



AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL

Ciência e
Tecnologia

Alysson Paolinelli
Durval Dourado Neto
Everardo Chartuni Mantovani
ORGANIZADORES



ESALQ

USP



ASSOCIAÇÃO
BRASILEIRA DE
IRRIGAÇÃO E
DRENAGEM

Agricultura Irrigada no Brasil: Ciência e Tecnologia

ISBN: 978-65-87391-23-6

DOI: 10.11606/9786587391236

**Alysson Paolinelli
Durval Dourado Neto
Everardo Chartuni Mantovani
(Organizadores)**

**Piracicaba, SP
2022**



Reitor - Prof. Dr. Carlos Gilberto Carlotti Junior

Vice-reitora - Profa. Dra. Maria Arminda do Nascimento Arruda



ESALQ

Diretor - Prof. Dr. Durval Dourado Neto

Vice-diretor - Prof. Dr. João Roberto Spotti Lopes

**Catálogo na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Agricultura irrigada no Brasil: ciência e tecnologia [recurso eletrônico] / organização de Alysson Paolinelli, Durval Dourado Neto e Everardo Chartuni Mantovani. - - Piracicaba : ESALQ; Viçosa : ABID, 2022

397 p. : il. (Cátedra Luiz de Queiroz)

ISBN: 978-65-87391-23-6

DOI: 10.11606/9786587391236

1. Agricultura irrigada - Brasil 2. Irrigação 3. Ciência 4. Tecnologia I. Paolinelli, A., org. Dourado Neto, D., org. III. Mantovani, E. C., org. IV. Título V. Série

CDD 631.7

Elaborada por Maria Angela de Toledo Leme - CRB-8/3359

Esta obra é de acesso aberto. É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte e a autoria e respeitando a Licença Creative Commons indicada





Cátedra Luiz de Queiroz
Conselho de Governança

Durval Dourado Neto

João Roberto Spotti Lopes

Luiz Gustavo Nussio

Nelson Sidnei Massola Junior

Ruy de Araújo Caldas



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
IRRIGAÇÃO E DRENAGEM

ABID 2021/2023

Presidente: Everardo Chartuni Mantovani (UFV)

Vice-presidente: Antonio Alfredo Teixeira Mendes (NDJ)

Diretores:

Durval Dourado Neto (Esalq/USP)

Sílvio Carlos Ribeiro Vieira Lima (Inovagri)

Denizart Pirotello Vidigal (Irrigazine-FIIB)

Ricardo Gava (UFMS)

Fernando Braz Tangerino Hernandez (Unesp)

Rodrigo Ribeiro Franco Vieira (Codevasf)

Lineu Neiva Rodrigues (Embrapa)

Catariny Cabral Aleman (UFV)

Maria Emília Borges Alves (Embrapa)

Flávio Gonçalves de Oliveira (UFMG)

Conselho Editorial

Fabiana Lumi Kikuchi Hamada
Marcela Almeida de Araujo
Naila de Freitas Takahashi
Veronica Marques Alves

Apoio Editorial

Leandro de Souza Almeida
Luciana Joia de Lima
Sandra de Marchi Vello

Capa

Hugo Arantes, Studio 1 Comunicação

Fotos da Capa

1. Freepik; 2. Valmont; 3. Freepik.
(da esquerda para direita)

Fotos da Contracapa

Gerhard Waller, Divisão de Comunicação da Esalq/USP
Quadros de autoria do professor Klaus Reichardt (Nikolaus)

Fotos dos Organizadores

Abramilho; Gerhard Waller/DvComun/Esalq/USP; Everardo Mantovani

CONSIDERAÇÕES SOBRE A OBRA "AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL" E O PROFESSOR ALYSSON PAOLINELLI, TERCEIRO TITULAR DA CÁTEDRA LUIZ DE QUEIROZ

A Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (Esalq), da Universidade de São Paulo (USP), anunciou em 10 de outubro de 2017 a instalação da Cátedra Luiz de Queiroz, que foi aprovada por sua Congregação em 14 de setembro de 2017, iniciativa apoiada, nessa ocasião, pelo Instituto de Estudos Avançados (IEA) da Universidade de São Paulo (USP). A indicação do Conselho de Governança da Cátedra do eminente **Ex-Ministro Alysson Paolinelli** para ser o **Terceiro Titular da Cátedra Luiz de Queiroz (Ciclo 2020/2022)**, foi aprovada em reunião da Congregação em 28 de maio de 2020, com posse em 3 de junho de 2020 para um ciclo anual, sendo reconduzido para novo ciclo, até 2 de junho de 2022 (Portaria Interna Reitoria 215, de 26/04/21).

O Conselho de Governança da Cátedra Luiz de Queiroz é composto pelos seguintes membros: Durval Dourado Neto (Docente do Departamento de Produção Vegetal e Diretor da Esalq/USP), João Roberto Spotti Lopes (Docente do Departamento de Entomologia e Acarologia e Vice-Diretor da Esalq/USP), Luiz Gustavo Nussio (Docente do Departamento de Zootecnia da Esalq/USP), Nelson Sidnei Massola Junior (Docente do Departamento de Fitopatologia e Nematologia da Esalq/USP) e Ruy de Araújo Caldas (Membro externo de notório saber).

A **Cátedra Luiz de Queiroz de Sistemas Agropecuários Integrados** é uma cadeira voltada para a discussão e realização de atividades abertas à participação de professores e estudantes de graduação e de pós-graduação da Instituição. Tem por finalidade promover reflexões e atividades interdisciplinares, em nível regional, nacional e internacional, sobre temas relativos ao desenvolvimento e sustentabilidade de Sistemas Agropecuários Integrados e suas aplicações com o ambiente e com a sociedade.

Alysson Paolinelli é Engenheiro Agrônomo formado em 1959 pela Universidade Federal de Lavras, Lavras (MG). Especializou-se nos estudos sobre o potencial da região do Cerrado para a produção agrícola. Em 1971, assumiu a Secretaria de Agricultura de Minas Gerais. Foi ministro da Agricultura no período de 1974 a 1979. Nesse período, Paolinelli modernizou a Embrapa e promoveu a ocupação econômica do Cerrado.

Em 2006, indicado por Norman Borlaug, foi agraciado com o prêmio *World Food Prize* (equivalente ao Prêmio Nobel da alimentação), por liderar a implantação da Agricultura Tropical no Cerrado Brasileiro. Em agosto de 2017, recebeu a Medalha Luiz de Queiroz, e, em 2021 e 2022, foi indicado para o Prêmio Nobel da Paz, pelo seu legado em transformar o Brasil em potência mundial do agronegócio e no papel do País em alimentar pessoas no mundo todo.

Foi Diretor-Geral da ESAL (atual, UFLA). É presidente executivo da Associação Brasileira dos Produtores de Milho (Abramilho), diretor da Verde AgriTech desde 2014 e presidente do Conselho Consultivo do Fórum do Futuro.

A principal temática desenvolvida na Cátedra Luiz de Queiroz (Ciclo 2020/2022) está voltada para projetos e propostas de políticas e ações públicas e privadas que organizem a atividade rural nacional de forma sustentável na Agricultura Irrigada, por meio de Sistemas Agropecuários Integrados no Brasil e tendo em vista sua inserção no agronegócio.

Quanto às Políticas Públicas na Agricultura Irrigada, o principal projeto a ser desenvolvido: Biomass Tropicais: [i] Caracterização da disponibilidade hídrica no Brasil, e [ii] desenvolvimento da Agricultura Irrigada no Brasil.

Quanto à Liderança Internacional (A5 - *Agricultural Academic Alliance*), a Cátedra visa colaborar com a consolidação da Aliança entre a Universidade de São Paulo (USP), por intermédio da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (Esalq), *Wageningen University and Research (WUR)*, *University of California-Davis (UCDavis)*, *China Agricultural University (CAU)*, e *Cornell University* (melhores universidades de Ciências Agrárias do Mundo no ranking da editora *U.S. News and World Report 2016*), que tem por objetivo viabilizar a realização de programas acadêmicos internacionais de longa duração para atender as demandas do mundo nas áreas de Agricultura, Pecuária, Meio Ambiente e Segurança Alimentar.

Ao final do primeiro ciclo como Terceiro Catedrático, aos 121 anos do Aniversário da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, **Alysson Paolinelli** apresenta esta obra que agrega as principais lideranças da área de Agricultura Irrigada no Brasil.

Prof. Dr. Carlos Gilberto Carlotti Junior

Reitor da Universidade de São Paulo

3 de junho de 2022

ALYSSON PAOLINELLI: VIDA E OBRA E O SEU O LEGADO PARA PAZ

O Ex-Ministro Alysson Paolinelli teve atuação de grande destaque em toda sua trajetória acadêmica e profissional.

Primeiro colocado no vestibular do Curso de Agronomia da Escola Superior de Agricultura de Lavras (ESAL), foi o presidente do Centro Acadêmico daquela instituição, onde se graduou Engenheiro Agrônomo em 1959, como primeiro colocado e orador da Turma de Formandos. Foi Diretor da ESAL (hoje Universidade Federal de Lavras - UFLA) entre 1967 e 1971, onde lecionou Hidráulica, Irrigação e Drenagem por 11 anos.

Nesse período, aprendeu os fundamentos básicos da Academia: a essência do conhecimento científico é a sua aplicação prática, como preconizava Confúcio, com o intuito maior de transformar conhecimento em riqueza para melhoria da vida de todos, especialmente os menos favorecidos. Desde o início foi um líder independente que sempre cultivou a PAZ e norteou suas ações com base na CIÊNCIA.

Especializou-se nos estudos sobre o potencial da região do Cerrado para a produção agrícola e teve brilhante atuação na direção de órgãos públicos, criando e implantando programas e instituições de grande importância na agricultura.

Foi Secretário de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais de 1971 a 1974, quando criou o Programa Integrado de Pesquisas Agropecuárias de Minas Gerais (hoje Epamig).

De 1991 a 1998, novamente Secretário, criou e implantou o Instituto Mineiro Agropecuário (IMA), que coordena programas de defesa sanitária animal e vegetal, e de qualidade e certificação de produtos agropecuários.

Foi Ministro da Agricultura de 1974 a 1979. Nesse período, Paolinelli impulsionou a expansão da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), criou e implantou a Embrater (Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural), e promoveu a ocupação econômica do Cerrado através do PRODECER, programa conjunto entre o Brasil e o Japão.

Posteriormente, atuou como presidente de várias instituições públicas e privadas, destacando-se o Banco do Estado de Minas Gerais (1979-1982), a Associação Brasileira de Bancos Comerciais Estaduais (Asbace) (1980-1982), a Fiat Allis Latino Americana (1982-1996 e 1998-2001), a Confederação Nacional de Agricultura do Brasil (CNA) (1988-1990), o Fórum Nacional de Agricultura (1992-1993) e a Associação Brasileira dos Produtores de Milho (Abramilho) (2010-2015). Sempre apoiou o associativismo e o cooperativismo como formas de organização dos produtores rurais.

Atualmente, é presidente do Instituto Fórum do Futuro, que promove o desenvolvimento de uma agricultura tropical sustentável.

Ao longo de sua brilhante carreira recebeu diversos prêmios, condecorações e títulos honoríficos. Em âmbito nacional, destacam-se o Prêmio Frederico de Menezes Veiga (Embrapa, 1981), Professor Emérito (Universidade Federal de Lavras, 2006), Personalidade do Agronegócio (Associação Brasileira de Agronegócio, 2006), Ordem Nacional do Mérito Científico (Classe Grã-Cruz, 2008), Medalha dos 150 anos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa, 2010) e Medalha Luiz de Queiroz (Esalq/USP, 2017). Também obteve amplo reconhecimento internacional.

O notável Alysson Paolinelli é praticante da agricultura mais moderna, a de baixo carbono, tendo obtido o reconhecimento por lideranças de todas as tendências ideológicas. São várias as homenagens a ele feitas por membros dos mais diversos partidos no âmbito do Parlamento brasileiro, bem como - e principalmente - de inúmeras instituições acadêmicas. Isso acontece não só por Paolinelli ter sido um técnico que valorizou a agricultura brasileira, mas por ter colocado em prática políticas que instrumentalizaram sustentavelmente o combate à fome no Brasil e no mundo.

Sua atuação política no debate Constituinte redundou na Constituição Federal de 1988, primando, sempre, por liberdade e igualdade a todos os brasileiros.

Alysson Paolinelli, por meio de emendas ao anteprojeto da Constituição no âmbito da Subcomissão da Política Agrícola e Fundiária e da Reforma Agrária da Assembleia Nacional Constituinte, propôs que a ordem econômica e social tivesse que propiciar o desenvolvimento nacional e a justiça social com base nos princípios da liberdade de iniciativa; da propriedade privada dos meios de produção; da valorização do trabalho; da função social da propriedade e da igualdade de oportunidades.

Segundo Paolinelli, a função social da propriedade é cumprida quando propicia o bem-estar de todos que dela dependem; mantém níveis satisfatórios de utilização e eficiência; e assegura a conservação dos recursos naturais e justas relações de trabalho.

Suas ideias e propostas, que podem ser revisitadas nos arquivos da Assembleia Nacional Constituinte, contribuíram sobremaneira para o perfil final da Carta Magna cidadã de 1988, equacionando o embate que existe entre igualdade e liberdade. O Estado tem de intervir para produzir condições de igualdade; para regular as oportunidades; para torná-las acessíveis a todos os seres humanos, independentemente de sua cor, origem, gênero ou condição social. Sem descurar, por outro lado, da liberdade, da ideia de Estado que prima pelas liberdades individuais.

Quando Ministro da Agricultura entre 15 de março de 1974 a 15 de março de 1979, consolidou a Embrapa como empresa de pesquisa e promoveu o desenvolvimento rural brasileiro com base na ciência, tecnologia e inovação, bem antes de que a Constituição de 1988 estabelecesse que ao Estado cabe promover e incentivar o desenvolvimento científico, a pesquisa, e a capacitação, tendo em vista o bem público e o progresso da nação.

Sob a inspiração de Paolinelli, as instituições de Pesquisa, como universidades, empresas estaduais e a Embrapa, desenvolveram sistemas de produção específicos ao ambiente de produção tropical, viabilizando a exploração racional do Cerrado, otimizando a utilização dos recursos naturais, insumos agrícolas, mão-de-obra, terra e capital, o que resultou na expansão da produção sustentável de alimentos para parcela significativa da população mundial.

Não seria possível o desenvolvimento da agricultura e pecuária na savana brasileira sem as iniciativas do Ministro Alysson Paolinelli.

Não foi por acaso, portanto, o reconhecimento dado a ele, diante da grandeza de seus projetos e ações: foi agraciado, em 2006, com o prêmio *World Food Prize*, o equivalente ao Nobel da alimentação, por liderar a implantação da Agricultura Tropical Sustentável no Cerrado Brasileiro. Esse prêmio é dado a pessoas, independente de raça e gênero, que ajudaram consideravelmente a população a melhorar a qualidade, quantidade ou disponibilidade de alimentos no mundo.

Em 2019 foi nomeado Embaixador da Boa Vontade do Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA).

Em 2020, Alysson Paolinelli se tornou o Terceiro Titular da **Cátedra Luiz de Queiroz de Sistemas Agropecuários Integrados** (Ciclo 2020/2022), uma cadeira voltada para a

discussão e realização de atividades abertas à participação de professores e estudantes de graduação e de pós-graduação da USP, coordenada por uma personalidade de notório saber. Tem por finalidade promover reflexões e atividades interdisciplinares, em nível regional, nacional e internacional, sobre temas relativos ao desenvolvimento e sustentabilidade de Sistemas Agropecuários Integrados e suas aplicações com o meio ambiente e com a sociedade

Em 2021 e 2022, ALYSSON PAOLINELLI foi indicado pela Universidade de São Paulo, por intermédio da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", para o Prêmio Nobel da Paz, pelo seu legado para promoção da PAZ através da oferta de alimentos em nível global: não haverá PAZ enquanto houver FOME.

Transformou o Brasil, da condição de importador de alimentos em 1970, em potência mundial do agronegócio que viabilizou o Brasil alimentar mais de 10% da população mundial e de liderar como Terceiro Catedrático da Esalq/USP o Projeto Biomas, que procura estruturar um planejamento estratégico para prover a produção de alimentos para mais 1 bilhão e cento e vinte milhões de pessoas em 2050, sempre tendo como alicerce de seus programas a ciência, a tecnologia, a sustentabilidade e a inovação.

Alysson Paolinelli é, enfim, um líder brasileiro provedor da PAZ em nível MUNDIAL, tanto no PASSADO com o desenvolvimento da Agricultura Sustentável no Cerrado preservando a Amazônia, como no PRESENTE e no FUTURO liderando o Projeto Biomas na Academia como Terceiro Titular da Cátedra Luiz de Queiroz.

Roberto Rodrigues
Durval Dourado Neto

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE ESTE LIVRO

A coleção de cinco livros da **OBRA** intitulada **AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL** é a Edição Revisada e Atualizada dos livros “Diferentes abordagens sobre Agricultura Irrigada no Brasil: História, Política Pública, Economia e Recurso Hídrico”, e “Diferentes abordagens sobre Agricultura Irrigada no Brasil: Técnica e Cultura”, cujos títulos são:

- Agricultura Irrigada no Brasil: história e economia
- Agricultura Irrigada no Brasil: políticas públicas
- Agricultura Irrigada no Brasil: recursos hídricos e sustentabilidade
- Agricultura Irrigada no Brasil: ciência e tecnologia
- Agricultura Irrigada no Brasil: inovação, empreendedorismo e sistemas de produção

Este **LIVRO** intitulado **Agricultura Irrigada no Brasil: ciência e tecnologia** foi organizado em 20 CAPÍTULOS de 397 páginas (além de outras 34 páginas na parte pré-textual), contemplando 42 AUTORES de diferentes instituições públicas e privadas, assim discriminados:

CAPÍTULO 1. **A revolução azul no contexto da agricultura irrigada** por *Rubens Duarte Coelho*

CAPÍTULO 2. **Pivô central: história, mercado, tecnologia e futuro** por *Renato Silva*

CAPÍTULO 3. **Irrigação por gotejamento: histórico e evolução tecnológica** por *Marcus Henrique Tessler*

CAPÍTULO 4. **O manejo da irrigação e o futuro da agricultura irrigada** por *Daniel Fonseca de Carvalho e Luiz Fernando Coutinho de Oliveira*

CAPÍTULO 5. **A evolução da irrigação mecanizada moldando os rumos da tecnologia de aplicação** por *Gustavo Fanelli Hossri*

CAPÍTULO 6. **Projeto e execução de sistemas de drenagem agrícola** por *Jarbas Honorio de Miranda, Laura Elizabeth Christianson e Luciano Alves de Oliveira*

CAPÍTULO 7. **Irrigação e fertirrigação em ambiente protegido** por *Sergio Nascimento Duarte*

CAPÍTULO 8. **Subsídios para o dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional** por *João Carlos Cury Saad*

CAPÍTULO 9. **Irrigação com déficit** por *Luís Henrique Bassoi*

CAPÍTULO 10. **Irrigação de baixo custo por sulcos** por *Edmar José Scaloppi*

CAPÍTULO 11. **Variabilidade e mudanças climáticas no contexto da agricultura irrigada** por *Paulo Cesar Sentelhas*

CAPÍTULO 12. **Manejo da irrigação no Brasil: aplicações, desafios e tendências para o futuro** por *Mirta Teresinha Petry, Reimar Carlesso e Juliano Dalcin Martins*

CAPÍTULO 13. **Tecnologias digitais para monitoramento da irrigação** por *Catariny Cabral Aleman, Fernando França da Cunha, Rubens Alves de Oliveira e Roberto Filgueiras*

CAPÍTULO 14. **Os transientes hidráulicos e a agricultura irrigada** por *Rodrigo Ribeiro Franco Vieira*

CAPÍTULO 15. **Produtividade da água na agricultura irrigada** por *José Antônio Frizzone e Verônica Gaspar Martins Leite de Melo*

CAPÍTULO 16. **Eficiência de uso da água na agricultura irrigada** por *Salassier Bernardo, Elias Fernandes de Sousa e Everardo Chartuni Mantovani*

CAPÍTULO 17. **Índice de desenvolvimento rural sustentável** por *Durval Dourado Neto, Allan Delfino, Pedro Alves Quilici Coutinho, Rodnei Rizzo, Marcela Almeida de Araujo, Alberto Giaroli de Oliveira Pereira Barretto, Pedro Abel Vieira Júnior, Roberto Rodrigues e Alysson Paolinelli*

CAPÍTULO 18. **Fertirrigação: aspectos relevantes e viabilidade técnica x financeira** por *Luiz Fabiano Palaretti e Alexandre Barcellos Dalri*

CAPÍTULO 19. **Utilização da energia fotovoltaica para irrigação: passado, presente e futuro** por *Flávio Gonçalves Oliveira, Everardo Chartuni Mantovani e Marcelo Carazo Castro*

CAPÍTULO 20. **Qualidade da água para irrigação localizada** por *Gustavo Haddad Souza Vieira e José Geraldo Ferreira da Silva*

Esta coleção de livros é parte de uma importante estratégia da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (Esalq/USP) que integra anualmente ao seu corpo técnico científico uma personalidade com especiais serviços prestados ao Brasil como Titular da Cátedra Luiz de Queiroz. No Ciclo 2020/2022, o Ex-Ministro Alysson Paolinelli é o Terceiro Titular da Cátedra Luiz de Queiroz de Sistemas Agropecuários Integrados.

A importância do trabalho do Ex-Ministro Alysson Paolinelli para agricultura irrigada brasileira é inquestionável, inicialmente como professor da área na antiga Escola Superior de Agricultura de Lavras (Esal), hoje Universidade Federal de Lavras (Ufla), e posteriormente como Secretário de Agricultura do Estado de Minas Gerais, Ministro da Agricultura, inúmeros outros cargos na iniciativa pública e privada e uma incansável participação em eventos técnicos. Neste sentido, foi proposta a elaboração desta obra como uma das atividades do Ex-Ministro Alysson Paolinelli.

A agricultura irrigada é uma das principais estratégias brasileiras para garantir o aumento da produção de alimentos com **sustentabilidade**: (i) **social** com a geração de inúmeros empregos diretos e indiretos, (ii) **ambiental** com a área adicional irrigável de cerca de 15 Mha, no período de 30 anos, não necessitar o desmatamento de novas áreas (“desmatamento zero”), e (iii) **econômica** devido ao aumento da produção e, conseqüentemente, da renda no campo, na agroindústria e na área de serviços. O mundo demanda, segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), que o Brasil produza alimento para cerca de 2,7 bilhões de pessoas (de um total 9,8 bilhões de pessoas – população mundial) em 2050, sabendo que atualmente produz para cerca de 1,5 bilhões (de um total 7 bilhões de pessoas – população mundial).

As publicações técnicas são muito importantes para o desenvolvimento da agricultura irrigada porque subsidiam e norteiam ações da iniciativa pública e privada, pelo fato dos profissionais desses setores apresentarem soluções eminentemente técnicas, com base científica, e que representam os atuais valores da sociedade, visando transformar conhecimento em riqueza em benefício de todos os segmentos da sociedade. Para representar a visão da SOCIEDADE BRASILEIRA, foram convidados os profissionais que apresentaram contribuições nos diferentes capítulos desta OBRA.

Esta obra foi lançada nas comemorações do aniversário (3 de junho de 2022) de 121 de anos da Esalq/USP, motivo pelo qual a contracapa deste livro foi contemplada com as fotos (fotógrafo Gerhard Waller, DvComun/Esalq/USP) dos quadros de autoria do talentoso pintor

Nikolaus (pseudônimo do Professor Dr. Klaus Reichardt): o **'retrato de dentro para fora'** do Portal Monumental da Esalq/USP retrata como a Esalq/USP se relaciona com sociedade e o **'retrato de fora para dentro'** do Portal Monumental da Esalq/USP retrata a visão da sociedade concernente à Esalq/USP. O Portal Monumental da Esalq/USP foi revitalizado após mais de 60 anos de inatividade e reinaugurado no dia 3 de junho de 2021 juntamente com a publicação da primeira edição desta obra.

Assim, os organizadores agradecem de forma muito especial às contribuições dos autores, que não mediram esforços para escrever um pouco da experiência de cada um, para esta importante obra da área de agricultura irrigada.

Durval Dourado Neto
Everardo Chartuni Mantovani

OS AUTORES

1. Alberto Giaroli de Oliveira Pereira Barretto. Engenheiro Agrônomo e Doutor em Ciências (USP), Pós-doutor (CNPq). Atua nas áreas de planejamento do uso da terra e modelagem espacial com ênfase em produção agropecuária, desenvolvimento rural e meio ambiente. No Grupo de Políticas Públicas da Esalq/USP (GPP) coordena a concepção de soluções em políticas públicas através de análise de dados e geotecnologias.

2. Allan Delfino. Advogado, Pós Graduado em Direito Tributário pelo IBET (Instituto Brasileiro de Estudos Tributários), com especialização em Agronegócio MBA-Gestão em Agronegócio pela Esalq/USP, Extensão em Direito do Agronegócio pelo INSPER e Mestre em Agronegócio pela FGV, atua como advogado militante na defesa do produtor rural desde 2004, foi Presidente da Comissão de Direito do Agronegócio de Sorocaba pela OAB 2017-2018, é produtor rural e trabalhou como consultor para várias empresas do setor de fertilizantes.

3. Alexandre Barcellos Dalri. Engenheiro Agrícola pela Ufla, com mestrado e doutorado em Irrigação e Drenagem pela Unesp/FCA. Atualmente é Professor da Unesp/FCAV, Jaboticabal. Tem experiência na área de Engenharia Agrícola, com ênfase em Irrigação e Drenagem, atuando principalmente nos seguintes temas: agricultura irrigada, hidrologia e agricultura digital. Professor e Orientador no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (Unesp/Botucatu) e Ciência do Solo (Unesp/Jaboticabal).

4. Alysson Paolinelli. Engenheiro Agrônomo (ESAL, 1959). Foi Ministro da Agricultura (1974-1979). Prêmio *World Food Prize* (2006). Indicado ao Prêmio Nobel da Paz (2021 e 2022). Terceiro Titular da Cátedra Luiz de Queiroz (Esalq/USP, 2020-2022).

5. Catariny Cabral Aleman. Engenheira Agrônoma pela Universidade do Oeste Paulista (Unoeste, 2009), Mestre em Agronomia com área de concentração em Produção Vegetal (Unoeste, 2011) e Doutora em Ciência com área de concentração Engenharia de Sistemas Agrícolas (Esalq/USP, 2015). Atualmente é Professora Adjunto I da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, com experiência em Engenharia Agrícola, atuando nas áreas de Irrigação, Hidráulica, Manejo de Irrigação, Irrigação de Precisão e Viabilidade Econômica do Uso da Irrigação. Chefe do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV.

6. Daniel Fonseca de Carvalho. Professor Titular do Departamento de Engenharia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Engenheiro Agrícola, Mestre (1993) e Doutor (1998) em Engenharia Agrícola (Irrigação e Drenagem) pela Universidade Federal de Viçosa. É bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq (nível 1D) (2019-2023) e bolsista da FAPERJ no programa Cientista do Nosso Estado (2018-2021).

7. Durval Dourado Neto. Engenheiro Agrônomo (1984) pela UFV, Mestre (Irrigação e Drenagem, 1989) e Doutor (Solos e Nutrição de Plantas, 1992) pela Esalq/USP e Pós-Doutor em física do solo e modelagem em agricultura pela Universidade da Califórnia (1993-1995). Professor Titular e Diretor da Esalq/USP. Coordenador do Grupo de Políticas Públicas (GPP/Esalq/USP) para o desenvolvimento de inteligência estratégica e espacial no apoio à decisão da interface agricultura e meio ambiente. Atua em modelagem de sistemas agrícolas.

8. Edmar José Scaloppi. Engenheiro Agrônomo, Professor Titular de Irrigação e Drenagem da FCA/Unesp, Botucatu, Mestre em Solos e Nutrição de Plantas pela Esalq/USP, Doutor em Ciências pela Unesp, Ph.D. em Engenharia de Irrigação pela Utah State University, Pós-Doutorado na Utah State University e University of California, Davis, EUA, Consultor técnico-científico do Centro Nacional de Engenharia Agrícola, presidente da Comissão de Estudos de Irrigação e Drenagem da ABNT, membro de Comitê Assessor do CNPq.

9. Elias Fernandes de Sousa. Engenheiro Agrícola (1989) e Mestre (1993) em Engenharia Agrícola pela UFV, e Doutor (1997) em Produção Vegetal pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (Uenf) e Pós-doutoramento na Universidade da Califórnia, Davis, CA (2016). É professor titular da Uenf. Atua na área de Engenharia Agrícola, com ênfase em Irrigação e Drenagem, nos temas: irrigação, manejo de irrigação, agricultura irrigada.

10. Everardo Chartuni Mantovani. Engenheiro Agrícola (1981) e Mestre (Engenharia Agrícola, 1986) pela UFV e Doutor (Agronomia – Manejo da Irrigação, 1993) pela Universidade de Córdoba Espanha. Professor (desde 1983) Titular Sênior do DEA-UFV. Coordenou por 20 anos o GESAI (Grupo de Estudos e Soluções para Agricultura Irrigada) - DEA/UFV. Em 2008 criou a empresa Irriplus Tecnologia e Treinamento Ltda na Incubadora de Empresas Tecnológicas da UFV e é o idealizador e criador da empresa IRRIGER, hoje empresa do grupo Valmont. Atual presidente da Abid – Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem.

11. Fernando França da Cunha. Engenheiro Agrônomo (2003), Mestre (2005) e Doutor (2009) em Engenharia Agrícola pela UFV. Atualmente é Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa atuando em disciplinas de graduação e pós-graduação. É membro efetivo do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) onde orienta estudantes de mestrado e doutorado. É bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq - Nível 2 e suas pesquisas são relacionadas à manejo e engenharia de irrigação.

12. Flávio Gonçalves Oliveira. Engenheiro Agrícola com Mestrado e Doutorado em Engenharia Agrícola na área de Irrigação e Drenagem pela UFV. Professor de Irrigação e Drenagem do Instituto de Ciências Agrárias da UFMG. Atuação na área de projetos de Irrigação, gerenciamento de Irrigação, hidrologia e análise de rentabilidade na agricultura Irrigada. Mais de 45 artigos publicados em revistas e capítulos de livros, mais de 500 projetos de Irrigação efetuados e 185 alunos orientados na área de Irrigação.

13. Gustavo Fanelli Hossri. Engenheiro Agrônomo pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq/USP), premiado com honra “Alexandre von Pritzelwitz”. Atua no segmento de irrigação há 10 anos, com especialidade na área de tecnologia de aplicação de água. Responsável por iniciar e desenvolver o mercado da multinacional austríaca Komet Irrigation no Brasil, gerenciando atualmente o mercado da América do Sul.

14. Gustavo Haddad Souza Vieira. Engenheiro Agrônomo (1999) e Doutor em Engenharia Agrícola pela UFV (2012), Pós-doutoramento pela Universidade da Florida, Fort Pierce, FL (2019-2020). Professor Titular do Ifes campus Santa Teresa-ES. É bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq (PQ-2A) (2022-2025) e atua nas áreas de irrigação, manejo, qualidade da água e desenvolvimento tecnológico. É líder do Grupo de Pesquisa em Irrigação do Ifes (IRRIFES), onde coordena projetos voltados ao desenvolvimento de soluções para a agricultura irrigada.

15. Jarbas Honorio de Miranda. Engenheiro Agrônomo pela EA/UFG. Professor Associado 2 do Departamento de Engenharia de Biosistemas ESALQ/USP. Possui Especialização em Irrigação e Drenagem pelo Acordo de Cooperação Técnica Brasil-Espanha (PRONI/UFG/FUNAPE). Mestre e Doutor em Irrigação e Drenagem pela ESALQ/USP e Pós-Doutorado em Irrigação e Drenagem, junto ao Department of Agricultural and Biological Engineering (ABE), University of Illinois at Urbana-Champaign (EUA). Desde 2012 é Membro da American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE-EUA) e Membro do ASABE Committee SW-23 Drainage (EUA).

16. João Carlos Cury Saad. Engenheiro Agrônomo pela FCA - Campus de Botucatu - Unesp (1986), Mestre (1990) e Doutor (1993), em Irrigação e Drenagem, pela Esalq/USP. Realizou Pós-doutorado na Universidade da Califórnia, Davis, de 1999 a 2001. Obteve o título de livre-docente pela Unesp, em 2002. Professor Titular em 2017. Foi Coordenador do Programa de

Pós-Graduação em Agronomia - Irrigação e Drenagem e Diretor da FCA - Campus de Botucatu - Unesp.

17. José Antônio Frizzone. Engenheiro Agrônomo (1977) e Mestre em Engenharia Agrícola (1979), pela UFV, Doutor em Agronomia (1986) pela Esalq/USP. Atua como professor Universitário desde 1978. Atualmente é Professor Titular aposentado pela Esalq/USP onde desenvolve atividades de ensino e pesquisa como Professor Sênior no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas. Durante sua carreira universitária publicou 270 artigos científicos e orientou 110 alunos de pós-graduação.

18. José Geraldo Ferreira da Silva. Engenheiro Agrícola (1981). Doutor em Engenharia Agrícola pela UFV (1999). Pesquisador aposentado do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER). Professor do Mestrado Profissional do Centro Universitário Vale do Cricaré (UNIVC). Atuação nas áreas de manejo de irrigação, relações solo-água-plantas, climatologia, agrometeorologia e educação ambiental.

19. Juliano Dalcin Martins. Engenheiro Agrônomo. Mestre. Doutor. Professor do Departamento de Engenharia Rural da UFSM. Doutor em Engenharia Agrícola pela UFSM e Instituto Superior de Agronomia - Universidade de Lisboa. Sua linha de pesquisa está relacionada Manejo da Água em Sistemas Agrícolas, trabalhando com modelação do balanço hídrico do solo e tecnologias visando melhorar a gestão da água em sistemas agrícolas.

20. Laura Elizabeth Christianson. Ph.D., Professora Afiliada, Department of Crop Sciences, University of Illinois at Urbana-Champaign, Engenheira profissional licenciada no Estado de Illinois. Com formação em engenharia agrícola, trabalhou anteriormente no projeto de biorreatores de marvalhas de madeira para remoção de nitrato de fontes pontuais e difusas. Como engenheira de pesquisa, estudou opções para melhorar a qualidade da água de drenagem de valas no Meio-Atlântico.

21. Luciano Alves de Oliveira. Engenheiro Agrônomo (Esalq/USP), Mestre e Doutor em Ciências em Engenharia de Sistemas Agrícolas (Esalq/USP). Atualmente trabalhando como Pesquisador Associado de Pós-doutorado, junto ao Department of Crop Sciences, University of Illinois em Urbana-Champaign. Membro do Programa de Pesquisa e Extensão de Drenagem de Illinois (I-DROP) desde 2020.

22. Luís Henrique Basso. Engenheiro Agrônomo (Esalq/USP), Mestre em Agronomia / Irrigação e Drenagem (FCA/Unesp), Doutor em Ciências (Cena/USP), Pós-doutorado (UC Davis, USA). Pesquisador da Embrapa Semiárido, em Petrolina-PE (1994 a 2015) e da Embrapa Instrumentação, em São Carlos-SP (desde 2015). Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da FCA/Unesp Botucatu.

23. Luiz Fabiano Palaretti. Engenheiro Agrônomo, Mestre e Doutor pela Universidade Federal de Viçosa. Pós Doutor em Irrigação pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". É Professor do Departamento de Engenharia de Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista (Unesp), campus Jaboticabal. Atua nas áreas de Recursos Hídricos, hidráulica agrícola e fertirrigação. Nessas áreas, tem orientado estudantes de ensino técnico, graduação e Pós-Graduação. Possui parcerias com empresas públicas e privadas para desenvolvimento da agricultura irrigada.

24. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira. Professor Titular do Departamento de Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Lavras. Engenheiro Agrícola com Mestrado em Engenharia Agrícola (Irrigação e Drenagem) pela Escola Superior de Agricultura de Lavras e Doutor em Engenharia Agrícola (Irrigação e Drenagem) pela Universidade Federal de Viçosa.

25. Marcela Almeida de Araujo. Economista, Mestre em Agronomia e Doutoranda em Economia Aplicada (Esalq/USP). Atua em projetos ligados a análise de políticas públicas e

desenvolvimento rural sustentável. Tem experiência com gestão de projetos, levantamento de dados primários, sistema de informações espaciais, modelagem econômica e de sistemas agrícolas.

26. Marcelo Carazo Castro. Engenheiro Agrícola e Agrimensor (UFV), Mestre em Engenharia Agrícola (UFLA) e doutorando em Engenharia Agrícola (UFV) na área de recursos hídricos. Atuou como projetista de sistemas de irrigação no oeste paulista e como docente-pesquisador no ITAC/EPAMIG. É professor de Engenharia Rural do Instituto Federal do Rio de Janeiro (IFRJ), campus Pinheiral, desde 2010.

27. Marcus Henrique Tessler. Doutor em Agricultura e Biosistemas pelo Departamento de Engenharia da Universidade do Arizona (1994). Diretor do departamento de Invernaderos estufas (Netafim, México, 2007-2012). Diretor de Desenvolvimento de Negócios (Netafim, Brasil, 2012-2018). Desde 2018 é o CEO da Netafim Argentina.

28. Mirta Teresinha Petry. Engenheira Agrônoma, Doutora, Professora Associada do Departamento de Engenharia Rural e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFSM. Obteve o título de doutora em Ciência do Solo na UFSM em 2004. É líder do grupo de pesquisa Manejo da Água em Sistemas Agrícolas, trabalhando com modelação do balanço hídrico do solo e tecnologias visando melhorar a gestão da água em sistemas agrícolas.

29. Paulo Cesar Sentelhas. Engenheiro Agrônomo, Mestre em Agrometeorologia, Doutor em Irrigação e Drenagem, pela Esalq/USP, Pós-doutorado em Agrometeorologia pela Universidade de Guelph, Canadá. Foi pesquisador do IPMet/Unesp, do IAC e da Weather Innovations. Desde 1996 é professor da Esalq/USP, sendo Professor Titular da área de Agrometeorologia. É pesquisador de produtividade do CNPq, nível 1A, e Editor-Chefe da revista Scientia Agrícola, da Esalq/USP.

30. Pedro Abel Vieira Júnior. Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) desde 1989 com experiência na área de agronomia (sementes e mudas, modelagem agrícola com ênfase na previsão do clima e negócios tecnológicos). Após 2002, ainda na Embrapa, desenvolve trabalhos em socioeconômica com ênfase em gestão integrada do risco agrícola, bioenergia, desenvolvimento regional, comércio agrícola internacional e cenário para agricultura.

31. Pedro Alves Quilici Coutinho. Engenheiro Agrônomo pela (Esalq/USP). Atua em projetos referentes ao desenvolvimento de políticas públicas voltadas ao meio rural. Possui experiência em geoprocessamento, modelagem espacial e análises estatística de dados.

32. Reimar Carlesso. Engenheiro Agrônomo, Ph.D. na Michigan State University (EUA). Professor convidado do Departamento de Engenharia Rural da UFSM, CEO da Irriga Global, empresa de manejo e monitoramento da irrigação que utiliza tecnologia desenvolvida na UFSM, com atuação em 20 países, nos seguintes continentes: África, América Latina, Ásia e Europa.

33. Renato Silva. Profissional com 20 anos de experiência no Agronegócio Brasileiro, com uma carreira sólida criada na área comercial e desenvolvimento de rede desenvolvida em grandes grupos como Case New Holland, Valmont e Pampa Capital, assim como com experiência em *turn around* e fusões e aquisições. Atualmente é presidente da Valmont Brasil, da Câmara Setorial de Equipamentos e Irrigação (CSEI) da Abimaq e membro do Conselho do Agronegócio da Fiesp. Além disso, é o atual Presidente do Conselho de Administração da Solbras, Empresa recém adquirida pela Valmont.

34. Roberto Filgueiras. Engenheiro Agrícola e Ambiental formado pela Universidade Federal de Minas Gerais UFMG (2013), Mestre em Agronomia (irrigação e drenagem) na linha de geoprocessamento, pela Universidade Estadual Paulista Unesp (2016). Doutor em Engenharia Agrícola, com foco em manejo da agricultura irrigada via sensoriamento remoto, pela

Universidade Federal de Viçosa UFV. Possui experiência na área de recursos hídricos, agrometeorologia, agricultura de precisão, irrigação de precisão, sensoriamento remoto, sistema de informação geográfica, geoestatística e machine learning.

35. Roberto Rodrigues. Engenheiro Agrônomo pela Esalq/USP (1965), Agricultor, Doutor Honoris Causa pela Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho - Unesp/Campus de Jaboticabal (1998). Ministro da Agricultura de 2003 a 2006. Coordenador do Centro de Agronegócio da Fundação Getúlio Vargas - FGVAGRO/EESP (desde 2006) e Embaixador Especial da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura - FAO (desde 06/2012) para as Cooperativas.

36. Rodnei Rizzo. Engenheiro Agrônomo, Mestre (Solos e Nutrição de Plantas) e Doutor (Ecologia Aplicada) pela USP, Pós-doutorando pela Esalq/USP. No setor privado, atuou como Analista de Geoprocessamento Sênior, desenvolvendo projetos de prospecção de terras para implantação de culturas bioenergéticas.

37. Rodrigo Ribeiro Franco Vieira. Engenheiro Agrônomo formado em 1987 na EAUFBA, em Cruz das Almas, Bahia, especialista em irrigação pelo PROINE (1989). Sempre atuante na área da agricultura irrigada, nos setores público (Codevasf) e privado, como projetista hidráulico, autor de diversos estudos de eficiência energética e uso da água. Consultor, autor do livro "Manual de Válvulas Hidráulicas", único em português. Atualmente buscando implantar a cultura da análise correta dos transientes hidráulicos na agricultura irrigada.

38. Rubens Alves de Oliveira. Engenheiro Agrícola (1984) e Engenheiro Agrônomo (1986), Mestre (1991) e Doutor (1996) em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Professor Titular, foi coordenador do curso de Engenharia Agrícola e Ambiental (2002 a 2004) e Chefe do Departamento de Engenharia Agrícola (2011 a 2013). Diretor do Centro de Ciências Agrárias, Gestão (2013 a 2017) e (2017 a 2021), preside a Câmara de Ensino e o Conselho Departamental desse Centro. Membro do Conselho Universitário (CONSU) e do Conselho de Ensino, Pesquisa e Extensão (CEPE) da Universidade Federal de Viçosa.

39. Rubens Duarte Coelho. Professor Titular da Esalq/USP - Departamento de Engenharia de Biosistemas. Engenheiro Agrônomo pela USP (1986), Mestre em Irrigação e Drenagem pela USP (1990), Doutor em Engenharia Hidráulica USP/ University of Nebraska USA (1996), ministrando 2 disciplinas de graduação e 4 disciplinas de pós-graduação. Membro das Sociedades Brasileira e Americana de Engenharia Agrícola (SBEA / ASABE). Total de 89 orientações já concluídas, sendo 29 Doutorados, 25 Mestrados, 3 Pós-Doutorados e 32 Iniciações científicas (IC). Presidente da Comissão de Convênios da Esalq e Bolsista Produtividade Pesquisa do CNPq.

40. Salassier Bernardo. Engenheiro Agrônomo (1967) pela UFRRJ, mestre em Irrigação (1969) pela University of California, Davis, USA, Ph.D. em Irrigação (1975) pela Utah State University, Logan, USA e pós-doutor (1987) pelo Institute of Irrigation Studies, da University of Southampton, UK. Ex-professor titular da UFV, onde foi chefe do DEA, presidente do Conselho de Pós-Graduação e coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. É ex-bolsista do CNPq (1A) e autor do livro Manual de Irrigação. Ex-professor titular da Universidade Estadual do Norte Fluminense, onde foi também coordenador do Curso de Pós-Graduação em Produção Vegetal e reitor de 1999 a 2003.

41. Sergio Nascimento Duarte. Professor de Hidráulica, Hidrologia e Drenagem Agrícola no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Esalq/USP. Mestre em Irrigação e Drenagem pela Esalq/USP e Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Tem trabalhado com fertirrigação e salinização em ambientes protegidos, drenagem agrícola e Hidrologia de pequenas bacias hidrográficas. É bolsista de produtividade do CNPq.

42. Verônica Gaspar Martins Leite de Melo. Engenheira Agrônoma, Mestre (2019) e Doutoranda em Engenharia de Sistemas agrícolas pela Esalq/USP.

ORGANIZAÇÃO



ESALQ

USP



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
IRRIGAÇÃO E DRENAGEM

Apoio



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES

MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO
REGIONAL

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



PREFÁCIO

Fazer escolhas corretas é um dos pré-requisitos do sucesso. A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” deve parte de seu reconhecido sucesso às escolhas acertadas que tem feito ao longo de sua história centenária. Em 2017 fez mais uma de suas decisões históricas: sua Congregação criou, com apoio do IEA da USP, a Cátedra Luiz de Queiroz, para promover estudos e atividades interdisciplinares voltados para a área e sistemas agropecuários, visando à formulação de políticas públicas e à consolidação da “A5 Alliance”, envolvendo cinco das universidades líderes do mundo nesta área: USP/Esalq, University of Cornell, University of California-Davis, Wageningen University and Research e China Agricultural University.

Quando completou 120 anos, entre 2020 e 2022, a Esalq/USP escolheu como Titular da Cátedra o engenheiro agrônomo Alysson Paolinelli, uma das figuras mais emblemáticas da agronomia brasileira. Homem de ciência e ao mesmo tempo preocupado com resultados práticos, ocupou posições de liderança, desde diretoria de unidade acadêmica em Lavras à Secretaria de Agricultura em Minas Gerais e ao Ministério da Agricultura.

É mundialmente conhecido pelas ações que resultaram na ocupação do Cerrado para exploração da agricultura de larga escala, que quase dobrou a área produtiva agrícola do país, contribuindo para um expressivo aumento da produção de alimentos, e ao mesmo tempo, ajudando a poupar desmatamento áreas de floresta tropical. Esta ação foi reconhecida em 2006, quando recebeu o Prêmio Mundial de Alimentos criado pelo ganhador do Prêmio Nobel da Paz Norman Borlaug.

No contexto dessa atividade de Alysson Paolinelli à frente da Cátedra Luiz de Queiroz, vem à luz a segunda edição revisada da coleção de livros relacionadas à agricultura irrigada, da qual faz parte este 4º volume “Agricultura Irrigada no Brasil: ciência e tecnologia”, organizado em colaboração com Durval Dourado Neto e Everardo Chartuni Mantovani.

“Agora que os recursos hídricos estão se tornando visivelmente mais escassos, aumentar a eficiência do uso água na agricultura (more crop per drop) é uma questão chave para atender às demandas atuais e futuras por alimentos, fibras e bioenergia da humanidade. A agricultura moderna está adentrando uma nova era tecnológica, a era da Revolução Azul”. Esse trecho do primeiro capítulo da obra delimita a sua importância. Estamos falando da produção agrícola, um dos mais importantes itens da economia brasileira, conduzida de maneira sustentável, em um momento histórico em que a água torna-se um bem cada vez mais escasso.

Alcançar esse objetivo exige, como sempre, ciência e arte. Ou como se diz modernamente, ciência e tecnologia. De uma maneira sistemática, ao longo dos 20 capítulos, o tema é revisado com habilidade e grande profundidade, somente possível pela combinação de um conjunto de 42 especialistas, liderados por coordenadores experientes, em um ambiente que favorece o permanente intercâmbio de ideias e análises detalhadas. Esse ambiente, que promove o pensamento criativo, é criado pela cátedra.

O conjunto de informações quase enciclopédico, amplamente ilustrado por mapas, figuras, gráficos e tabelas, resume a contribuição de uma vastíssima literatura. Mas, adicionalmente, está ali integrada a experiência pessoal de cada um dos autores.

No conjunto, a obra contribuirá certamente para solução prática de problemas de irrigação, como fundamento para educação de jovens agrônomos e pesquisadores, e também para identificar novos tópicos de pesquisa.

Os coordenadores e autores merecem nossos aplausos pela contribuição concreta à agronomia brasileira. A Esalq/USP, mais uma vez, faz uma escolha correta, que beneficia o país.

Marco Antonio Zago

Presidente da FAPESP

AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL

Ciência e Tecnologia

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1		
1	A revolução azul no contexto da agricultura irrigada	1
	<i>Rubens Duarte Coelho</i>	
	Resumo	1
1.1	Introdução	1
1.2	A irrigação no mundo antigo	1
1.3	A agricultura irrigada na era moderna	3
1.4	A revolução verde na agricultura	3
1.5	A revolução azul e a pegada hídrica na agricultura	4
1.6	O sistema híbrido de irrigação: pivô central e gotejamento	6
1.7	A eficiência do uso da água na agricultura	9
1.8	Fotossíntese: plantas C ₃ e C ₄	10
1.9	Implementação da revolução azul	11
1.10	O milagre azul da bioenergia	13
1.11	Irrigação de precisão	17
1.12	Agricultura aérea de precisão em áreas irrigadas	20
1.13	Considerações finais	21
	Referências	21

CAPÍTULO 2		
2	Pivô central: história, mercado, tecnologia e futuro	25
	<i>Renato Silva</i>	
	Resumo	25
2.1	Introdução	25
2.2	História	28
2.3	Mercado	29
2.4	Tecnologia	31
2.5	Rede de distribuição	32
2.6	Governança	33
2.7	Futuro responsável	33
2.8	Considerações finais	34
	Referências	35

CAPÍTULO 3

3	Irrigação por gotejamento: histórico e evolução tecnológica	37
	<i>Marcus Henrique Tessler</i>	
	Resumo	37
3.1	Introdução	37
3.2	Desenvolvimento tecnológico dos gotejadores	39
3.3	Gotejadores	40
3.4	Vazão dos gotejadores	44
3.5	Princípios da irrigação por gotejamento (Engenharia e Agronomia)	44
3.6	Conceito do solo como reservatório	49
3.7	Sistema radicular sob irrigação por gotejamento	51
3.8	O solo como alvo	52
3.9	Fertirrigação, nutrição e <i>drip protection</i>	53
3.10	Considerações sobre a forma de aplicação de fertilizantes	56
3.11	Reflexões sobre o futuro da tecnologia de irrigação por gotejamento	57
3.12	Considerações finais	59
	Referências	59

CAPÍTULO 4

4	O manejo da irrigação e o futuro da agricultura irrigada	61
	<i>Daniel Fonseca de Carvalho e Luiz Fernando Coutinho de Oliveira</i>	
	Resumo	61
4.1	Introdução	61
4.2	Manejo da água baseado em dados climáticos	62
4.3	Manejo da água baseado no balanço de água no solo	65
4.4	Manejo da água a partir de informações na planta	67
4.5	Manejo da irrigação com acionamento automático	69
4.6	Irrigação com <i>deficit</i> controlado	70
4.7	Considerações finais	72
	Referências	73

CAPÍTULO 5

5	A evolução da irrigação mecanizada moldando os rumos da tecnologia de aplicação	77
	<i>Gustavo Fanelli Hossri</i>	
	Resumo	77
5.1	Introdução	77
5.2	Pivô central: dinâmica e operacionalidade	80
5.3	Pivô central: tecnologia de aplicação	81
5.4	Considerações finais	86
	Referências	87

CAPÍTULO 6

6	Projeto e execução de sistemas de drenagem agrícola <i>Jarbas Honorio de Miranda, Laura Elizabeth Christianson e Luciano Alves de Oliveira</i>	89
	Resumo	89
6.1	Introdução	89
6.2	Drenagem de terras agrícolas	89
6.3	Considerações finais	103
	Referências	103

CAPÍTULO 7

7	Irrigação e fertirrigação em ambiente protegido <i>Sergio Nascimento Duarte</i>	107
	Resumo	107
7.1	Introdução	107
7.2	O cultivo em estufas agrícolas	108
7.3	Irrigação em estufas	108
7.4	Fertirrigação em estufas	116
7.5	Considerações finais	121
	Referências	122

CAPÍTULO 8

8	Subsídios para o dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional	127
	<i>João Carlos Cury Saad</i>	
	Resumo	127
8.1	Introdução	127
8.2	Sequência sugerida	128
8.3	Espaçamento entre aspersor	128
8.4	Definição da área efetivamente irrigada	128
8.5	Lâmina líquida e lâmina bruta	128
8.6	Turno de irrigação	129
8.7	Vazão do projeto	129
8.8	Configuração da rede hidráulica	129
8.9	Esquema operacional, número de posições irrigadas e ajuste dos dados	130
8.10	Seleção do aspersor e suas características operacionais	131
8.11	Hidráulica de tubulações com múltiplas saídas	131
8.12	Dimensionamento da linha lateral	135
8.13	Condição operacional crítica	139
8.14	Dimensionamento da linha principal	139
8.15	Cálculo da altura manométrica total	140
8.16	Potência do conjunto motobomba	140
8.17	Estudo de caso: dimensionamento de um sistema de irrigação por aspersão convencional com linhas laterais emparelhadas em desnível	140
8.18	Considerações finais	147
	Agradecimentos	147
	Referências	147

CAPÍTULO 9

9	Irrigação com <i>deficit</i>	149
	<i>Luís Henrique Basso</i>	
	Resumo	149
9.1	Introdução	149
9.2	Irrigação com <i>deficit</i> : considerações sobre o seu uso	150
9.3	Aspectos econômicos	150
9.4	Produtividade da água e sua relação com a irrigação com <i>deficit</i>	152
9.5	Irrigação com <i>deficit</i> no Semiárido do Brasil	153
9.6	Estratégias de irrigação com <i>deficit</i>	154
9.7	Respostas fisiológicas e morfológicas das plantas ao <i>deficit</i> hídrico	155
9.8	Respostas de culturas ao <i>deficit</i> hídrico	155
9.9	Considerações finais	161
	Referências	162

CAPÍTULO 10

10	Irrigação de baixo custo por sulcos	167
	<i>Edmar José Scaloppi</i>	
	Resumo	167
10.1	Introdução	167
10.2	O processo de irrigação de baixo custo por sulcos	171
10.3	Preparo da área a ser irrigada	171
10.4	Classificação do sistema de irrigação de baixo custo por sulcos	172
10.5	Composição do sistema de irrigação	172
10.6	Dimensionamento de sistemas de irrigação de baixo custo por sulcos	175
10.7	Determinação do comprimento dos sulcos	177
10.8	Considerações finais	183
	Referências	184

CAPÍTULO 11

11	Variabilidade e mudanças climáticas no contexto da agricultura irrigada	187
	<i>Paulo Cesar Sentelhas</i>	
	Resumo	187
11.1	Introdução	187
11.2	Variabilidade, tendências, anomalias e mudanças climáticas	188
11.3	Impactos da variabilidade e das mudanças climáticas nas culturas agrícolas	193
11.4	Impactos da variabilidade e das mudanças climáticas no requerimento hídrico das culturas	195
11.5	Irrigação como estratégia de mitigação das mudanças climáticas	197
11.6	Mudanças climáticas e a expansão da agricultura irrigada no Brasil	200
11.7	Considerações finais	202
	Referências	202

CAPÍTULO 12

12	Manejo da irrigação no Brasil: aplicações, desafios e tendências para o futuro	207
	<i>Mirta Teresinha Petry, Reimar Carlesso e Juliano Dalcin Martins</i>	
	Resumo	207
12.1	Introdução	207
12.2	Requerimento hídrico e o manejo da irrigação	208
12.3	Programação ou calendarização da irrigação	209
12.4	Manejo da irrigação baseado no status de água no solo: medida do conteúdo ou da tensão de água no solo	209
12.5	Manejo da irrigação com base na planta: o <i>status</i> de água na planta	214
12.6	Manejo da irrigação baseado em parâmetros meteorológicos: método da ETc	215
12.7	Métodos combinados do manejo da irrigação	220
12.8	Considerações finais	221
	Referências	222

CAPÍTULO 13

13	Tecnologias digitais para monitoramento da irrigação	227
	<i>Catariny Cabral Aleman, Fernando França da Cunha, Rubens Alves de Oliveira e Roberto Filgueiras</i>	
	Resumo	227
13.1	Introdução	227
13.2	Sensoriamento remoto aplicado à irrigação	228
13.3	Sensoriamento remoto orbital na agricultura irrigada	229
13.4	Sensoriamento remoto aéreo na agricultura irrigada	230
13.5	Sensoriamento remoto proximal na agricultura irrigada	232
13.6	Modelos e algoritmos para análise de imagens na agricultura irrigada	233
13.7	Inteligência artificial aplicada ao manejo de irrigação	234
13.8	Automação de sistemas de irrigação	238
13.9	Aplicação de água em taxa variável	239
13.10	Considerações finais	240
	Agradecimentos	241
	Referências	241

CAPÍTULO 14

14	Os transientes hidráulicos e a agricultura irrigada	243
	<i>Rodrigo Ribeiro Franco Vieira</i>	
	Resumo	243
14.1	Introdução	243
14.2	Definição	244
14.3	Ondas de pressão	247
14.4	Entendendo as soluções	251
14.5	Estudos de casos - exemplos reais	260
14.6	Considerações finais	266
	Referências	266

CAPÍTULO 15

15	Produtividade da água na agricultura irrigada	269
	<i>José Antônio Frizzone e Verônica Gaspar Martins Leite de Melo</i>	
	Resumo	269
15.1	Introdução	269
15.2	Eficiência da irrigação	270
15.3	Produtividade da água na agricultura	271
15.4	Eficiência da irrigação	272
15.5	Produtividade da água	276
15.6	Fatores que afetam a produtividade da água	280
15.7	Técnicas para aumentar a produtividade da água	283
15.8	Considerações finais	284
	Referências	285

CAPÍTULO 16

16	Eficiência de uso da água na agricultura irrigada	289
	<i>Salassier Bernardo, Elias Fernandes de Sousa e Everardo Chartuni Mantovani</i>	
	Resumo	289
16.1	Introdução	289
16.2	Meio ambiente	291
16.3	Benefício da irrigação	292
16.4	Salinização do solo	293
16.5	Contaminação dos recursos hídricos	293
16.6	Disponibilidade de água	294
16.7	Manejo de irrigação e o sistema solo-planta-atmosfera	296
16.8	Relação entre produtividade e disponibilidade de água	297
16.9	Maximização da produtividade por unidade de água aplicada	299
16.10	Maximização da produtividade por unidade de área	299
16.11	Maximização dos lucros	300
16.12	Otimização da eficiência de uso da água na agricultura	300
16.13	Funções de produção	301
16.14	Otimização física	302
16.16	Otimização econômica	303
16.16	Ponto de equilíbrio	303
16.17	Obtenção de dados no campo	304
16.18	Eficiência do uso de água	304
16.19	Rendimento por unidade de lâmina aplicada	305
16.20	Produtividade na agricultura irrigada	305
16.21	Manejo do sistema de irrigação	308
16.22	Irrigação com turno de rega prefixado	310
16.23	Irrigação com turno de rega variável	310
16.24	Considerações finais	312
	Referências	313

CAPÍTULO 17

17	Índice de desenvolvimento rural sustentável	315
	<i>Durval Dourado Neto, Allan Delfino, Pedro Alves Quilici Coutinho, Rodnei Rizzo, Marcela Almeida de Araujo, Alberto Giaroli de Oliveira Pereira Barretto, Pedro Abel Vieira Júnior, Roberto Rodrigues e Alysson Paolinelli</i>	
	Resumo	315
17.1	Introdução	315
17.2	Índice de desenvolvimento rural sustentável	317
17.3	Estudo de caso: o desenvolvimento rural sustentável no estado de São Paulo	326
17.4	Índice de desenvolvimento rural sustentável	334
17.5	Considerações finais	335
	Referências	335

CAPÍTULO 18

18	Fertirrigação: aspectos relevantes e viabilidade técnica x financeira	339
	<i>Luiz Fabiano Palaretti e Alexandre Barcellos Dalri</i>	
	Resumo	339
18.1	Introdução	339
18.2	Premissas da fertirrigação	340
18.3	Quantidade e qualidade da fonte hídrica	343
18.4	Sistema de injeção de fertilizantes	344
18.5	Injeção direta na sucção da bomba	345
18.6	Injeção feita por tanques de diferencial de pressão	346
18.7	Injeção por Venturi	346
18.8	Injeção via bomba centrífuga	347
18.9	Injeção via bomba injetora	348
18.10	Injetora de motor hidráulico – Bombas dosadoras	350
18.11	Injetora multicanais	351
18.12	Considerações sobre o uso de fertilizantes em sistemas fertirrigados	352
18.13	Rotina básica no sistema operacional de fertirrigação	353
18.14	Manejo da fertirrigação via extrator de solução	354
18.15	Custos operacionais: adubação manual x fertirrigação	356
18.16	Considerações finais	358
	Referências	359

CAPÍTULO 19

19	Utilização da energia fotovoltaica para irrigação: passado, presente e futuro	361
	<i>Flávio Gonçalves Oliveira, Everardo Chartuni Mantovani e Marcelo Carazo Castro</i>	
	Resumo	361
19.1	Introdução	361
19.2	Evolução histórica do curso da implantação fotovoltaica	362
19.3	Composição dos sistemas fotovoltaicos (FV) de bombeamento para irrigação	363
19.4	Modelos de utilização da energia solar FV em sistemas de irrigação	367
19.5	Elementos para o dimensionamento de sistemas de irrigação FV	370
19.6	Legislação brasileira para sistemas fotovoltaicos	373
19.7	Considerações finais	374
	Referências	374

CAPÍTULO 20		
20	Qualidade da água para irrigação localizada	379
	<i>Gustavo Haddad Souza Vieira e José Geraldo Ferreira da Silva</i>	
	Resumo	379
20.1	Introdução	379
20.2	Caracterização do problema	380
20.3	Tratamento de água de irrigação	381
20.4	Aeração e sedimentação	386
20.5	Considerações finais	389
	Referências	390

	HOMENAGEM (Klaus Reichardt)	393
	Relação de Autores, Capítulos e E-mails	395
	Os Organizadores	397

CAPÍTULO 1

1 A REVOLUÇÃO AZUL NO CONTEXTO DA AGRICULTURA IRRIGADA

Rubens Duarte Coelho

Resumo

O século XXI inicia-se sob o estigma do aquecimento global e da escassez de água em diversas partes do globo terrestre. O crescimento urbano e as demandas industriais já competem atualmente com a água disponível para a agricultura irrigada e a perspectiva futura é de acirramento desta disputa, além do mais, preservar rios e áreas de proteção permanente (APP), exigem manter fluxos de água nas microbacias em níveis mínimos. Conseguiremos conciliar todos esses interesses? A agricultura moderna está adentrando uma nova era tecnológica a era da Revolução Azul na Agricultura, diferentemente da Revolução Verde na Agricultura que focou no aumento de produtividade das culturas agrícolas por unidade de área, essa nova revolução está focada no aumento de produtividade das culturas por unidade de água requerida pelas culturas (evapotranspiração). O texto leva o leitor por uma rápida passagem pela história do desenvolvimento da irrigação no mundo, adentrando vários detalhes da eficiência do uso da água na agricultur

a moderna, em especial às novas tecnologias de irrigação, à produção de bioenergia de segunda geração (Etanol 2G) e apresentando finalmente, o estado da arte em termos da tecnologia de Irrigação de Precisão. Espera-se com esta abordagem múltipla, despertar o interesse das novas gerações para a importância da água na sustentabilidade agrícola, pois sabe-se atualmente que a produção de alimentos no futuro não será limitada pela disponibilidade de terras no mundo, como se acreditava no passado, mas sim pela disponibilidade hídrica nas microbacias de produção agrícola.

1.1 Introdução

As civilizações antigas da humanidade precisavam garantir a produção de alimentos nos locais onde viviam, pois não havia comércio internacional de produtos agrícolas que oferecesse segurança alimentar à população em anos de chuvas escassas; deste modo, desenvolveram técnicas avançadas de irrigação em seus domínios territoriais, visando garantir o abastecimento de alimentos em situações adversas de precipitação natural.

A irrigação foi a primeira tecnologia empregada na agricultura das grandes civilizações, precedendo de longa data, o melhoramento genético, os maquinários, os adubos sólidos e os defensivos agrícolas (herbicidas, fungicidas e inseticidas).

1.2 A Irrigação no mundo antigo

O início da agricultura irrigada se deu em torno do ano 4000 a.C., quando alguns agricultores do norte da Mesopotâmia migraram para a região sul desta planície entre os rios Tigres e Eufrates, denominada "Fértil Crescente" (Iraque). Diferentemente da região norte, as chuvas da região sul eram bem mais escassas e irregulares (PONTING, 1991).

Uma particularidade desta região sul da Mesopotâmia é que os rios transportam quantidades significativas de sedimentos, o que proporciona um grande acúmulo de material sólido em suas margens, criando verdadeiros diques naturais ao longo dos rios, de modo que muitas vezes a superfície da água destes rios encontra-se em uma cota mais elevada do que as terras das várzeas, nessas condições, para se fazer uma agricultura irrigada não é preciso

bombear água (tecnologia não disponível na época), apenas conduzi-la por gravidade até o local desejado, através de uma rede de canais e reservatórios de água encravados nestes diques naturais. Esta mesma condição de dique natural ocorre nos rios da Índia e da China, formados a partir do degelo da neve na cordilheira do Himalaia e na cadeia de montanhas *Bayan Har* respectivamente.

A irrigação transformou estas sociedades como nunca antes imaginado. Pela primeira vez os agricultores foram capazes de produzir uma quantidade de alimento superior ao plantio de sequeiro, de tal modo que parte da sociedade não precisava se dedicar à agricultura e pudessem desenvolver outras ocupações profissionais (exército, tecelagem, cerâmica, metalurgia, escrita, arquitetura e matemática).

As sociedades que mais se destacaram na agricultura irrigada foram: Sumérios, Babilônios e Assírios (Rios Tigres e Eufrates), Egípcios (Rio Nilo), Indus (Paquistão e Índia), Chineses (Yellow River), Astecas e Maias (América Central e Peru).

Os Sumérios formaram a sociedade mais notável da época, além da agricultura irrigada inventaram a roda e também a primeira escrita da humanidade (cuneiforme); viviam distribuídos no "Fértil Crescente" em 8 cidades, com aproximadamente 20 mil habitantes cada uma. O desaparecimento abrupto desta civilização em torno do ano 2000 a.C., foi sempre uma das grandes incógnitas da arqueologia moderna, mostrando a vulnerabilidade deste modelo de crescimento social com base na agricultura irrigada (WEISS, 1993). Os egípcios, os Indus e os chineses são as únicas civilizações remanescentes deste período histórico da humanidade.

Somente no final do século XX, uma equipe de cientistas composta por arqueólogos, físicos de solos e geólogos conseguiu decifrar o enigma do desaparecimento da civilização Suméria, com base em técnicas arqueológicas modernas (WILFORD, 1993).

Análises detalhadas de diversos perfis de solo estratificados nas planícies do "Crescente Fértil" e na região norte da Mesopotâmia, revelou que houve um considerável acúmulo de sais nessas terras agrícolas (salinização do solo), acompanhado de uma significativa alteração climática, que diminui as precipitações naturais na região por aproximadamente 300 anos. A baixa atividade microbiológica do solo, em especial de minhocas e insetos, associada a quantidades expressivas de areias finas típicas de dunas (ventos fortes), comprovaram a intensificação da aridez e a dissecação da paisagem nesta região durante este período. Exatamente o que causou esta mudança climática permanece desconhecido até o momento, porém esta descoberta ajudou a esclarecer o colapso desta sociedade.

O Rio Nilo não apresentava esta formação de diques naturais ao longo de suas margens, era preciso que os egípcios esperassem o período chuvoso do ano para que o rio extravasasse nas planícies, de modo a permitir o plantio das sementes, no momento mais adequado de umidade e aeração no solo. A agricultura irrigada egípcia não era efetuada continuamente durante o ano; era temporária durante um curto período de umidade ideal no solo, após o período de cheia do rio. Somente entre os anos de 1920 e 1940, com a construção de diversas barragens ao longo do Rio Nilo é que os Egípcios conseguiram ter controle sobre o nível das águas deste rio, de modo que a agricultura irrigada se tornou uma atividade contínua ao longo do ano. Os egípcios são a civilização mais longínqua e de maior sucesso na prática da agricultura irrigada (BUTZER, 1976).

1.3 A agricultura irrigada na era moderna

Os ingleses foram os responsáveis por darem início à Engenharia de Irrigação tecnificada no mundo no ano de 1840, na região de Punjab, localizada na fronteira norte entre a Índia e o Paquistão. Nesta época, a Índia era colônia inglesa e entre os anos de 1837 e 1838 ocorreu uma grande fome na região por falta de chuvas, resultando na morte de milhões de pessoas (STONE, 1984).

Engenheiros ingleses que haviam aprimorado suas habilidades técnicas com a construção de estradas de ferro e de canais na Europa, se lançaram à nobre tarefa de desenvolver sistemas de irrigação por superfície nesta região da Índia conhecida como a "Terra dos Cinco Rios", visando evitar novas catástrofes humanitárias.

Em 1857 foi inaugurado o Canal de Ganges (Punjab), que iria permitir controlar com bastante precisão os níveis de água nos rios e nos reservatórios na região, de maneira que a permitir o fluxo por gravidade da água até as parcelas irrigadas no campo.

O dimensionamento deste canal baseou-se em uma formulação francesa, nunca antes testada nesta escala de grandeza. A declividade do canal ficou superdimensionada e a velocidade de fluxo inadequada ao solo da região, o que começou a erodir as margens do canal, de tal sorte, que foi necessário a readequação desta declividade, algo bastante trabalhoso e custoso para a coroa Inglesa. No ano de 1900 a Índia já contabilizava uma área total irrigada de 13,4 milhões de ha, mais do que o dobro da área atual (2020) irrigada no Brasil: 6,5 milhões ha.

Nos Estados Unidos, o início da engenharia de irrigação na era moderna se deu em torno de 1850 com os mórmons no estado de Utah, a maioria descendentes de imigrantes ingleses. Anteriormente a este período, a irrigação era uma atividade artesanal praticada apenas por povos indígenas na fronteira com o México. Posteriormente, o estado da Califórnia baseando-se na experiência bem sucedida de Utah, iniciou também a implantação da irrigação em seus domínios territoriais, sendo que em 1900 já possuía 400 mil ha implantados, enquanto que os mórmons na mesma época totalizavam 100 mil ha irrigados em Utah (MORGAN, 1993; WORSTER, 1985).

A engenharia de irrigação no Brasil iniciou suas atividades em 1904 no município de Pelotas no Rio Grande do Sul, com a implantação da primeira lavoura empresarial de arroz irrigado por inundação (www.arrozcristal.com.br). O potencial de área irrigada no Brasil é estimado em 66 milhões de ha (SPAVOREK *et al.*, 2014), sendo que atualmente contabiliza-se em torno de 6,5 milhões de ha implantados nas culturas de grãos, fruticultura, hortaliças, café e cana-de-açúcar.

O Brasil explora atualmente 10% de seu potencial total de área irrigada. A intensificação da irrigação em território nacional ocorreu a partir do ano de 1970, bem mais tardiamente quando comparado aos demais países irrigantes no mundo. Por outro lado, o Brasil utiliza equipamentos de irrigação de última geração e projetos mais tecnificados, aproveitando-se de toda a experiência acumulada nos países desenvolvidos, o que é uma grande vantagem competitiva, pois permite ser mais eficiente no uso da água com base em uma agricultura irrigada mais moderna e assertiva.

1.4 A revolução verde na agricultura

A Revolução Verde na agricultura ocorrida na última metade do século XX, promoveu um aumento significativo da produtividade da terra ($t\ ha^{-1}$) nas regiões agrícolas mais antigas do globo terrestre (Europa e Ásia); já nas regiões agrícolas mais jovens (América do Norte, América do Sul e Oceania) este aumento de produtividade da terra se deu simultaneamente à expansão das áreas cultivadas.

O tripé de sustentação da Revolução Verde baseou-se em três premissas básicas: (i) o melhoramento genético que proporcionou variedades com potencial de alta produtividade, (ii) o uso intensivo de produtos químicos (adubos, herbicidas, inseticidas) e (iii) a implantação da tecnologia de irrigação em larga escala. Sem o uso de fertilizantes e defensivos, as novas sementes não poderiam expressar seu potencial genético; sem água suficiente, os fertilizantes teriam pouco efeito (POSTEL, 1999).

Embora a Revolução Verde tenha ajudado na preservação ambiental, evitando que áreas de florestas e de pastagens fossem transformadas em áreas agrícolas, ela demandou imensas quantidades de água. O aumento de 2,4 vezes na produtividade das terras agrícolas entre os anos de 1950 e 1995 foi acompanhado pelo aumento de 2,2 vezes na quantidade de água utilizada na irrigação (SHIKLOMANOV, 1996).

O século XXI inicia-se sob o estigma do Aquecimento Global e tem-se observado a ocorrência de secas intensas imprevisíveis em diversas partes do globo terrestre (sistema Cantareira [SP], Califórnia, Austrália, Índia, Kenya, África do Sul, etc.). O crescimento urbano e as demandas industriais estarão competindo com a água disponível para a agricultura nas próximas décadas, além do mais, restaurar populações de peixes, salvar espécies ameaçadas de extinção, preservar rios e áreas de proteção permanente (APP), exigirão manter fluxos de água nas microbacias em níveis mínimos. Conseguiremos conciliar todos esses interesses?

1.5 A revolução azul e a pegada hídrica na agricultura

Agora que os recursos hídricos estão se tornando visivelmente mais escassos, aumentar a eficiência do uso água na agricultura (*more crop per drop*) é uma questão chave para atender às demandas atuais e futuras por alimentos, fibras e bioenergia da humanidade. A agricultura moderna está adentrando uma nova era tecnológica a era da Revolução Azul.

A Revolução Azul será bem mais difícil de ser implementada nos próximos anos quando comparada à Revolução Verde, pois a água desempenha diversas funções ambientais, sendo que o uso da água em um determinado ponto de uma bacia hidrográfica, pode ocasionar impactos em outros locais. A Revolução Azul requer estratégias de planejamento mais criativas e mais diversas que resultarão em uma agricultura mais intensiva em informação e menos intensiva em insumos, promovendo a introdução de novas tecnologias e um melhor gerenciamento da água na agricultura (POSTEL, 1999).

O termo "eficiência do uso da água" foi definido inicialmente por fisiologistas vegetais para expressar a quantidade de matéria seca (MS) produzida por uma planta em função da quantidade de água evapotranspirada ($\text{kg}_{\text{MS}} / \text{m}^3_{\text{H}_2\text{O}}$); embora este termo seja usual na literatura científica, do ponto de vista da engenharia, a eficiência de um processo é um valor percentual adimensional. Para resolver este impasse foi proposto a utilização do termo "produtividade da água" como sinônimo do termo "eficiência do uso da água" (STEDUTO; HISAO; FERERES, 2007).

O comércio internacional de *commodities* agrícolas intensivas no uso de água, tem gerado a percepção de que os recursos hídricos não estão mais vinculados a determinados domínios territoriais no mundo. Desta maneira a origem dos recursos hídricos está desconectada da distribuição espacial dos consumidores finais (HOEKSTRA; HUNG, 2002).

Observa-se na Figura 1, que a América do Norte, a América do Sul e a Oceania são os grandes centros exportadores de água virtual no mundo, sendo que a Europa e a Ásia são os maiores importadores deste tipo de água, com base no comércio internacional de *commodities* agrícolas.

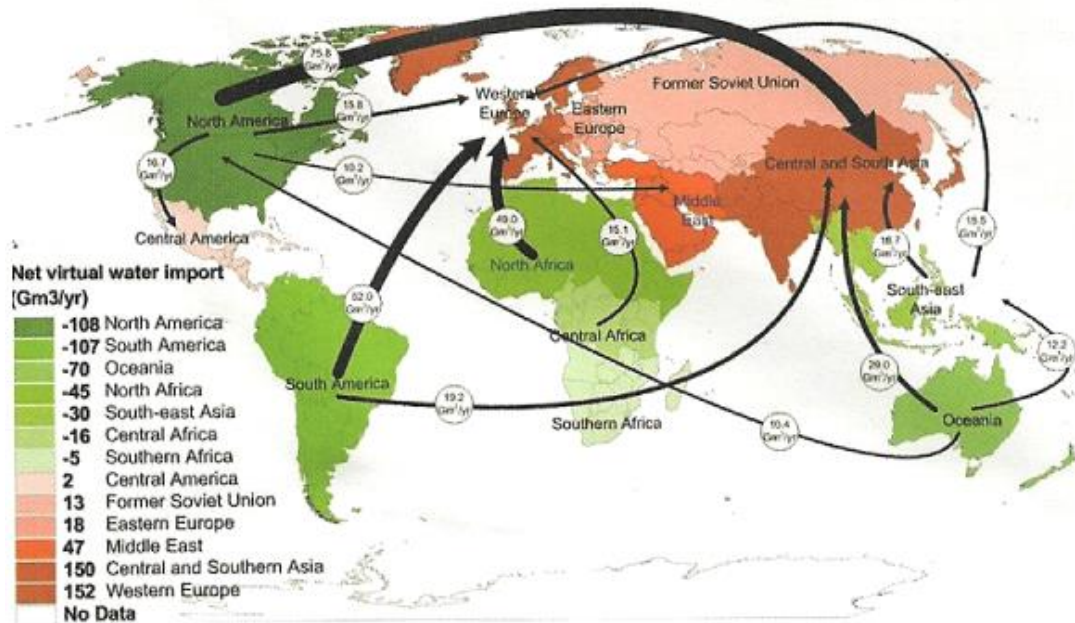


Figura 1. Saldo de importação de água virtual em diferentes regiões do globo (HOEKSTRA; HUNG, 2002).

A ideia de se analisar o uso da água ao longo da cadeia de suprimento de um produto agrícola, ganhou notoriedade mundial com a introdução do conceito "*water footprint*" apresentado por Hoekstra em 2003, que leva em consideração tanto o uso direto quanto o uso indireto de água na produção de um bem de consumo. A pegada hídrica é um indicador multidimensional georeferenciado que quantifica o volume consumido por tipo de fonte hídrica e o volume equivalente para mitigar a "poluição" do processo de produção; ela não é uma medida do impacto ambiental ocasionado pelo consumo de água e da poluição gerada em um determinado ecossistema.

A pegada hídrica é subdividida nas cores azul, verde e cinza. A pegada hídrica azul refere-se à água retirada dos rios e dos lagos normalmente utilizada em sistemas de irrigação. A pegada hídrica verde, refere-se à água da chuva que fica disponível no perfil de solo e que é absorvida pelo sistema radicular das plantas. A pegada hídrica cinza, refere-se ao volume de água virtual equivalente, necessário para "diluir" a poluição gerada no processo.

Na Figura 2, observa-se um exemplo de quantificação da pegada hídrica na cultura de cana-de-açúcar para vários países do mundo (GERBENS-LEENES; HOEKSTRA, 2012). O Brasil tem uma eficiência do uso da água muito superior à maioria dos países produtores de cana-de-açúcar. Cuba, Vietnã e Índia apresentam valores bem elevados de pegada hídrica. Destaques para Paquistão e Egito, que apresentam elevados níveis de irrigação (água azul). Austrália, Colômbia, Argentina e Peru são também bem eficientes no uso da água na produção de cana-de-açúcar.

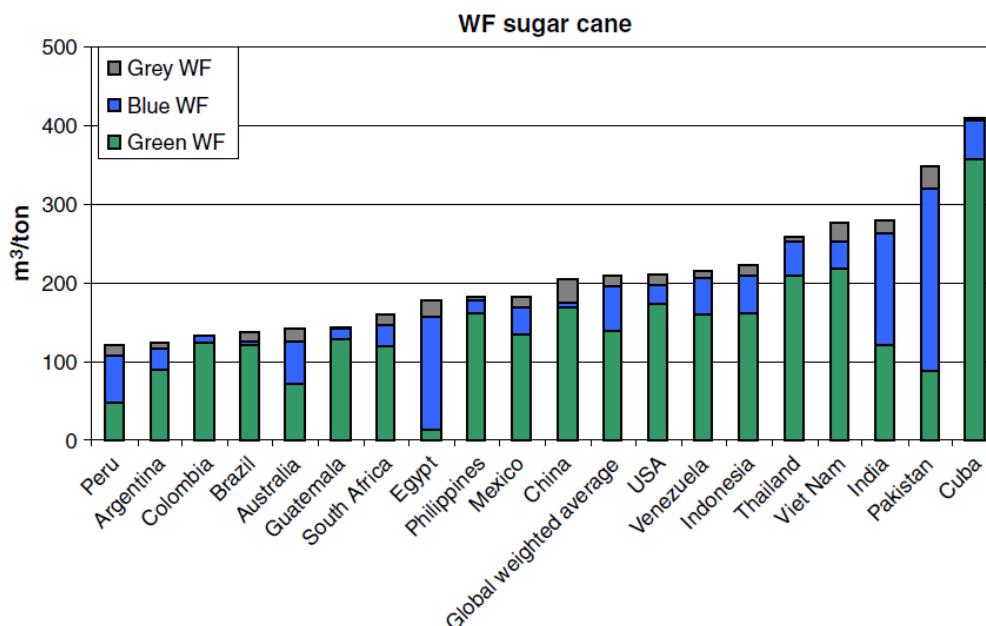


Figura 2. Pegada hídrica verde, azul e cinza na produção de cana-de-açúcar, para diferentes países no mundo (m³ de água por tonelada de colmos frescos) (GERBENS-LEENES; HOEKSTRA, 2012).

Embora a agricultura irrigada represente aproximadamente 70 % do consumo hídrico mundial, não se sabe ao certo qual a eficiência de aplicação desta água na zona radicular das plantas. Estima-se que as perdas por evaporação no processo de aplicação de água na irrigação possam ser na ordem de 10 a 20 % e as perdas por drenagem de 15 a 20 %, resultando em uma perda total entre 25 a 40 % da água aplicada nas irrigações por aspersão e por superfície. Esta "ineficiência" da irrigação mundial pode ser considerada uma "grande oportunidade", pois com o uso de novas tecnologias, ao aumentar o nível dessa eficiência, mais água estará disponível para ampliação da agricultura irrigada.

1.6 O sistema híbrido de irrigação: pivô central e gotejamento

Existem poucos exemplos de países, bacias hidrográficas e perímetros irrigados que tenham promovido ganhos significativos da produtividade da água em larga escala na agricultura. Israel é o único país que já realizou o que o mundo precisa fazer nos próximos 30 - 40 anos, ou seja: dobrar a produtividade da água na agricultura na escala de uma nação. O feito israelense se deu nas culturas de hortaliças, frutas e culturas de maior valor agregado (BHATIA; CESTTI; WINPENNY, 1995).

A estratégia israelense de aumento da eficiência do uso da água na agricultura irrigada, baseou-se em duas premissas básicas: (i) no uso da irrigação localizada por gotejamento em larga escala, visando diminuir o desperdício de água por evaporação no momento da aplicação pelos sistemas de irrigação, evitando a retenção foliar da água no dossel das plantas e reduzindo as perdas de água por evaporação direta do solo e (ii) na implantação de um sistema de informação para o manejo de precisão da irrigação nas culturas irrigadas, com base em estações meteorológicas, sensores de umidade do solo e sensoriamento remoto, evitando aplicações excessivas de água e a ocorrência de deficiência hídrica em momentos críticos das culturas (HILLEL, 1994).

A implantação da irrigação localizada em grandes áreas, tem como desafio tecnológico o monitoramento e o controle do entupimento dos emissores, de maneira tal que a vida útil prevista em projeto seja assegurada durante a operação de campo. Existem exemplos de sucesso na superação deste desafio tecnológico, com base na seleção criteriosa dos emissores,

dos sistemas de filtragem, tanques de aeração/decantação e da implantação de procedimentos de manutenção periódica: abertura dos finais de linha, aplicação de cloração e ácidos na água de irrigação.

Em regiões úmidas onde se pratica a irrigação suplementar, a previsão de chuvas com maior precisão poderá evitar irrigações desnecessárias e otimizar a captura das precipitações naturais no perfil de solo das áreas irrigadas.

Atender ao desafio de dobrar a produtividade da água nas culturas de trigo, milho, soja, algodão e arroz demandará o uso intensivo de novas tecnologias e estratégias; embora nenhuma nação tenha conseguido este feito até o momento, a região noroeste do Texas nos Estados Unidos pode servir como inspiração para esta causa.

O declínio do aquífero Ogallala forçou os agricultores texanos à adotarem uma irrigação mais eficiente nos equipamentos do tipo pivô central previamente instalados nesta região, substituindo os tradicionais bocais de aspersão, por emissores do tipo LEPA (COELHO *et al.*, 1996), posicionados em pendurais próximos ao solo, de maneira tal, que a água não fica retida no dossel das plantas, o que promove uma economia de água entre 15 e 30% e resulta em ganhos de produtividade agrícola na ordem de 10 a 15% (algodão e milho).

A irrigação por pivô central foi apresentada aos agricultores em 1948 e patenteada nos Estados Unidos em 1952, já a irrigação por gotejamento em Israel surgiu em 1965. Entre os anos de 1950 e 2015, houve um grande aperfeiçoamento destas duas tecnologias de irrigação, tanto a nível de engenharia de produto, quanto a nível de engenharia de material. Os equipamentos evoluíram para níveis de confiabilidade muito elevados, porém dois problemas persistem até os dias de hoje: no pivô central as perdas de água por evaporação, deriva e retenção foliar, enquanto que na irrigação por gotejamento a questão do entupimento dos gotejadores, principalmente com a tendência de diminuição da vazão dos emissores para valores entre 0,4 e 1,0 L h⁻¹, visando otimizar a malha hidráulica no campo; várias tecnologias de emissores para pivô e gotejamento foram desenvolvidas nas últimas décadas, de modo que estes problemas foram amenizados, porém não eliminados completamente até a presente data.

Mais recentemente, a proposta de um sistema híbrido de irrigação, resultante da fusão dos sistemas de irrigação pivô central e gotejamento fixo, deu origem à um novo conceito em sistemas de irrigação denominado de "gotejamento móvel por pivô central" (PMDI /*Pivot Mobile Drip Irrigation*). Este sistema híbrido propicia ao sistema pivô central irrigar o solo sem molhar a folhagem da cultura, utilizando tubo-gotejadores como emissores de água, que são arrastados sobre o solo ou dossel das plantas, conectados diretamente à tubulação aérea do pivô central (KISEKKA *et al.*, 2015); nestas condições as perdas de água por evaporação, deriva e retenção foliar são minimizadas.

A irrigação por gotejamento móvel utiliza gotejadores de alta vazão, entre 8 e 12 L h⁻¹, sendo eles bem menos susceptíveis ao entupimento (causas físicas, químicas ou biológicas), associado ao fato de utilizar uma quantidade de tubogotejadores bem menor na área, apenas 2 % do total de metros lineares de plantio, quando comparado ao sistema de irrigação por gotejamento fixo, o que viabiliza economicamente, reposições mais frequentes de tubulações, para manter a operacionalidade do sistema, em casos de entupimentos recorrentes e mais intensivos.

O sistema híbrido PMDI (Figura 3) é um sistema atrativo, pois une a eficiência da irrigação por gotejamento, com a praticidade da irrigação por pivô central, a um custo mais acessível por unidade de área irrigada. A utilização de sistemas de filtragem da água na base do pivô central é obrigatória no PMDI (*mesh* 80), para garantir a longevidade dos emissores tipo gotejador.

Irrigantes de cultivos intensivos (batata e tomate industrial) possuem uma certa preocupação fitossanitária com relação aos tubos gotejadores sendo arrastados sobre o dossel das plantas, no que diz respeito à possibilidade de dispersão de doenças e pragas na área irrigada. Aplicações de campo na África do Sul (2020), conduzidos pela empresa americana *DragonLine*, têm-se mostrado insensível a estes problemas fitossanitários nos cultivos intensivos de batata, tomate, cebola e cana-de-açúcar (Figura 4). Tecnologias futuras de revestimento destes tubos gotejadores com nanomateriais de cobre ou prata, poderão proporcionar maior segurança fitossanitária aos irrigantes optantes pelo PMDI.

Nos Estados Unidos o uso do PMDI concentra-se basicamente nas culturas de milho, soja e trigo, já no Brasil, vislumbra-se o potencial desta tecnologia na irrigação da cana-de-açúcar e na aplicação de vinhaça, evitando a famigerada corrosão dos equipamentos de aspersão nas usinas de etanol.

Trabalho pioneiro no desenvolvimento de um software livre para o dimensionamento hidráulico do sistema de irrigação por gotejamento móvel em pivô central (PMDI) foi apresentado recentemente na Esalq/USP (ALMEIDA *et al.*, 2017). Atualmente encontra-se em andamento um outro projeto de pesquisa FAPESP (2018/09729-7), coordenado pelo autor deste capítulo, que enfoca a questão do entupimento dos tubo gotejadores arrastados sobre a superfície do solo na fase inicial de cultivo, pela possibilidade de obstrução dos gotejadores, por aglomeração de partículas sólidas de fora para dentro nos orifícios dos tubo gotejadores, decorrentes da movimentação do equipamento na área; resultados iniciais demonstram a robustez do sistema em resistir ao entupimento pelo arraste sobre o terreno, para os diferentes tipos de solos estudados.

Ressalta-se que o sistema PMDI mantém o sistema de aspersão original do pivô central instalado, de tal modo, que ambos os sistemas possam ser acionados alternadamente, de acordo com as necessidades do manejo de irrigação, ao longo do ciclo de cultivo.

A irrigação por pivô central por imposição nas questões de outorga, deverá ser direcionada no futuro para as modalidades PMDI (*Pivot Mobile Drip Irrigation*) e LEPA (*Low Energy Precision Application*), unindo as vantagens de ambas tecnologias de irrigação em um único equipamento: elevada eficiência na aplicação de água, menor custo de implantação, maior resistência ao entupimento e elevado nível de automação.

Por ocasião do X Congresso Brasileiro de Tomate Industrial (2020), no painel intitulado "O Manejo Inteligente da Irrigação na Cultura do Tomate Industrial", o sistema PMDI foi apresentado pela primeira vez aos agricultores brasileiros, sendo que em breve, espera-se que o sistema seja instalado em campo, para que seja avaliado potencial desta tecnologia em condições nacionais de cultivos irrigados.

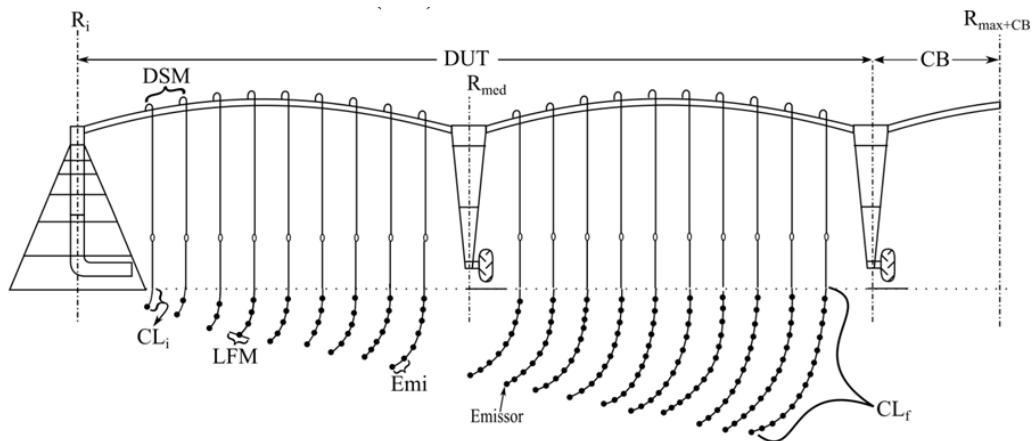


Figura 3. Esquema de um sistema de irrigação por gotejamento móvel em pivô central (**PMDI - Pivot Mobile Drip Irrigation**). R_i - raio inicial; R_{med} - raio médio do pivô; R_{max+CB} - raio máximo do pivô com balanço; DUT - Distância até a última torre; CB - comprimento do balanço; DSM - Distância entre saídas de mangueira; CL_i - comprimento de tubo gotejador da primeira linha; CL_f - comprimento de tubo gotejador da última linha; LFM - largura da faixa molhada do emissor; Emi - espaçamento entre emissores no tubo gotejador (ALMEIDA *et al.*, 2017).



Figura 4. Imagens da irrigação por gotejamento móvel na cultura do tomate industrial (Cortesia: Empresa *Dragonline / Monty Teeter*).

1.7 A eficiência do uso da água na agricultura

O segundo conjunto de estratégias visando aumentar a eficiência do uso da água na agricultura irrigada, baseia-se em promover a habilidade própria das plantas em serem mais eficientes no processo de fotossíntese. O crescimento das plantas está diretamente relacionado com a taxa de transpiração, que é o processo de absorver a água do solo e liberá-la de volta para a atmosfera.

Trabalhando com uma grande variedade de culturas em diversas localidades, vários pesquisadores têm relatado existir uma relação linear entre a transpiração das plantas e a

produção de biomassa, até o ponto em que a água não é mais o fator limitante. Isto significa que para uma determinada cultura em particular, em uma certa localidade, uma maior produção de biomassa requer um maior consumo de água pelas plantas. Observa-se que essa linearidade é observada apenas para a “transpiração” das plantas e não para a “evapotranspiração” das plantas.

Com base nos experimentos que o autor tem conduzido na Esalq/USP, relacionados ao consumo hídrico de diferentes variedades de cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento, comprovou-se essa linearidade de resposta entre a produtividade de colmos e a transpiração da cana-de-açúcar (COELHO *et al.*, 2019). Nota-se também, que o melhoramento genético desta cultura nas últimas décadas, promoveu uma maior eficiência no uso da água com base no aumento do índice de colheita (kg açúcar / kg biomassa total produzida). Observou-se que o melhoramento genético alterou significativamente o nível transpiração das plantas, de maneira tal, que diferentes variedades apresentam diferentes volumes de água transpirados por unidade de área, o que resulta em diferentes quantidades de biomassa produzida por unidade de área num mesmo ambiente de produção. Por outro lado, o consumo hídrico transpirado por unidade de matéria seca produzida pelas diferentes variedades de cana-de-açúcar é praticamente constante para uma mesma condição climática, algo intrínseco ao processo de fotossíntese e do *deficit* de pressão de vapor da atmosfera no local considerado.

1.8 Fotossíntese: plantas C₃ e C₄

As plantas precisam abrir os estômatos para capturar o CO₂ da atmosfera cujo carbono é a matéria prima principal da biomassa vegetal (42% base peso seco), durante este processo, perde água para a atmosfera através da transpiração, o que promove o resfriamento das folhas (calor latente de vaporização), mantendo a temperatura celular em níveis adequados para a fotossíntese.

A eficiência do uso da água em termos de matéria seca produzida é diferente entre as plantas de ciclos C₃ e C₄ de fotossíntese. As plantas do ciclo C₃ são menos eficientes no uso da água no processo fotossintético do que as plantas C₄. Em um mesmo ambiente agrícola, as plantas C₃ mantem a condutância estomática em nível mais elevado e por maior tempo, para conseguirem sintetizar uma mesma unidade de biomassa que uma planta C₄, desta maneira transpiram mais água para a atmosfera. As plantas C₄ possuem propriedades especiais anatômicas e bioquímicas que as tornam mais eficientes no uso da água, quando comparadas às plantas C₃, por serem mais rápidas e por realizarem fotossíntese com níveis de CO₂ inferiores no mesófilo foliar, requerendo um menor tempo e uma menor intensidade de abertura dos estômatos para o ambiente.

As variedades de cana-de-açúcar que através de uma menor transpiração “poupam a água do solo” são normalmente mais resistentes aos períodos de estresse hídrico, pois adotam a tática de evitar o estresse hídrico e não de resistir ao estresse hídrico, já as variedades de cana que apresentam um enraizamento mais profundo no solo, proporcionam uma maior disponibilidade de água verde para as plantas (CAD), diminuindo a necessidade de irrigação.

No decorrer da Revolução Verde os índices de colheita (biomassa de interesse comercial por biomassa total aérea produzida) das culturas de arroz, trigo e milho passaram de valores iniciais de 30 % para valores atuais entre 40 e 60 % (MANN, 1999). Este incremento no índice de colheita aumentou consideravelmente a produtividade da terra e simultaneamente a produtividade da água (eficiência do uso da água).

Fisiologistas vegetais estudam a vários anos, a possibilidade de fazerem com que as plantas controlem o fechamento estomático de maneira mais precisa, pois algumas vezes os estômatos são mantidos abertos por um período mais prolongado do que o necessário para a captura do CO₂ atmosférico essencial à fotossíntese, o que faz com que a planta perca água

para o ambiente sem nenhum ganho de biomassa. Fazendo com que os estômatos se fechem mais rapidamente, a transpiração da planta seria reduzida sem nenhum prejuízo à produtividade. Esta tecnologia baseia-se na aplicação de agentes antitranspirantes (ex. ácido abscísico); até o presente momento, o uso desta tecnologia ainda não é viável do ponto de vista operacional e econômico.

Outros pesquisadores depositam suas esperanças em aumentar a eficiência bioquímica do processo fotossintético; este desafio é enorme, visto que os processos de fotossíntese como se conhecem hoje, permanecem essencialmente inalterados por milhões de anos. Vislumbra-se inicialmente a possibilidade de manipulação da enzima Rubisco associada ao processo bioquímico fotossintético em plantas C_3 , como a primeira tentativa nesta direção. Outros trabalhos nesta área, focam na aplicação de aminoácidos e compostos orgânicos vegetais tipos bioestimulantes e promotores de resistência a estresses bióticos e abióticos, assim como, na inoculação das sementes com determinados tipos de fungos, que auxiliem o sistema radicular das plantas na absorção de nutrientes e de água do solo, em condições mais extremas de disponibilidade.

1.9 Implementação da revolução azul

Será que os agricultores estarão dispostos a dedicarem tempo no aprendizado, recursos financeiros e esforços na implementação das tecnologias da Revolução Azul? Sem um ganho econômico ou benefício direto aos agricultores, a adoção destas tecnologias será lenta e restrita aos produtos agrícolas comercializados em mercados certificados mais exigentes em termos ambientais.

Nos Estados Unidos, parte significativa dos jovens demonstram pouco interesse em suceder seus pais nas atividades agrícolas das fazendas: consideram-se herdeiros, mas não sucessores. A idade média do agricultor americano atual é de aproximadamente 60 anos. A baixa atratividade em se tornar um agricultor deve-se em grande parte ao trabalho intensivo no campo, à baixa remuneração, comparado às alternativas profissionais que a vida urbana oferece e à elevada necessidade de capital para compra de terras e equipamentos. A opção por arrendar terras aos grandes conglomerados agrícolas é uma nova realidade dessa crise sucessória no campo da agricultura americana.

No Brasil, a fase áurea vivida pelo agronegócio até os dias de hoje, tem atraído diversos jovens para atuarem profissionalmente no meio rural, em função da elevada empregabilidade na área e ótimas perspectivas futuras em território nacional. Os empresários agrícolas brasileiros possuem tradição em contratarem profissionais para trabalharem em suas fazendas, cabendo a eles a função de gestores de suas propriedades e não de operadores de máquinas agrícolas como nos EUA. As alternativas profissionais fora do agronegócio que a vida urbana oferece aos jovens brasileiros, são bem menos atrativas, quando comparada às oportunidades de trabalho urbano em território americano.

Uma ferramenta estratégica da "extensão rural" para o aumento da produtividade da terra e da água é o melhoramento genético das plantas. Ao se incorporar no material genético as características (*traits*) mais propícias ao potencial de produtividade, basta o agricultor ter acesso a esta tecnologia que a transferência de conhecimento é automática, pois ela encontra-se encapsulada no material genético das plantas. Em função desta particularidade, o melhoramento genético na agricultura apresenta um enorme potencial de mercado, sendo que diversas empresas multinacionais atuam neste segmento de negócio.

Tecnologias de manejo de irrigação que promovam uma maior eficiência na aplicação de água não podem ser incorporadas diretamente ao material genético das plantas, elas dependem da interação com o ser humano, pois são intensivas no uso de informação. Estas tecnologias são bem mais difíceis de serem implementadas a nível de campo, absorvendo

esforços consideráveis dos serviços de “extensão rural” e das empresas de consultoria que exploram este segmento de mercado, o que dificulta sua implementação em larga escala, não despertando interesse comercial de empresas multinacionais de grande porte, sendo negócios explorados por pequenas e médias empresas, com faturamentos anuais bem mais modestos.

Destaca-se no Brasil, o surgimento de empresas de consultorias focadas na prestação de serviços em manejo de irrigação nos últimos 15 anos. Estas empresas atuam basicamente no manejo da irrigação por pivô central, com base em métodos climatológicos de balanço hídrico, estações meteorológicas automatizadas, coeficientes de cultura e softwares nacionais de gerenciamento da irrigação.

Observa-se um movimento destas empresas de consultoria em manejo da irrigação em incorporarem em seus protocolos técnicos de atuação, a instalação de sensores de umidade do solo nas áreas irrigada, para aferirem os coeficientes de cultivos utilizados em seus balanços hídricos, por exigência de uma maior precisão no manejo da irrigação por parte de seus clientes mais tecnificados.

Destacam-se entre os sensores de umidade do solo, os tensiômetros, as sondas TDR e a sondas de capacitância FDR. Os tensiômetros são os equipamentos mais sensíveis e confiáveis na faixa úmida do solo, entre potenciais matriciais entre -1 a - 50 kPa, sendo mais indicados para a irrigação plena em áreas de irrigação por gotejamento (maior precisão em umidades do solo próximas da capacidade de campo). Por outro lado, as sondas TDR e FDR indicam com precisão potenciais matriciais no solo mais baixos, entre -33 a -100 kPa, quando calibradas adequadamente em laboratório com amostras de solo, sendo indicados para a irrigação plena e por *deficit* em sistemas de aspersão do tipo pivô central, autopropelido, convencional e no monitoramento de áreas de sequeiro.

A indústria nacional de sensores de umidade do solo tem feito progressos significativos, nos últimos 15 anos, disponibilizando equipamentos de qualidade a preços competitivos. Algumas destas empresas disponibilizam *know-how* e *know-why* mais avançados em termos de calibração de sensores capacitivos (Figura 5), laboratórios para determinação de curvas de retenção de água no solo e sistemas automáticos de aquisição de dados integrados em plataformas “*cloud*”, de modo tal, a suprirem a demanda por serviços mais especializados em agricultura digital - IoT (*Internet of Things*).

Recentemente, um trabalho de pesquisa conduzido em Nebraska (SHARMA; IRMAK; KUKAL, 2021), analisou nove sensores de umidade do solo (sondas TDR e FDR), mostrando que a adequação dos sensores pode diferir quando diferentes métricas são empregadas. Os resultados apresentados enfatizam a necessidade de calibração e de avaliação desses sensores de umidade do solo, com base em critérios práticos e orientados para a aplicação de manejo da irrigação. A classificação da eficácia dos sensores e a incerteza associadas ao seu uso, permitiram identificar os melhores sensores para o manejo da irrigação.

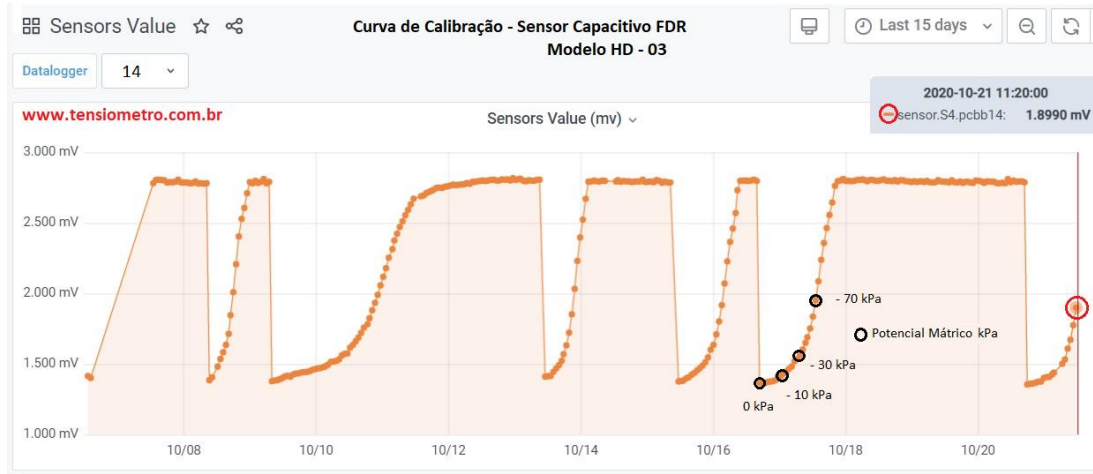


Figura 5. Curva de calibração de sensor capacitivo tipo FDR, em função do sinal de saída (volts) e do potencial mátrico da água no solo via IoT/LORA (Empresa Hidrodinâmica Irrigação).

Em nível mundial observa-se o surgimento de diversas plataformas de manejo da irrigação que estão competindo com as empresas nacionais. Nos últimos 2 anos, a maioria das empresas de consultoria em manejo da irrigação, incorporaram ferramentas de sensoriamento remoto, para monitoramento destas áreas irrigadas, de modo a identificar com base em imagens de satélites, problemas de uniformidade de irrigação em equipamentos pivô central (padrões circulares) e alterações abruptas nos índices vegetativos do dossel das plantas, de modo remoto, em grandes áreas e em tempo real (inteligência artificial).

As alternativas para contribuir com a Revolução Azul no médio e no longo prazo já foram apresentadas anteriormente, porém no curto prazo, como pode-se aumentar a eficiência do uso da água na agricultura, aumentar a rentabilidade do agricultor e contribuir para a redução do efeito estufa simultaneamente?

Deve-se analisar duas tecnologias ainda não mencionadas, que são as únicas restantes a serem exploradas neste contexto: Bioenergia e Irrigação de Precisão.

1.10 O milagre azul da bioenergia

Os resíduos vegetais que ficam sobre o solo, representam em torno de 45 a 60 % da biomassa seca aérea que não é colhida nos tradicionais cultivos agrícolas. Esta biomassa que já foi produzida pelo agricultor e que já consumiu água por evapotranspiração, é deixada sobre o solo para se decompor por ação dos micro-organismos. Parte desta matéria orgânica é benéfica à fertilidade do solo, sendo que em torno de 5 - 7 t ha⁻¹ de matéria seca devem ser deixadas sobre do terreno, o restante se não colhido, será usado como "consumo de luxo" pela microbiologia do solo.

Ao se coletar do campo parte desta biomassa vegetal para fins energéticos, aumenta-se extraordinariamente o índice de colheita dos cultivos no campo (80 a 90 %), e automaticamente dá-se um salto enorme na eficiência do uso da água na agricultura, o que pode ser considerado o "milagre azul da bioenergia 2G". Na Figura 6, observa-se este aumento da produtividade da água na cultura de cana-de-açúcar (litros de etanol por m³ de água transpirada) para diferentes variedades (V₁...V₅), em função do nível de irrigação (50, 75, 75 e 100 %), para as diferentes tecnologias de produção de etanol: 1G, 2G (celulose) e 2G (hemicelulose) (SANTOS *et al.*, 2019).

A transformação da biomassa em energia pode ser feita através de diferentes tecnologias, dentre as quais se destacam: a queima direta em caldeiras, o gás metano, a

hidrólise, a pirólise e a gaseificação. A queima direta da biomassa e a produção de gás metano já são bem conhecidas e utilizadas em larga escala no mundo, por outro lado a hidrólise enzimática (etanol 2G), a pirólise e a gaseificação da matéria (syngas), embora já comprovadas em escala piloto ainda estão passando pelo processo de "up scaling" industrial.

A queima direta da biomassa apresenta um rendimento termodinâmico baixo entre 12 e 18%, sendo que a gaseificação da matéria é o extremo de eficiência termodinâmica, com até 45% de rendimento, ou seja, se as usinas no Brasil tivessem acesso à tecnologia da gaseificação, poderia ser gerado 3 vezes mais bioeletricidade, com a mesma quantidade de biomassa de bagaço utilizada atualmente na queima direta. A cogeração de energia elétrica nas usinas de cana-de-açúcar do Brasil por queima direta nas caldeiras, abastece aproximadamente 10 milhões de residências no Brasil (2014).

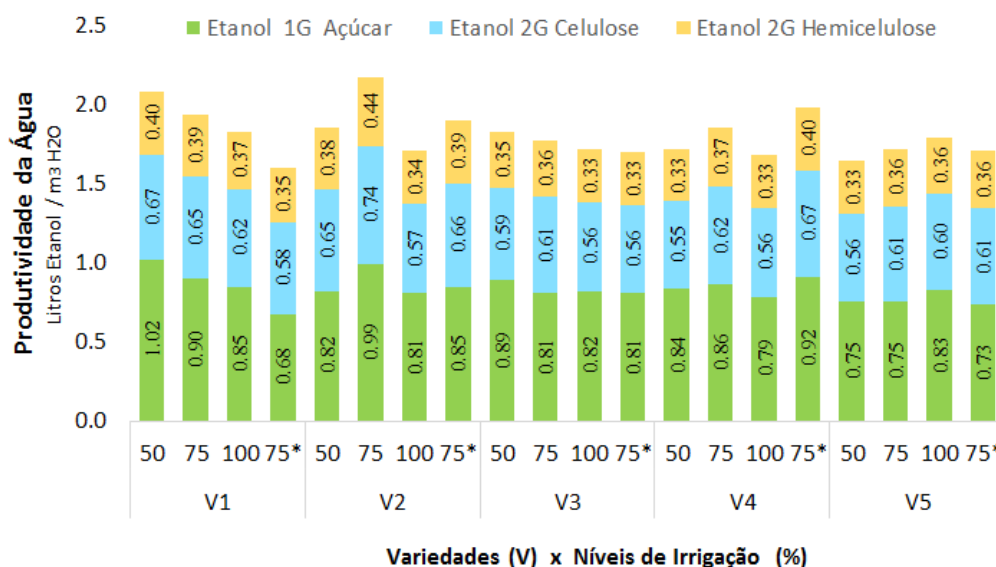


Figura 6. Produtividade da água na produção de etanol a partir de cana-de-açúcar, para diferentes níveis tecnológicos (1G, 2G_C, 2G_H) em função das variedades e níveis de irrigação (SANTOS *et al.*, 2019).

O etanol 1G a partir da sacarose da cana-de-açúcar, possui barreiras alfandegárias para comercialização no mundo, pois além de beneficiar somente poucos países produtores (a cana não é plantada em países desenvolvidos de clima temperado), ele ainda gera controvérsias na competição por terra e água com a produção de alimentos. Por outro lado, o etanol 2G é amplamente aceito no mundo, sendo que a União Europeia e os Estados Unidos possuem incentivos fiscais para sua produção nacional e importação, visando o desenvolvimento desta indústria mitigadora da emissão de CO₂ a nível mundial.

Nos últimos 5 anos, o etanol de 2G começou suas operações industriais em diversos países do mundo inclusive no Brasil, com o pioneirismo das Empresas Raízen (Shell) e GranBio, que iniciaram suas operações industriais em 2014, com o apoio tecnológico da empresa dinamarquesa Novozyme.

Estima-se que possa ser recolhido entre 5 a 10 t ha⁻¹ de biomassa seca de resíduos agrícolas para ser usado na geração de bioenergia; desta maneira se atingirá em torno de 80 a 90 % do índice de colheita. Em termos monetários, calcula-se que o valor a ser recebido pelo agricultor estará em escala mundial entre US\$ 25,00 a US\$ 60,00 por tonelada de biomassa enfardada entregue na indústria, isto representa aproximadamente US\$ 150,00 a US\$ 600,00 por hectare de renda bruta, que se descontados os custos de colheita e transporte, entre US\$ 50,00 e US\$ 150 por ha, resultará em uma renda líquida ao agricultor variando de

US\$ 75,00 a US\$450,00 por ha, além do incremento significativo de produtividade da água nestas áreas.

Uma tonelada de biomassa seca produz por hidrólise enzimática, aproximadamente 250 litros de etanol 2G, o que em valores atuais de mercado pago pelo consumidor final representa US\$125,00 por tonelada. A empresa GranBio em Alagoas tem pago ao produtor, em torno de US\$ 25,00 por tonelada de biomassa de palha entregue na usina. Considerando que a GranBio receberá 50 % do valor do etanol pago na bomba de combustível (US\$ 62,50), frente ao custo de US\$ 25,00 da biomassa pago ao agricultor, restará um valor de US\$ 37,50 por tonelada para remuneração do processo industrial e do investimento. Para enfardar cada tonelada de biomassa no campo, gasta-se em média 600 ml de diesel com o maquinário, sendo que o custo de amarrar este fardo (corda de nylon) situa-se em torno de US\$ 0,70.

A Usina Zilor de Lençóis Paulista-SP, tem sido pioneira na cogeração de energia elétrica a partir da palha recolhida em áreas de cana sob regime de parceria de plantio. O valor pago atualmente por tonelada de biomassa gira em torno de R\$ 130,00 pela palha triturada e R\$ 100,00 pela não triturada (umidade até 14% e impureza mineral até 4%). Atualmente 8 parceiros são fornecedores de biomassa enfardada para esta empresa.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos apresentou em 2005, um estudo denominado "*Billion Ton*", cujo objetivo foi determinar se as terras agrícolas dos EUA seriam capazes de fornecer biomassa vegetal suficiente para substituir pelo menos 30 % do consumo de petróleo, de modo a diminuir a emissão de carbono para a atmosfera provenientes dos combustíveis fósseis (PERLACK, 2005). Este estudo concluiu que já existem 1,3 bilhões de toneladas de biomassa disponíveis anualmente como resíduos de culturas agrícolas e florestais sobre o solo americano, sendo que quantidades complementares podem ser obtidas, com o cultivo de culturas energéticas específicas para esta finalidade. Neste estudo, sendo o valor do barril de petróleo US\$ 23,00 e o valor da biomassa US\$ 60,00 / tonelada, ambas as tecnologias apresentam o mesmo custo por unidade de energia US\$ 4,00 GJ⁻¹. No ano de 2011 foi lançado uma extensão deste trabalho denominado de "*Billion Ton Update*".

No final de 2007, o Departamento de Energia dos EUA (DOE), anunciou um financiamento inicial de 780 milhões de dólares por um período de 10 anos, para a criação de três Centros de Pesquisa em Bioenergia (BRCS) em território americano: (i) *Joint BioEnergy Institute* (JBEI), liderado por Lawrence Berkeley Laboratório, (ii) *Great Lakes Bioenergy Research Center* (GLBRC), liderado pelas Universidade de Wisconsin e Universidade Estadual de Michigan, e (iii) *Bioenergy Science Center* (BESC) liderado pelo *Oak Ridge National Laboratory*. A missão destes laboratórios é desenvolver abordagens científicas e de engenharia, juntamente com tecnologias de apoio, que estarão na base de conversão biomassa lignocelulósica em combustíveis líquidos de transporte.

Nos últimos 13 anos estes 3 centros de pesquisas tem desenvolvido trabalhos nas seguintes áreas do conhecimento: genômica, biologia microbiana, biologia vegetal, genética, proteômica, fisiologia, bioquímica estrutural, biologia computacional, bioinformática, engenharia agrícola e engenharia industrial, sendo que as linhas de pesquisas são: (i) produção e logística de biomassa com ênfase na sustentabilidade, (ii) otimização de culturas de bioenergia, (iii) a desconstrução da biomassa, e (iv) conversão de biomassa em combustíveis. O desafio final deste investimento é traduzir a ciência básica desenvolvida ao longo dos anos, em tecnologia robusta que possa ser aplicado à indústria.

Por outro lado, na Europa, o desenvolvimento de indústria de biocombustíveis é incentivado pela *7th Framework Programme* e pela *European Biofuels Technology Platform* (FIORESE *et al.*, 2012). O orçamento de pesquisa e desenvolvimento voltada à bioenergia (líquida, sólida e gás) tem oscilado entre 300 e 450 milhões de dólares anuais divididos em vários países do bloco, sendo que os biocombustíveis líquidos ficam com aproximadamente 35 % destes recursos (160 milhões de dólares). Observa-se que o investimento anual em

pesquisas voltadas à bioenergia da Comunidade Europeia é aproximadamente 4 vezes maior do que o investimento anual americano.

Na Europa a preocupação maior dos tomadores de decisão é assegurar uma coordenação de esforços dentro dos diversos países do bloco, a fim de que os biocombustíveis avançados (2G) tornem-se uma opção comercial, atingindo as metas estabelecidas pela Comissão Europeia. O foco principal desta estratégia é o investimento em pesquisa e desenvolvimento.

Analisando o investimento em pesquisas de biocombustíveis 2G no Brasil, estima-se um desembolso aproximado de 10 milhões de dólares anuais por parte da FAPESP (BIOEN), CNPq e FINEP. Esse baixo nível de investimento nacional em pesquisa, explica o fato de que o etanol de 2G implantado no Brasil (Raízen e Granbio) está se dando com o apoio tecnológico de empresas estrangeiras.

A operação das usinas 2G no Brasil encontram-se atualmente em fase de ajuste dos processos industriais. O maior problema até o momento, tem sido o teor de impurezas minerais (partículas de solo) presente na biomassa, que tem promovido o desgaste prematuro de importantes equipamentos no processamento desse material, ocasionando menor eficiência industrial do que previsto em projeto, por necessidade de paradas frequentes para manutenção.

No Congresso da ASABE (*American Society of Agricultural and Biosystems Engineering*), realizado na cidade de New Orleans em 2015, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) pela primeira vez, esteve presente de maneira institucional no encontro, sendo que a temática principal do evento girou em torno da Bioenergia. A palestra de abertura do *Bioenergy Focus Day* foi proferida pelo Prof. Rob Anex da Universidade de Wisconsin e intitulou-se: *The Bioenergy Water Nexus*, destacando a importância da água dentro da questão da bioenergia.

A divisão de Bioenergia do DOE tem desenvolvido estudos sobre a implantação das biorefinarias em território americano, em função do tamanho e do posicionamento das operações industriais frente à logística de recolhimento dos resíduos vegetais nas fazendas. Atenção especial está sendo dada ao aumento do tráfego de caminhões nas estradas e ferrovias, o que requer um estudo mais detalhado da infraestrutura local.

Um dos pontos críticos identificados no processo é a etapa de recolhimento da palhada no campo, uma vez que o maquinário é adaptado da produção de feno a partir de plantas forrageiras. Visando diminuir as impurezas nos fardos e aumentar a durabilidade do maquinário, o ideal seria que no momento de colheita do produto agrícola, os resíduos vegetais não fossem lançados sobre o terreno, mas diretamente para o processo de enfardamento, porém a questão a umidade do material é limitante. O DOE solicitou à ASABE esforços da sociedade para desenvolvimento deste tipo de maquinário.

A seguir será analisada a outra alternativa tecnológica remanescente para contribuir com a Revolução Azul no curto prazo, visando aumentar a eficiência do uso da água na agricultura: a Irrigação de Precisão.

1.11 Irrigação de precisão

A Agricultura de Precisão (AP) foi inicialmente definida como: “aplicar o tratamento adequado, no local correto, no momento certo”; após vinte e cinco anos desde o início da implantação desta tecnologia no campo, observa-se que o conceito evoluiu para uma direção bem diferente da original: “um sistema de aproximação para manejar solos e cultivos agrícolas de modo a reduzir as incertezas de decisão, através de um melhor entendimento da

variabilidade espacial e temporal do ambiente de produção” (DOBERMANN *et al.*, 2004; GEBBERS; ADAMCHUCK, 2010).

Diversas são as ferramentas utilizadas na agricultura de precisão: (i) mapeamento de colheita, (ii) orientação autônoma de máquinas no campo, (iii) tráfego controlado, (iv) amostragem georeferenciada, (v) sensoriamento remoto, e (vi) aplicação de insumos a taxa variável: sementes, água, corretivos, adubos, herbicidas, inseticidas e fungicidas.

A Irrigação de Precisão engloba todas as tecnologias da agricultura de precisão de sequeiro mais a aplicação de irrigação em taxa variável no campo. Atualmente este tipo de tecnologia é aplicada nos equipamentos de irrigação pressurizada dos tipos pivô central e localizada (gotejamento e microaspersão), sendo que a economia de água relatada com o uso desta tecnologia é variável entre 5 a 30%, dependendo da desuniformidade das plantas no campo, o que contribui para o aumento da eficiência do uso da água pelas culturas.

Existem algumas evidências científicas de que a Irrigação de Precisão pode reduzir a degradação ambiental, reduzindo a lixiviação de nitrato no solo para as águas subterrâneas, diminuindo os problemas de erosão no campo e reduzindo o uso de energia no bombeamento de água e nas operações agrícolas mecanizadas; porém estudos detalhados e a quantificação ambiental destes benefícios são incipientes na literatura.

De maneira geral, considera-se a Agricultura de Precisão (AP) uma tecnologia estratégica da agricultura do futuro. A questão em aberto atualmente é quais ferramentas serão adotadas e em que velocidade serão implementadas? É fato notório que a adoção da AP pelos agricultores está atrasada com relação às expectativas iniciais (GRIFFIN *et al.*, 2010; REICHARDT; JURGENS, 2009; MANDEL *et al.*, 2011).

Em aproximadamente 40% de um total de 108 estudos nos EUA, as tecnologias de agricultura de precisão não proporcionaram as vantagens esperadas (LAMBERT; LOWENBERG-DEBOER, 2000) sendo que em 60% dos casos apontados como lucrativos, custos importantes foram omitidos das análises econômicas apresentadas, como por exemplo: custos de amostragem de solo em grid, análise de dados, treinamento e consultoria especializada; somente 3 destes estudos foram publicados em periódicos científicos.

As maiores restrições na adoção da AP são a complexidade da tecnologia, o custo dos equipamentos e *softwares*, o tempo de aprendizado da tecnologia básica, a falta de recomendação técnica com embasamento científico sólido e conseqüentemente a imprevisibilidade da lucratividade proporcionada (ROBERTSON *et al.*, 2012).

As sementes transgênicas foram introduzidas no mercado agrícola na mesma época que as tecnologias da agricultura de precisão (1995), atualmente o nível de adoção das sementes transgênicas pelos agricultores de milho e soja é de 40 e 80% respectivamente, muito superior à adoção das tecnologias de AP (<15%). Diferentemente das sementes cuja tecnologia está embutida no DNA das plantas, a *Agricultura de Precisão* requer em contrapartida um conhecimento tecnológico e gerenciamento de informação avançado por parte dos agricultores e de seus colaboradores.

As ferramentas de maior sucesso da Agricultura de Precisão nas grandes culturas agrícolas (soja, milho, algodão e cana) são aquelas consideradas mais simples do ponto de vista operacional e que não requerem intervenção humana: (i) a orientação autônoma de maquinário no campo (GPS/piloto automático), tornando o trabalho dos operadores mais eficiente, (ii) o tráfego controlado na área que minimiza a compactação do terreno, (iii) mapeamento de colheita e (iv) aplicação localizada de herbicidas (on/off) nas ervas daninhas no campo (JOINT RESEARCH CENTER OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2014).

A aplicação de insumos a taxa variável (VRT) em área total (água, corretivos, adubos, etc.) ainda não é dominada plenamente em nenhuma cultura. O diagnóstico preciso do que

está causando a variabilidade das plantas no campo requer a quantificação de uma série de parâmetros, sendo que em diversas situações o “custo do diagnóstico de precisão” é superior ao “benefício da aplicação de precisão (taxa variável)”.

A aplicação de insumos em taxa variável na irrigação (Fertirrigação VRT) depende de uma base científica sólida para que as recomendações sejam mais assertivas. A complexidade de um sistema biológico na maioria dos casos não se resume exclusivamente à uma única variável sendo aplicada em taxa variável. O conhecimento agrônômico no seu maior grau de entendimento, tem que estar codificado em um algoritmo de tomada de decisão.

Uma das maiores causas de quebra de safras na agricultura de sequeiro é o *deficit* hídrico no solo. Os parâmetros de física de solo como retenção de água e condutividade hidráulica, assim como, o aprofundamento radicular das plantas que definem a disponibilidade de água no solo (CAD) para as plantas, não possuem sensores proximais que possam quantificá-los de maneira barata e precisa na agricultura de precisão.

Em um trabalho conduzido por Monteiro (2015) sobre as causas da quebra de produtividade (*yield gap*) na cultura da cana-de-açúcar no Brasil, o *deficit* hídrico no solo foi responsável por aproximadamente 70 % da queda de produtividade observada para diferentes regiões e anos agrícolas analisados no Brasil, enquanto que as práticas de manejo adotadas nas usinas, foram responsáveis por apenas 30 % desta queda de produtividade (variedades, adubação, controle de pragas, plantas daninhas e espaçamento de plantio). Estas proporções entre quebra de safra por *deficit* hídrico e por erros de manejo, varia em função do nível tecnológico da agricultura de cada localidade considerada: em municípios com alta tecnologia de produção agrícola (Rio Verde, GO), a quebra de safra é na maior parte das vezes decorrente da deficiência hídrica no solo (96%), pois os erros de manejo na cultura são mínimos (4%), já em outras regiões menos tecnificadas (Campos, RJ), a quebra de safra por deficiência hídrica é de apenas 38% na média dos anos, sendo por erros de manejo a quebra de safra é em torno de 62%.

A tentativa de se correlacionar a condutividade elétrica do solo ou a constante dielétrica do meio (equipamentos Veris e) com a textura e a disponibilidade hídrica do solo (CAD), mostra-se limitada em várias situações de campo, pois é influenciada pelo tipo de solo (geologia), teor de umidade, teor de matéria orgânica e nível de salinidade da área.

Os modelos matemáticos de simulação do crescimento de plantas deverão trabalhar integrados à Agricultura de Precisão para que as recomendações de aplicação em taxa variável sejam mais precisas e eficientes. Dentre os modelos de simulação atualmente disponíveis, destacam-se duas plataformas: DSSAT, APSIM e AquaCrop. Estes modelos de simulação possuem uma base científica mecanística complexa e os dados de entrada podem ser rodados em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfico), sendo estes modelos sensíveis à disponibilidade hídrica e ao teor de nitrogênio no solo. Com relação às pragas, doenças e ervas daninhas nas culturas, os modelos não são responsivos a estas questões até o presente momento.

Estas plataformas de simulação do crescimento das plantas, definem os diferentes ambientes de produção encontrados no campo, levando em consideração as particularidades genéticas das variedades de cada cultura, assim como, as condições climáticas de cada região, as características químicas e as características físicas do solo (capacidade de água disponível - CAD).

Um exemplo clássico destes modelos de simulação é a resposta da cultura de milho aos adubos nitrogenados aplicados, em função da distribuição das chuvas e das irrigações em cada ano agrícola considerado, de tal modo que a recomendação de adubação não é um valor fixo baseado unicamente na análise química de solo (por exemplo: Boletim 100 IAC), mas sim

um valor variável, dependente da análise química de solo e da disponibilidade hídrica no solo durante o ciclo de cultivo (previsão de chuvas / irrigação).

A lucratividade da VRT é crítica para a adoção desta tecnologia pelos agricultores. Devido aos diversos fatores complexos envolvidos, a lucratividade da aplicação em taxa variável não é facilmente demonstrada em todos os cenários considerados (JOINT RESEARCH CENTER OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2014). Deve-se tomar cuidado para não se recomendar este tipo de tecnologia em áreas que não sejam responsivas (baixa variabilidade espacial). Os membros da comunidade europeia de AP decidiram se unir no desenvolvimento de um "*Precision Farming Calculator*" nos próximos anos, que permitirá identificar *a priori* as áreas de maior probabilidade de sucesso no uso desta tecnologia, provavelmente com base em imagens de satélites.

Outra recomendação da comunidade europeia de agricultura de precisão AP (JOINT RESEARCH CENTER OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2014) é que os trabalhos de pesquisas sejam conduzidos de maneira independente das empresas que comercializam equipamentos e prestam serviços nesta área de conhecimento, pois observa-se em diversos casos, uma influência tendenciosa em apresentar resultados mais promissores do que os realmente obtidos em campo, o que tem levado à recomendação indiscriminada desta tecnologia, mesmo em áreas não propícias ao retorno econômico.

Em um trabalho bastante detalhado sobre a viabilidade econômica de aplicação de adubos nitrogenados em taxa variável na Alemanha, Meyer-Aurich *et al.* (2008; 2010) obtiveram lucratividade variando entre 10 e 25 Euros por hectare. Contudo deve-se ter cautela com relação a estes números, uma vez que diversos estudos econômicos de longo prazo, não apresentam significância estatística favorável à aplicação em taxa variável de nitrogênio (BOYER *et al.*, 2011). Outros estudos (LIU *et al.*, 2006; ANSELIN *et al.*, 2004) apresentam valores de lucratividade abaixo de 8 Euros por hectare, enquanto que na Dinamarca (OLESON *et al.*, 2004) não foi demonstrado viabilidade econômica da agricultura de precisão para VRT na aplicação de nitrogênio.

A possível explicação para o pequeno benefício de VRT na adubação, pode ser a pequena inclinação da curva de resposta próxima ao ponto ótimo que a agricultura mais tecnificada já se encontra; devido ao fato de a taxa de aplicação já estar próxima da máxima produtividade, o efeito observado de incremento de produtividade com base na variação da dose de adubo é apenas marginal (PANNELL, 2006).

Para a cultura do trigo na Inglaterra, o benefício econômico do piloto automático em máquinas agrícolas foi estimado e 2,2 Euros por hectare, enquanto que o tráfico controlado na área resultou em benefícios em torno de 20 Euros por hectare (KNIGHT *et al.*, 2009).

1.12 Agricultura aérea de precisão em áreas irrigadas

A Agricultura Aérea de Precisão (sensoriamento remoto e drones) é considerada a ferramenta de diagnóstico espacial, mais econômica, rápida e precisa que se tem disponível atualmente (RADOGLU-GRAMMATIKIS *et al.*, 2020). As imagens de sensoriamento remoto são empregadas inicialmente na varredura em macro escala da área de interesse, identificando áreas uniformes e apontado as zonas com maior desuniformidade. Posteriormente, sobrevoos com drones em altitudes mais baixas, e a obtenção de imagens de alta resolução convencionais, termais e multiespectrais, possibilitam o diagnóstico mais preciso desta variabilidade espacial, cuja causa deverá ser confirmada com base em amostragens de plantas e de solo em locais específicos selecionados dentro da área de interesse.

Se o diagnóstico da variabilidade for devido à compactação de solo ou a presença de nematoides na área, a recomendação ideal seria não aumentar a aplicação de adubos e nem água nestas áreas problemáticas, pois não haveria resposta das plantas, correndo o risco de

perda de nitrogênio por desnitrificação. Se o diagnóstico da variabilidade espacial for a baixa fertilidade do solo, a aplicação de fertilizantes na área é recomendada, somente se houver previsão de umidade favorável no solo dentro da janela de tempo ideal de correção para a cultura, em função da data de plantio e do estágio fenológico.

A Irrigação de Precisão está sendo orientada inicialmente pela Agricultura Aérea de Precisão, com base nos mapas de índices de vegetação NDVI, VDVI, SAVI, MSAVI, CWSI, etc., obtidos por imagens multiespectrais de sensoriamento remoto (*Landsat*: resolução de 30 x 30 m nas bandas convencionais e 100 x 100 m banda térmica e *Sentinel 1 e 2*) ou por imagens aéreas obtidas a partir de drones (resolução 3 x 3 cm) de tal modo que quanto maior o NDVI, maior será a lâmina de irrigação a ser aplicada, com base em um valor escalar multiplicativo definido pelo usuário, a ser considerado nas diferentes zonas de manejo consideradas. Esta estratégia de manejo não visa corrigir o problema da variabilidade das plantas no campo, apenas evitar o desperdício de água na irrigação.

A resolução destas imagens é bastante variável e o valor ideal depende do objetivo a ser focado. Satélites como o *Rapid Eye*, *Ikonos* e os recém lançados *WorldView3* e *PlanetLab* (2020), possuem melhor resolução espacial do NDVI, 5 x 5 m, 1 x 1 m e 0,3 x 0,3 m respectivamente, sendo suas imagens vendidas comercialmente.

A utilização de imagens térmicas (IVTer) obtidas a partir de drones, permite detectar se as plantas estão apresentando temperatura foliar mais elevada, o que seria um indicativo de stress hídrico nestas áreas, possibilitando o mapeamento da CAD do solo e da profundidade radicular simultaneamente na área. Por outro lado, imagens hiperespectrais possibilitam a quantificação do teor de clorofila e de carotenos destas plantas. Juntamente com validações de campo, estas imagens mais sofisticadas podem auxiliar na tomada de decisão mais racional sobre fertirrigação em taxa variável. Os algoritmos e softwares de como unir todas estas informações e oferecer uma recomendação em VRT de irrigação e adubação são complexos e estão em fase preliminar de desenvolvimento e validação em campo. O preço de aquisição destas câmeras está em torno de 20 a 200 mil dólares, o que inibe seu uso pelos agricultores no momento, sendo mais utilizadas em projetos de pesquisas.

O maior benefício econômico em agricultura aérea de precisão é relatado para a cultura da uva *Padthaway Shiraz*, visando a produção de vinho na Austrália (BRAMLEY *et al.*, 2005). O benefício econômico de se efetuar uma colheita seletiva na área com base no índice *PCD* (*plant cell density index*: relação da reflectância: *infrared/red*) calculado com base em imagens multiespectrais de alta resolução (drones), foi de US\$ 8.096,00 por hectare para a venda de uva mais padronizada e de US\$ 64.228,00 por hectare para a produção de vinho de maior qualidade, em uma área de 4,25 h. Observa-se neste caso, que não foi feita nenhuma aplicação de insumos a taxa variada, somente a colheita seletiva em função do "vigor" das plantas no campo; esta tecnologia de viticultura de precisão é uma das mais promissoras na área de agricultura de precisão, em função da altíssima rentabilidade por unidade de área na produção de vinho.

Os investimentos privados em pesquisas de novas tecnologias na agricultura no ano de 2019 nos EUA, foram de US\$ 4,70 bilhões, segundo o relatório americano da *AgFunder* (2020), divididos da seguinte maneira: (i) 23 % em Biotecnologia (genética animal e vegetal, microbiomas e bem estar animal); (ii) 20 % em Novidades de Sistemas de Cultivo (fazendas urbanas, psicultura, produção de insetos e algas); (iii) 19 % em *Softwares* para Gestão de Fazendas, Sensoriamento e IoT (dispositivos para captura de dados agrícolas, softwares para suporte à decisão e análise de banco de dados); (iv) 14% em Plataformas de Venda de Commodities Agrícolas (comércio e leasing de equipamentos); (v) 12 % em Bioenergia e Biomateriais (processamento de resíduos na fazenda, biodigestores anaeróbicos e produção de biomateriais); (vi) 4% em Plataformas de Vendas Direta da Fazenda (fazendeiros

comercializando seus produtos diretamente com os consumidores finais); (vii) 4 % em Robótica Agrícola e (viii) 3% Outras tecnologias.

A captura de dados agrícolas no campo foi dominada pelo sensoriamento remoto (satélites) e drones em 2019. Algumas *startups* de tecnologia de VANT tiraram o foco da agricultura, desanimados pela complexidade e desafio de criar valor para os agricultores a partir de seus produtos. Somente as empresas pioneiras em drones especializadas em áreas agrícolas, conseguiram recursos financeiros significativos de investidores para continuar seus desenvolvimentos em 2019: *PrecisionHawk* (softwares para análise de dados aéreos agrícolas) e *DroneDeploy* (novos negócios agrícolas).

Os investimentos em *startups* de robótica na agricultura ainda são surpreendentemente baixo no ano de 2020. Apresentam-se muitos conceitos futuristas nesta área do conhecimento, mas os investidores não estão dispostos a arriscarem em um mercado ainda não consolidado e incerto no curto prazo.

1.13 Considerações finais

O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de açúcar, citros, café, soja e carnes (bovina e frango) e *player* de destaque na produção de milho e algodão. Quando se analisa o potencial de produção da Agricultura Irrigada de alimentos, fibras e bioenergia em solo nacional, vislumbra-se o potencial agro-econômico que o país possui e que será incrementado ainda mais no futuro, em função da necessidade que o mundo tem da “água doce virtual” aqui disponível, vinculada aos produtos agrícolas que são exportados pelo agronegócio brasileiro.

A Engenharia de Irrigação no Brasil tem uma importante missão a cumprir na implantação e na operação de aproximadamente 60 milhões de ha a serem irrigados nas próximas décadas. O correto planejamento destes projetos e a primorosa gestão dos recursos hídricos, energéticos e ambientais envolvidos, serão os pilares de sustentação deste grande desafio no contexto da Revolução Azul.

A oportunidade de acesso aos melhores equipamentos de irrigação disponíveis no mercado mundial e a experiência acumulada na agricultura irrigada em diferentes países, coloca o Brasil em posição estratégica para liderar a Eficiência do Uso da Água na produção agrícola irrigada do século XXI.

É de responsabilidade das universidades brasileiras, através de seus cursos de Engenharia Agrônômica e de Engenharia Agrícola, em níveis de graduação e de pós-graduação, promover a qualificação dos recursos humanos necessários para dar suporte a esta empreitada.

Aos ombros dos pesquisadores e cientistas nas áreas de Engenharia de Irrigação e Engenharia de Água e Solo, recai a nobre missão de orientar os rumos dos “trilhos” a serem implantados no futuro, para que “as locomotivas e os vagões” da iniciativa privada e da extensão rural, desenvolvam os trabalhos necessários, para conduzir a agricultura irrigada brasileira ao apogeu da Revolução Azul.

Referências

ANSELIN, L.; BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. A spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. **American Journal of Agricultural Economics**, v.86, n.3, p.675-687, 2004.

ALMEIDA, A.N.; COELHO, R.D.; COSTA, J.O.; FARÍAS, A.J. Methodology for dimensioning of a center pivot irrigation system operating with dripper type emitter. **Engenharia Agrícola**, v.37, p.828-837, 2017.

- BHATIA, R.; CESTTI, R.; WINPENNY, J. Water conservation and reallocation: best practice cases in improving economic efficiency and environmental quality. Washington, DC., **World Bank Report**, 1995.
- BOYER, C.N.; WADE BORSEN, B.; SOLIE, J.B. Profitability of variable rate nitrogen application in wheat production, **Precision Agriculture**, v.12, p.473-487, 2011.
- BRAMLEY, R.G.V.; PROFFITT, A.P.B.; HINZE, C.J.; PEARSE, B.; HAMILTON, R.P. Generating benefits from precision viticulture through selective harvesting. In: STAFFORD, J.V. (Ed.) Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture. **Wageningen Academic Publishers**, The Netherlands, p.891-898, 2005.
- BUTZER, K.W. **Early hydraulic civilization in Egypt: a study in cultural ecology**. The University of Chicago Press 1976.
- COELHO, R.D. **Characterization of center pivot irrigation system (low energy precision application - LEPA) under reservoir tillage**. 236 p., 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.
- COELHO, R.D.; LIZCANO, J.V.; DA SILVA BARROS, T.H.; DA SILVA BARBOSA, F.; LEAL, D.P.V.; DA COSTA SANTOS, L.; RIBEIRO, N.L.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; MARTIN, D.L. Effect of water stress on renewable energy from sugarcane biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.103, p.399-407, 2019.
- COELHO, R.D.; MARTIN, D.L.; CHAUDHRY, F.H. Effect of LEPA irrigation on storage in implanted reservoirs. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.39, n.4, p.1287-1298, 1996.
- DOBERMANN, ACHIM; BLACKMORE, SIMON; COOK, SIMON; ADAMCHUK, VIACHESLAV. Precision Farming: Challenges and Future Directions. In: PAPER 4TH INTERNATIONAL CROP SCIENCE CONGRESS. Brisbane, Australia, 2004.
- IORESE, G.; CATENACCI, M.; VERDOLINI, E.; BOSETTI, V. **Advanced Biofuels: Future Perspectives from an Expert Elicitation Survey**. Fondazione Eni Enrico Mattei. Nota di Lavoro 67, 2012.
- GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. Precision agriculture and food security. **Science**, v.327, p.828-831, 2010.
- GERBENS-LEENES, W.; HOEKSTRA, A.Y. The Water Footprint of Sweeteners and Bio-ethanol. **Environmental International**, v.40, p. 202-211, 2012.
- GRIFFIN, T.; BONGIOVANNI, R.; LOWEBERG-DEBOER, J. Worldwide adoption of precision agriculture technology: The 2010 update, In: 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, July 18-21, Denver Colorado, 2010.
- HILLEL, D. **Rivers of Eden**. New York, Oxford University Press, 1994.
- HOEKSTRA, A.Y. Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, 12–13 December 2002, **Value of Water Research Report Series**, n.12, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands. Disponível em: [www.waterfootprint.org/Reports/ Report12.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf), 2003. Acesso em: 19 mar. 2021.
- HOEKSTRA, A.Y.; HUNG, P.Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. **Value of Water Research Report Series**, n. 11, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, Disponível em: [www. waterfootprint.org/Reports/ Report11.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report11.pdf). 2002. Acesso em: 19 mar. 2021.
- JOINT RESEARCH CENTER OF THE EUROPEAN COMMISSION. Precision Agriculture: An Opportunity for EU Farmers - Potential Support with the CAP 2014-2020. European Parliament. Policy Department B: Structural and Cohesion Policies. **Agricultural and Rural Development**, JCR, 2014.
- KISEKKA, I.; NGUYEN, G.; AGUILAR, J.P.; HOGERS, D.H. **Comparing mobile drip irrigation to low elevation spray application**, 2015. Disponível em: http://www.kwo.org/Projects/GovernorsConference2015/PowerPoints/Comparing_MDI_and_LESA_Governors_water_conference_revised-12-13-2015.pdf. Acesso em: 21 abr. 2016.

- KNIGHT, S.; MILLER, P.; ORSON, J. An up-to-date cost/benefit analysis of precision farming techniques to guide growers of cereals and oil seeds. **HGCA Research Review 2009**, n.71, p.115. 2009.
- LAMBERT, D.; LOWENBERG-DEBOER. **Precision Agriculture Profitability Review**. Purdue University West Lafayette, IN. 2000.
- LIU, Y.; SWINTON, S.M.; MILLER, N.R. Is site specific yield response consistent over time? Does it pay? **American Journal of Agricultural Economics**, v.88, p.471-483, 2006.
- MANDEL, R.; LAWES, R.; ROBERTSON, M. What's preventing growers from implementing precision agriculture? **Agribusiness Crop Updates**. Perth, 2011.
- MANN, C.C. Crop scientists seek a new revolution. **Science**, 15 Jan. 1999.
- MEKONNEN, M.M.; PAHLOW, M.; ALDAYA, M.M.; ZARATE, E.; HOEKSTRA, A.Y. Sustainability, efficiency and equitability of water consumption and pollution in Latin America and the Caribbean. **Sustainability**, v.7, n.2, p.2086-2112, 2015.
- MEYER-AURICH, A.; GANDORFER, M.; HEIBENHUBER, A. Economic analysis of precision farming technologies at the farm level: two German case studies. In: CASTALONGE, O.W. **Agricultural Systems: Economics, Technology and Diversity**, Hauppauge NY, USA: Nova Science Publishers, p.67-66, 2008.
- MEYER-AURICH, A.; WEERSINK, A.; GANDORFER, M. Optimal site-specific fertilization and harvesting strategies with respect to crop yield and quality response to nitrogen, **Agricultural Systems**, v.103, p.478-485, 2010.
- MONTEIRO, L.A. **Sugarcane yield gap in Brazil: a crop modelling approach**. 129p., 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
- MORGAN, R.M. Water and the land: a history of American irrigation. Fairfax, VA, **The Irrigation Association**, 1993.
- OLESON, J.E.; SORENSEN, P.; THOMSON, I.K. Integrated nitrogen input systems in Denmark. In: **Agriculture and nitrogen cycle**, Island Press, Washington, Covelo, London, p.129-140, 2004.
- PANNEL, D.J. Flat earth economics: the far-reaching consequences of flat payoff functions in economic decisions making. **Review of Agricultural Economics**, v.28, p.553-566, 2006.
- PERLACK, R.D.; STOKES, B.J. (Leads), ORNL/TM-2011/224. U.S. Department of Energy. U.S. Billion-Ton update: biomass supply for a bioenergy and bioproducts industry. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. 227p., 2011.
- PERLACK, R.D.; WRIGHT, L.L.; TURHOLLOW, A.F.; GRAHAM ROBIN, L.; STOKES, B.J.; ERBACH, D.C. ORNL/TM-2005. U.S. Department of Energy. U.S. Billion-Ton: Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a Billion-Ton Annual Supply. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. 60p., 2005.
- PONTING, C.A **Green history of the world**. New York; Penguin Books, 1991.
- POSTEL, S. Pillar of Sand. World Watch Books. Norton & Company, New York/London. 1999.
- RADOGLOU-GRAMMATIKIS, P. *et al.* **A compilation of UAV applications for precision agriculture**. Computer Networks, v.172, 2020.
- REICHARDT, M.; JURGENS, C. Adoption and future perspective of precision farming in Germany: Results of several surveys among different agricultural target groups. **Precision Agriculture**, v.10, n.1, p.73-94, 2009.
- ROBERTSON, M.J.; LIEWELLYN, MANDEL, R. Adoption of variable rate fertilizer application in the Australian grains industry. Status, issues and prospects. **Precision Agriculture**, v.13, n.2, p.181-199, 2012.
- SANTOS, L.C.; COELHO, R.D.; BARBOSA, F.S.; LEAL, D.P.V.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; BARROS, TIMÓTEO, H.S.; LIZCANO, J.V.; RIBEIRO, N.L. Influence of deficit irrigation on accumulation and

partitioning of sugarcane biomass under drip irrigation in commercial varieties. **Agricultural Water Management**, v.221, p.322-333, 2019.

SHARMA, K.; IRMAK, S.; KUKAL, M.S. Propagation of soil moisture sensing uncertainty into estimation of total soil water, evapotranspiration and irrigation decision-making. **Agricultural Water Management**, v.243, p.106-454, 2021.

SHIKLOMANOV, I.A. **Rise in irrigation water use**. Assessment of Water Resource and Water Availability in the World. State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia, 1996.

SPAVOREK, G.; DOURADO NETO, D.; BARRETO, A.; PAGANINI, S.; MAULE, R., ASSUNÇÃO, A.; REZENDE, L. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Projeto de Cooperação IICA/Ministério da Integração Nacional BRA 08/002, 2014.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrigation Science**, v.25, p.189-207, 2007.

STONE, I. **Canal Irrigation in British India**. Cambridge, U.K. Cambridge University Press, 1984.

WEISS, H. The Genesis and collapse of third millennium North Mesopotamian civilization, **Science**, 20 aug. 1993.

WILFORD, J.N. Collapse of Earliest Known Empire is Linked to Long, Harsh, Drought. **New York Times**, 24 ago. 1993.

WORSTER, D. **Rivers of the empire: water, aridity and the growth of the American west**. New York. Oxford University Press, 1985.

CAPÍTULO 2

2 PIVÔ CENTRAL: HISTÓRIA, MERCADO, TECNOLOGIA E FUTURO

Renato Silva

Resumo

O sistema de irrigação por pivô central tem uma longa trajetória de serviços prestados à agricultura brasileira e mundial, tornando-se o principal sistema de irrigação global. Sua história, do surgimento até os dias de hoje, está intimamente ligada à história da Empresa Valmont que, através da visão e liderança de Robert Daugherty, transformou um protótipo desenvolvido no estado de Nebraska, EUA, em um sistema mundial de irrigação.

No Brasil, foi somente nos últimos 20 anos que essa tecnologia abrangeu uma área superior a 1,4 milhões de ha, o que equivale a cerca de 21% da área irrigada brasileira em culturas intensivas e extensivas do norte ao sul do país, um mercado crescente e de alta tecnologia, dando suporte a uma agricultura irrigada sustentável. O pivô central, assim, se insere como uma resposta clara para a necessidade produtiva, em plataformas que tem como base quatro grandes pilares: o monitoramento/controle, previsão/planejamento, otimização/aplicação e, informações/análises.

Toda a tecnologia e avanço do sistema pivô central demanda uma rede de distribuição ampla e bem estruturada e processos de governança bem definidos envolvendo transparência, responsabilidade corporativa, equidade e prestação de contas. A tecnologia contribui de forma efetiva para a democratização da agricultura irrigada, permitindo que cada vez mais produtores tenham acesso à irrigação por pivô central, com sistemas que se adaptam a diversos tipos de solo e topografia.

Do ponto de vista da sustentabilidade dois pontos são avaliados, a importante definição da expansão da agricultura irrigada em áreas já utilizadas para agricultura de sequeiro e pastagens e, por outro lado, o uso de energia fotovoltaica em grande escala. O Brasil tem um potencial de expansão da agricultura irrigada em áreas de intensificação e sobre áreas de pastagem da ordem de 56 milhões de ha, representando um potencial efetivo de curto e médio prazo de 13,7 milhões de ha, cujo ritmo de expansão atual deveria, em média, dobrar para atingir estes valores em 2050, quando a FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2009a) estima ser necessário aumentar a produção mundial em pelo menos 60%.

Uma das grandes limitações no desenvolvimento da agricultura irrigada é a disponibilidade de energia. Nesse âmbito a energia solar tem se destacado como opção no mercado brasileiro. Frente a tudo isto, uma questão importante é o desenvolvimento de políticas públicas que possam incentivar o setor de irrigação à adoção desta fonte de energia limpa, renovável, eficiente e abundante.

2.1 Introdução

A agricultura irrigada brasileira avança de forma estruturada e sustentável nos últimos anos. O pivô central tem sido um importante sistema de suporte neste crescimento em função das suas características de aplicação de água que favorecem a eficiência com grande robustez e durabilidade.

O pivô central é um equipamento que caracteriza o principal sistema de irrigação por aspersão mecanizada e seu uso tem se expandido de forma significativa em função da sua operacionalidade e da qualidade da irrigação, destacando-se a uniformidade de distribuição

de água, o fácil controle da lâmina d'água aplicada, a grande versatilidade para as diversas condições de topografia e tipos de solo, o menor dispêndio de mão-de-obra e, também, as novas tecnologias incorporadas nos últimos anos, que garantem um controle total do sistema (BERNARDO *et al.*, 2019).

O pivô central é um sistema de irrigação que se movimenta de forma mecânica e sua composição é feita por uma linha lateral de aço com saídas para emissores. A linha lateral é suspensa por torres de sustentação com rodas na base de diâmetro variado em função do tamanho do equipamento. Este tipo de sistema de aspersão irriga uma área circular através da rotação da sua linha lateral em torno de um ponto fixo, denominado como 'ponto do pivô'. A lateral móvel pode se estender além da última torre; esta extensão é denominada 'lance em balanço' e, em algumas situações, pode ter um canhão final acoplado na sua extremidade. Para que o canhão final opere com maior eficiência é comum à instalação de uma bomba de apoio (*booster*) para a elevação da pressão de saída da água a ser aplicada pelo canhão final. (COLOMBO, 2003).

Na Figura 1 a seguir, apresenta-se uma vista lateral de um sistema implantado e, na Figura 2, uma vista superior de uma fazenda irrigada com o sistema pivô central.



Figura 1. Vista lateral de um sistema de irrigação do tipo pivô central.

Um dos principais levantamentos de expansão da área irrigada no Brasil por todos os sistemas de irrigação e em especial do pivô central é feito pela Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação da CSEI/Abimaq (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTO, 2021). No último levantamento do período de 2000-2020, o total de área irrigada pelo sistema pivô central é estimado em 1,42 milhões de ha, o que quando somado às áreas já existentes antes deste período, está em consonância com os resultados do estudo da Embrapa (GUIMARÃES; LANDAU, 2020) que, utilizando sensoriamento remoto obteve um resultado total de 1,6 milhão de hectares com pivô central no País.

Nas Figuras 3 e 4, apresenta-se a evolução da expansão anual da área irrigada por pivô central assim como a evolução da expansão anual acumulada no Brasil.



Figura 2. Vista geral de área irrigada por pivô central.

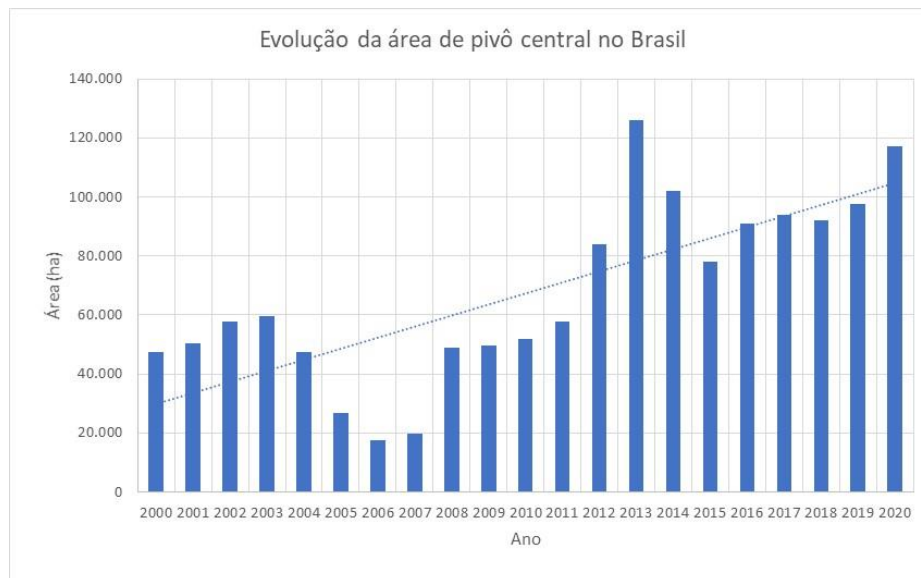


Figura 3. Evolução anual de expansão anual da área irrigada por pivô central no período de 2000 a 2020 e a evolução da taxa média (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTO, 2021).

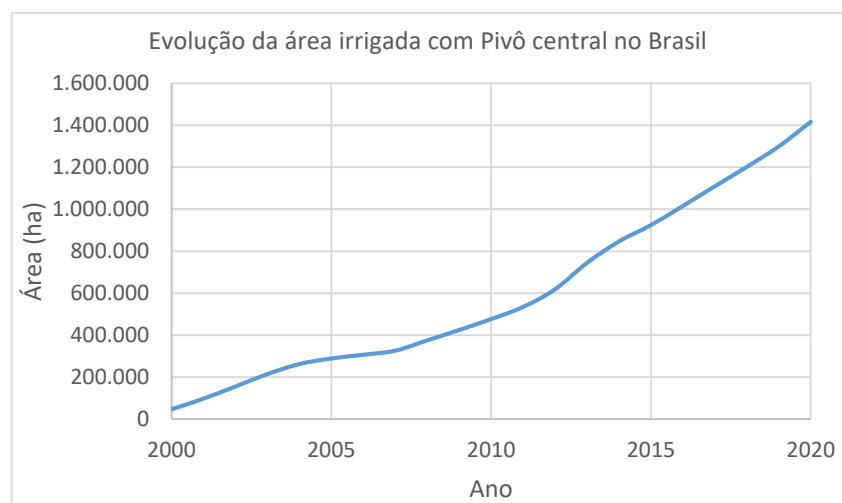


Figura 4. Evolução anual acumulada de expansão anual da área irrigada por pivô central no período de 2000 a 2020 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTO, 2021).

2.2 História

Platão, na Grécia Antiga, afirmava que “a necessidade é a mãe da invenção”. A história do pivô central mostra como a criatividade humana agiu para resolver problemas por meio da inovação e da tecnologia.

A história do desenvolvimento do sistema pivô central, remonta ao estado do Nebraska, centro-oeste dos EUA, nos últimos 70 anos e está intimamente ligada à história da Empresa Valmont, cuja sede se encontra na cidade de Omaha-NE nos EUA e que, no Brasil, estabeleceu-se em Uberaba, MG.

Em 1947, o inventor Frank Zybach desenvolveu o protótipo de uma máquina de irrigação por pivô central. Nos anos que se seguiram, ele modificou e refinou o design para melhorar a eficiência operacional e, em 1954, licenciou sua patente para o empresário Robert Daugherty (Valley Manufacturing). Na década seguinte, o protótipo foi aprimorado e, com o tempo, foi se tornando mais robusto, mais alto e mais confiável. Em questão de poucos anos, a tecnologia já era considerada inovadora e apresentava uma grande novidade: o pivô possibilitava irrigar terrenos que não eram totalmente planos. Isso viabilizaria muitas áreas que, até então, eram consideradas inadequadas para a agricultura. Além disso, esta evolução levou à substituição do sistema de movimentação por energia hidráulica para acionamento elétrico (LIVING HISTORY FARM, 2021).

Na Figura 5 a seguir, apresenta-se uma vista de um modelo de pivô central antigo com sistema de movimentação hidráulico e também a de um modelo de sistema atual com a foto de Robert Daugherty, criador da empresa Valmont e um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento e expansão do sistema pivô central no mundo.



Figura 5. Vista de um modelo de pivô central antigo e de um modelo novo com a foto do Robert Daugherty, criador da empresa Valmont (LIVING HISTORY FARM, 2021).

Nos anos 50, começaram a surgir modelos viáveis para produção em grande escala. Aos poucos, a tecnologia evoluiu, culminando nas soluções completas e polivalentes que conhecemos hoje. Na década de 1960, a Valley Manufacturing tornou-se a Valmont Industries, Inc., iniciando o processo de internacionalização com a exportação do primeiro pivô para a França. Ainda no final dessa mesma década, deu início ao processo de galvanização por imersão à quente, num esforço de melhoria contínua. Nas décadas seguintes, a empresa continuou seu processo de desenvolvimento tecnológico, lançando produtos que permitiram o avanço desse sistema mundialmente (LIVING HISTORY FARM, 2021).

No Brasil, a Valmont tem mais de meio século de história. Tudo começou em 1954 com a fundação da Asbrasil, em São Bernardo do Campo (SP), para a produção de conjuntos de irrigação convencionais com aspersores “perrot”, além de tubos de aço. Vinte e um anos depois, passou também a fabricar os primeiros autopropelidos do Brasil. Em 1978, a empresa juntou-se à americana Valmont, quando fabricaram o primeiro pivô central do Brasil. Em 1989, a Asbrasil foi transferida para Uberaba e, em 1997, a Valmont adquiriu o seu controle acionário,

tendo adquirido todas as cotas da empresa até o início de 2018. A nova empresa, a Valmont Indústria e Comércio Ltda, deu início, então, à fabricação do Pivô Valley 8000 (VALLEY, 2002).

Atualmente, na segunda década do século XXI, está em curso a transição para uma nova era, onde as tecnologias de irrigação transitam entre a Agricultura 4.0 e 5.0, onde é a protagonista. Nessa nova forma de irrigação de precisão, as tecnologias agregam alta precisão e conexão com a internet, combinando informações para melhorar a performance durante todos os estágios de produção e contribuindo para aumento da produtividade, redução de custos, uso racional de insumos agrícolas e melhora nos rendimentos. Proliferam os sensores sem fios, câmeras multiespectrais plataformas de integração de dados, sensores do solo, da planta e do clima, algoritmos de inteligência artificial ("machine learning") e soluções robóticas (AGRONEGOCIO, 2021).

Toda essa tecnologia permite gerenciar de forma inteligente os sistemas de irrigação por pivô central à distância, recebendo informações estruturadas referentes ao clima, demanda hídrica da cultura, recomendação de lâmina a ser aplicada, identificação de doenças e pragas na área do pivô central através de sensores e câmeras especiais montadas na estrutura. Também avançam as possibilidades de uso do pivô para a aplicação de água e fertilizantes de forma específica e em quantidade necessária em cada ponto da área, através de mapas obtidos do sensoriamento remoto ou análises em tempo real.

2.3 Mercado

À medida que as inovações tecnológicas avançam e tomam conta do agronegócio, um aspecto se revela cada vez mais claro, a denominada Irrigação Inteligente. Esta apresenta-se como uma parte essencial do futuro do setor, seja no intuito de suprir uma demanda crescente por alimento, seja para maximizar a eficiência energética e produtiva.

Para ser considerada inteligente, a irrigação precisa ir além da simples aplicação de água nas lavouras, devendo incorporar necessariamente novas tecnologias que permitam um alto grau de automação do sistema de irrigação, avanço esse já visível em muitas propriedades rurais.

Para concretizar essa irrigação automatizada e inteligente, é preciso utilizar equipamentos que permitam o acréscimo de diferentes soluções, sendo que o sistema pivô central vem incorporando cada dia mais tais tecnologias voltadas para o futuro.

Os pivôs são a forma de irrigação que mais cresce no Brasil, o que pode ser confirmado pelo último Censo Agropecuário do IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017). Entre 2006 e 2017, os resultados apontam um aumento de 542 mil hectares na área ocupada por pivôs no país. A participação deste tipo de equipamentos passou de 19,6% para 20,8%.

Comparando os dados de 2017 e 2000 com base nos Censo Agropecuário (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017), observa-se muitos municípios brasileiros com crescimento superior 150% na área usada com pivôs centrais, chegando em alguns casos, a aumentos superiores a 500%, principalmente nos estados do Mato Grosso e Rio Grande do Sul. Essa área irrigada abrange uma grande variedade de culturas, estimando-se que entre 90 e 95% dela seja ocupada, principalmente, com lavouras de soja, milho, feijão e cana-de-açúcar. Em menor proporção, também se encontram culturas de algodão e café. É importante, também, citar a olericultura, que abrange as culturas folhosas, raízes, bulbos, tubérculos e alguns frutos como o melão e a melancia, ocupando aproximadamente 5% da área total.

Observa-se um crescimento significativo da área irrigada por pivô central no Brasil. Em 1985, a primeira edição da pesquisa identificou uma área irrigada por pivô de 31 mil ha, ocupados por cerca de 363 equipamentos. Em 2000, um novo levantamento calculou 490,5

mil ha e 6.680 equipamentos. O Censo agropecuário de 2017 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017) indica uma aceleração dessa expansão a partir de 2010, indicando que a área havia triplicado para 1,42 milhões de hectares. Os números do Censo Agropecuário de 2017 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017) foram muito próximos dos valores de 1,48 milhões ha levantados no estudo de 2017 e publicados no Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento nº 222 da Embrapa Milho e Sorgo (GUIMARÃES; LANDAU, 2020), com a utilização de técnicas de sensoriamento remoto.

Na Tabela 1, apresentam-se os resultados comparativos de expansão da área irrigada por pivô central em 2017 e 2020 para os estados com pelo menos 100 unidades. Observa-se na tabela que os valores totais de área irrigada com sistemas pivô central aumentou em 136.515 ha, levando a um aumento de 23.181 para 25.292 equipamentos.

Tabela 1. Variação da quantidade (frequência de instalação – número de equipamentos, NE) e área potencialmente irrigada (API, ha) pelos pivôs centrais levantados em 2017 e 2020 por estado com pelos menos 100 unidades (GUIMARÃES; LANDAU, 2020).

Estado	NE		API	
	2017	2020	2017	2020
MA	69	112	5.491,80	8.797,00
MT	929	1.117	113.124,90	138.043,00
PR	207	249	12.255,80	14.633,30
TO	156	185	14.392,40	16.890,10
SP	4.262	4.734	190.507,10	213.137,00
MG	7.401	8.541	452.189,60	501.183,60
BA	3.110	3.099	216.631,40	236.491,40
RS	1.683	1.813	110.858,50	118.718,60
GO	3.945	4.207	272.329,50	289.910,90
DF	256	270	14.417,40	14.979,10
ES	309	305	14.418,20	14.250,70
CE	144	127	8.421,60	6.934,20
MS	320	239	31.878,50	22.661,50
AL	117	41	4.014,00	1.456,90
Brasil	23.181	25.292	1.476.100,85	1.612.617,30

Também é importante citar os dados do Atlas Irrigação (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021), que indicaram uma área de agricultura irrigada no Brasil de 8,2 milhões de hectares irrigados, sendo 25% com a cultura do arroz, 8% com a cultura do café, 27 % com culturas anuais em pivôs centrais e 25% com as demais culturas e sistemas. A cana-de-açúcar ocupa 15 e 35,5% desse montante respectivamente para água e fertirrigação (água e a vinhaça que é um subproduto da produção de álcool e açúcar).

Assim, o país ocupa a sexta posição na lista das nações com as maiores áreas equipadas para irrigação, atrás da China, EUA, Índia, Paquistão e Irã (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2019).

A ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021) também cita uma expansão de 4,2 milhões de hectares irrigados até 2040, reforçando a importância do

Brasil enquanto fornecedor de alimentos para todo o mundo, embora exista um potencial de crescimento maior quando consideradas a disponibilidade de áreas aptas, a demanda dos produtores e a capacidade industrial do país. Para se chegar a esse nível de expansão, é necessária uma boa gestão dos recursos naturais e, claro, da tecnologia disponível no mercado. Nesse sentido, os pivôs centrais despontam em relação a outras formas de irrigação.

2.4 Tecnologia

Os pivôs de hoje já são equipados com diversas soluções altamente tecnológicas, inexistentes há poucos anos atrás. Painéis inteligentes agem como estações meteorológicas para entregar informações atualizadas e em tempo real ao produtor. Softwares de bancos de dados armazenados na nuvem permitem que o produtor controle o seu sistema de irrigação a partir do tablet, smartphone ou computador, eliminando a necessidade de se deslocar até a fazenda.

Além disso, os pivôs centrais oferecem versatilidade para cada situação. É possível, por exemplo, adaptar o equipamento para fazer a fertirrigação das lavouras. Outras soluções permitem o uso do pivô até em terrenos acidentados.

Também vale ressaltar o potencial do pivô central para a tendência mundial de se trabalhar a irrigação (e a agricultura, em geral) de forma mais sustentável e ecológica. Fontes de energia renovável, como a solar, são cada vez mais acessíveis e eficientes – e já existem no mercado algumas alternativas às fontes convencionais de energia, tornando o pivô um equipamento ainda mais completo.

É importante também considerar o manejo de irrigação tecnificado, que permite ao produtor gerenciar de forma efetiva a decisão da irrigação, mantendo as condições ótimas para a cultura, sem excesso e com otimização do uso de energia (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). As orientações técnicas são realizadas através de dados das culturas, do clima, do solo, de imagens de satélites, entre outros pontos, visando orientar o produtor sobre quando ele deve irrigar e a quantidade de água a ser utilizada de acordo com a cultura e seus diferentes estágios.

O sistema Irriger Connect (IRRIGER, 2021) do grupo Valmont, através de sua plataforma na web, possibilita a realização do balanço hídrico com base nas informações climáticas, nos sensores de umidade de solo e no banco de imagens de satélite, permitindo um manejo baseado na otimização do uso de água e energia, na redução de custos e no aumento da produtividade das culturas. A plataforma on-line contribui ativamente para uma irrigação rentável e econômica.

Vale salientar que o sistema pivô central é um projeto muito bem estruturado e otimizado. Primeiro, são executados levantamentos que abrangem topografia do terreno, energia, licença de outorga d'água, dentre outros pontos, que definem a intensidade de aplicação, lâmina a ser aplicada associada à(s) cultura(s) exploradas (BERNARDO *et al.*, 2019).

Outro pilar fundamental que agrega diretamente à eficiência dos equipamentos, é a capacidade de embarcar tecnologias – por exemplo, buscando uma maior eficiência, o sistema de irrigação de taxa variável VRI (do inglês "*Variable Rate Irrigation*") e outras tecnologias de agricultura de precisão embarcada ao equipamento. A tecnologia VRI oferece um sistema que atua em taxa variável, performando através da leitura de um mapa de prescrição, e permite ligar, desligar e controlar a irrigação por aspersor, individualmente. Aliada aos mapas, há a possibilidade de variação de lâmina por ângulo, por lance, chegando até em nível individual por aspersor e automação – estas coletadas e executadas por meio dos painéis inteligentes Valley da linha ICON (VALLEY, 2021).

As tecnologias de irrigação estão preparadas para atender à demanda com eficiência e devem ser a resposta mais clara para a necessidade produtiva. A instalação de um pivô central proporciona o plantio continuado, de mais de uma cultura em um ano agrícola, otimizando o uso do solo, da infraestrutura, da mão de obra, gerando maior rentabilidade e desenvolvimento para região (BERNARDO *et al.*, 2019).

Faz-se significativo destacar e reafirmar a tecnologia Valmont relacionada ao manejo da irrigação e ao sistema pivô central. A grande escala de informações agregadas pelo Irriger Connect prepara o produtor para a manutenção de uma irrigação responsável e sustentável, tendo em vista a preservação dos recursos hídricos (IRRIGER, 2021). A tecnologia Valley disponibiliza linhas de produtos tecnológicos completas que abrange painéis inteligentes ICON com telemetria embarcada via GSM ou rádio, assim como soluções híbridas de conexão. O sistema VFD de movimento contínuo dos lances proporciona um avanço linear, configurando maior potencial de uniformidade e maior na lâmina de água, com menos esforço estrutural no equipamento (VALLEY IRRIGAÇÃO, 2021).

Por último, destaca-se plataforma Valley 365, lançada pela Valmont em 2019 e que tem como grandes vantagens a composição de quatro grandes pilares de trabalho na empresa, a Telemetria (Monitoramento e Controle), o Irriger Connect (Previsão e Planejamento), o Valley VRI (Otimização e Aplicação) e, por fim, o Valley Insights (Informações e Análises), uma nova etapa através de uma tecnologia disruptiva a ser embarcada nos pivôs de irrigação (VALLEY IRRIGAÇÃO, 2021).

A atuação do Brasil no cenário da sustentabilidade e da eficiência agrícola é estratégica e eficiente. Empresas e produtores nacionais exportam boas práticas e produtos altamente tecnificados para outros países. O grande desafio é que todos os setores envolvidos possam se unir em prol de um planejamento amplo para o setor.

2.5 Rede de distribuição

Enquanto solução para aumentar a rentabilidade e aproveitar melhor cada hectare de solo cultivado, o pivô é indiscutivelmente uma ferramenta eficaz. O desenvolvimento da irrigação é o caminho para a agricultura do futuro, e essa é uma demanda que vale a pena perseguir. Com base nisso as marcas estão trabalhando diariamente pela expansão da rede de revendedores em todo o território nacional, para que cada vez mais produtores tenham acesso aos benefícios do pivô central. Em especial, a Valmont está contemplando em 2021, 100 pontos de venda em todo o Brasil (VALLEY IRRIGAÇÃO, 2021).

De Norte a Sul, o estabelecimento de novos pontos de venda é fundamental para garantir a estrutura que o produtor precisa para irrigar com eficiência e segurança. Os novos pontos de venda garantem acesso aos equipamentos a mais pessoas e suporte mais próximo aos que já utilizam o sistema.

Com a inauguração de cada unidade, aumenta também a equipe capacitada do fabricante, preparada para atender a todas as necessidades da região, o que significa a consolidação de uma verdadeira rede de irrigação que se estende por todo o Brasil, promovendo o desenvolvimento e o acesso à tecnologia mais avançada do mercado.

A rede de distribuição tem, além de outras, a função de ser a ponte entre o mercado e o fabricante; disseminando as novas soluções e tecnologia e trazendo os anseios do cliente para dentro das organizações. Estar próximo do cliente facilita a compreensão de sua necessidade e o oferecimento de soluções que garantam a ele ao resultado esperado.

O termo Sucesso do Cliente tem sido cada vez mais difundido dentro das organizações. Garantir que o cliente atinja as metas esperadas passa definitivamente pela ação da rede de distribuição, pois ela é, geralmente, o primeiro e o mais próximo contato com esse cliente. É

a rede que auxilia diretamente o fabricante na leitura dessas necessidades e que, muitas vezes, sugere soluções simples e eficazes ainda não pensadas e não planejadas pela fábrica.

2.6 Governança

Um grande desafio a ser adotado por todas as empresas do Agronegócio, que virá também com o crescimento da agricultura irrigada brasileira, é a profissionalização, através da governança corporativa. A governança corporativa está relacionada ao alinhamento de interesses. Também tem como objetivo a preservação e a otimização do valor econômico de longo prazo na corporação, o que colabora para uma maior qualidade das tomadas de decisão.

A própria expressão governança corporativa conquista evidências e interesses de forma crescente dentro das organizações, sendo regida por conceitos fundamentais demonstrados a seguir: (i) transparência: divulgação das ações da empresa de forma clara e socialmente responsável, (ii) responsabilidade corporativa: a responsabilidade corporativa tem como pilar a valorização da sustentabilidade da corporação, visando a sua longevidade, (iii) equidade: o conceito de equidade está relacionado ao igual tratamento de todos os sócios e partes interessadas no negócio, e (iv) Prestação de contas: é a justificativa e a divulgação de dados que ocorrem quando os gestores da companhia revelam os resultados de seus atos, omissões e tomadas de decisões.

Um conceito que deverá crescer bastante nos próximos anos é o de ações voltadas à "ESG", sigla em inglês que significa a responsabilidade quanto ao meio ambiente, social e governança.

Por muito tempo, grandes empresas, organizações, governos e investidores consideraram principalmente os riscos denominados de "G" (governança), com foco em normas contábeis, adoção de novas práticas, formação e composição de conselhos de administração e éticas nos negócios. Porém, nos últimos anos, a influência da parte denominada "ES" (ambiental e social) vem aumentando consideravelmente e, com isso, exigindo uma nova postura das empresas.

2.7 Futuro responsável

A tecnologia contribui de forma efetiva para a democratização da agricultura irrigada, permitindo que cada vez mais produtores tenham acesso à irrigação por pivô central, com sistemas que se adaptam a diversos tipos de solo e topografia.

Duas considerações são importantes nesta análise de futuro responsável. Primeiramente, a expansão da agricultura irrigada em áreas já utilizadas na agropecuária (agricultura de sequeiro e pastagem) e, de outro lado, o uso de energia fotovoltaica em grande escala.

Um novo estudo de Análise Territorial para o Desenvolvimento da Agricultura Irrigada no Brasil (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021) realizado pela Esalq/USP em parceria com a ANA e MDR, define o potencial de implantação de novas áreas irrigadas dentro do critério de intensificação em áreas aptas de agricultura de sequeiro (total de 73,9 milhões de ha) e de expansão em áreas de pastagem (total de 174,7 milhões de ha).

O estudo concluiu que, em números absolutos, 22% da área atualmente em uso com agricultura e pastagens no Brasil tem disponibilidade hídrica nos mananciais locais para crescimento da agricultura irrigada, totalizando 55,85 milhões de ha, sendo 26,69 e 26,73 milhões de ha, respectivamente sobre áreas com agricultura de sequeiro e áreas de pastagens. Cita ainda um adicional de 2,43 milhões de ha sobre áreas agropecuárias com água dos aquíferos (água subterrânea) e um potencial efetivo de curto e médio prazo de 13,7 milhões de ha que se concentram no Centro-Oeste (46%), Sul (31%), Sudeste (19%) e Nordeste e

Norte com 2% cada um, correspondendo a 167% da área atual irrigada de 8,2 milhões de hectares.

Vale destacar que, considerando o crescimento médio dos últimos cinco anos de 215.000 ha/ano (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTO, 2021), este potencial de 13,7 milhões de ha seria atingido somente em 2075, o que não parece adequado considerando-se os benefícios de uma agricultura irrigada sustentável para a produção de alimentos, empregos, renda e para o meio ambiente através da intensificação da produção. Uma proposta seria trabalhar de forma conjunta todos os setores envolvidos para atingir este potencial de 13,7 milhões de ha em 2050, ano em que estudos da FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2009) estimam a necessidade de aumento da produção de alimentos de pelo menos 60%. Tal meta exigiria, em média, dobrar a área anualmente implantada no país, atualmente de 215 mil ha, estando o setor industrial preparado para essa demanda ampliada.

Um importante avanço para as propriedades que se localizam em regiões mais isoladas, com limitação ao acesso à rede elétrica, que dificulta ou impede a instalação de equipamentos de irrigação, é o uso da energia fotovoltaica, que capta a energia solar e a converte em eletricidade para alimentar o pivô central.

Um bom exemplo são os pivôs equipados com painéis que captam a energia do sol e a armazenam em baterias. Dessa forma, o pivô pode irrigar nos momentos de disponibilidade de energia solar e ainda dispõe de reserva energética para ser utilizada em dias ou momentos com menos exposição à luz solar.

Essa nova realidade apresenta diversos benefícios, tanto para o produtor, quanto para o setor e a sociedade. Por um lado, ter mais produtores com acesso à tecnologia de irrigação significa mais produção de alimentos, contribuindo tanto para a renda dessas propriedades e famílias quanto para o agronegócio nacional. Por outro, há que se pensar no benefício da sustentabilidade e da economia de recursos.

2.8 Considerações finais

A energia solar é renovável, limpa e tem um baixo impacto ambiental, evitando, por exemplo, a emissão de dióxido de carbono, um dos principais gases do efeito estufa e, por consequência, um dos responsáveis pelo aquecimento global. As fontes mais convencionais de energia, como combustíveis fósseis, são as que possuem o maior impacto ambiental, nesse sentido.

Além disso, o uso da energia solar também pode representar uma importante economia financeira para o produtor. Dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (SAUAIA, 2017), indicam que a economia dos sistemas fotovoltaicos é capaz de reduzir as contas de energia de forma significativa. Por tudo isto, o setor vem passando por um forte crescimento na última década no Brasil, com crescimento a uma taxa média anual de 230%.

Diversos números mostram o aumento da potência instalada em energia solar. Cerca de 7% do total de usinas instaladas estão localizadas em propriedades rurais brasileiras, correspondendo a 13,1% da potência instalada. Conforme dados da ANEEL, apenas no primeiro semestre de 2020 em zonas rurais, foram instalados 175 MW, um aumento significativo de 265% em relação ao mesmo período do ano anterior, indicando que, dentre as fontes renováveis de energia, a solar apresenta-se como uma solução mundial, tanto em relação ao meio ambiente quanto do ponto de vista econômico (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR, 2021).

Frente a todo esse panorama, a grande questão é como desenvolver políticas de melhor aproveitamento da energia solar, fonte energética limpa, renovável, eficiente, abundante e acessível, para potencializar ainda mais a evolução tecnológica da agricultura irrigada?

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas de Irrigação**: uso da água na agricultura irrigada, v.2. Brasília: ANA, 2021, 86p.
- AGRONEGÓCIOS. Agricultura 5.0: Agricultura para alimentar um planeta em crescimento. Disponível em: <http://www.agronegocios.eu/noticias/agricultura-5-0-agricultura-para-alimentar-um-planeta-em-crescimento>. Acesso em: 21 mai. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR. Absolar. 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/deixeasolarcrescer>. Acesso em: 8 abr. 2021.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, D.D.; SOARES, A.A. **Manual de Irrigação**. 9. Ed. Ed. UFV. 2019. 545p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTO. Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação (CSEI). Abimaq. Disponível em: <http://www.camaras.org.br/site.aspx/Home-CSEI>. Acesso em: 5 abr. 2021.
- COLOMBO, A. Pivô central. In: MIRANDA, J.H.; PIRES, R.C.M. **Irrigação**. Piracicaba: Funep. Cap. 11, v.2, p.209-258. 2003.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Aquastat. Information system on water and agriculture. FAO, 2009. Disponível em: www.fao.org/nr/aquastat/. Acesso em: 18 mar. 2021.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. FAO. 2009. Disponível em: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf. Acesso em: 6 abr. 2021.
- GUIMARÃES, D.P.; LANDAU, E.C. **Georreferenciamento dos pivôs centrais de irrigação no Brasil**: ano base 2020. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. 63p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Agropecuário Brasileiro de 2017. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/>. Acesso em: 7 abr. 2021.
- IRRIGER. **Gestão da Irrigação**. 2021. Disponível em: <http://www.irriger.com.br/pt-br>. Acesso em: 8 abr. 2021.
- LIVING HISTORY FARM. 2021. Disponível em: <https://livinghistoryfarm.org/farminginthe50s/water/first-pivots-installed/>. Acesso em: 5 abr. 2021.
- MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação princípios e métodos**. Ed. UFV, 2009. 355p.
- SAUAIA, R.L. Energia solar fotovoltaica: panorama, oportunidades e desafios. ABSOLAR. Seminário Desafios da Geração de Energia Elétrica no Brasil. Brasília. 2017. 30p.
- VALLEY IRRIGAÇÃO. Sistema Valley 365. 2021. Disponível em: <http://www.valleyirrigation.com.br/precision-ag/valley-365>. Acesso em: 5 abr. 2021.
- VALLEY. História da irrigação e dos 48 anos da Valmont no Brasil. Informe Técnico Publicitário. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, v.54, p.37-39. 2002.

CAPÍTULO 3

3 IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO: HISTÓRICO E EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA

Marcus Henrique Tessler

Resumo

Desenvolvida em Israel, a partir dos anos 60, a irrigação por gotejamento vem se expandindo rapidamente em todo o mundo. Amplamente utilizada em frutas e hortaliças, o gotejamento vem sendo aplicado cada vez mais em cultivos como cafeicultura, cana de açúcar, citricultura, oliveiras, nogueiras, seringueiras, etc. e mais recentemente em grãos e arroz, nos sistemas enterrados. A expansão acelerada se deve entre outros às grandes produtividades associadas ao gotejamento assim como a alta eficiência de aplicação da água e fertilizantes. O artigo abaixo resume o desenvolvimento dessa tecnologia nos últimos anos e oferece brevemente uma visão agronômica das principais características de se trabalhar com gotejamento, entre elas a fertirrigação / quimigação. A necessidade de se produzir cada vez mais alimentos a uma população global crescente, associado a necessidade de se utilizar cada vez menos água na produção agrícola, faz com que a alternativa de se utilizar o gotejamento seja cada vez mais procurada. O conceito de se produzir "mais com menos" é parte intrínseca da tecnologia da irrigação por gotejamento e explica o crescimento acelerado dessa técnica no mundo e no Brasil.

3.1 Introdução

A tecnologia do sistema irrigação por gotejamento se originou em Israel, nos anos 60, e foi fruto de um acaso, como muitas vezes ocorre com as grandes descobertas.

Um engenheiro de nome Simcha Blass, diretor do departamento de águas no Sul de Israel, a caminho de seu escritório, observou que várias árvores, plantadas em uma região árida, permaneciam permanentemente verdes e crescendo durante todo o ano. Após abrir uma pequena trincheira no local, observou de que a linha adutora que levava água para o bairro vizinho, e que passava justamente ao lado das árvores, apresentava um pequeno vazamento. A observação de que um vazamento insignificante e contínuo de água podia sustentar árvores de porte no meio de um deserto levou, alguns anos depois, ao desenvolvimento do primeiro gotejador e aos primórdios da tecnologia de irrigação por gotejamento.

Alguns anos após essa observação inicial, o Engenheiro Blass já aposentado, desenvolveu o que é conhecido com o primeiro protótipo de um gotejador comercial. A ideia muito simples, consistia em abrir um pequeno orifício em um tubo de polietileno, e envolvê-lo com um micro tubo conectado a esse orifício, por onde a água perdesse pressão à medida em que avançava pelo micro tubo, e finalmente saía em forma de gotas.

A ideia, e o conceito de se irrigar com baixos volumes de água e através de gotejadores, foi vendida posteriormente a uma das cooperativas locais (kibbutz) com a intenção inicial de irrigar seus próprios cultivos. À medida em que os primeiros problemas técnicos foram sendo superados, a técnica da irrigação por gotejamento começa a se desenvolver e a se expandir localmente. O kibbutz Hatzerim, que havia se associado e comprado a ideia original do eng. Blass, cria a primeira empresa de irrigação por gotejamento no mundo, a Netafim. Desde então o desenvolvimento dessa tecnologia não para de crescer.



Figura 1. Evolução histórica dos gotejadores.

Os primeiros resultados e avanços indicaram que a tecnologia necessitava de muitas melhorias e ajustes, em especial no que se referia ao desenvolvimento dos gotejadores e dos sistemas de filtragem adequados, requeridos para proteger o sistema contra entupimentos e obstruções.

A tecnologia de irrigação por gotejamento esteve limitada a Israel até que novos gotejadores e acessórios para complementar os sistemas foram sendo aprimorados (filtros e válvulas), a finalmente o conceito de irrigação por gotejamento como um sistema novo e revolucionário começa a se expandir.

A partir da segunda metade dos anos 70, com o desenvolvimento de gotejadores mais sofisticados e confiáveis, e da compreensão do potencial desses sistemas no aumento das produções e na qualidade final dos produtos irrigados, a tecnologia de irrigação por gotejo sai de Israel em direção a outros países do mundo, inicialmente sendo aplicado àqueles onde as áreas desérticas eram significativas (Estados Unidos, México, África do Sul, Austrália). No entanto, somente a partir dos anos 80 é que a tecnologia da irrigação por gotejamento se populariza e ganha adeptos em todo o mundo, tornando-se a opção técnica mais atrativa para um grande número de cultivos, em especial a fruticultura, cotonicultura, citricultura, hortaliças, entre outros.

Ainda que o gotejamento se originou em Israel e as empresas israelenses continuam liderando o desenvolvimento dessa tecnologia, empresas de outros países já têm uma participação importante no crescimento do gotejamento em todo o mundo. Entre elas estão as empresas indianas, americanas, italianas, gregas, espanholas, coreanas, chinesas, entre tantas outras. O mercado é crescente e novas aplicações aparecem a cada dia.

A irrigação por gotejamento chega ao Brasil em torno de 1983, trazido por empresas que importavam tecnologia israelense ao País, mas é a partir da segunda metade dos anos 90, com a recente abertura comercial do país, as empresas israelenses começam a se instalar formalmente no Brasil. Após o ano 2000, inicia-se a produção local de seus produtos, difundindo de forma definitiva a tecnologia.

A intenção desse artigo é o de dar uma ideia atualizada da tecnologia da irrigação por gotejamento no mundo, e em especial no Brasil. O caráter prático desse material em nenhum momento significa uma abordagem superficial dos temas a serem tratados. Pelo contrário, as análises estão muito bem fundamentadas em conhecimentos sólidos da moderna teoria de irrigação. A ótica abordada é a do engenheiro de campo, preocupado com os aspectos técnicos que envolvem um bom projeto e um bom manejo do sistema, sem, no entanto, perder de vista de que o que realmente interessa é o resultado agrônômico e econômico para o agricultor.

Um bom agro projeto começa nos estudos básicos de solo, água, topografia e clima. As práticas agrônômicas e culturais de cada região devem ser incorporadas ao projeto, sempre que possível. O agro-projeto, é baseado em satisfazer as necessidades hídricas e nutricionais da cultura implantada. Deve-se levar em conta aspectos científicos, agrônômicos, operacionais e econômicos para a concepção de um bom projeto de irrigação. Além disso um bom dimensionamento da injeção de fertilizantes (fertirrigação) também é fator chave de sucesso em um projeto, uma vez que essa técnica exige critérios desde seu dimensionamento até sua aplicação.

A combinação da boa engenharia de irrigação aliado ao manejo correto do sistema traz ótimos resultados. O entendimento perfeito de quando e quanto irrigar, é um dos fatores fundamentais para que altas produtividades sejam obtidas. Para tanto é necessário que os dados básicos de física de solos (granulometria, capacidade de retenção de água, tipo de solo, entre outros) sejam incorporados à metodologia de cálculo, de modo a definir com critérios técnicos o momento correto de se irrigar os vários cultivos e o tempo ou volume de água necessário para que o solo volte a condições ótimas de umidade, permitindo um crescimento ideal para as plantas.

3.2 Desenvolvimento tecnológico dos gotejadores

3.2.1 Características do sistema

A irrigação por gotejamento é um sistema de engenharia novo, um conceito distinto de como a irrigação era feita até poucos anos atrás.

No gotejo, a água é filtrada e levada até a região onde se localiza o sistema radicular dos cultivos através de uma malha hidráulica composta de tubulações adutoras, secundárias e ramais, e aplicada exatamente nesse ponto com grande precisão, através de emissores (gotejadores) com vazão conhecida. Muitas vezes o termo irrigação por gotejamento é confundido com irrigação localizada, que abrange também os sistemas de micro aspersão.

Um sistema de gotejamento é composto de vários componentes (Figura 2), que podem ser divididos entre: (i) conjunto moto-bomba e chave de partida, (ii) filtragem, (iii) sistema de automação e controle, (iv) injeção de fertilizantes, (v) rede adutora (principal) e linhas de distribuição (ramais), (vi) válvulas, (vii) tubulação gotejadora, e (viii) medidor de água.

Embora o sistema funcione como um todo, a ênfase nesse capítulo é a de apresentar o desenvolvimento da tecnologia dos emissores (gotejadores) e como isso tem impactado o crescimento da irrigação por gotejamento como um todo.

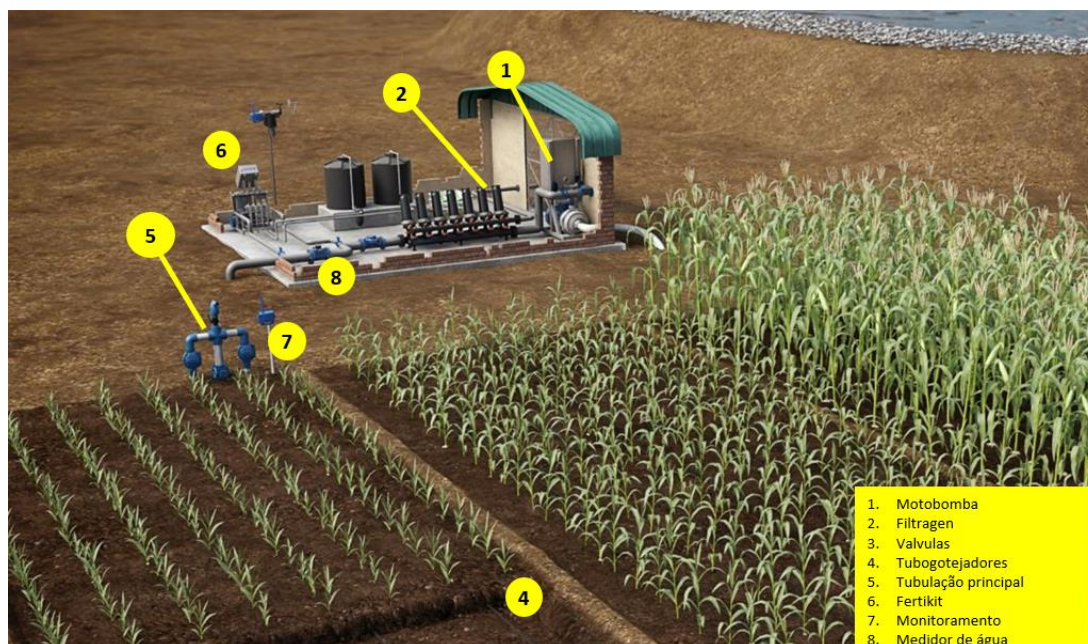


Figura 2. Vista de um sistema de irrigação por gotejamento típico.

3.3 Gotejadores

Os equipamentos de irrigação por gotejamento vêm se desenvolvendo muito nos últimos 60 anos, tornando-se cada vez mais confiáveis e duráveis.

Considere uma mangueira de polietileno com água escoando sob pressão. Ao se abrir um pequeno furo nessa mangueira a água vai jorrar, e quanto maior a pressão nesse ponto mais água vai espirrar através desse orifício. À medida em que a água percorre a mangueira ocorre uma perda de pressão por atrito entre a água e a parede da tubulação; esse fenômeno é conhecido pelos engenheiros como perda de carga. Em uma topografia plana a pressão existente no início da linha é maior do que aquela existente no final da linha e conseqüentemente uma quantidade maior de água jorra em um orifício no início da linha do que em um orifício similar no final.

Um gotejador é uma peça projetada de forma que, se inserida numa mangueira sob pressão, vai liberar através da saída do emissor uma quantidade de água com vazão conhecida e pré-determinada. Para evitar que a água jorre através de um gotejador localizado na tubulação, desenvolveu-se um mecanismo que induz uma perda de pressão (perda de carga) significativa à medida que a água passa através dessa peça. Assim, ainda que a pressão da água seja grande, ao passar através do gotejador ela se dissipa, e sai com pressão praticamente zero, sob a forma de gotas.

Nos primeiros gotejadores comerciais (anos 60 e princípio dos anos 70), o caminho em que a água percorria dentro do gotejador para dissipar energia (perder carga ou pressão) era um caminho helicoidal e muito longo, além do que a água fluía através de uma área de seção transversal pequena. A velocidade da água dentro do gotejador não era grande, o que muitas vezes acarretava problemas de funcionamento, em especial aqueles relativos a obstruções ou entupimentos. Em termos de engenharia, o fluxo nessas condições é conhecido como fluxo laminar.

A partir dos anos 70, desenvolveu-se um novo tipo de gotejador, onde o caminho interno percorrido é tortuoso e muito menor do que o apresentado no modelo anterior. Além disso possuía uma área de seção transversal interna maior, e com grande velocidade de escoamento de água. Esse gotejador, muito menos sujeito a entupimentos, tornava os sistemas de gotejamento mais confiáveis, mesmo sob regime de fertirrigação e/ou utilizando-

se águas de baixa qualidade. Essa nova tecnologia incorpora hidraulicamente um fluxo turbulento no gotejador.

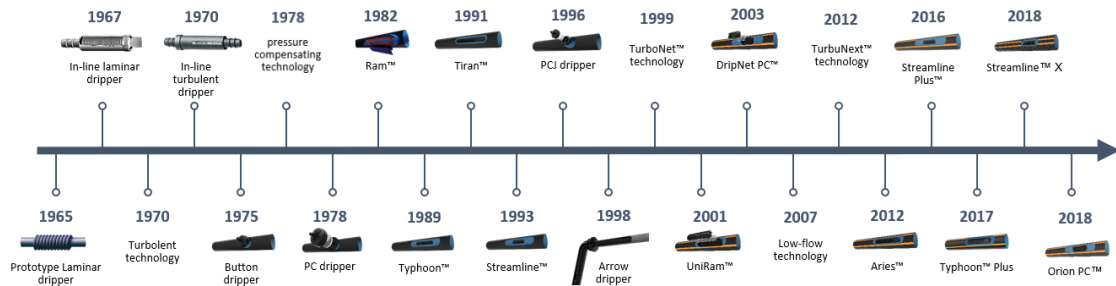


Figura 3. Evolução histórica do desenvolvimento de emissores Netafim.

O caminho que a água percorre dentro do gotejador para perder energia é conhecido como o labirinto do gotejador, ou apenas labirinto (Figura 4). Ainda que o desenho, dimensões e forma do mesmo tenham se modificado significativamente nos últimos anos, todos os gotejadores modernos possuem esse sistema para induzir perda de carga.

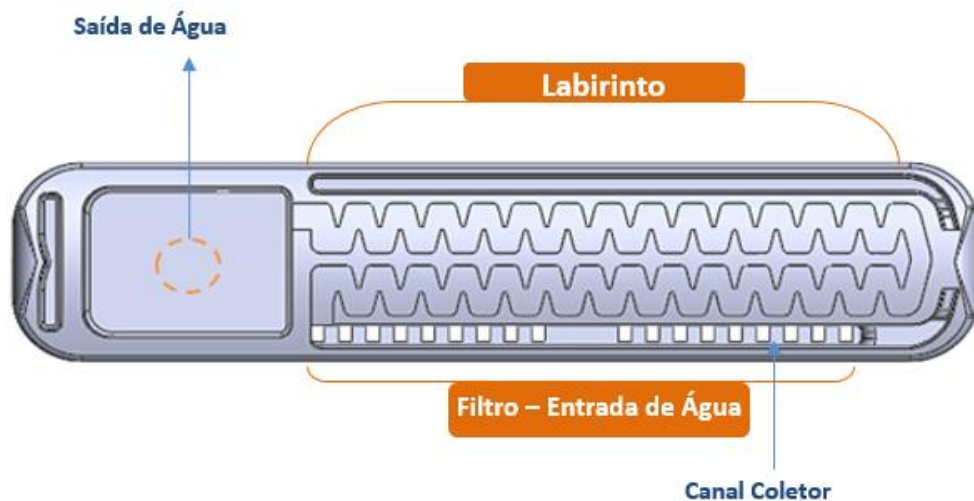


Figura 4. Vista de um sistema de labirinto de um gotejador.

Até meados dos anos 70, os gotejadores eram externos à tubulação e inseridos mecanicamente no processo de fabricação. Em 1975 se desenvolveu os primeiros gotejadores tipo botão, que são comuns até os dias de hoje, muito utilizados em viveiros e estufas (Figura 5).

Esses gotejadores, tanto os conhecidos como "in line" até os gotejadores tipo botão (*on line*), apresentavam a mesma característica de serem dependentes da pressão. Para um mesmo gotejador, se a pressão na linha varia de um ponto a outro, a vazão do gotejador muda de acordo com essa variação. Dessa forma, para que o sistema aplique água de uma maneira uniforme é necessário que o projetista fixe limites máximos de variação para a pressão, e conseqüentemente à vazão correspondente, uma vez que o conceito de uniformidade é fundamental em irrigação por gotejo.

A partir do fim dos anos 70, incorporou-se mais um avanço tecnológico no desenvolvimento dos gotejadores. No mesmo gotejador de fluxo turbulento desenvolvido anteriormente, incorporou-se uma membrana de borracha ou silicone no corpo do gotejador (Figura 6). Essa membrana, chamada de diafragma, se ajusta dentro do gotejador,

dependendo da pressão. Se a pressão é grande, ao se ajustar, o diafragma impede o caminho natural da água forçando uma perda de carga maior dentro gotejador. Conseqüentemente, a vazão diminui. Da mesma forma, se a pressão é pequena, o ajuste do diafragma é reduzido ou inexistente, e a passagem de água através do gotejador aumenta, acarretando uma vazão maior.



Figura 5. Gotejador tipo botão.

O diafragma incorporado exerce uma “regulagem” da pressão dentro do gotejador, fazendo com que, independentemente da pressão externa (pressão da linha) a vazão que cada gotejador vai fornecer seja sempre a mesma. Essa característica permite uma uniformidade de aplicação de água muito alta, dependendo apenas do gotejador. Em outras palavras, quando utilizado esse tipo de equipamento, a quantidade de água e fertilizantes aplicado pelo sistema é igual em todo o campo, independente de topografia, comprimento da tubulação gotejadora, pressão na rede, entre outros.

Esse tipo de gotejador é conhecido como auto compensável e foi considerado um dos avanços tecnológicos mais importantes no desenvolvimento dos sistemas de gotejamento. Ao mesmo tempo que se desenvolveu esse gotejador, incorporou-se também um mecanismo de autolimpeza nesses gotejadores.

Se alguma partícula ou impureza passar através dos filtros, penetrar o gotejador e chegar a bloqueá-lo, a membrana de regulação de pressão (diafragma) abre totalmente, permitindo que a passagem de água naquele instante seja a máxima. Nessas condições, o fluxo de água dentro do gotejador aumenta e elimina consigo a sujeira. Assim, além de se desenvolver um mecanismo de auto compensação, incorporou-se no mesmo um sistema de autolimpeza.

No início dos anos 80, um novo gotejador foi desenvolvido, incorporando toda tecnologia de auto compensação e auto limpeza. O avanço significativo foi a introdução de tubulações onde os gotejadores foram incorporados na tubulação durante o processo de fabricação da mangueira. Essa tubulação, com gotejadores integrados, é comumente chamada de tubo gotejador, como pode ser visto na Figura 7.

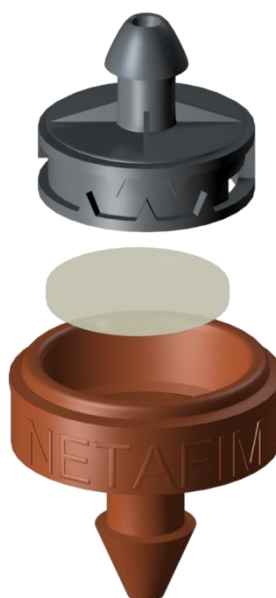


Figura 6. Gotejador auto compensado.



Figura 7. Gotejador auto compensado *in line*.

Nesse caso, a vazão e o espaçamento dos gotejadores são definidos pelo projetista, de acordo com os dados agronômicos (cultura e solo) e a tubulação é fabricada de acordo com as especificações solicitadas. A vantagem desse equipamento é a redução de problemas de vandalismo, comuns quando na utilização de gotejadores de botão, aliado à praticidade de se estender e recolher essa tubulação no campo.

A partir dos anos 90, a tecnologia de fabricação dos gotejadores permite duas alternativas: gotejadores autocompensados ou regulares, sejam de botões (externos) ou integrais (internos). É justamente a partir de década de 90 e início do ano 2000 que o conceito da irrigação por gotejamento começa a se expandir fortemente em todo o mundo.

O desenvolvimento dos gotejadores continua, em especial no que diz respeito ao desenho de novos labirintos internos, garantindo uma performance ainda mais eficiente. Esses mesmos gotejadores vêm acompanhados de um pré-filtro, de modo a otimizar ainda mais as questões ligadas a obstruções.

Novos produtos vão sendo desenvolvidos constantemente, para aplicações especiais. Entre eles os gotejadores tipo flecha, para aplicações em viveiros, os gotejadores com mecanismos anti-sucção para trabalhar com sistemas de gotejo enterrado, gotejadores com produtos inibidores de intrusão de raízes, gotejadores antidrenantes ou ainda aqueles

desenvolvidos para aplicação em mineração (lixiviação de ouro e cobre), entre outros. A tecnologia avança.

De forma sucinta os gotejadores modernos incorporam uma série de parâmetros técnicos e de engenharia, que os tornam muito mais resistentes e adaptados a toda e qualquer situação de campo. É de se esperar que os gotejadores atuais tenham algumas das características apresentadas abaixo: (i) regime de fluxo interno turbulento, (ii) grande seção transversal interna, por onde a água escoar (que possam eliminar as impurezas que eventualmente venham e penetrar no gotejador), (iii) possuam uma área grande de pré-filtragem, (iv) labirinto de comprimento pequeno, para que a água entra e saia do gotejador rapidamente, (v) mecanismos de auto compensação e auto limpeza, (vi) vida útil longa, (vii) possam operar com águas de baixa qualidade, (viii) possuam mecanismos de ante sucção, (ix) possuam mecanismos ante drenante, e (x) outros.

Cada aplicação requer um tipo de solução. Entre outros parâmetros, a escolha do gotejador (ou tubo gotejador) ideal é uma combinação de vários fatores, e vai depender da experiência dos técnicos e projetistas para definir a solução mais apropriada.

3.4 Vazão dos gotejadores

A vazão dos gotejadores tem mudado significativamente nos últimos anos. Com o desenvolvimento da tecnologia e do conhecimento agrônomo associado à irrigação por gotejamento, observa-se uma tendência de se utilizar a cada dia, gotejadores de vazões menores.

Do ponto de vista agrônomo, a distribuição da água em torno do gotejador tende a ser maior lateralmente, quando se utilizam vazões menores, uma vez que a água vai se distribuindo mais lentamente no solo. Do ponto de vista agrônomo, a taxa de aplicação de um sistema com essas características é menor, permitindo repor lentamente ao cultivo o que está sendo consumido pela evapotranspiração. E finalmente, ao aplicar água de forma mais lenta, se minimiza o potencial de perdas por lixiviação.

A utilização de gotejadores com vazões menores tem um impacto muito grande na engenharia, permitindo linhas longas para a tubulação gotejadora, menor infraestrutura de rede hidráulica, simplificando a instalação dos sistemas e reduzindo também as questões de automatização.

A utilização de gotejadores de vazão menor só está sendo possível devido ao desenvolvimento tecnológico dos emissores apresentados anteriormente. Até poucos anos atrás era comum projetar sistemas com gotejadores de $8,0 \text{ L h}^{-1}$, $4,0 \text{ L h}^{-1}$, $3,6 \text{ L h}^{-1}$, entre outros. A tendência atual é a de se trabalhar com gotejadores de $1,6 \text{ L h}^{-1}$, $1,0 \text{ L h}^{-1}$ e $0,6 \text{ L h}^{-1}$.

3.5 Princípios da irrigação por gotejamento (Engenharia e Agronomia)

3.5.1 Engenharia: parâmetros de projeto

Dentre os parâmetros necessários para a elaboração de um projeto de irrigação por gotejo estão: (i) qualidade da água, (ii) tipo de solo, (iii) evapotranspiração, (iv) coeficiente de cultivo, (v) levantamento planialtimétrico, (vi) outras informações técnicas e (vii) projeto hidráulico.

3.5.1.1 Qualidade de água

Uma análise completa da qualidade da água deve ser feita para avaliar problemas potenciais em relação a possíveis entupimentos dos gotejadores. A partir dessa análise determina-se uma estratégia de pré-tratamento da água, aeração, oxidação (cloração ou peróxido de hidrogênio), injeção de ácidos, ou uma combinação dessas alternativas, de modo a prevenir problemas potenciais.

As Tabelas 1 e 2 indicam os principais elementos que devem ser analisados, suas concentrações, e o maior ou menor grau de risco de problemas futuros.

Tabela 1. Critério indicativo de qualidade de água quanto ao risco de entupimento de gotejadores (NAKAYAMA; BUCKS, 1986).

Fator	Risco de entupimento		
	Pequeno	Moderado	Severo
Físico			
Sólidos em suspensão (mg L ⁻¹)	50	50 – 100	> 100
Químico			
pH	7,0	7,0 – 8,0	> 8,0
Sólidos dissolvidos (mg L ⁻¹)	500	500 - 2.000	> 2.000
Manganês (mg L ⁻¹)	0,1	0,1 – 1,5	> 1,5
Ferro total (mg L ⁻¹)	0,2	0,2 – 1,5	> 1,5
Sulfito de hidrogênio (mg L ⁻¹)	0,2	0,2 – 2,0	> 2,0
Biológico			
Número total de bactérias ¹	10.000	10.000 – 50.000	> 50.000

¹ Número máximo por mL.

Tabela 2. Principais fatores físicos, químicos e biológicos que contribuem para o entupimento de sistemas de gotejamento (NAKAYAMA; BUCKS, 1986).

Físicos (sólidos em suspensão)	Químicos (precipitação)	Biológicos (bactéria e algas)
Partículas inorgânicas Areia Silte Argila Plástico	Carbonato de cálcio ou magnésio Sulfato de cálcio	Filamentos Decomposição microbiológica: ferro, manganês, enxofre
Partículas orgânicas Plantas aquáticas (phytoplankton / algas)	Metais pesados, carbonatos, silicatos e sulfitos Óleo e outros lubrificantes	
Animais aquáticos (zooplâncton)	Fertilizantes: fosfatos, ferro, cobre, zinco, manganês	
Bactéria		

A análise da qualidade de água, as maneiras de prevenção do problema (aeração, cloração, outros) assim como sugestões de remediação de problemas existentes (limpeza com ácidos, injeção de cloro, concentrações e tempo de aplicação de produtos químicos) devem ser analisados por profissionais experientes na área de irrigação localizada.

É sempre mais fácil prevenir os problemas com antecedência do que remediá-los.

3.5.1.2 Tipo de solo

A textura do solo é um dos parâmetros mais importantes para a execução do projeto, uma vez que define, entre outros, o espaçamento a ser escolhido para os gotejadores.

O efeito de um gotejador no solo é a formação de um volume molhado, tridimensional, de tamanho e forma variável, denominado bulbo molhado. A superposição dos bulbos formados por cada gotejador individual forma uma faixa molhada contínua no solo, onde o sistema radicular vai se desenvolver. Em geral se espera que haja continuidade nessa faixa.

Considerando-se a mesma quantidade de água total aplicada, a forma do bulbo em solos arenosos lembra a de uma cenoura, longa e estreita. Para que a faixa molhada seja contínua é necessário portanto que os gotejadores estejam próximos entre si. No caso de solos argilosos, a forma do bulbo se assemelha mais à de uma cebola, mais arredondado e menos profundo. Assim, para esses solos, opta-se por gotejadores mais distantes um do outro. A Figura 8 apresenta o formato do bulbo molhado em três tipos de solo.

A razão para esse fenômeno é a de que em solos arenosos a força preponderante atuando na água é a da gravidade, forçando a mesma para baixo. Em solos argilosos, embora a força da gravidade também esteja presente, as forças capilares (atração entre a argila e a água) são grandes, fazendo com que a água tenha um movimento lateral significativo.

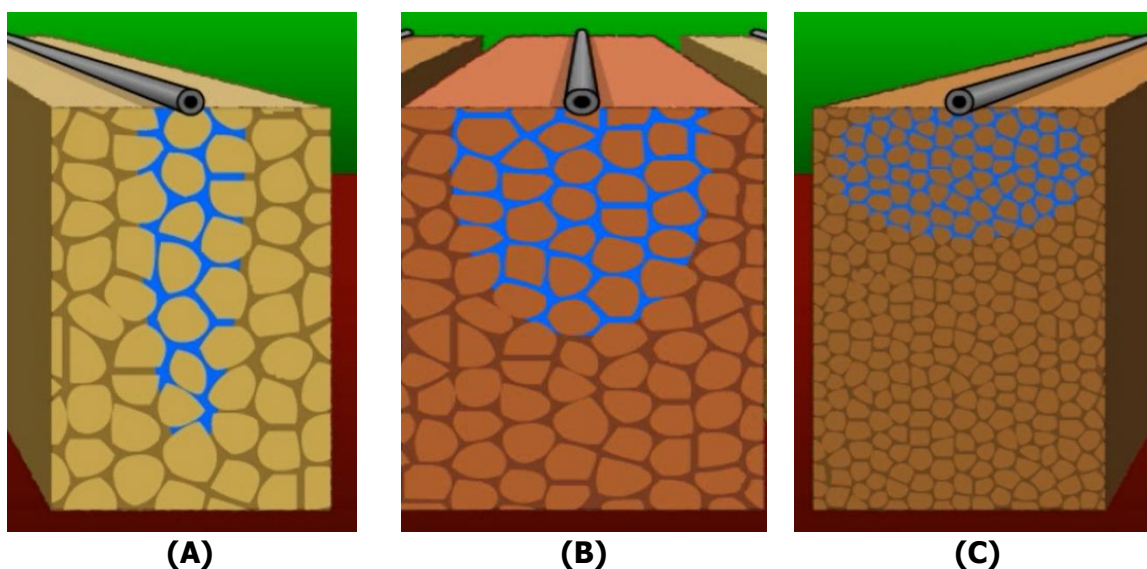


Figura 8. Bulbo molhado em diferentes tipos de solos: (A) solo argiloso, (B) solo médio e (C) solo arenoso.

3.5.1.3 Evapotranspiração

A quantidade de água que um sistema de irrigação deve fornecer é função direta da quantidade de água consumida pelas plantas. A soma da quantidade de água evaporada da superfície do solo com aquela consumida pelo processo de transpiração das plantas é conhecida como evapotranspiração.

A evapotranspiração de um determinado cultivo depende das condições climáticas e locais existentes na região, além de fatores genéticos (intrínsecos a cultura em estudo). Exemplificando, para um mesmo local, o consumo de água de uma lavoura de café é totalmente distinto do consumo de água de uma lavoura de banana, já que diferentes cultivos apresentam diferentes consumos de água, devido a fatores genéticos. Entre outros, os fatores mais importantes que determinam a evapotranspiração para um determinado local são a temperatura, a umidade relativa do ar, a velocidade dos ventos, a altitude, a latitude, e a radiação solar.

A determinação da evapotranspiração para uma determinada região é fruto de inúmeros estudos e pesquisas, e interessam a todos envolvidos em problemas de engenharia de meio ambiente, recursos hídricos, clima, e não será abordada nesse artigo. Para todos os efeitos e fins de projeto, parte-se do princípio de que esses valores são conhecidos na região em questão. Esses dados podem ser obtidos e/ou estimados através de relatórios de Universidades locais, centros de pesquisa, órgãos governamentais, entre outros.

3.5.1.4 Coeficiente de cultivo

Após o conhecimento da evapotranspiração é necessário se conhecer o coeficiente de cultivo (K_c) da cultura em questão.

Com os dados da evapotranspiração aliados ao K_c , chegamos a um fator chamado de Evapotranspiração da Cultura, que indica a demanda de água requerida já adaptada a cultura que irá ser implantada no projeto.

3.5.1.5 Levantamento planialtimétrico

Um levantamento planialtimétrico detalhado deve ser apresentado para que o projeto possa ser executado. Nesse levantamento devem constar o ponto e a cota de captação da água, todos os acidentes topográficos (brejos, árvores de porte, áreas de preservação) e os elementos feitos pelo homem (estradas, carregadores, cercas, etc.). Devem ser apresentadas curvas de nível a cada 2 m (para terrenos acidentados) até a cada 5m para terrenos mais suaves.

Direções preferenciais de plantio devem ser incorporados no levantamento (se em curva de nível ou outra direção) assim como qualquer mudança no sentido do plantio dentro da lavoura.

3.5.1.6 Outras informações técnicas

Resta ainda acrescentar dados sobre o cultivo, em especial o espaçamento de plantio. Se espaçamentos diferentes estão sendo utilizados, devem ser indicados com clareza no mapa topográfico.

A disponibilidade ou não de energia elétrica no local, voltagem da rede, restrições de água, vazão máxima disponível são algumas das informações técnicas que devem ser indicados.

3.5.1.7 Projeto hidráulico

De posse de todos os dados preliminares para a execução do projeto, o primeiro passo é a escolha do equipamento.

O princípio fundamental de um projeto de gotejamento é o de que o cultivo seja irrigado da maneira mais uniforme possível. Em toda a lavoura a quantidade de água e fertilizantes aplicada tem que ser praticamente a mesma, independente se a cultura se

encontra perto ou não da captação da água, se está ao lado do carreador ou em uma rua morta, se em um ponto alto do campo ou numa baixada.

Qualquer que seja a situação todo o cultivo deve receber a mesma quantidade de solução nutritiva. Para tanto, o engenheiro avalia os parâmetros de projeto e a topografia, e opta por um tipo específico de equipamento. Essa avaliação é feita em parceria com o agricultor, uma vez que as diferentes opções técnicas acarretam custos distintos.

O projeto hidráulico de um sistema de irrigação por gotejamento se inicia na adequação do tipo de gotejador e o espaçamento entre os gotejadores ao tipo de solo onde o cultivo está plantado. Para se determinar precisamente esses valores pode-se proceder a testes no campo e averiguar se a escolha dos mesmos foi apropriada. Em alguns casos um engenheiro experiente define esses parâmetros *a priori*, sem a necessidade de testes.

O espaçamento entre gotejadores não tem nenhuma relação com o espaçamento da cultura a ser irrigada. A combinação do tipo de solo, vazão e distância entre os gotejadores é o que define a solução técnica do projeto, e não o espaçamento do cultivo em si.

Em sistemas de gotejamento com gotejadores regulares (onde a vazão de um gotejador depende da pressão), há que estabelecer critérios de engenharia para assegurar um alto grau de uniformidade. Normalmente, se define que nesses casos um bom projeto tenha uma variação máxima de vazão entre os gotejadores de 10%. Com esse critério se assume que a uniformidade do sistema é alta e não deve afetar o resultado agrônômico.

Para variações maiores do que 10%, a desuniformidade aumenta e conseqüentemente a diferença entre a vazão dos primeiros e dos últimos emissores nas linhas laterais de irrigação será grande. Essa situação pode influir na produção, criando áreas mais produtivas do que outras. Isso é especialmente observado em cultivos perenes, onde ano após ano parte da lavoura é "mais irrigada e fertilizada" do que outras.

De forma ilustrativa (Figura 9) para se conseguir uma variação máxima de vazão de 10%, o projetista deve restringir a variação máxima de pressão dentro de um determinado setor, dependendo do gotejador.

Sistemas que utilizam tubulações com gotejadores autocompensáveis se caracterizam por uma alta uniformidade de aplicação. Todos os gotejadores aplicam a mesma quantidade de água e nutrientes e em geral essa uniformidade é refletida na lavoura, com crescimento das plantas e produção muito similar em toda a área.

A alta uniformidade de aplicação acaba se refletindo nos cultivos, com uma produção homogênea e de alta produtividade.

O dimensionamento hidráulico de um projeto de irrigação por gotejo prevê a aplicação de um volume total de água (lâmina) para o cultivo, suficiente para repor toda a água consumida via evapotranspiração naquele dia. O sistema é calculado para que o fornecimento de água seja o necessário para repor essas perdas no caso de uma lavoura adulta, no pico de demanda, produzindo no seu potencial.

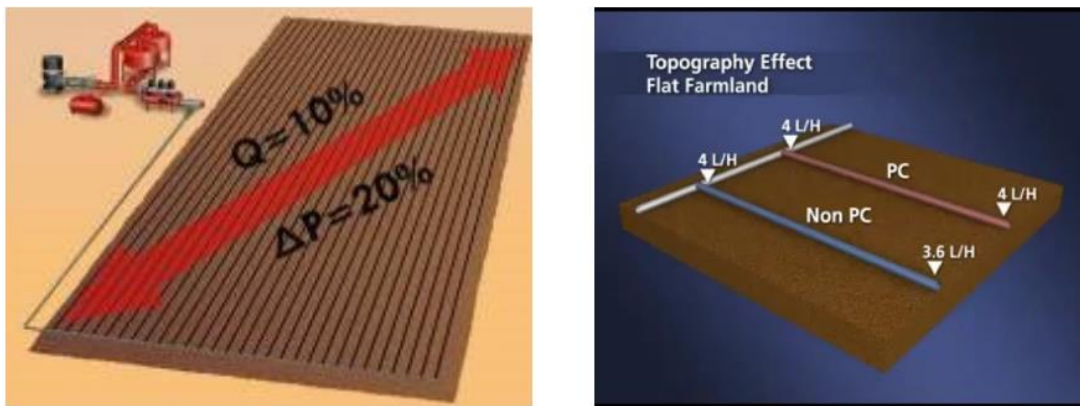


Figura 9. Variação máxima de vazão em projetos com gotejadores regulares.



Figura 10. Vista de uma área de cafeicultura irrigada.

3.5.2 Agronomia: princípios de operação na irrigação por gotejamento

Sistemas de irrigação por gotejamento devem ser operados de modo a aplicar água com alta frequência e com pequenas quantidades de água a cada aplicação. Dependendo do tipo de solo, é possível que a aplicação de água seja diária, ou até em casos mais críticos, duas a três vezes ao dia (solos extremamente arenosos). Diferentemente de outros sistemas, o sistema de gotejo é fixo no campo e pode ser acionado ou desligado sem qualquer custo adicional.

3.6 Conceito do solo como reservatório

Para fins de manejo de uma cultura irrigada considere o conceito clássico do solo como um reservatório. Os limites de água nessa "caixa d'água" são indicados a seguir, e o princípio ideal de manejo é "encher a caixa" com uma frequência determinada, sem deixar que o nível baixe a valores críticos, a partir do qual a produção poderia ser afetada. Os parâmetros clássicos necessários para se definir quando irrigar e quanto irrigar são: (i) capacidade de

campo (CC): é definido como o teor de umidade que o solo se encontra depois de 24 a 48 horas após chuvas ou irrigação terem ocorrido, isto é, depois de que o excesso de água tenha sido drenado do solo. Pode ser interpretado como o teor de umidade ótimo para o crescimento das plantas. Quando o solo se encontra em capacidade de campo, a umidade e a aeração do solo são adequadas, e as plantas encontram as melhores condições para o crescimento. É o nível ideal de água no reservatório, (ii) ponto de murcha permanente (PMP): é o teor de água em que o solo se encontra a partir do qual as plantas deixam de ser capazes de extrair água do solo, e entram em declínio. Fisicamente, a partir desse limite, as plantas já não são capazes de recuperar sua turgidez. O ponto de murcha permanente é o limite mínimo que o reservatório pode chegar, (iii) disponibilidade total de água (DTA): é a quantidade total de água liberada pelo solo entre os limites de capacidade de campo e ponto de murcha permanente ($DTA = CC - PMP$). Representa o volume de água disponível por unidade do volume total de água no reservatório, (iv) limite de disponibilidade (f): representa o limite máximo entre capacidade de campo e ponto de murcha permanente a partir do qual volta-se a irrigar uma determinada cultura. Em geral é expresso em porcentagem (%). Em termos práticos significa o nível do reservatório onde se restabelece a irrigação, e em geral é muito acima do limite mínimo (ponto de murcha permanente), e (iv) disponibilidade real de água (DRA): é a quantidade máxima de água à disposição das plantas antes de se reiniciar a irrigação. Representa o volume máximo disponível para as plantas antes de se irrigar novamente, e é o volume que se considera para manejar o sistema, e é expresso como $DRA = f \times DTA$ (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

A Figura 11 mostra esquematicamente a quantidade de água e ar em um determinado solo para os parâmetros discutidos anteriormente.

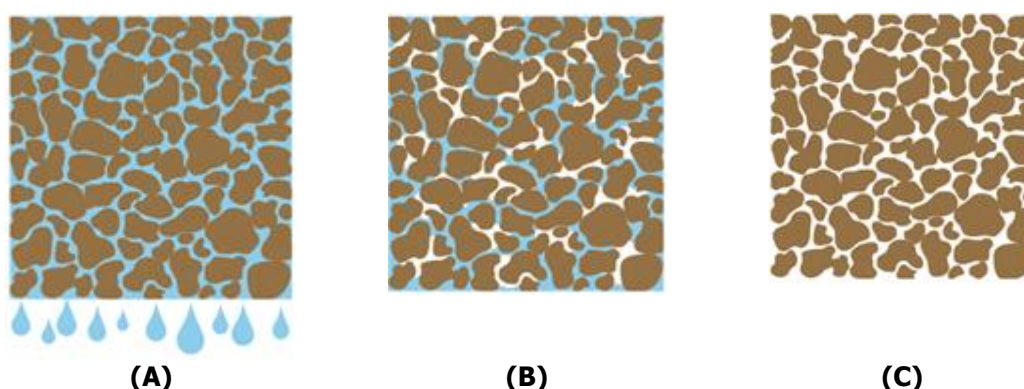


Figura 11. Diferentes estados de teor de água no solo (A) ponto de saturação, (B) capacidade de campo e (C) ponto de murcha permanente (água disponível).

O conceito do solo como um reservatório é muito utilizado na aspersão e em sistemas de sulcos e/ou superfície, na sua estratégia de manejo da água. Uma vez que no gotejamento pode-se irrigar com alta frequência sem custo operacional adicional associado a esse sistema, a ideia de um solo como reservatório não é tão representativa.

Quando se irriga uma cultura por gotejamento, pretende-se estabelecer um regime de irrigação de modo que o solo esteja sempre perto da condição de capacidade de campo (condição ótima). Se isso ocorre, o movimento de absorção de água pelas plantas é grande, e os benefícios em forma de produção aparecem. Se o nível de umidade do solo baixar muito, se aproximando daqueles valores próximos ao ponto de murcha permanente, a produção será definitivamente afetada. Para se evitar que isso ocorra, estabelece-se um limite máximo permitido, em torno de 20% a 30% a partir do qual a irrigação volta a ocorrer.

A Figura 12 indica as diferenças de manejo da água para sistemas de aspersão, comparado com gotejamento.

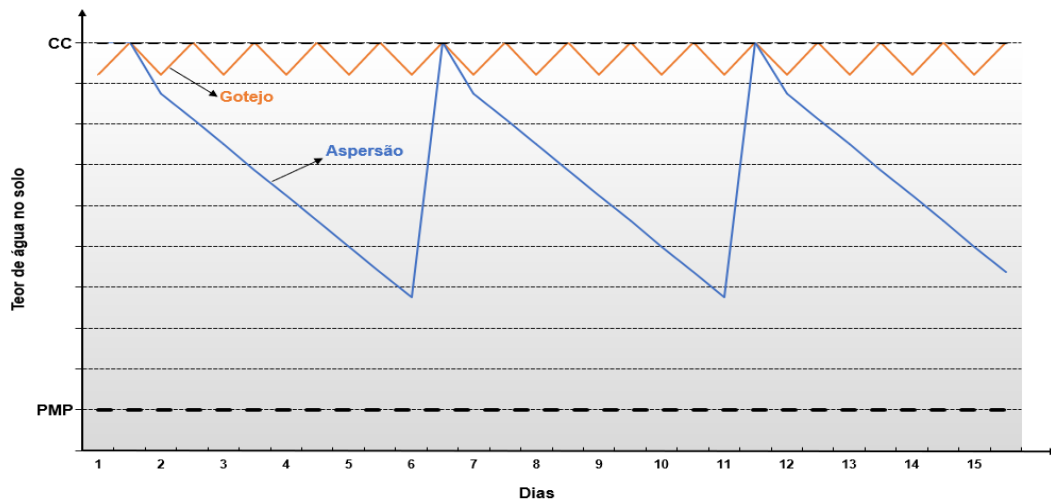


Figura 12. Manejo de água para gotejo e aspersão.

Aplicações mais frequentes de água permitem que o solo se encontre sempre em um estado de umidade perto do ótimo (capacidade de campo). Quando isso ocorre as plantas se beneficiam por serem capazes de absorver água e nutrientes em quantidades suficientes para que todo o processo fisiológico seja otimizado.

À medida que o solo seca, a transpiração diminui, pois há o fechamento dos estômatos, afetando diretamente na produção de energia da planta (fotossíntese) acarretando em perdas de produtividade da lavoura em questão.

3.7 Sistema radicular sob irrigação por gotejamento

A irrigação por gotejamento concentra a água e nutrientes em uma porção limitada da área total (faixa molhada devido a superposição dos bulbos).

O desenvolvimento do sistema radicular é intenso nessa porção do solo, induzindo a um grande crescimento de radículas. Essa concentração radicular potencializa a absorção da água e nutrientes, otimizando os processos fisiológicos dos cultivos, que “devolvem” esses benefícios em termos de produção agrícola.

Em zonas áridas e semiáridas, os cultivos dependem apenas da irrigação para a absorção de água e nutrientes, uma vez que as chuvas são escassas ou inexistentes. O desenvolvimento radicular é restrito apenas à faixa molhada formada pelos bulbos (Figura 13).

Em zonas subtropicais e tropicais, com períodos chuvosos representativos, o comportamento do sistema radicular é distinto. As raízes crescem para fora da zona dos bulbos, se beneficiando das chuvas e da fertilidade natural dos solos na área adjacente à faixa molhada. No entanto, uma vez que o processo contínuo de irrigação / fertirrigação está sempre limitado a faixa molhada, a concentração de radículas continua muitas vezes maior do que ocorre na área externa, nos períodos chuvosos.

Pode-se considerar como um “bônus adicional” à contribuição do consumo de água do sistema radicular expandido em épocas de chuvas, em relação ao volume total de água aplicado.



Figura 13. Sistema radicular concentrado no bulbo molhado.

3.8 O solo como alvo

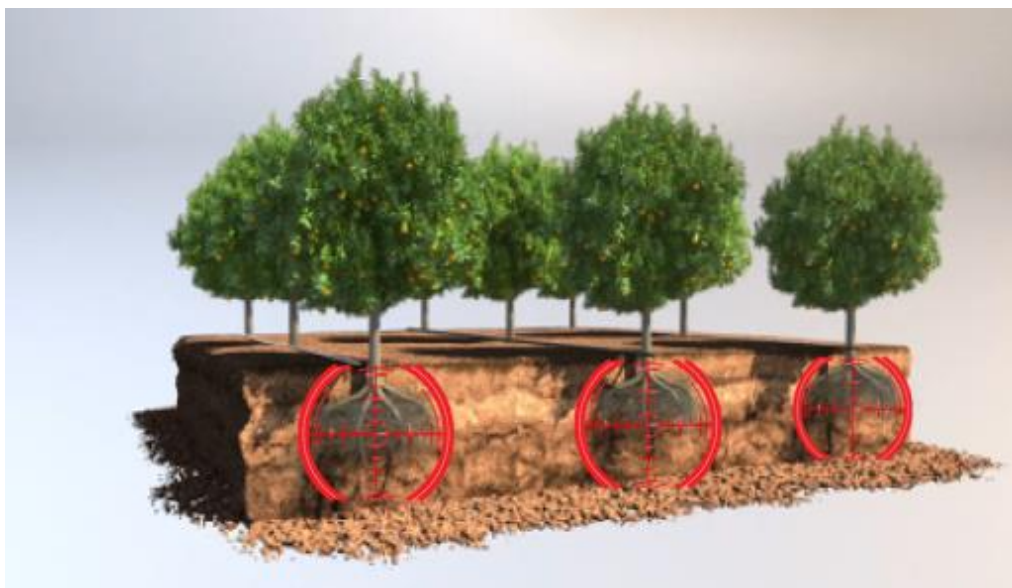


Figura 14. Solo como alvo.

No gotejamento, a irrigação é sempre mais frequente, já que se espera manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo permanentemente. Como premissa, antes do início de uma nova safra ou nas primeiras irrigações, se sugere “encher a caixa de água do solo” e depois manter o mesmo sempre próximo à capacidade de campo.

De maneira similar, a frequência de fertilização (fertirrigação) será muito maior do que na fertilização tradicional; isso faz com que os cultivos estejam sempre bem nutridos. O sistema radicular efetivo vai estar concentrado na faixa molhada, potencializando a absorção de água e fertilizantes, otimizando a produção.

A uniformidade de aplicação de água e nutrientes via gotejo permite um controle muito grande na quantidade de água e fertilizantes, minimizando sua quantidade total, assim como perdas por lixiviação.

Durante todo o processo de irrigação, a área molhada deve ser o centro das atenções do irrigante, uma vez que o bom gerenciamento do processo (água e fertilizantes) nessa região

vai produzir os resultados esperados, com altas produtividades (mais produção a menor custo). Essa combinação de fatores faz com que a área molhada e fertilizada pela irrigação por gotejo seja considerada como o alvo principal a ser alcançado e administrado.

3.9 Fertirrigação, nutri irrigação e *drip protection*

Sistemas de irrigação por gotejamento aplicam água com uma precisão e economia única, fazendo com que a eficiência na utilização e aplicação dos recursos hídricos seja incomparável. A uniformidade e eficiência de aplicação de água chega a 95%, ou seja, praticamente toda a água efetivamente aplicada é benéficamente utilizada pelas plantas, sem perdas. A possibilidade de se aplicar água com esse grau de precisão levou os usuários de irrigação por gotejamento à utilização desse sistema para a aplicação de fertilizantes via água de irrigação, criando um novo vocábulo, a fertirrigação. Incorporou-se dessa maneira todas as vantagens de um sistema preciso como o gotejamento à prática da fertilização.

A fertirrigação é uma técnica fundamental quando se utiliza o gotejamento para a irrigação de qualquer cultivo. A abordagem moderna é a de que um sistema de irrigação por gotejo é mais do que uma malha hidráulica capaz de distribuir água com controle absoluto, mas sim um sistema de distribuição de água, solução nutritiva, defensivos agrícolas, biológicos e orgânicos necessários à lavoura. A fertilização via água é parte fundamental do sucesso que os sistemas de irrigação por gotejamento vêm obtendo no mundo e deve ser interpretado como uma técnica indissociável da irrigação. Para todos os efeitos, sempre que se aborda o tema de irrigação localizada, em especial o sistema de gotejamento, entenda-se fertirrigação.

Com a técnica da fertirrigação, pela primeira vez na história da agricultura, pode-se controlar com precisão as quantidades de fertilizantes necessários ao cultivo, adequando-se à fase de crescimento do plantio, época do ano, estado nutricional da planta, entre outros. Pode-se corrigir com facilidade qualquer deficiência apresentada assim como prover às plantas exatamente o necessário, na época desejada, de acordo com o estado fenológico do cultivo, sem desperdícios. Isso acarreta economias de escala no processo de fertilização das lavouras, fazendo com que os custos operacionais e de produção diminuam. A eficiência de absorção é potencializada, uma vez que os fertilizantes são aplicados em conjunto com a água, que é o veículo de entrada nas plantas.

3.9.1 Aspectos agronômicos da fertirrigação

Já se mencionou anteriormente de que o sistema radicular dos diferentes cultivos, quando irrigado por gotejo se localiza na faixa úmida formada pelos bulbos molhados. Nesse caso, observa-se uma concentração de radículas que chega a ser muitas vezes maior do que aquela encontrada em condições de sequeiro, uma vez que a planta reconhece que naquele local existe água, nutrientes e oxigênio em abundância.

Os nutrientes aplicados serão consumidos na região do bulbo molhado (local onde estão concentradas grande parte das raízes de absorção das plantas) (Figura 15). É fundamental para o sucesso agronômico que essa porção do solo esteja sempre adequadamente irrigada e fertilizada (fertirrigação).



Figura 15. Café Conilon com gotejamento subterrâneo no extremo Sul da Bahia.

Dividindo-se a quantidade total de fertilizantes que se aplicaria em uma temporada em várias aplicações, tem-se um regime de fertilização totalmente distinto daquele que se obtém quando se fertiliza a lavoura da maneira tradicional. Pode-se por exemplo aplicar a quantidade de nutrientes necessária para um período de um mês em quatro aplicações semanais, ou oito aplicações (duas vezes por semana), ou até diariamente (conceito chamado de Nutrirrigação ou Fertirrigação proporcional).

Como regra prática se recomenda uma frequência de fertirrigação de no mínimo uma vez por semana. O resultado desse novo modo de se fertilizar tem um impacto agrônomo importante nos cultivos e na economia do processo de fertilização (mão de obra e quantidade total de nutrientes).

Sob o ponto de vista agrônomo, a aplicação de grandes quantidades de fertilizantes em contrapartida a várias aplicações com dosagens menores tem sérias desvantagens. O parcelamento dos nutrientes, além de melhorar a absorção dos mesmos ainda reduz drasticamente a lixiviação dos nutrientes quando comparado a aplicações mecânicas (convencionais em lavouras de sequeiro).

O aumento da quantidade de nutrientes aplicado ao solo de uma só vez aumenta o teor de salinidade da solução, dificulta a absorção de água e nutrientes pelas plantas devido ao aumento do potencial osmótico no solo, podendo criar uma situação de estresse. Em geral a quantidade de água e nutrientes a disposição dos cultivos diminui à medida em que o teor de sais no solo aumenta. Em contrapartida, se a frequência de fertilização é grande, e as quantidades de fertilizantes aplicadas de cada vez são pequenas, o potencial osmótico se mantém baixo devido à baixa concentração de sais na solução, aumentando a disponibilidade de água e nutrientes para o cultivo.

As perdas inerentes à fertilização sólida são praticamente eliminadas quando se utiliza a fertirrigação. Inicialmente, uma vez que os fertilizantes serão aplicados em doses pequenas e com grande frequência de aplicação, evita-se problemas de lavagem de nutrientes por chuvas e/ou minimizam-se os problemas de lixiviação. Outro aspecto positivo é o fato de que quando aplicados via solução, os nutrientes se encontram rapidamente disponíveis às plantas, evitando-se o tempo usual que os fertilizantes levam para passarem da fase sólida à fase líquida. Todas as perdas intrínsecas a esse processo são eliminadas.

3.9.2 Vantagens da fertirrigação

São vantagens da fertirrigação: (i) economia de fertilizantes devido à eliminação das perdas por lixiviação e volatilização, e por se aplicar os fertilizantes exatamente onde se concentra o sistema radicular das culturas. Essa economia em geral justifica a utilização de fertilizantes de melhor qualidade, ainda que a custos maiores, (ii) correção rápida das deficiências. Devido à alta concentração de raízes e ao alto teor de umidade encontrado no bulbo, o processo de assimilação dos nutrientes é potencializado pelo cultivo, e (iii) distribuição dos nutrientes no perfil de solo de uma maneira mais homogênea. Controlando-se o sistema de irrigação pode-se evitar lixiviação do nitrogênio assim como, dependendo de quando o fertilizante é aplicado (se no começo ou fim do processo de irrigação) concentra-se o nitrogênio no perfil superior ou inferior do sistema radicular.

3.9.3 Cuidados com a fertirrigação

Os seguintes cuidados devem ser observados na fertirrigação: (i) a utilização de fertilizantes de baixa qualidade e/ou pouco solúveis pode acarretar problemas nos gotejadores, causando precipitação de sais. A combinação de dois ou mais fertilizantes aplicados ao mesmo tempo deve ser analisada por um agrônomo, para evitar-se reações químicas que possam acarretar precipitados na tubulação; e (ii) requer manejo por pessoal habilitado e uma mudança de procedimentos na propriedade. A fertirrigação é uma técnica de caráter intensivo, requerendo dos operadores maior dedicação e um controle mais apurado.

3.9.4 Nutrirrigação (um novo conceito) e fertirrigação

A diferença conceitual entre a fertirrigação e nutrirrigação é que na fertirrigação se estabelece uma aplicação quantitativa de fertilizantes de acordo com uma agenda semanal ou quinzenal de aplicação. Já na nutrirrigação se aplicam os fertilizantes de forma proporcional, onde os nutrientes são sempre disponibilizados em todas as irrigações e de acordo com as fases fenológicas da cultura.

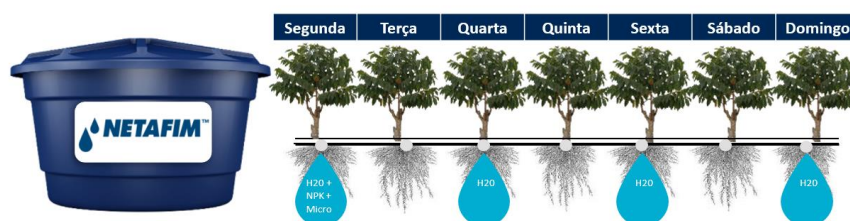


Figura 16. Vista de um sistema de fertirrigação (agenda semanal e quantitativa de fertilizantes) manual, com aplicação de nutrientes semanalmente.

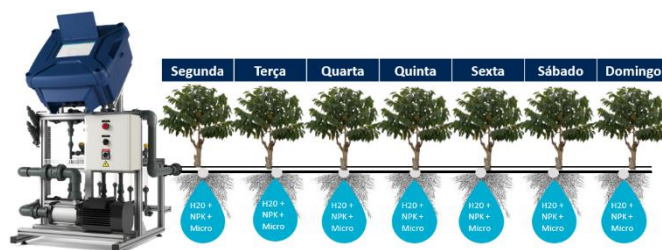


Figura 17. Vista de um sistema de fertirrigação automático denominado de nutr irrigação com aplicações diárias de nutrientes.

3.9.5 Drip protection

Similar à prática da fertirrigação, os sistemas de gotejamento podem ser utilizados para a aplicação de produtos químicos (quimigação), como inseticidas, fungicidas, ou qualquer outro produto cujo modo de absorção seja via sistema radicular ou aplicados para controle de nematoides, pragas ou doenças de solo. Os sistemas de gotejamento também podem ser utilizados para aplicar produtos biológicos (como bactérias) ou orgânicos (como ácidos fúlvicos e húmicos).

O fato de que esses produtos sejam distribuídos de forma uniforme e precisa em toda a lavoura apresenta as mesmas vantagens econômicas dos fertilizantes, ou seja, evitam-se os desperdícios, o que por si só já é uma vantagem comparativa importante. Além disso, há uma economia com mão de obra, hora-máquina e consumo de óleo diesel, e uma diminuição da compactação do solo através da passagem intensiva do maquinário para pulverizações mecânicas.

A quimigação é uma prática que deve ser conduzida com muito cuidado. É importante que se utilizem apenas os produtos já liberados pelos órgãos reguladores, de modo a se evitar problemas de meio ambiente e com pessoal de campo.

3.10 Considerações sobre a forma de aplicação de fertilizantes

É possível que em condições de fertirrigação, o cultivo apresente produções muito acima daquelas observadas em condições de sequeiro ou irrigação suplementar (aspersão convencional ou canhões), fazendo com que a quantidade total de fertilizantes aumente para manter essa demanda adicional. O que se pode afirmar com certeza é que para uma determinada produção, a quantidade total de nutrientes é menor quando aplicado via água (fertirrigação/nutr irrigação) do que sob a forma tradicional. Isso se deve única e exclusivamente ao fato de que a eficiência do processo de fertilização é muito maior sob fertirrigação, já que as perdas são mínimas.

A preparação de um programa de fertirrigação exige conhecimentos técnicos sobre os fertilizantes utilizados (qualidade, tipos e solubilidade), análise química da água (sais dissolvidos e pH) e um monitoramento contínuo da lavoura. Se problemas são observados (falta ou excesso de nutrientes) o rumo pode ser facilmente corrigido, mudando-se as concentrações aplicadas. Acima de tudo, essas mudanças podem ser feitas com rapidez, sem permitir danos maiores ao cultivo.

O processo de fertirrigação de uma lavoura passa pelo conhecimento do comportamento da cultura (estado fenológico), manejo adequado do sistema de gotejamento (turno de rega correto), tipos de fertilizantes, compatibilidade ou não entre os mesmos, quantidades de fertilizantes necessária baseada em cargas pendentes, controle e acompanhamento da lavoura durante o ano. É fundamental o apoio de um agrônomo experiente e conhecedor de todo esse processo. Nessas condições o processo pode apresentar resultados expressivos, com produções muito acima das médias usuais.

3.11 Reflexões sobre o futuro da tecnologia de irrigação por gotejamento

O crescimento acelerado da população mundial e a necessidade de se aumentar a produção agrícola, considerando-se as restrições ambientais cada vez maiores, faz com que o interesse na irrigação por gotejo aumente ano após ano. O tema da água (e sua eventual escassez) está cada dia mais presente nas discussões das autoridades, técnicos e na sociedade em geral.

O crescimento da tecnologia de irrigação por gotejamento na última década tem sido expressivo, e aponta para vários cultivos e aplicações especiais que até poucos anos atrás eram impensáveis.

A técnica da irrigação por gotejamento enterrado (*SDI, subsurface drip irrigation*) é conhecida há muitos anos, e sua aplicação que estava restrita a poucos cultivos (hortaliças, tomate industrial, entre outros) vem se expandindo rapidamente. No Brasil, a cana-de-açúcar e o café são alguns dos cultivos que tem se beneficiado do gotejamento enterrado com excelentes resultados.

Nos últimos anos o interesse na irrigação de grãos (soja, milho, trigo) além do algodão, alfafa e pastagens, tem levado a um crescimento acelerado da aplicação de SDI. Os parâmetros de instalação (profundidade, preparo de solo, plantio e instalação por GPS, escolha da vazão e espaçamento dos gotejadores) e o manejo do sistema de gotejamento, incluindo a garantia de germinação dos cultivos e os ajustes do sistema para as condições de plantio direto já está consolidada. O gotejamento enterrado é uma realidade e sua aplicação nos cultivos anuais é uma das áreas de maior potencial de crescimento do gotejo em vários países, em especial no Brasil, Argentina e Estados Unidos.

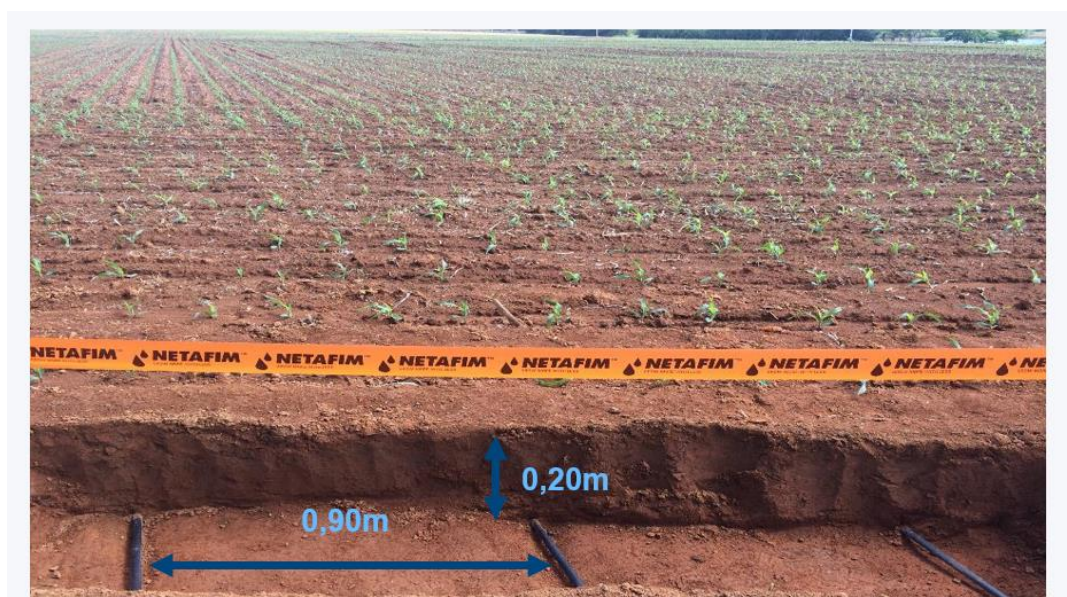


Figura 18. Vista de um sistema de irrigação por gotejamento com linhas enterradas e cultivos anuais.

A utilização de águas residuais de várias indústrias (leiteira, sucroalcooleira, outras) e de reúso de água (reciclada) é mais uma das grandes oportunidades de crescimento. A tecnologia de gotejo enterrado ambiental, E-SDI (*environmental sub surface drip irrigation*), aliado à segurança que os novos gotejadores apresentam, vai permitir que se trabalhe com esse tipo de recurso, aumentando significativamente o volume total de água a ser disponibilizado. Israel recicla e reutiliza mais de 80% do esgoto para fins de irrigação. Espanha e Estados Unidos são alguns dos outros países onde o reciclado de água para fins de irrigação

é comum. Nesse momento essa solução é praticamente inexistente no Brasil e deveria ser considerado com uma alternativa adicional, em especial nas áreas semiáridas do País.

Outro cultivo em que o gotejamento enterrado pode vir a crescer, se destaca o caso do arroz, o cereal mais plantado em todo o mundo. A maneira tradicional do plantio de arroz, por inundação, é cada dia mais questionado dado o grande volume de água utilizado. As experiências com SDI no arroz reduzem em mais 60% o volume de água utilizado com um incremento de produção acima de 20 a 40%. Esses estudos já estão saindo da fase de análise preliminar e em breve entrarão em fase comercial.



Figura 19. Vista de uma área de produção de arroz irrigado com sistema de irrigação por gotejamento com linhas enterradas.

A irrigação por gotejamento, desenvolvida nos anos 60, pode ser considerada a primeira tecnologia “de precisão” utilizada na agricultura. O controle que o sistema oferece, chegando ao limite de se determinar a quantidade exata de água, fertilizantes e produtos químicos aplicado nas lavouras, faz com que naturalmente seja incorporado nesse conceito uma segunda “onda tecnológica”, a agricultura digital.

A irrigação de precisão (gotejamento) já está se beneficiando do impacto das novas tecnologias de controle digital, o *digital farming*, o que vai tornar o gotejamento ainda mais atrativo e eficiente. As novas técnicas de monitoramento, via satélite e/ou drones, vem permitindo um controle absoluto dos cultivos, ao nível de árvores individuais. As características de controle e eficiência da irrigação por gotejo, “casam” perfeitamente com os avanços na digitalização da agricultura.

Um dos impactos imediatos dos avanços da agricultura de precisão / gotejamento é a tendência de se utilizar gotejadores com vazões cada vez menores no futuro. Gotejadores com vazões menores do que 1 L h^{-1} serão utilizados cada vez mais na agricultura; já se estuda emissores de $0,4 \text{ L h}^{-1}$, chegando até a gotejadores de $0,25 \text{ L h}^{-1}$.

Esses mesmos gotejadores serão utilizados para o gotejamento enterrado (SDI) ou para a utilização de águas de baixa qualidade ou residuais (E-SDI). A qualidade desses

emissores vai permitir que se trabalhe com os mesmos graus de filtragem dos emissores atuais, sem necessidade de filtros especiais e/ou tratamentos de água sofisticados.

Alguns países têm investido pesadamente em grandes projetos de irrigação por gotejamento para pequenas propriedades, em especial os projetos comunitários na Índia. Pode ser que esse modelo venha a se estender para outros países também, dando oportunidades a pequenos produtores de trabalhar com alta tecnologia de irrigação.

Ainda não é possível avaliar o impacto econômico / social da irrigação por gotejamento quando alcançar os milhares de pequenas e médias propriedades no Brasil, que não irrigam ou irrigam com sistemas menos sofisticados. Novas soluções mais simples e fáceis de instalar vão ser introduzidas no mercado ano após ano. E à medida em que o gotejamento vai chegando a esse mercado (e esse processo é inevitável), vai-se observar um crescimento enorme da tecnologia com reflexos imediatos na produção de alimentos.

3.12 Considerações finais

A irrigação por gotejamento deve ser interpretada como uma tecnologia de distribuição de água e nutrientes, com uma eficiência associada a esse processo sem similar em qualquer outro sistema de irrigação.

A "máquina" que compõe o sistema de irrigação por gotejo, composta por filtros, válvulas reguladoras de pressão, tubos gotejadores regulares ou autocompensados, etc., permite ao usuário um controle e precisão na aplicação de água, fertilizantes e defensivos sem precedente na história da agricultura.

Para que se possa extrair o máximo desse equipamento deve-se utilizar o mesmo dentro de critérios de manejo, adequando-se o sistema a cada caso específico, levando-se em conta as características climáticas e pedológicas onde esses sistemas estão sendo aplicados. Esses são os aspectos da "inteligência" do sistema, que não devem ser relegados a um segundo plano, sob o risco de não se obter os resultados agrônômicos esperados. De uma forma simplista pode-se associar a máquina do sistema de irrigação por gotejo com o "*hardware*" de um computador, enquanto a prática do manejo da água e fertirrigação pode ser entendida como o "*software*". O sucesso agrônômico requer uma ótima combinação de ambos.

As altas produtividades, a diminuição de custos operacionais e a sinergia existente entre a tecnologia de irrigação por gotejamento com uma política moderna no gerenciamento de recursos hídricos e ambientais, assim como os ganhos de produtividade obtidos pode ser interpretado como o início de uma nova fase na história da agricultura mundial, incorporando uma das mudanças tecnológicas mais profundas já verificadas na produção agrícola, desde que o homem se fixou ao campo.

Referências

BERNARDO, S.; SOARES, A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de Irrigação**. 8. Ed. Viçosa: Ed. UFV, 625p., 2008.

NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. Trickle Irrigation for Crop Production. Design, Operation and Management. **Developments in Agricultural Engineering**, 9. Elsevier, 1986.

CAPÍTULO 4

4 O MANEJO DA IRRIGAÇÃO E O FUTURO DA AGRICULTURA IRRIGADA

Daniel Fonseca de Carvalho e Luiz Fernando Coutinho de Oliveira

Resumo

O manejo da irrigação é uma técnica fundamental no fornecimento de água, no momento e na quantidade certa para o desenvolvimento normal das plantas. Neste capítulo são abordados aspectos de manejo com base na demanda agrometeorológica da região (lisimetria, tanque Classe A e modelos de estimativa da ET), balanço de água no solo (tensiometria, TDR e FDR) e características fisiológicas das plantas (temperatura foliar, resistência estomática, potencial hídrico e fluxo de seiva), além de manejo com acionamento automático e com *deficit* hídrico controlado.

4.1 Introdução

A água é um fator essencial no desenvolvimento da atividade agropecuária e seu uso otimizado na produção de alimentos constitui um dos principais desafios, principalmente no cenário mundial de mudanças climáticas (SACCON, 2018). Apesar de aproximadamente 20% da área total cultivada no planeta ser irrigada, sua participação atinge 40% da produção de alimentos, fibras e culturas bioenergéticas (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2017), demonstrando a importância da irrigação na viabilização do setor agrícola em diferentes regiões.

A agricultura irrigada mundial ocupa uma área estimada de 310 Mha, sendo 75% localizada na Ásia. De acordo com o censo Agropecuário 2017, o Brasil irriga cerca de 7,0 milhões de ha (CARVALHO *et al.*, 2020), se colocando entre os dez países com maior área irrigada no mundo. Em termos globais, a área irrigada deve aumentar nas próximas décadas e atingir 402 Mha até 2030, sendo 40 Mha em países em desenvolvimento (DARKO *et al.*, 2015). Como consequência, as reservas hídricas poderão ser afetadas e por isso, o uso sustentável da água tem se tornado cada vez mais uma preocupação mundial (VELASCO-MUÑOZ *et al.*, 2018). No Brasil, a área potencialmente irrigável é avaliada em 61,4 Mha, sendo 18,4 Mha em regiões com alta aptidão de solo e relevo (SPAROVEK *et al.*, 2015).

O uso racional da água na agricultura irrigada deve nortear o planejamento e, principalmente, o manejo da irrigação. Embora a irrigação esteja associada a níveis tecnológicos elevados (MAROUELLI *et al.*, 2011), a irrigação no Brasil ainda é praticada de forma inadequada, resultando em grande desperdício de água. Nesse sentido, a estimativa da necessidade hídrica das culturas assume grande destaque, na medida em que se busca maximizar a produção e minimizar os custos. Portanto, o manejo da irrigação tem como objetivo aplicar água às plantas na medida correta (quanto?) e no momento adequado (quando?), o que não constitui uma tarefa fácil. Envolve tomada de decisão e, por isso, é fundamental que os produtores irrigantes e todos os agentes envolvidos tenham consciência da importância da água e saibam que a técnica da irrigação não pode ser confundida com molhação ou encharcamento do solo.

A aplicação de água em quantidade insuficiente para atender à necessidade hídrica da planta, normalmente proporciona baixos níveis de produtividade, porém, a aplicação em excesso, que pode parecer uma segurança para o agricultor, favorece a lixiviação de nutrientes, mantém o solo com baixa aeração, aumenta os custos de produção e compromete a qualidade e a produtividade dos cultivos. Além disso, a aplicação excessiva provoca redução

na disponibilidade de recursos hídricos da região, comprometendo o seu uso para outras atividades e até mesmo para aumento da área irrigada pelo agricultor.

Apesar dos benefícios relacionados à atividade, muitos irrigantes ainda não adotam qualquer estratégia de manejo de água da irrigação, muitas vezes em função carência de informações meteorológicas, desconhecimento da capacidade de retenção de água no solo, baixa prioridade do manejo da irrigação em relação às demais atividades agrícolas (calendário de semeadura/colheita, adubação, aplicação de defensivos, entre outros), falta de informação/consciência ambiental e falta de assistência técnica especializada.

O manejo da água na agricultura irrigada pode ser executado com diferentes bases de informação: demanda agrometeorológica na região, balanço de água no solo e características fisiológicas das plantas. É comum o uso de mais de uma dessas bases de informação, sendo a demanda agrometeorológica associada a um balanço de água no solo a forma mais usual. Apesar do fato de que parâmetros fisiológicos da planta deveriam sempre ser utilizados para o correto manejo da irrigação, pois refletem o real estado hídrico da cultura, em situação prática ainda são pouco utilizados, pois seus processos de avaliação, de um modo geral, são mais caros, trabalhosos e complexos para uso comercial quando comparados àqueles com base no solo e em dados climáticos.

4.2 Manejo da água baseado em dados climáticos

Os fatores ambientais influenciam a transpiração dos vegetais à medida que alteram o gradiente de vapor d'água entre a superfície da folha e o ar que a envolve. Assim, os principais fatores que afetam a evapotranspiração e, conseqüentemente, o consumo de água das plantas são o balanço de energia entre o solo e a folha, a umidade e temperatura do ar, o vento e a disponibilidade hídrica (ANGELOCCI, 2002).

O consumo de água do conjunto solo-planta, conhecido também como necessidade hídrica da cultura, corresponde à quantidade de água que é transferida para atmosfera na forma de vapor, caracterizando o processo da evapotranspiração (ET), que é um fator básico na determinação do total de água necessária à cultura, quando se deseja um manejo correto da água nos trabalhos de irrigação e drenagem.

Existem diferentes metodologias para medição ou estimativa da ET e em função da sua magnitude nos balanços hidrológicos, pequenos erros em seus valores podem representar volumes substanciais de água. Serão discutidas as técnicas da lisimetria e da estimativa de ET por modelos e tanque Classe A.

4.2.1 Manejo da irrigação por lisimetria

Os lisímetros tem sido largamente empregados para desenvolvimento, calibração e validação de modelos de ET (ALLEN *et al.*, 2011), visando caracterizar a evapotranspiração de grandes áreas de cultivo. Porém, tanto para essas finalidades quanto para manejo de irrigação, é primordial que as condições vegetativas e ambientais no lisímetro representem áreas maiores, ou seja, a vegetação no interior do lisímetro deve apresentar as mesmas condições (altura e área foliar semelhante) da vegetação na área que o circunda.

Os principais fatores ambientais que afetam as medições da ET nos lisímetros são os efeitos da advecção, as dimensões do lisímetro, a espessura e a distância entre as paredes do lisímetro, a altura de suas bordas, além das diferenças de densidade entre a vegetação dentro e fora do lisímetro. Assim, os lisímetros devem apresentar paredes e abertura entre as paredes interna e externa com a menor espessura possível. No manejo do sistema de irrigação, devem ser aplicadas as mesmas lâminas de água dentro e fora do lisímetro para que o regime de umidade no seu interior acompanhe umidade da área adjacente.

De acordo com Allen *et al.* (2011), os lisímetros podem ser agrupados em três categorias: (i) de lençol freático constante, que fornecem dados confiáveis para períodos semanais ou maiores, e representam áreas onde o lençol freático está próximo da superfície e é mantido no mesmo nível dentro e fora do lisímetro, (ii) de percolação, frequentemente empregados em áreas de alta precipitação, em que as variações na água armazenada no solo são determinadas por métodos de determinação da umidade ou por medidas de entradas (precipitação e irrigação) e saída (volume percolado), e (iii) de pesagem, em que as variações da água do solo são determinadas pela pesagem de toda a estrutura com balança mecânica ou célula de carga. Quando bem manejados, esse tipo de lisímetro fornece dados mais precisos em períodos curtos de tempo, sendo os de célula de carga os de maior precisão. As células de carga medem uma corrente elétrica que se altera continuamente em função de deformações causadas pela variação da massa sustentada (PEREIRA *et al.*, 2002).

Com o desenvolvimento de novas técnicas construtivas e a queda nos custos das células de carga e dos sistemas de aquisição de dados, os lisímetros de pesagem se tornaram de fácil construção e de baixo custo. Segundo Silva *et al.* (1999), além da exatidão, os sistemas de pesagem geralmente apresentam distribuição homogênea da massa do sistema e podem apresentar sensibilidade de até 0,1 kg ou 0,1 mm.

Há vários exemplos de uso da lisimetria no Brasil, podendo citar os trabalhos de Faria *et al.* (2006) que construíram uma bateria de dez lisímetros de pesagem com 2,7 m² de área e 1,3 m de profundidade, e Campeche *et al.* (2011), que instalaram e calibraram um lisímetro circular de grande porte, com 5,72 m² e 1,0 m de profundidade. Essa estrutura foi utilizada para estimativa da necessidade hídrica do coqueiro anão verde em São Cristóvão, SE (SOUSA *et al.*, 2011). Utilizando lisímetro de pesagem com 1,0 m² de área e 070 m de profundidade, as necessidades hídricas da berinjela (LIMA *et al.*, 2012), do milho (SOUZA *et al.*, 2012) e repolho (ARAÚJO *et al.*, 2019) foram determinadas na região de Seropédica, RJ.

4.2.2 Manejo com base na estimativa da ETo por modelos

A medição direta constitui a forma mais precisa para a estimativa da ET. Porém, em virtude das limitações associadas à construção e operação de lisímetros, o uso de modelos físico-matemáticos tem se tornado alternativa prática para a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) e, posteriormente, da evapotranspiração da cultura (ETc).

O boletim FAO 24 (DOORENBOS; PRUITT, 1977) apresentou diferentes métodos de estimativa da ETo, cujo desempenho variava com relação à adaptabilidade dos mesmos às diferentes condições climáticas locais. Posteriormente, o boletim FAO 56 (ALLEN *et al.*, 1998) apresentou o método de Penman-Monteith como padrão em virtude do seu bom desempenho em regiões com diferentes características climáticas. O método proporciona resultados que se aproximam da ETo, por representar as condições físicas presentes no processo e incorporar variáveis fisiológicas e aerodinâmicas.

A ETc é obtida pela multiplicação do valor de ETo pelo coeficiente de cultivo (Kc) que é dependente do tipo de cultura, de parâmetros climáticos, da taxa de evaporação do solo e do estágio de desenvolvimento da cultura. O coeficiente de cultivo pode se constituir de um único valor (Kc único) ou da soma de dois valores, descrevendo separadamente o efeito da evaporação (K_e) e da transpiração (K_{cb}) entre as superfícies (grama x campo cultivado). Para fins de planejamento e manejo da irrigação, normalmente tem sido utilizado o Kc único, sendo esta metodologia mais popular.

Os valores de Kc para diferentes culturas são facilmente encontrados na literatura. Porém, os valores devem ser usados com cautela, pois são válidos para culturas que estejam em desenvolvimento pleno, sem apresentar qualquer tipo de deficiência hídrica ou nutricional. Além disso, os valores divulgados pela FAO (ALLEN *et al.*, 1998) são válidos para clima sub-

úmido, no qual a umidade relativa média mínima diária se encontra na faixa de 45% e a velocidade média do vento de $2,0 \text{ m s}^{-1}$. Sempre que as condições climáticas locais diferirem destas, os coeficientes devem sofrer correções para que possam melhor representar a evapotranspiração do cultivo. Esse problema é resolvido quando valores de K_c são determinados diretamente em campo, levando em consideração os aspectos regionais.

4.2.3 Manejo com base na ETo obtida pelo tanque Classe A

A evapotranspiração pode também ser estimada por meio de medidas da taxa de evaporação de uma superfície líquida, sendo esta obtida diretamente em aparelhos denominados evaporímetros. Os mais conhecidos são os atmômetros e os tanques de evaporação, e medem o poder evaporativo da atmosfera, influenciado pelos efeitos da radiação, temperatura, vento e umidade.

Apesar de sofrerem grande influência das condições ambientais, os tanques de evaporação são muito empregados para manejo de irrigação, sendo o Classe A é o mais conhecido. Consiste em um tanque circular construído em chapas de aço galvanizado ou inox, com 120,7 cm de diâmetro e 25,0 cm de profundidade. É instalado sobre um estrado de madeira, em nível, com 15 cm de altura, o qual é colocado normalmente sobre um terreno gramado. Segundo recomendações da FAO (ALLEN *et al.*, 1998), o nível da água no tanque deve ser mantido entre 5,0 e 7,5 cm abaixo da borda, devendo haver reposição ou retirada de água quando o nível estiver fora da faixa. A medida da evaporação pode ser realizada manualmente, utilizando uma régua ou um parafuso micrométrico, também denominado micrômetro de gancho, instalado dentro de um poço tranquilizador. A vantagem de se utilizar o parafuso micrométrico é obter uma leitura mais precisa do nível d'água. Quando se utilizam sensores de nível, normalmente os mesmos estão acoplados a sistemas de aquisição de dados (*datalogger*) permitindo, inclusive, leituras de evaporação em curtos espaços de tempo.

O tanque Classe A constitui um dos métodos mais simples e viáveis para o manejo da irrigação, pois o agricultor irrigante pode, sem muita dificuldade, dispor de um equipamento na propriedade. O método consiste em obter leituras de evaporação, que são geralmente obtidas diariamente na parte da manhã. As leituras de evaporação (EV) devem ser convertidas em ETo por meio de um coeficiente, denominado K_t , que depende das condições locais onde o tanque está instalado, da bordadura, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Pode ser obtido por meio de equações ou em tabelas, para as condições de presença e ausência de cobertura na bordadura.

4.2.4 Manejo com base na evapotranspiração por sensoriamento remoto

A nível de bacia hidrográfica ou em grandes áreas cultivadas, a estimativa da evapotranspiração pode ser feita por meio de técnicas de sensoriamento remoto, permitindo a obtenção de dados com alta resolução espacial e temporal e rapidez na coleta de informação. A partir das interações físicas na interface superfície-atmosfera, Bastiaanssen *et al.* (1998) propuseram um algoritmo para a estimativa instantânea das componentes do balanço de energia por sensoriamento remoto, denominado Balanço de Energia para Superfície Continental (*Surface Energy Balance for Land* - SEBAL), tornando possível quantificar a evapotranspiração de uma cultura, em tempo real. De acordo com Monteiro *et al.* (2014), o SEBAL considera a variabilidade espacial de elementos micrometeorológicos por meio de funções semiempíricas, estimando a evapotranspiração a partir de imagens de satélite e de dados da região, como temperatura do ar e velocidade do vento.

O algoritmo já foi avaliado em diferentes regiões do Brasil, apresentando resultados satisfatórios na cultura do algodão no semiárido cearense (SANTOS *et al.*, 2010), no cultivo

da soja no Rio Grande do Sul (MONTEIRO *et al.*, 2014), em café no cerrado mineiro (COSTA *et al.*, 2019), dentre outros.

4.3 Manejo da água baseado no balanço de água no solo

Seja pelo conteúdo ou pela medida da energia com que está retida pela fração sólida do solo, a quantidade de água no solo é uma variável utilizada em diversos estudos, sendo o seu monitoramento um importante componente no manejo da água para irrigação. O método padrão de determinação da umidade é baseado em amostragem de solo e análises gravimétricas do material coletado, necessitando para isso, um período de no mínimo 24 h entre as medidas da massa úmida e da massa seca do material de solo. A partir da década de 1960, vários métodos foram sendo desenvolvidos e com os novos dispositivos eletromagnéticos baseados em dielétrico e capacitância, medidas do conteúdo de água do solo começaram a ser empregados em substituição ao procedimento gravimétrico (padrão).

Todos os métodos de determinação da umidade possibilitam a estimativa da lâmina de água a ser aplicada por meio do produto entre a água disponível útil e a profundidade do sistema radicular da cultura em questão (FOLEGATTI *et al.*, 2004). A água disponível no perfil é dada pela diferença da umidade na capacidade de campo, em volume, com umidade atual do solo.

Além do método gravimétrico (padrão) existem diversas metodologias para monitoramento da água no solo, destacando-se o tensiômetro, pela praticidade e baixo custo, e as técnicas da reflectometria no domínio do tempo (TDR) e da frequência (FDR). A opção por um determinado método varia de acordo com a finalidade, os objetivos e a disponibilidade instrumental existente.

4.3.1 Manejo com base na umidade do solo utilizando tensiômetro

No método tensiométrico, a determinação da umidade do solo é feita de forma indireta, a partir da tensão com que a água está retida no solo. A leitura obtida no tensiômetro é utilizada para calcular o potencial matricial de água no solo, a partir do qual é possível obter o valor do conteúdo de água no solo por meio de modelos matemáticos que descrevem o comportamento da curva característica, também denominada de curva de retenção da água no solo. Existem diversos modelos desenvolvidos para representar a curva de retenção sendo o de Van Genuchten (1980), o mais utilizado.

O tensiômetro pode medir tensões cujo potencial matricial varia de 0 (saturação) a -0,75 atm, atingindo somente uma parte da "água útil do solo" (em solos arenosos, cobre $\pm 70\%$ e em solos argilosos, $\pm 40\%$). Este intervalo, apesar de limitado, representa uma importante faixa de potencial e umidade do solo em práticas agrícolas.

Além dos modelos tradicionais (tensiômetros de Bourdon e de mercúrio), tem sido muito utilizado o tensiômetro de punção, que mede o potencial matricial a partir de um tensiômetro digital ou analógico, cuja vantagem é se dispor de apenas um dispositivo de leitura (tensiômetro) para um grande número de sensores na área irrigada. Em complemento, os transdutores de pressão têm sido adaptados a tensiômetros de punção, facilitando o armazenamento das leituras em dispositivos *datalogger*.

4.3.2 Manejo com base na umidade do solo utilizando TDR

O equipamento baseado na reflectometria no domínio do tempo constitui um dos mais modernos medidores de umidade no solo e se baseia no tempo de decaimento de um sinal ou o tempo de retorno de um pulso elétrico. O equipamento em si é um transmissor/capacitor de ondas, o qual conectado a cabos e hastes metálicas, emite um sinal de onda ou um pulso no

solo. Este sinal se interage com o meio onde se deseja medir a umidade, e um sensor realiza a leitura do seu comportamento e apresenta ao usuário. O equipamento emite um pulso na frequência de microondas e o tempo de retorno é da ordem de décimos de segundos.

Para se medir o conteúdo de água no solo são utilizados diferentes tipos de sonda que são cravadas no solo a fim de medirem as variações, no tempo, da propagação de um pulso elétrico. Os tipos mais comuns são as sondas de cabo paralelo que podem ser construídas com gabaritos apropriados.

Pelo fato de o solo, em geral, ser composto por partículas minerais, orgânicas e água, as constantes dielétricas (K_a) para esses materiais são bem distintas, atingindo, aproximadamente, 1,0 para o ar, de 3,0 a 7,0 para as partículas minerais e de 80,0 para água. Justamente devido à grande diferença dos valores de K_a da água para os outros constituintes do solo, a velocidade de propagação de uma onda de energia em hastes paralelas inseridas no solo é dependente do conteúdo de água no mesmo, fazendo com que a TDR seja um método eficiente de se avaliar a umidade no solo. De posse de K_a , a umidade do solo (θ) é obtida por meio de equações, que de preferência, devem ser calibradas diretamente na área a ser monitorada, para maior confiabilidade. Apesar do custo elevado, a técnica permite a medição do conteúdo de água do solo próximo à superfície; permite medidas em ampla faixa de umidade do solo, e permite a obtenção de leituras em faixas específicas de profundidade; para isso, instala-se a sonda no sentido horizontal.

Apesar da existência de modelos de calibração disponibilizados pelos fabricantes, é recomendado que seja realizada calibração local a fim de se obter com maior confiabilidade, valores de umidade do solo para fins de manejo da irrigação. A calibração consiste em coletar, periodicamente, amostras de solo para determinação direta da umidade e medir a constante dielétrica na mesma profundidade. Medidas como estas sendo realizadas vão gerar um conjunto de dados ($\theta \times K_a$) que trabalhados em um pacote estatístico, permitirá a obtenção de uma curva de calibração, após análise de regressão, que correlacione tais variáveis. Essas curvas devem ser obtidas para diferentes profundidades do perfil e tipos de solo existentes na área de plantio.

A TDR foi utilizada por Souza *et al.* (2011) no manejo da irrigação do pimentão, cultivado em diferentes sistemas de cultivo. Por meio das medidas de K_a , a necessidade hídrica da cultura foi determinada, que relacionada à ETo por Penman-Monteith, permitiu o estabelecimento dos coeficientes de cultivo (K_c) para a região. A mesma metodologia foi utilizada por Oliveira Neto *et al.* (2011) no manejo da irrigação no cultivo da beterraba, sendo determinados os coeficientes de cultivo em sistema orgânico de produção sob cobertura morta de leguminosa e gramínea. Carvalho *et al.* (2014) utilizaram o TDR100 (Campbell Sci.) no manejo da irrigação da cenoura, cultivada com diferentes suprimentos de água. As sondas foram instaladas horizontalmente sob as linhas de irrigação por gotejamento, nas profundidades de 0,05, 0,10 e 0,20 m.

4.3.3 Manejo com base na umidade do solo utilizando FDR

A medida da umidade do solo pode ser realizada por meio dos sensores de FDR, também conhecida por sonda de capacitância. Os sensores do tipo capacitivos têm seu princípio de funcionamento baseado na capacitância elétrica que determina por sua vez a constante dielétrica do solo. Quando ativado, a matriz solo-água-ar forma o meio dielétrico deste capacitor. A capacitância aumenta com o aumento do número de moléculas de água livre, e com os dipolos respondendo ao campo elétrico criado pelo capacitor (PALTINEANU; STARR, 1997).

Os sensores FDR são confundidos com os TDR, pois ambos medem a constante dielétrica do solo. Entretanto, a FDR mede o tempo de carga de um condensador e este é

função da constante dielétrica do solo que rodeia o condensador, enquanto a TDR determina a constante dielétrica de um meio, medindo o tempo que leva uma onda eletromagnética a propagar-se por uma linha de transmissão, sendo função da constante dielétrica do meio que rodeia a linha de transmissão.

Este tipo de sensor de determinação de umidade permite a medição em várias profundidades e locais em tempo real e têm sido utilizados no manejo da irrigação em diferentes culturas, requerendo como qualquer medidor de umidade, a calibração prévia para o solo que será monitorado. A calibração é feita de forma semelhante à descrita para os sensores TDR.

Mounzer *et al.* (2008) monitoraram o conteúdo de água no solo no cultivo do pessegueiro (*Prunus persica* (L.) Batsch cv. Flordastar) irrigado com 100% da ETc, de acordo com a metodologia da FAO 56, e com doses e frequência de irrigação ajustadas continuamente a partir do conteúdo de água na zona radicular obtido pelas sondas de capacitância de FDR. A partir deste manejo, os autores concluíram que o tratamento de irrigação programado de acordo com as medições da sonda de capacitância proporcionou uma economia de 18% da água de irrigação em relação ao tratamento convencional programado e não teve efeito sobre a produção total ou o crescimento vegetativo de pessegueiros jovens.

4.4 Manejo da água a partir de informações na planta

As relações hídricas na planta envolvem a absorção da água do solo, sua translocação pela planta e a transpiração para a atmosfera, ou seja, a planta integra os efeitos das condições ambientais e faz a interface entre o solo (reservatório de água) e a atmosfera ("sumidouro") (MAROUELLI *et al.*, 2011). De toda a água absorvida pelo sistema radicular apenas uma pequena fração fica retida na planta, sendo a maior parte transferida para a atmosfera na forma de vapor, por meio da parte aérea. A transpiração se torna mais evidente em plantas cultivadas, as quais exigem centenas de quilogramas de água para produzir um quilograma de matéria seca. Numa planta de milho, por exemplo, já foi verificado que cerca de 98% da água absorvida é evaporada, 1,8% é retida na planta e apenas 0,2% é utilizada na fotossíntese.

A princípio, a transferência de água por transpiração pode parecer algo negativo, mas o potencial para tais quantias volumosas de água apresenta profundas implicações no crescimento, produtividade e sobrevivência das plantas, o que alguns autores chamam de evaporação produtiva. A redução no crescimento devido ao estresse hídrico é a principal causa de perdas econômicas e o fracasso de colheita em todo o mundo.

A planta interage com as condições do ambiente formando um sistema, denominado solo-água-planta-atmosfera. O resultado dessa interação se manifesta na aparência visual da planta, principalmente coloração e ângulo de posição das folhas, e em atributos fisiológicos, como a transpiração, o potencial hídrico foliar, o potencial osmótico, a resistência estomática, a temperatura foliar do dossel que caracterizam seu estado hídrico. Portanto, a possível quantificação desses atributos fisiológicos representa um método potencial de manejo de irrigação.

4.4.1 Temperatura foliar

Na natureza, a transpiração desempenha um importante papel no arrefecimento das folhas. Portanto, as plantas evaporam grandes quantidades de água para a atmosfera e, assim, dissipam grandes quantidades de energia rebaixando assim a temperatura da sua parte aérea. Ao se medir as temperaturas do ar (T_a) acima do dossel e a da parte aérea de uma cultura (T_c), pode-se determinar um diferencial de temperatura, que se correlaciona com a disponibilidade de água no solo. Assim, quanto maior for este diferencial menor será o *deficit*

de umidade no solo, permitindo que a planta transpire para promover o arrefecimento das folhas. Por outro lado, se há *deficit* de umidade no solo, haverá um decréscimo da transpiração que promoverá um aquecimento das folhas, fazendo com que T_c se torne maior que T_a .

O diferencial de temperatura ($T_c - T_a$) pode ser associado aos deficits de umidade no solo e do vapor d'água na atmosfera e ao fluxo de calor sensível. Jackson *et al.* (1981) sugeriram que a disponibilidade de água para uma dada cultura pode ser estimada por meio da normalização do domínio da diferença de temperatura entre T_c e T_a . A técnica da termometria de infravermelho pode ser empregada na estimativa da evapotranspiração, por meio da determinação do calor sensível da equação do balanço de energia de uma cobertura vegetal ou da resistência aerodinâmica do dossel. Essas variáveis compõem o modelo de Penman-Monteith.

4.4.2 Transpiração e resistência estomática (porometria)

A perda de água por transpiração nas plantas se deve à transpiração cuticular, à transpiração lenticular e à transpiração estomática, sendo esta última a mais importante na interação entre a planta e o ambiente. Quando os estômatos abrem, o grau de saturação mantido nos espaços intercelulares depende da taxa de difusão do vapor para o exterior, e esta depende, por sua vez, da resistência estomática e da densidade de pressão de vapor da atmosfera.

O fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera depende dos gradientes de potencial e das condutividades hidráulicas no solo, nas raízes, no xilema, nos estômatos e na camada de ar acima do dossel. Desconsiderando a resistência cuticular, pode-se assumir que a resistência foliar devido à difusão de vapor de água para a atmosfera se deve à resistência estomática, que é variável com o nível de turgescência das células. O aumento da resistência estomática no decorrer do dia, provocado pelo aumento do *deficit* de pressão de vapor, promove uma perda de turgescência das folhas, justamente para prevenir um aumento da taxa de transpiração.

Não há métodos biofísicos que permitam a medição direta e quantitativa da abertura estomática no campo. No entanto, aparelhos denominados porômetros podem ser empregados para medições indiretas da verdadeira abertura total dos estômatos nas plantas. O porômetro de difusão, também chamado de equilíbrio dinâmico, mede a taxa de transpiração de parte da folha numa câmara ventilada, mantendo um balanço de entrada de ar seco, controlado de acordo com a taxa de transpiração. Na utilização deste equipamento, selecionam-se folhas saudáveis sem sintomas de deficiência nutricional ou ataque de pragas e doenças, e posicionadas no terço médio da altura total da planta. O aparelho registra a resistência estomática, radiação na faixa do visível, temperatura da folha e da câmara, umidade relativa e a transpiração. Essas leituras devem ser feitas nas partes superiores e inferiores das folhas devido às diferenças do número de estômatos. Curvas diárias da resistência estomática são valiosas para a melhor interpretação do comportamento da planta em relação ao *deficit* de água no solo e à demanda de água pela atmosfera.

4.4.3 Potencial hídrico foliar

O potencial hídrico foliar indica o estado hídrico das plantas, expressando a reação da planta ao excesso ou ao *deficit* de água no solo, e permitindo, assim, definir o momento de se iniciar a irrigação. O estado hídrico da planta é dinâmico, modificando não somente em função da disponibilidade de água no solo e das condições atmosféricas, mas também com o estágio de desenvolvimento da planta. O nível de hidratação de um tecido está intimamente relacionado com atividade fisiológica deste. Assim, o potencial hídrico pode ser aplicado como atributo para se avaliar a atividade fisiológica de um tecido ou célula. Nesse sentido, o

comportamento estomático e a fotossíntese, entre outros processos, podem ser afetados pelo decréscimo do potencial hídrico foliar, resultante de estresse hídrico ocorrido em qualquer estágio de desenvolvimento da planta.

Quando os estômatos estão fechados, a pressão de vapor nos espaços intercelulares está muito perto da saturação; quando os estômatos se abrem, inicia-se o processo de difusão do vapor para o exterior, desenvolvendo um gradiente de pressão de vapor entre as paredes das células, local de evaporação, e a câmara estomática.

O potencial total da água e seus principais componentes podem ser obtidos por vários instrumentos e em diferentes partes das plantas, sendo o psicrômetro, o higrômetro e a câmara de pressão, ou bomba de Scholander, os mais utilizados na pesquisa científica. Para avaliação do potencial de água na folha, a câmara ou bomba de pressão, ou ainda bomba de Scholander, apresenta boa possibilidade de utilização na irrigação. Esse equipamento tem sido muito aplicado em condições de campo por ser de uso simples e rápido. O equipamento se baseia no equilíbrio das pressões do gás, injetado dentro de uma câmara hermeticamente fechada contendo uma folha, e da água no xilema da folha.

De maneira geral, para culturas em pleno desenvolvimento e se há *deficit* de água no solo, os valores do potencial total de água no solo variam entre -100 a -10 kPa, sendo que na planta, para as mesmas condições, o potencial varia de -4 a -0,5 MPa e na atmosfera, de -100 a -10 MPa (REICHARDT; TIMM, 2004). Essas diferenças de potenciais proporcionam gradientes responsáveis pelo fluxo de água no sistema contínuo solo-planta-atmosfera. Avaliando os potenciais de água no solo, nas folhas de cafeeiros irrigados para as condições do cerrado e na atmosfera, Oliveira *et al.* (2009) obtiveram variações de -69,25 a -2,25 kPa, de -3,13 a -0,21 MPa e de -261,04 a -40,82 MPa, respectivamente, mostrando que existe um grande diferencial de potencial no sistema solo-planta-atmosfera, responsável pelo fluxo de água neste sistema.

4.4.4 Fluxo de seiva

De forma rápida e precisa, os métodos de dissipação térmica são empregados em medições do fluxo de seiva no xilema com o propósito de investigar a taxa de transpiração das plantas, nos quais uma fonte de calor contínua ou um pulso direcionado de calor é produzido por meio de dispositivos termoeletrônicos. Para isso, sensores são fixados ou inseridos nos troncos ou ramos de plantas, principalmente frutíferas lenhosas, para medição do fluxo de seiva que, no período de 24 horas, tem demonstrado grande aproximação com a transpiração.

Na determinação do fluxo de seiva (transpiração), têm sido utilizados métodos que se baseiam no fornecimento de pulsos de calor ao tronco, no fornecimento contínuo de calor ao tronco, como no método da sonda de dissipação térmica, e no método de balanço de calor. Esses métodos se destacam por serem não destrutivos e permitirem o estudo simultâneo da transpiração em muitas plantas em nível de campo. O método de balanço de calor apresenta a vantagem de não necessitar de calibração, enquanto os outros dois, por medirem, em princípio, a velocidade da seiva, exigem a determinação da área efetiva do xilema para o transporte hídrico, a fim de transformar a densidade de fluxo de seiva em fluxo de seiva.

4.5 Manejo da irrigação com acionamento automático

Nos últimos anos tem se observado um expressivo aumento no uso de tecnologias no setor produtivo, tendo por finalidade a otimização, não somente da mão de obra, mas dos diferentes fatores inerentes à produção agrícola. Sob o ponto de vista científico, vários estudos têm sido conduzidos visando a automação de sistemas de irrigação, possibilitando aplicar a quantidade de água necessária à cultura e no momento mais adequado (LEAL *et al.*, 2014).

A automação de sistemas de irrigação, baseada em sensores de umidade do solo, apresenta potencial para fornecer água às plantas por meio da manutenção do conteúdo de água do solo num intervalo desejado, considerado ótimo ou adequado para o crescimento da planta (MUÑOZ-CARPENA; DUKES, 2005). Um sistema de irrigação automatizado, quando bem programado, apresentará vantagens em relação aos sistemas tradicionais, pois o acionamento manual geralmente é realizado de forma irregular e sem controle, aplicando lâminas excessivas, além do custo de se dispor de operadores para essa função.

Seguindo a técnica de manejo com base no monitoramento da tensão de água no solo, Medici *et al.* (2010) propuseram um acionador automático que utiliza o princípio do tensiômetro, denominado acionador simplificado para irrigação (ASI). Caracterizado como de fácil construção e baixo custo, é composto basicamente de uma cápsula cerâmica, uma mangueira de polietileno e um pressostato ou sensor de nível. O dispositivo pode ser construído utilizando uma vela de filtragem residencial (cápsula) e um pressostato de lavadora de roupa ou louça, facilmente encontrados no mercado.

A cápsula cerâmica é o sensor de solo e deve ser instalada na profundidade que representa o sistema radicular da cultura. Antes da instalação, o sistema deve ser montado e preenchido totalmente com água, a exemplo de um tensiômetro. O pressostato, ligado à rede elétrica, deve estar posicionado a um desnível (h) em relação à cápsula e é exatamente essa altura que irá definir a tensão de acionamento no momento da irrigação. Portanto, estando o sistema instalado e em decorrência da evapotranspiração do cultivo, o conteúdo de água no solo irá diminuir provocando a formação de uma tensão dentro da cápsula que é transmitida pelo tubo flexível até o pressostato. Quando essa tensão atingir o valor correspondente ao desnível "h", o diafragma do pressostato aciona um comutador estabelecendo a passagem da corrente elétrica que irá acionar uma motobomba ou abrir uma válvula solenoide, fornecendo água ao sistema de irrigação. A água aplicada irá umedecer o solo fazendo com que a tensão na cápsula seja alterada, interrompendo a passagem de corrente elétrica pelo comutador e, conseqüentemente, o fornecimento de água pelo sistema de irrigação. Assim, o próprio potencial matricial da água no solo ou substrato irá comandar o acionamento e o desligamento do sistema, evitando aplicação excessiva ou deficitária.

Sousa *et al.* (2020) avaliaram o ASI para irrigação em substratos agrícolas com diferentes características de retenção de água. A partir de transdutores de pressão instalados na mangueira de polietileno, foram registradas tensões máximas de 3,95 e 3,96 kPa, correspondendo, respectivamente, a 0,37 e 0,50 cm³ cm⁻³, respectivamente, em substratos comercial e em substrato compostos por fibra de coco (56,2%) + vermicomposto (18,8%) + pó de granito (25%). Nestas tensões foram verificados acionamentos com tensão em torno de 4,0 kPa.

Diversos estudos já foram desenvolvidos utilizando o dispositivo, seja em vaso ou em campo, com substrato ou solo de diferentes texturas, cujos resultados têm demonstrado a praticidade e a robustez do equipamento (BATISTA *et al.*, 2013; GOMES *et al.*, 2014, 2017; MELLO *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2018; VALENÇA *et al.*, 2018; BUENO *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2020).

4.6 Irrigação com *deficit* controlado

A técnica de manejo da irrigação com *deficit* controlado consiste em aplicar lâminas inferiores às necessárias para atender a demanda hídrica real da cultura, e apesar de afetar a sua produtividade, apresenta benefícios como o aumento da eficiência de irrigação, redução dos custos da irrigação e redução dos riscos associados aos impactos ambientais adversos da irrigação plena. Basicamente, a irrigação deficitária controlada visa atender somente uma fração da demanda de água da cultura por evapotranspiração, podendo ser praticada com irrigação total ou com irrigação suplementar.

O *deficit* de água pode ser imposto durante todo o ciclo da cultura ou somente nas fases menos críticas ao *deficit* hídrico, com menores reflexos na redução da produtividade da cultura. Para isso, é fundamental que sejam conhecidos os coeficientes de resposta da cultura ao *deficit* hídrico (K_y), obtidos com base em experimentação em campo e divulgados pela literatura. Esta técnica é uma alternativa em cenários em que se prioriza a economia de água e sua eficiência, procurando manter um retorno econômico semelhante ou superior à opção de irrigação plena. Assim, para a sua adoção a campo é necessária uma análise de custo de produção e viabilidade econômica detalhada para cada situação (MARTIN *et al.*, 2012).

As estratégias de irrigação deficitária controlada devem levar em consideração fatores importantes que influenciam o comportamento ecofisiológico e a produção das culturas (SÁNCHEZ-BLANCO; TORRECILLAS, 1995) e tem como objetivo a manipulação do crescimento vegetativo e reprodutivo das plantas, uma vez que o estado hídrico é um fator determinante, que influi em todos os aspectos do crescimento e qualidade do produto final (grãos, frutos, etc.). Os autores chamam a atenção para diversos fatores envolvidos que devem ser considerados para que possa validar experimentalmente a sua adoção, dentre eles as características do clima, do solo e da planta, o método e sistema de irrigação empregados além de informações a respeito da resistência à seca e dos períodos críticos de desenvolvimento da cultura. As estratégias de manejo da irrigação deficitária controlada (IDC) envolvem a aplicação de água em função das necessidades fisiológicas; do atendimento da porcentagem da demanda de água de uma cultura e a irrigação de salvamento.

4.6.1 Aplicação de água em função das necessidades fisiológicas

A IDC utiliza o estresse hídrico como meio para potencializar a qualidade do produto, aplicando diferentes níveis de restrição hídrica ao longo dos períodos críticos do desenvolvimento vegetativo e reprodutivo das culturas em níveis específicos, de acordo com o solo, para que as reações fisiológicas da cultura possam ser aproveitadas em benefício da produção (TEIXEIRA, 2015). Os períodos críticos podem ser definidos como os momentos fenológicos em que o desenvolvimento de um estresse hídrico pode condicionar de forma considerável a produção ou a qualidade do produto final. Portanto, a programação da irrigação nos períodos críticos constitui um aspecto essencial na irrigação deficitária controlada, e deve ser realizada principalmente nas fases em que o crescimento e a qualidade dos frutos têm baixa sensibilidade ao *deficit* hídrico (COELHO *et al.*, 2006). Neste caso, o enfoque fisiológico se torna relevante, com especial atenção tanto na fenologia da cultura, quanto na sua tolerância ao *deficit* hídrico.

4.6.2 Atendimento da porcentagem da demanda de água de uma cultura

Essa estratégia visa atender somente uma fração da demanda de água da cultura (FRIZZONE, 2007) e, portanto, a lâmina de irrigação é menor que a evapotranspiração da cultura no período, reduzindo a produtividade, mas com a vantagem de se aumentar a eficiência de aplicação, com redução nos custos operacionais. Esta estratégia é utilizada para se produzir mais do que a situação de sequeiro, de forma sustentável, exigindo um menor volume de água em comparação com a irrigação convencional (FRANÇOIS, 2012). Nesse caso, a lâmina de irrigação é determinada a partir de porcentagens da evapotranspiração, do armazenamento da água no solo, da tensão da água no solo ou da fração da área adequadamente irrigada. Quando o manejo é realizado por tensiometria, valores de tensões da água no solo de -30, -40 ou -50 kPa, por exemplo, são pré-fixados, abaixo do valor definido para a condição de água disponível em que a planta ainda consegue evapotranspirar na sua taxa potencial.

4.6.3 Irrigação de salvamento

Consiste na técnica de se irrigar somente as fases do desenvolvimento da cultura mais sensíveis aos deficits hídricos. É uma prática agrônômica muito utilizada nos canaviais, nas regiões que apresentam altos deficits hídricos como as que ocorrem no cerrado brasileiro (SILVA, 2015). Nas regiões de cerrado, as chuvas são sazonais e há alta demanda atmosférica, acarretando altas taxas de evapotranspiração. Assim, a ocorrência de *deficit* de água no solo promove alterações fisiológicas na planta, tais como o aumento da temperatura foliar, diminuição da condutância estomática, transpiração e fotossíntese, os quais implicam em uma redução na assimilação de CO₂, com conseqüente decréscimo da produtividade (ZINGARETTI *et al.*, 2012).

4.7 Considerações finais

Apesar de ser uma técnica milenar, o manejo da irrigação ainda é considerado insatisfatório na maior parte das áreas cultivadas. Quando mal conduzida, além de não produzir os resultados esperados, a irrigação pode causar perdas econômicas e degradação ambiental, levando a um descrédito da atividade e pressões dos órgãos reguladores e da opinião da sociedade como um todo. Os sistemas de irrigação apresentaram um grande avanço tecnológico, mas o mesmo não tem sido verificado no que se refere à aplicação correta de água para as plantas.

No passado, o manejo da irrigação se baseava apenas no balanço de água no solo, empregando a quantificação da umidade do solo pelos métodos gravimétrico e tensiométrico, ou pelo uso do tanque Classe A. Com o avanço da microeletrônica, métodos de medição da umidade do solo e das condições hídricas das plantas foram desenvolvidos, permitindo uma maior praticidade e rapidez na quantificação da água no solo. Associado a isso, as determinações laboratoriais das características físicas do solo também sofreram inovações com equipamentos mais sofisticados e com o uso de modelos matemáticos para descrever tais características, que associadas às medições de campo, proporcionaram uma maior integração das informações e dos processos de automação dos sistemas.

O desenvolvimento das plataformas automáticas de coleta de dados meteorológicos permitiu programações internas e maior agilidade no balanço hídrico, pela quantificação de chuvas e estimativa da evapotranspiração em tempo real e escala temporal menor que um dia. A ampliação da rede de coletas automáticas e a disponibilização das informações em plataformas digitais, acessíveis por computador e smartphones, associadas às tecnologias de imageamento por radares e sensoriamento remoto, permite ao agricultor a tomada de decisão do momento de irrigar e com controle local, determinar a quantidade de água a ser aplicada.

Atualmente, tem-se a agricultura irrigada de precisão, a nível de propriedade, com o uso de sensores acoplados a estações telemétricas e sensoriamento de baixa altitude com o uso de drones, trazendo ao irrigante uma maior comodidade e praticidade no manejo da irrigação. Informações disponibilizadas nas redes de computadores por órgãos governamentais, como por exemplo o zoneamento de risco climático, vieram também contribuir para a tomada de decisão, na definição do momento ideal de plantio, de modo a aproveitar melhor o regime hídrico, permitindo a aplicação da irrigação suplementar, reduzindo assim o impacto nos corpos hídricos, permitindo assim a ampliação da área irrigada.

O manejo da irrigação visando a otimização do uso da água e a redução dos impactos ambientais continua sendo um desafio para o setor agrícola, e práticas de irrigação suplementar, de irrigação deficitária controlada e o emprego das águas residuárias deverão ser cada vez mais divulgadas e incentivadas.

Referências

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T.A.; JENSEN, M.E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement Accuracy. **Agricultural Water Management**, v.98, p.899-920, 2011.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, **Irrigation and Drainage Paper**, n.56, 300p., 1998.
- ANGELOCCI, L.R. Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: Introdução ao tratamento biofísico. Piracicaba, Edição do Autor, 272p., 2002.
- ARAÚJO, M.S.P.; SOUSA, E.F.; CARVALHO, D.F.; PEREIRA, V.R. Evapotranspiração e coeficientes da cultura do repolho em sistema orgânico. **Irriga**, v.24, p.98-108, 2019.
- BASTIAANSSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v.212-213, p. 198-212, 1998.
- BATISTA, S.C.O.; CARVALHO, D.F.; ROCHA, H.S.; THANER DOS SANTOS, H.; MEDICI, L.O. Production of automatically watered lettuce with a low-cost controller. **International Journal of Food, Agriculture and Environment**, v.11, p.485-489, 2013.
- BUENO, M.M.; LELES, P.S.S.; ABREU, J.F.G.; SANTOS, J.J.S.; CARVALHO, D.F. Water requirement and growth indicators of forest tree species seedlings produced with automated irrigation management. **PLoS One**, v.15, p.e0238677, 2020.
- CAMPECHE, L.F.M.S.; AGUIAR NETTO, A.O.; SOUSA, I.F.; FACCIOLI, G.G.; SILVA, V.P.R.; AZEVEDO, P.V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.5, p.519-525, 2011.
- CARVALHO, D.F.; MARTINS, R.C.F.; SANTOS, J.J.S.; TELES, G.C.; GENTILE, M.A.D.; OLIVEIRA, M.S. Evolution and current scenario of irrigated area in brazil: systematic data analysis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, p.505-511, 2020.
- CARVALHO, D.F.; DOMINGUEZ, A.; OLIVEIRA NETO, D.H.; TARJUELO, J.M.; MARTINEZ-ROMERO, A. Combination of sowing date with deficit irrigation for improving the profitability of carrot in a tropical environment (Brazil). **Scientia Horticulturae**, v.179, p.112-121, 2014.
- COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A.; SIMÕES, W.L.; COELHO, Y.S. Irrigação em citros nas condições do Nordeste do Brasil. **Laranja**, v.27, n.2, p.297-320, 2006.
- COSTA, J.O.; COELHO, R.D.; WOLFF, W.; JOSÉ, J.F.; FOLEGATTI, M.V.; FERRAZ, S.F.B. Spatial variability of coffee plant water consumption based on the SEBAL algorithm. **Scientia Agrícola**, v.76, n.2, p.93-101, 2019.
- DARKO, R.O.; YUAN, S.; HONG, L.; LIU, J.; YAN, H. Irrigation, a productive tool for food security - a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B*. **Soil and Plant Science**, v.66, p.191-206, 2015.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Crop water requirements. Rome: FAO, **Irrigation and Drainage Paper**, n.24, 204p., 1977.
- FARIA, R.T.; CAMPECHE, F.S.M.; CHIBANA, E.Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.237-242, 2006.
- FOLEGATTI, M.V.; SILVA, T.J.A.; CASARINI, E. O manejo da irrigação como elemento essencial na utilização racional dos recursos hídricos. In: THAME, L.C.M. (Ed.). **A cobrança pelo uso da água na agricultura**. Embu: Igual Editora, p.213-219, 2004.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Agricultura irrigada sustentável no Brasil: Identificação de áreas prioritárias**. Brasília, n.1, 243p., 2017.
- FRANÇOIS, T. **Relações hídricas e trocas gasosas em plantas de feijão submetidas à irrigação deficitária**. 2012, 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

- FRIZZONE, J.A. Planejamento da irrigação com o uso de técnicas de otimização. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.1, n.1, p.24-49, 2007.
- GOMES, D.P.; CARVALHO, D.F.; ALMEIDA, W.S.; MEDICI, L.O.; GUERRA, J.G.M. Organic carrot-lettuce intercropping using mulch and different irrigation levels. **International Journal of Food, Agriculture and Environment**, v.12, p.323-328, 2014.
- GOMES, D.P.; CARVALHO, D.F.; MEDICI, L.O.; VALENÇA, D.C.; PINTO, M.F. Growth and production of tomato fertilized with ash and castor cake and under water depths, cultivated in organic potponics. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.39, p.201-209, 2017.
- JACKSON, R.D.; ISON, S.B.; REGINATO, R.J.; PINTER JUNIOR, R.J. Canopy temperature as crop water stress indicator. **Water Resources Research**, v.17, p.1133-1138, 1981.
- LEAL, S.C.O.; CARVALHO, D.F.; MEDICI, L.O. **Dispositivo automático de baixo custo para irrigação**. 1ed. Saarbrücken, Deutschland: Novas Edições Acadêmicas, v.1, 71p., 2014.
- LIMA, M.E.; CARVALHO, D.F.; SOUZA, A.P.; ROCHA, H.S.; GUERRA, J.G.M. Desempenho do cultivo da berinjela em plantio direto submetida a diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.604-610, 2012.
- MARQUELLI, W.A.; OLIVEIRA, A.S.; COELHO, E.F.; NOGUEIRA, L.C.; SOUSA, V.F. Manejo da água de irrigação. In: SOUSA, V.F.; MARQUELLI, W.A.; COELHO, E.F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A. (Ed.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Embrapa Hortaliças; São Luís: Embrapa Cocais; Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura; Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011.
- MARTIN, J.D.; CARLESSO, R.; AIRES, N.P.; GATTO, J.C.; DUBOU, V.; FRIES, H.M.; SCHEIBLER, R.B. Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho. **Irriga, Edição Especial**, p.192-205, 2012.
- MEDICI, L.O.; ROCHA, H.S.; CARVALHO, D.F.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R.A. Automatic controller to water plants. **Scientia Agrícola**, v.67, p.727-730, 2010.
- MELLO, G.A.B.; CARVALHO, D.F.; MEDICI, L.O.; SILVA, A.C.; GOMES, D.P.; PINTO, M.F. Organic cultivation of onion under castor cake fertilization and irrigation depths. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.40, p.1-8, 2018.
- MONTEIRO, P.F.C.; FONTANA, D.C.; SANTOS, T.V.; ROBERTI, D.R. Estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração para áreas de cultivo de soja no sul do Brasil utilizando imagens do sensor TM Landsat 5. **Bragantia**, v.73, n.1, p.72-80, 2014
- MOUNZER, O.H.; VERA, J.; TAPIA, L.M.; GARCÍA-ORELLANA, Y.; CONEJERO, W.; ABRISQUETA, I.; RUIZ-SÁNCHEZ, M.C.; ABRISQUETA-GARCÍA, J.M. Irrigation scheduling of peach trees (*Prunus persica* L.) by continuous measurement of soil water status. **Agrociencia**, v.42, n.8, nov./dez., 2008.
- MUÑOZ-CARPENA, R.; DUKES, M.D. **Automatic irrigation based on soil moisture for vegetable crops**. Rep. ABE356, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Gainesville, 2005.
- OLIVEIRA, L.F.C.; OLIVEIRA, R.Z.; CASTRO, T.A.P. Comportamento fisiológico de cafeeiros submetidos a diferentes disponibilidades de água no solo. **Bioscience Journal**, v.25, n.3, p.83-91, 2009.
- OLIVEIRA, M.S.; CARVALHO, D.F.; GOMES, D.P.; PEREIRA, F.A.C.; MEDICI, L.O. Production of cut sunflower under water volumes and substrates with coconut fiber. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, p.859-865, 2018.
- OLIVEIRA NETO, D.H.; CARVALHO, D.F.; SILVA, L.D.B.; GUERRA, J.G.M.; CEDDIA, M.B. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da beterraba orgânica sob cobertura morta de leguminosa e gramínea. **Horticultura Brasileira**, v.29, p.330-334, 2011.
- PALTINEANU, I.C.; STARR, J.L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.1576-1585, 1997.

- PEREIRA, A.R.; SANTIAGO, A.V.; MAGGIOTO, S.R.; FOLEGATTI, M.V. Problemas operacionais com lisímetros de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p.51-56, 2002.
- PEREIRA, R.M.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; SALES, D.L.; RODRIGUEZ, W.D.M; SOUZA, J.M.F. Viabilidade econômica da irrigação de cana-de-açúcar no cerrado brasileiro. **Revista Irriga e Inovagri**, v.1, n.2, p.149-157, 2015.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri, SP: Manole, p. 478, 2004.
- SACCON, P. Water for agriculture, irrigation management. **Applied Soil Ecology**, v.123, p.793-796, 2018.
- SÁNCHEZ-BLANCO, M.J.; TORRECILLAS, A. Aspectos relacionados com la utilización de estratégias de riego deficitario controlado en cultivos leñosos. In: ZAPATA, M.; SEGURA, P. **Riego deficitario controlado**. Mundi Prensa, 188p., 1995.
- SANTOS, C.A.C; BEZERRA, B.G; SILVA, B.B.; RAO, T.V.R. Assessment of daily actual evapotranspiration with SEBAL and S-SEBI algorithms in cotton crop. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, p.383-392, 2010.
- SANTOS, J.J.S.; PEGO, R.G.; COUTO, B.R.M.; BUENO, M.M.; CARVALHO, D.F. Water requirement, commercial quality and yield response factor of gladiolus produced with automated irrigation on different growing periods. **Ciência e Agrotecnologia**, v.44, p.e017220, 2020.
- SILVA, D.N. Comportamento de genótipos de cana-de-açúcar com irrigação de salvamento em Goianésia-GO. 2015, 68f. Dissertação de Mestrado em Agronomia - Universidade Estadual Paulista, 2015.
- SILVA, F.C.; FOLEGATTI, M.V.; MAGGIOTTO, S.R. Análise de funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v.7, n.1, p.53-58, 1999.
- SPAROVEK, G.; LEITE, C.V.; BARRETO, A.G.O.P.; MAULE, R.F.; DOURADO NETO, D. Análise territorial e potencial da agricultura irrigada no Brasil. **ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna**, v.106, p.50-55, 2015.
- SOUZA, I.F.; AGUIAR NETTO, A.O.; CAMPECHE, L.F.M.S.; BARROS, A.C.; SILVA, V.P.R.; AZEVEDO, P.V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte II: Consumo hídrico do coqueiro anão verde irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.5, p.526-532, 2011.
- SOUZA, W.L.; CRUZ, E. S.; MEDICI, L.O.; SALVADOR, C.A.; CARVALHO, D. F. Avaliação de um acionador automático para irrigação em substratos agrícolas com diferentes características de retenção de água. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v.3, p.3944-3956, 2020.
- SOUZA, A.P.; LIMA, M.E.; CARVALHO, D.F. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo do milho em monocultivo e consórcio, usando lisímetros de pesagem. **Agrária**, v.7, p.142-149, 2012.
- SOUZA, A.P.; PEREIRA, J.B.A.; SILVA, L.D.B.; GUERRA, J.G.M.; CARVALHO, D.F. Evapotranspiração, coeficientes de cultivo e eficiência do uso da água da cultura do pimentão em diferentes sistemas de cultivo. **Acta Scientiarum-Agronomy**, v.33, p.15-22, 2011.
- TEIXEIRA, J.I.M.C.V. Efeitos de estratégias de rega deficitária sobre o rendimento e qualidade da casta Touriga Franca na Região do Douro. 2015, 91f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrônoma - Universidade do Porto, 2015.
- VELASCO-MUÑOZ, J.F.; AZNAR-SÁNCHEZ, J.A.; BELMONTE-UREÑA, L.J.; ROMÁN-SÁNCHEZ, I.M. Sustainable water use in agriculture: A review of worldwide research. **Sustainability**, v.10, p.1-18, 2018.
- VALENÇA, D.C.; CARVALHO, D.F.; REINERT, F.; AZEVEDO, R.A.; PINHO, C.F.; MEDICI, L.O. Automatically controlled deficit irrigation of lettuce in organic potponics. **Scientia Agrícola**, v.75, p.52-59, 2018.

ZINGARETTI, S.M.; RODRIGUES, F.A.; GRAÇA, J.P.; PEREIRA, L.M.; LOURENÇO, M.V. Sugarcane responses at water deficit conditions. In: RAHMAN, I.M.M.; HASEGAWA, H. **Water Stress**. Intech, p.255-276, 2012.

CAPÍTULO 5

5 A EVOLUÇÃO DA IRRIGAÇÃO MECANIZADA MOLDANDO OS RUMOS DA TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO

Gustavo Fanelli Hossri

Resumo

A tecnologia de aspersores de irrigação possui um papel notório no desenvolvimento da agricultura irrigada. No ramo da aspersão mecanizada via pivô central esse fato é bem evidente. Responsáveis pelo último elo na cadeia de transporte de água ao solo, os aspersores passaram por diversas modificações, ao mesmo passo que as demandas desse mercado se expandiram no Brasil. Embora muitas vezes assumindo um papel coadjuvante no sistema de irrigação, observa-se hoje um grande interesse, tanto da sociedade profissional, quanto do mercado consumidor. O presente capítulo visa ilustrar de maneira bastante objetiva de que forma o segmento de tecnologia de aplicação absorveu as demandas apresentadas pelo setor nos últimos anos, e as respostas que serão apresentadas futuramente, preservando sempre a agricultura irrigada em patamares de respeito à utilização inteligente de água.

5.1 Introdução

A cada ano a agricultura nacional entra em níveis profissionais mais elevados e se assemelha mais ao ambiente empresarial. Um dos fatos que auxilia guiar os rumos da evolução nesse sentido pode ser entendido pelo aumento significativo dos custos de produção da lavoura. Os últimos 10 anos foram marcados por uma forte desvalorização cambial em relação à moeda norte americana, impactando diretamente nos três alicerces básicos para condução dos cultivos: Sementes x Defensivos x Fertilizantes. Essa correlação existe, pois ainda temos uma precificação muito dolarizada para os insumos do sistema de produção agrícola. Pelos gráficos a seguir fica evidente essa tendência. Como exemplo foram utilizados custos variáveis e operacionais de soja no Brasil (Figura 1) e a flutuação cambial do dólar perante o real (Figura 2) de 2007 a 2016.

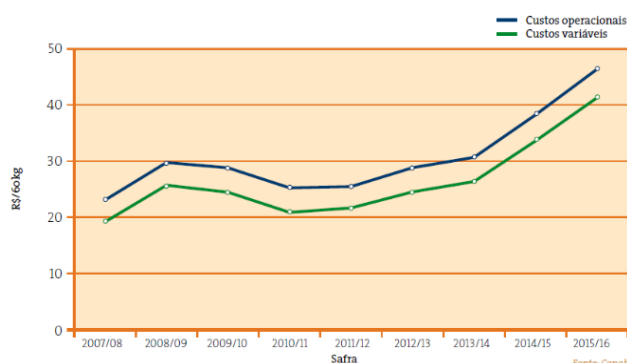


Figura 1. Evolução dos custos operacionais e variáveis da soja no Brasil (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2016).

O cenário pós 2016 não foi diferente, e no ano de 2020 estivemos diante dos maiores patamares históricos, com a moeda americana chegando próximo dos R\$ 6,00. Praticamente nenhum segmento de mercado permaneceu alienado a essa tendência. Conduzir com sucesso lavouras de altas produtividades está cada vez mais desafiador e financeiramente oneroso. Partindo dessa ótica, esse impacto macroeconômico parece ter alterado a sensibilidade ao risco na atividade agrícola e refletiu diretamente na forma como os agricultores estão

investindo seu capital. Conviver com riscos sempre foi realidade dos produtores rurais, porém os altos níveis de capital necessários hoje para plantar e colher, alteram a percepção e redirecionam os investimentos às tecnologias que garantam mais segurança de safra.



Figura 2. Variação cambial. Dólar frente ao Real (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2016).

Dentre os diversos fatores que convergem para instabilidade nos resultados agrícolas, o domínio das práticas agrônômicas sempre se destaca como essencial. Porém independentemente de esforços e do nível de conhecimento dessa ciência, o padrão de produtividade será sempre melhor explicado por fatores abióticos como a temperatura, luz e água - sendo esse o trinômio chave nas equações de captação de energia e desenvolvimento fisiológico das plantas. Mesmo em situações de alto nível tecnológico e organização gerencial, a resultante econômica no campo estará sempre à mercê dos rigores meteorológicos. Cerca de 80% da variabilidade da produção agrícola no mundo se deve a variações de clima ao longo do ciclo das culturas, especialmente nas de sequeiro, sendo esse então um fator decisivo no sucesso ou no fracasso das safras e do agronegócio como um todo (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

Analisando agora pontualmente as variáveis meteorológicas, a **temperatura** é um recurso que até hoje, não é passível de manejo ou manipulação, estando o cultivo em condições normais de campo (em cultivo não protegido). Da mesma forma poderíamos falar de **luminosidade**, porém fatos recentes colocaram esse tema em discussão na comunidade científica, avaliando as possibilidades de se proceder com aplicações suplementares de radiação fotossintética artificial em larga escala, porém ainda sem resultados substanciais. Já no caso da **água**, essa sim é uma prática já dominada pela ciência agrônômica, sendo uma das tecnologias que mais se desenvolve no que tange as práticas de segurança de safra no Brasil. Ter a habilidade e a capacidade de intervir artificialmente no regime hídrico, altera drasticamente o risco da atividade agropecuária.

A realidade de um produtor irrigante é totalmente diferente quando comparada a um produtor em sequeiro. Eliminar a variável hídrica da equação de produtividade é um condicionante não somente do nível de insumos que serão aplicados no ciclo, como também o tipo de cultivo conduzido. Lavouras irrigadas são os ambientes onde as mais altas tecnologias são implementadas, afetando diretamente em toda a cadeia de fornecimento do agronegócio. Com a percepção alterada, o agricultor se sente mais confortável a incrementar o nível de intensificação, objetivando atingir produtividades máximas. Na mesma linha de raciocínio, observamos cultivos específicos como alho, cebola e batata - conhecidos por seu alto valor agregado, serem conduzidos em escala comercial apenas sob a segurança de um sistema de irrigação. Uma lavoura de alho por exemplo, possui custos de implantação e condução 15 - 20 vezes maiores do que uma lavoura de soja. Sendo assim, a quebra de safra por escassez hídrica em um ambiente desse é muito mais impactante.

Como resultado disso, os últimos 10 anos foram marcados por um significativo crescimento na aquisição de sistemas de irrigação, com destaque para os sistemas mecanizados (pivôs centrais) e sistemas localizados (gotejamento). A partir de 2010, sistemas de irrigação incrementaram expansão a uma taxa acima de 150 mil hectares por ano, totalizando um crescimento de mais de 2 milhões de hectares nesse período. Esse número corresponde a 50% da expansão que tivemos anteriormente em um prazo de 49 anos. Pelo histórico de acompanhamento de 1960 até 2009, tinha-se conhecimento de um acumulado de algo em torno de 4 milhões de hectares (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2016). Com esses números fica evidente notar a expressividade desse tipo de tecnologia no contexto agrícola, ao mesmo passo que traçamos otimismo ao futuro.

Tabela 1. Evolução da área irrigada, crescimento anual total (CAT, ha ano⁻¹) e área total (AT, ha), dos sistemas de irrigação no Brasil no período de 2000 a 2006 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS, 2019).

Tipo	Área total irrigada por ano (ha ano ⁻¹)						
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Pivô Central	47.320	50.540	57.820	59.500	47.600	26.600	17.500
Carretel	25.000	29.000	30.000	30.000	22.500	21.000	30.000
Convencional	16.200	15.300	14.650	17.500	15.000	15.000	15.000
Localizada	30.000	33.000	37.000	40.000	38.000	35.000	30.000
CAT	118.520	127.840	139.470	147.000	123.100	97.600	92.500
AT	3.068.480	3.196.320	3.335.790	3.482.790	3.605.890	3.703.490	3.795.990

¹ Histórico até 1999: 2.949.960 ha.

Tabela 2. Evolução da área irrigada, crescimento anual total (CAT, ha ano⁻¹) e área total (AT, ha), dos sistemas de irrigação no Brasil no período de 2007 a 2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS, 2019).

Tipo	Área total irrigada por ano (ha ano ⁻¹)						
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Pivô Central	19.600	49.000	49.500	52.000	57.750	84.000	126.000
Carretel	30.000	30.000	25.000	30.000	32.500	32.500	32.500
Convencional	16.500	20.000	17.000	25.000	29.500	35.400	40.710
Localizada	40.000	47.000	40.000	50.000	56.000	60.480	72.576
CAT	106.100	146.000	131.500	157.000	175.750	212.380	271.786
AT	3.902.090	4.048.090	4.179.590	4.336.590	4.512.340	4.724.720	4.996.506

A Tabela 1 ilustra esse crescimento e os dados são fruto de análises da Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação, órgão da Associação Brasileira de Máquinas e Implementos Agrícolas (ABIMAQ), no qual estão presentes os principais *players* responsáveis por esse segmento.

Tabela 3. Evolução da área irrigada, crescimento anual total (CAT, ha ano⁻¹) e área total (AT, ha), dos sistemas de irrigação no Brasil no período de 2014 a 2020 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS, 2019).

Tipo	Área total irrigada por ano (ha ano ⁻¹)						
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Pivô Central	102.000	78.000	91.000	94.000	92.000	97.500	117.000
Carretel	10.500	6.000	18.000	14.000	13.750	12.500	16.250
Convencional	28.497	28.000	31.000	31.000	31.000	31.000	37.200
Localizada	79.834	75.000	75.000	64.000	64.000	68.500	78.775
CAT	220.831	187.000	215.000	203.000	200.750	209.500	249.225
AT	5.217.337	5.404.337	5.619.337	5.822.337	6.023.087	6.232.587	6.481.812

É fato que a agricultura irrigada é vista como uma ferramenta indispensável na política de desenvolvimento do agronegócio brasileiro, tamanha é a segurança produtiva de alimentos, fibras e energia, que esse segmento traz ao país. A tecnologia de pivô central ganha destaque nesse contexto pois talvez seja o sistema de entrega de água que mais se adapta às condições agrícolas brasileiras. Pelos dados acima, é possível observar a representatividade desses sistemas na expansão. No ano de 2019, por exemplo, representou 46% do crescimento total de área irrigada. Órgãos públicos como Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico em conjunto com Embrapa, também acompanham de perto essa evolução. Imageamento de satélites mostram um volume total de mais de 18 mil máquinas instaladas por todo território nacional até 2016 (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2016). É evidente que essa expansão ocorre devido a uma grande aceitação por parte do produtor rural a esse método de irrigação. Na sequência alguns pontos serão melhor explorados, justamente para ressaltar as grandes vantagens operacionais de um pivô central e de que forma a tecnologia de aplicação se aperfeiçoou para garantir que esse crescimento acontecesse de uma maneira sustentável.

5.2 Pivô central: dinâmica e operacionalidade

Um país de dimensões continentais com grande parcela de seu território locado entre os trópicos, viabiliza muitas opções para exploração de diferentes cultivos e amplia as janelas de oportunidade da terra. Para operar com pluralidade de cultivos é necessária flexibilização e dinâmica operacional. Sendo assim, é desejável que o sistema de irrigação impacte minimamente na mecanização das operações de plantio, colheita, preparo de solo, rotação de culturas e sistematizações em geral. O equipamento de irrigação pivô central agrega justamente essa autonomia. Partindo de uma visada holística, vemos uma tubulação aérea que passa por cima da lavoura transportando água por todo o raio plotado. Temos então uma resultante de baixa relação equipamento/superfície de solo irrigada. Um pivô de 565 metros com tubulação de 6.5/8", ocupa 0,01% de uma área irrigada de 100 hectares. Lembrando também que essa ocupação não é fixa pois o sistema possui torres móveis. Podemos então concluir que a irrigação mecanizada ocupa espaço mínimo da zona de operação agrícola.

Um outro ponto que corrobora para adesão desse tipo de tecnologia, vai de encontro à conceitos econômicos e a variação dos preços das commodities agrícolas. Para ilustrar esse pensamento, tomemos por exemplo um irrigante - produtor/fornecedor de cana-de-açúcar para determinada usina sucroalcooleira. Se porventura esse produtor rural vislumbrar condições mais interessantes para exploração de grãos por uma melhor remuneração futura, seu sistema de irrigação em nada impactará a transição do cultivo. Não haverá limitação nenhuma em relação às diferenças de espaçamento e manejo das culturas selecionados.

O grande diferencial do pivô central é trabalhar a água em uma simulação de chuva por toda lavoura, permitindo ao agricultor ilimitadas opções de atividades agropecuárias. Caso esse mesmo produtor opte por produzir carne ou leite sob regime de pastejo intensivo, nenhuma preocupação haverá em relação ao conflito animal x sistema de irrigação nesse processo. A facilidade com que os cultivos podem ser alterados/rotacionados em uma área de irrigação é de extrema valia, pois a todo momento observamos variações expressivas de preços, principalmente em cultivos nacionais, como feijão. Essa cultura deve ser destacada pois é responsável por grande parte dos investimentos em irrigação mecanizada no Brasil. O feijão possui uma particularidade pois não é enquadrado como uma commodity internacional. Diferente de outros grãos (soja e milho), é um produto negociado alienado a lógica da bolsa de valores. Seus preços são facilmente volatilizados e nos últimos anos renderam como uma excelente opção aos irrigantes. Podemos confirmar esse fato quando observamos o feijoeiro ser conduzido justamente nos períodos de menor regime pluviométrico, nos principais polos de irrigação do Brasil - São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Bahia.

5.3 Pivô central: tecnologia de aplicação

Para acompanhar essa crescente demanda, todo o setor de irrigação busca sempre aperfeiçoar suas tecnologias e oferecer aos irrigantes soluções inteligentes que minimizem utilização de água e energia. Importante citar nesse momento o tamanho do conglomerado agroindustrial da irrigação operante no setor. Diversos agentes atuam nesse segmento, agregando expertise em várias esferas da engenharia. Bombeamento, adutora e pivô formam um conjunto de elos que conectam água e garantem o transporte até área a ser irrigada. Durante todo evento de transporte a água permanece em um conduto fechado, pressurizado e protegido. A linha final desse caminho termina em um dispositivo muito importante da estrutura da irrigação: os aspersores. Esses elementos são peças chaves responsáveis pela última etapa do processo. É justamente nesse momento em que todo volume de água sai do ambiente pressurizado e deve ser fracionado em gotas objetivando o contato com solo e tornando o recurso hídrico disponível ao sistema radicular. A distância entre o aspersor e o solo embora pequena em relação a todo caminho já percorrido desde a captação, é momento mais delicado e complexo de todo trajeto. Por não estar mais protegido, o volume de água torna-se vulnerável ao ambiente, podendo sofrer com a baixa umidade relativa do ar, incidência de ventos e condições atmosféricas em geral. Cabe ao sistema de aspersão projetar o volume de água em gotas com tamanho e distribuição adequados. Caso o fracionamento aconteça em formato de gotas muito pequenas, estará essa aplicação susceptível a perdas por arraste e evaporação antes que a água toque o solo. Caso a projeção aconteça com uma balística de gotas mais pesada, haverá maior garantia de contato com solo, porém riscos de compactação aumentam e com isso outros prejuízos assumem forma. O impacto excessivo de gotas pesadas pode gerar um selamento da camada superficial do solo, minimizando a capacidade de infiltração e gerando um fenômeno conhecido por *run-off*, no qual a água escorre pelo terreno ao invés de infiltrar pelos macroporos. Além disso, o choque de gotas pesadas pode também gerar danos severos aos *seedlings* de plantas mais sensíveis, ou prejudicar estruturas de plantio, como no caso dos canteiros, bastante comuns em cultivos de batatas e cenouras.

Ao longo do processo de amadurecimento da ideia de que a irrigação mecanizada era uma boa tecnologia de irrigação, obviamente houve a necessidade de focar na parte estrutural da máquina, tendo em mente que o pivô pode ser visto como um implemento agrícola, da mesma forma que um trator, pulverizador ou semeadora. Os fabricantes no Brasil tiveram que exercitar muito a abordagem em cima de suas qualidades eletromecânicas, matéria prima e espessura das chapas metálicas utilizadas na tubulação. Como qualquer outro implemento agrícola, uma máquina de irrigação obviamente requer manutenção e naturalmente esse tema

foi alvo nas tratativas comerciais com os produtores rurais. Sendo assim, por muitos anos o sistema de aspersão foi colocado em um segundo plano.

Embora aspersores e reguladores de pressão possam parecer produtos simples oriundos da injeção plástica, existe ali um alto nível de detalhamento técnico empregado para manter boa qualidade em um item que estará a todo tempo exposto ao ambiente e aos intemperes climáticos, além de choques mecânicos e desgaste pela aplicação de água e outros sólidos em solução como: fertilizantes, dejetos, areia e outros resíduos. Comparado com toda a estrutura da máquina, que é feita de ligas metálicas em sua matéria prima, os aspersores devem embarcar tecnologia de última ponta, com polímeros especiais, garantindo funcionamento justamente nessa etapa de tamanha responsabilidade – a aplicação da água no solo.

Essa especificidade pode ter auxiliado a manter um foco reduzido na tecnologia de aplicação, justamente por possuir um portfólio reduzido de *players* especializados na fabricação desses componentes. Esse nível de tecnologia de produção é dominado hoje por basicamente 3 multinacionais. Duas delas localizadas em território norte americano e a outra em continente europeu (Áustria). Além de estarem distantes geograficamente das realidades brasileiras, as 3 empresas possuem algo em comum, que seria o fato de terem sua origem como negócios familiares e atividade local em um primeiro momento. Naturalmente ao longo do tempo, expandiram internacionalmente, e da mesma forma que outras empresas estrangeiras do agronegócio, identificaram no Brasil um mercado próspero devido à grande aptidão para atividades agropecuárias.

Embora um pouco atrasado, temos atualmente no Brasil um ambiente muito fértil para evoluir nesse tópico de tecnologia de aplicação. Muito disso é devido ao aumento de interesse do mercado consumidor em selecionar os melhores dispositivos que irão equipar suas máquinas. Tanto os fabricantes de pivô, como os irrigantes em si, possuem uma grande preocupação na forma como a água está sendo distribuída na lavoura. Já existe um melhor entendimento que os aspersores devem ser enquadrados como os responsáveis na definição de eficiência do pivô central, independentemente da marca ou modelo do pivô.

A eficiência de um sistema de irrigação por pivô central é basicamente ditada por dois fatores, uniformidade de distribuição e eficiência de aplicação (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008). Essa última é capaz de refletir as perdas por evaporação e arraste pelo vento, durante o percurso da água entre os emissores e o solo.

Os aspersores específicos para utilização em pivô passaram por muitas alterações ao longo do tempo. Os pontos principais que sempre foram alvos de destaque consistiam nas características de raio de aplicação, padrão de molhamento e pressão de operação. Em relação ao raio, o mercado consumidor sempre demandou da indústria um emissor que projetasse sua aplicação com grandes alcances, tendo em vista aos níveis de recobrimento e sobreposição. Essa característica influencia diretamente nas possibilidades de espaçamento e conseqüentemente no número de conjuntos emissores (regulador de pressão + aspersor) necessários a compor o mapa de aspersão. Quanto maior o raio de alcance, teoricamente melhor a sobreposição, possibilitando maiores espaçamentos e conseqüentemente menor investimento na quantidade de produtos a serem incluídos no orçamento do projeto. Esse conceito é herança dos sistemas de aspersão fixa, conhecido na indústria por *solid-set* - método de irrigação que é um dos mais antigos, onde são instalados aspersores dispostos de maneira a formar um layout esquadrejado na área. Por serem estruturas fixas, é de interesse que o espaçamento entre aspersores seja o maior possível, pois o número de estruturas instaladas determina a economicidade da instalação, além de minimizar problemas de operacionalização da área. Com isso, se desenvolveram no mercado emissores de impacto com alta pressão de operação (3 a 4 kgf cm⁻²), para atender essa demanda de longos espaçamentos. No início da história dos pivôs centrais, esses mesmos aspersores foram

instalados e posicionados diretamente nas furações acima da tubulação. Logo se notou que essa aplicação estava longe de ser ideal, pois pela altura da máquina, o trajeto que a água deveria percorrer até chegar no solo seria muito grande, e a alta pressão gerava um índice de pulverização notável, resultando em deriva excessiva e baixa eficiência de aplicação. A partir daí, inúmeros outros dispositivos foram projetados para operar em tubos de descida (mangueira, tubos metálicos ou PEAD), baixando então altura de instalação para algo em torno de 1,5 a 2,0 metros em relação ao solo. Uma linha extensa de produtos foi apresentada ao mercado durante esse período, fato que também auxiliou a gerar dúvidas quanto ao melhor dispositivo a ser utilizado em cada condição de cultivo, solo e ambiente.

Um evento muito importante durante a evolução dos aspersores foi o desenvolvimento do dispositivo rotativo. Esse fato merece destaque pois realmente alterou a forma de fracionamento da água e sua aplicação. O aspersor rotativo foi projetado para utilizar a própria energia hidráulica e movimentar um disco defletor com ranhura. Essa tecnologia ganhou notoriedade na indústria da irrigação pois era visível os baixos índices de deriva e alta uniformidade de distribuição. Até o momento foi o mecanismo de aplicação de água que mais se assemelhou a distribuição natural da chuva. Em relação ao padrão de molhamento, o rotativo tem capacidade de aplicar água instantaneamente em 360 graus de maneira bastante uniforme, suavizando os índices de intensidade de precipitação. No Brasil esse modelo passou a ser mais utilizado em meados de 2010, fato esse que vai de encontro às análises apresentadas ao início desse capítulo. Assim é possível compactuar que a tecnologia de aplicação de água acompanhou de perto a rápida evolução da agricultura irrigada brasileira.

Outro ponto que merece destaque é a redução na necessidade de energia de operação. Enquanto os antigos aspersores de impacto necessitavam de pressões ao redor de 3 a 4 kgf cm^{-2} para funcionar, os aspersores rotativos demandavam apenas 0,69 a 1,03 kgf cm^{-2} . Essa redução foi importante para tornar os pivôs centrais conhecidos por alta eficiência no uso de energia. Esse conceito continua ainda evoluindo e hoje temos produtos no mercado que operam com reguladores de pressão de 0,41 kgf cm^{-2} .

Esse quadro impacta de maneira significativa no consumo de energia, principalmente em máquinas de grande porte e alto uso de irrigação. As condições geográficas brasileiras permitem explorar irrigação com mais de 3000 horas por ano em regiões de latitudes mais baixas. Nessas mesmas regiões temos aptidão para implantar máquinas extensas, acima de 120 hectares, devido ao relevo ser bastante plano. Essa combinação entre tamanho dos pivôs e alto uso de irrigação demanda elevadas cargas energéticas. Talvez o Brasil seja um dos únicos países a utilizar sistemas de irrigação nesses níveis, sendo então um campo que se diferencia e explora muito mais os limites de tecnologia disponíveis na indústria.

Conforme citado anteriormente, as características desejáveis para emissores sempre se fixaram muito em raio de aplicação, padrão de molhamento e pressão de operação. Porém com esses atributos já bem entendidos a engenharia de aplicação vislumbra hoje um tópico mais avançado, que embora evidente, foi muito pouco detalhado nesses últimos anos: balística e tamanho de gotas.

A indústria de aspersores sempre tocou nesse tema de maneira indireta, limitando-se em apenas conceituar tamanho de gotas pequenos, médios ou grandes, porém nunca pontuando numericamente esses parâmetros. Se lembrarmos que a eficiência de aplicação é dada pela quantificação das perdas por arraste e evaporação, é necessária então maior compreensão de qual a tolerância de determinados diâmetros de gota em relação a determinadas velocidades de vento. Nessa mesma linha de raciocínio, se os espectros de gotas forem bem conhecidos, seria possível realizar previsões mais assertivas da energia de impacto da água no solo de acordo com altura de instalação dos emissores. Esses números seriam de extrema valia para determinar com clareza os parâmetros ideais de aplicação, de acordo com

cada tipo de solo, e aliar práticas agrônômicas como aumento da cobertura de palhada, caso necessário.

Embora alguns estudos já tenham sido direcionados nesse sentido desde a década de 60, a base de literatura ainda é muito escassa. Isso se deve ao fato de a metodologia para mensuração do espectro de gotas ser algo complexo. Dentre essas metodologias podemos citar o método da farinha, que consiste na captura de gotas em coletores contendo uma camada peneirada de farinha de trigo, e posterior separação dos grânulos que serão secos e medidos para determinar os diferentes tamanhos de gotas capturados. Outro método de referência utiliza tecnologia eletrônica, onde as gotas cruzam um feixe de laser horizontal e a sombra projetada em um dispositivo semiconductor infere o tamanho da gota (KING; WINWARD; BJORNEBERG, 2010).

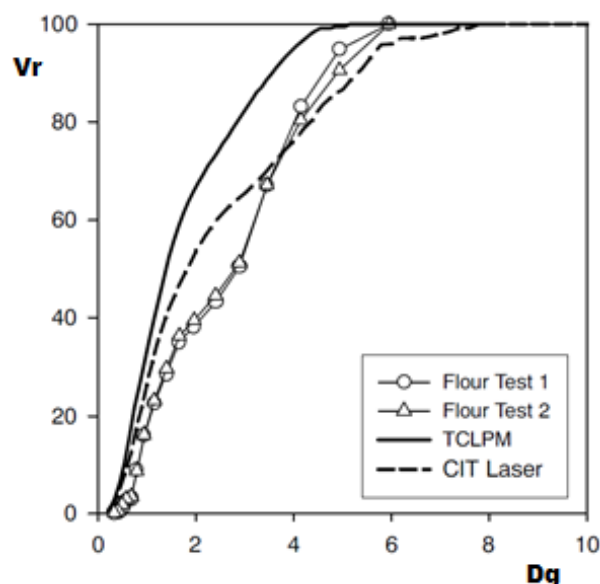


Figura 3. Espectro de gotas, volume relativo (V_r , %) em função do diâmetro de gota (D_g , mm), para aspersor em 10,5 mca (15 psi) e bocal 6,4 mm. Metodologias: métodos da farinha (*Flour Test 1* e *Flour Test 2*) e via Laser (*TCLPM* e *CIT Laser*) (KING; WINWARD; BJORNEBERG, 2010).

Embora exista um abismo tecnológico entre ambos métodos para mensuração de gotas, King, Winward e Bjerneberg (2010) citam que os resultados ainda podem variar muito de acordo com modelo e condição de operação do aspersor avaliado.

Contudo, os esforços da comunidade científica internacional no âmbito desse tema, destacaram um conceito bastante aplicável: não existe no momento da distribuição de água, um tamanho definido de gotas, e sim uma população ou espectro de partículas de diferentes tamanhos. Essa amplitude então definirá o quão padronizado determinado aspersor tem em fracionar o volume de água aplicado. Na Figura 3 temos um exemplo dessa variação, com um aspersor operando em pressão de 15 PSI, analisado sob diferentes metodologias, sendo dois deles via método da farinha (*Flour Test 1* e *Flour Test 2*) e dois via Laser (*TCLPM* e *CIT Laser*).

Excluindo-se a variação entre as diferenças metodológicas, os números corroboram para uma série de conclusões de interesse do setor de irrigação. O primeiro vai de encontro às porcentagens de gotas pulverizadas - menores do que 0,5 mm de diâmetro. Mesmo que ainda não haja uma correlação entre o tamanho de gota e a intensidade de perturbação por rajada de vento, pode-se inferir que gotas menores que 0,5 milímetro dificilmente atingirão o alvo solo. Sendo assim, é desejável que a curva de distribuição de gotas seja menos inclinada em seu início, mostrando a resiliência que um aspersor tem em controlar o efeito de pulverização. Gotas menores que 0,5 mm são compatíveis com espectro de gotas de um

pulverizador agrícola. Porém, do ponto de vista da engenharia de irrigação, não são interessantes visando boa eficiência de aplicação. A identificação dessas frações, serão provavelmente indicadores técnicos a serem agregados em catálogos pela indústria, da mesma forma que temos hoje raio de alcance em diferentes bocais.

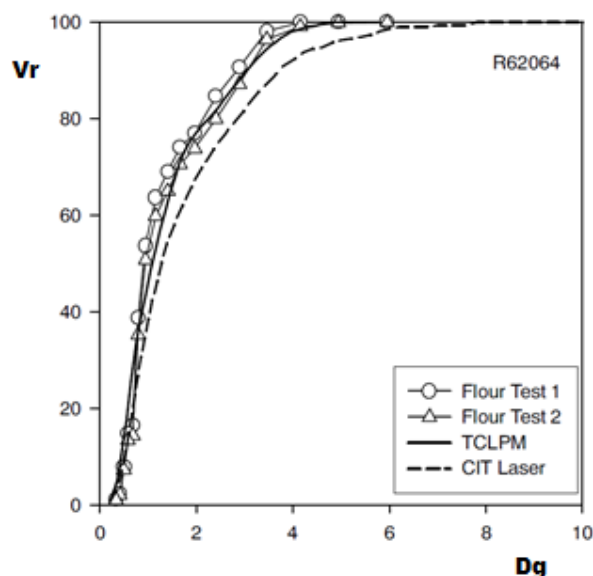


Figura 4. Espectro de gotas, volume relativo (V_r , %) em função do diâmetro de gota (D_g , mm), para aspersor em 17,5 mca (25 psi) e bocal 6,4 mm. Metodologias: métodos da farinha (*Flour Test 1 e Flour Test 2*) e via Laser (*TCLPM e CIT Laser*) (KING; WINWARD; BJORNEBERG, 2010).

Uma outra questão que pôde ser evidenciada pela Figura 3, seria a amplitude do espectro que determinado aspersor tem em produzir. No caso apresentado, temos um range que vai de 0,5 a 4,0 mm. A partir do momento em que existir uma priorização de determinado diâmetro médio de gotas, o aspersor deverá buscar projetar o maior volume possível de gotas desse tamanho e evitar ao máximo as extremidades, tanto inferiores (gotas pequenas) quanto superiores (gotas grandes).

King, Winward e Bjorneberg (2010) relatam com clareza um outro fenômeno clássico que ocorre durante funcionamento de emissores ao se variar a pressão de trabalho. Maiores pressões injetadas no dispositivo aspersor tendem a aumentar a fração pulverizada de água e, por consequência, reduzir o potencial de eficiência de aplicação. Em contra partida, pressões menores tendem a aumentar a porcentagem do volume de água distribuído, em diâmetros maiores de gotas. Esse é um resultado bastante esperado, porém pouco avaliado pela base científica. Na Figura 4, temos o mesmo aspersor, operando agora com 25 psi.

Comparado com a Figura 3, vemos um aumento significativo na angulação da curva. Neste caso, temos mais de 75% do volume de água sendo distribuído em gotas menores do que 2 mm. Se for identificado por exemplo, que essa fração de gotas não se comporta bem com velocidades mínimas de vento, com certeza essa combinação, aspersor x regulador de pressão, não será interessante, pensando em garantir eficiência de aplicação.

A sequência normal de um aprofundamento desses estudos seria agora avaliar quais os limites técnicos para priorizar gotas maiores, objetivando aumentar eficiência de aplicação. Sem dúvida existe um limiar estreito entre o risco de perda de água por vento x impacto de água no solo, porém pode ser mais sensível ao irrigante as perdas de água durante o processo de irrigação, do que os danos relativos à impacto de água no solo. Se for esse o caminho, talvez a engenharia de aspersores objetive projetar sistemas cada mais preparados para direcionar o espectro de gotas em tamanhos maiores, sabendo que esses serão amortecidos

via proteção natural da palhada, e lembrando ainda, que plantio direto é prática de rotina dos agricultores brasileiros. Além disso, existem sistemas alternativos para se reduzir intensidade de precipitação e impacto de água no solo. Um exemplo é ilustrado na Figura 5, na qual temos um sistema de ampliação de espaçamento perpendicular à tubulação. Essa estratégia aumenta a superfície de contato de solo, suavizando a distribuição e minimizando impactos no momento da aplicação.



Figura 5. Expansor implantando em pivô central para reduzir intensidade de precipitação.

Esse tipo de estrutura minimiza um outro efeito secundário, bastante negligenciado, que seria a colisão de gotas. O fenômeno ocorre principalmente quando os aspersores trabalham muito próximos uns dos outros, seja por uma duplicação ou por um espaçamento de outlet reduzido. O choque entre as gotas reduz ainda mais o diâmetro médio, chegando próximo a uma névoa, sendo então facilmente carregada pelo vento. Alternativas bastante simples podem ser utilizadas para minimizar esse efeito e preservar o padrão original de gotas produzido pelo emissor. A própria estrutura da máquina pode ser utilizada como suporte para as mangueiras e assim espaçar os aspersores. No caso da Figura 5, temos um arranjo um pouco mais complexo, com cabos de aço esticados pelo lance em balanço. Porém, é bastante comum a utilização dos tirantes nos vãos/lances, para ajudar nessa função.

A avaliação de tamanho de gotas médio será um tema bastante pertinente nos próximos anos e sem dúvida será um indicador de grande responsabilidade ao se falar sobre eficiência em irrigação mecanizada. A indústria de aspersão terá papel fundamental na difusão desses dados que já existem, e dos que venham ainda a ser produzidos via ambiente acadêmico ou experiência de campo. Esse é mais um caso clássico onde as demandas crescentes do setor acabam moldando os rumos de novos focos de pesquisa. O segmento de irrigação é uma fronteira agrônômica relativamente jovem, quando comparado a outros departamentos das ciências agrárias.

5.4 Considerações finais

Importante lembrar que este capítulo objetivou discorrer apenas sobre uma das etapas da irrigação. Se contabilizarmos o que ainda venha a avançar nas esferas de manejo da irrigação, automatizações e monitoramento remoto, colocamos a irrigação em um patamar de grandes horizontes a serem explorados. Nada mais se esperaria de uma ciência tão nobre quanto àquela que utiliza o bem mais precioso da humanidade: a água.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil 2014. Relatório síntese, ANA, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS, Câmara Setorial de Irrigação. Atualização de área irrigada no Brasil. Abimaq, 2019.

BERNARDO, S.; SOARES, A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de Irrigação**. 8 Ed. Viçosa: Ed. UFV, 625p. 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Compêndio de Estudos Conab**. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília: Conab, 2016.

KING, B.A.; WINWARD, T.W.; BJORNEBERG, D.L. **Laser precipitation monitor for measurement of drop size and velocity of moving spray-plate sprinklers**, 2010.

CAPÍTULO 6

6 PROJETO E EXECUÇÃO DE SISTEMAS DE DRENAGEM AGRÍCOLA

Jarbas Honorio de Miranda, Laura Elizabeth Christianson e Luciano Alves de Oliveira

Resumo

A drenagem de terras agrícolas tem por objetivo principal a retirada do excesso de água dos solos, superficialmente e/ou subterrâneo. De maneira superficial, visando o controle do escoamento superficial e subsuperficialmente, visando o controle da profundidade do lençol freático (LF). Para se alcançar esses objetivos, um dos primeiros passos e desafios é a definição da fonte do excesso de água e depois a correta aplicação das técnicas de drenagem. Há de se ressaltar que tais ações devem seguir a legislação que assegura a utilização dessas áreas. Aspectos atuais como modelagem computacional e utilização de técnicas para redução de contaminação ambiental de águas subterrâneas, vêm sendo aplicados em termos mundiais. Com isso, busca-se com a drenagem de terras agrícolas, o aproveitamento e utilização de novas áreas para a produção agrícola, bem como, proteção de áreas naturais evitando problemas de erosão, bem como, de contaminação de águas subterrâneas.

6.1 Introdução

A drenagem de terras agrícolas tem por objetivo retirar o excesso de água dos solos, permitindo uma melhoria da aeração e das propriedades físico-químicas desses solos, tornando-os mais aptos e efetivos para o desenvolvimento e produção de cultivos. Também, auxilia na lixiviação de sais do solo, controlando problemas de salinidade em algumas regiões e situações. Portanto, de maneira simples, quando a drenagem natural do solo não é suficiente para torná-lo propício ao cultivo agrícola, recomenda-se o uso de métodos de drenagem artificial.

Em alguns levantamentos estatísticos, em termos mundiais, a drenagem é necessária para a produção agrícola em cerca de 25% das terras cultiváveis nos Estados Unidos e Canadá (PAVELIS, 1987; SHADY, 1989) e cerca de 33% das terras agrícolas requerem drenagem (SMEDEMA *et al.*, 2004). Cabe ressaltar que sem a técnica da drenagem, não seria possível a agricultura em muitas dessas terras. Com o uso da drenagem, essas áreas estão entre as mais produtivas do mundo.

6.2 Drenagem de terras agrícolas

6.2.1 Considerações iniciais

Os projetos de drenagem que vêm sendo executados na região sudeste do Brasil têm como objetivo incorporar áreas (terras baixas) ao processo produtivo, às quais apresentam drenagem natural deficiente. Na maioria desses projetos, aspectos importantes do sistema de drenagem, tais como o espaçamento entre drenos, muitas vezes vêm sendo definidos não apenas pela aplicação de equações de drenagem, às quais muitas vezes obtém-se valores de espaçamento entre drenos bem menores do que aqueles aplicados na prática. Ou seja, em sua maioria, os espaçamentos utilizados em condições de campo, tendo como base a experiência prática do projetista, têm sido consideravelmente maiores do que seriam caso fossem obtidos pelas equações de espaçamento entre drenos e critérios de drenagem tradicionais (MIRANDA, 1997).

Segundo Duarte (1997), ao que tudo indica, os critérios conservadores de dimensionamento fornecem o espaçamento que propicia a produtividade máxima das culturas, mas nem sempre retratam o dimensionamento mais econômico.

De certa forma, os projetos de drenagem agrícola são divididos em dois grupos: drenagem subterrânea e drenagem superficial. O primeiro grupo busca estabelecer um controle do rebaixamento do lençol freático (LF), adequando uma situação ideal à produção agrícola e o segundo grupo procura facilitar a retirada da água da superfície do solo evitando problemas de erosão (Figura 1).

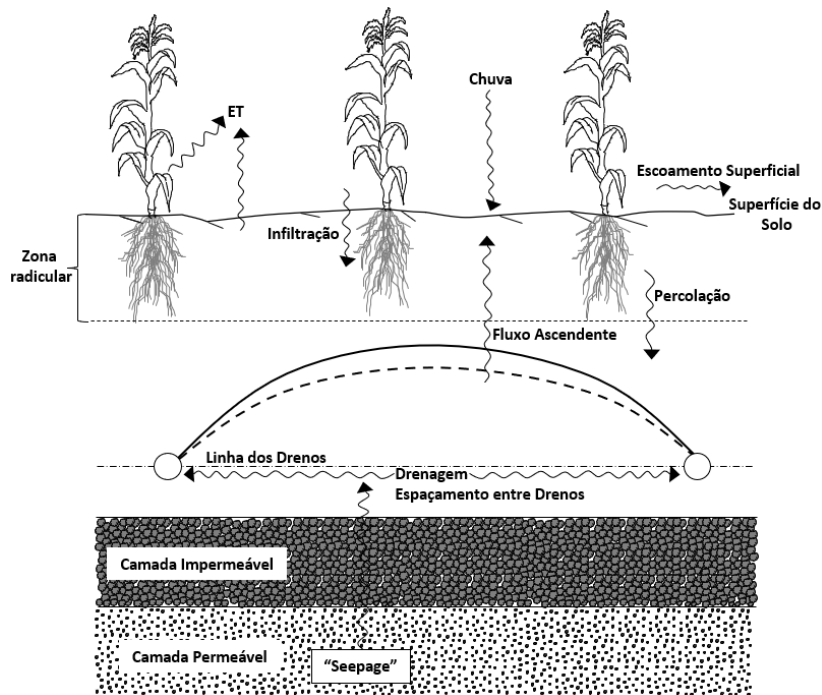


Figura 1. Componentes físicos do ambiente agrícola e elementos de drenagem agrícola.

Os projetos de drenagem agrícola possuem os seguintes objetivos principais: (i) Aeração do sistema radicular mediante o rebaixamento do LF: retirando o excesso de água, tanto da superfície do solo quanto da zona radicular, em função de um tempo ideal para que a planta tenha condições de realizar as trocas gasosas entre a zona radicular e a atmosfera, (ii) Trafegabilidade de máquinas: trazer a umidade do solo a um ponto ideal, de modo que se torne possível o tráfego de máquinas agrícolas para realizar o preparo do solo, (iii) Controle da erosão: trata-se do principal objetivo da drenagem superficial em áreas com declive em regiões úmidas. O sistema de drenagem deve garantir com que a água se infiltre através da superfície do solo ou seja retirada da área, buscando a menor perda de solo (processos erosivos), e (iv) Controle da salinidade: situação muito característica em regiões áridas e semiáridas, onde se pratica irrigação, nas quais a drenagem busca evitar o fluxo ascendente vindo do LF para a zona radicular e permitir a retirada de sais provenientes da aplicação, pela irrigação, mediante lâminas de lixiviação.

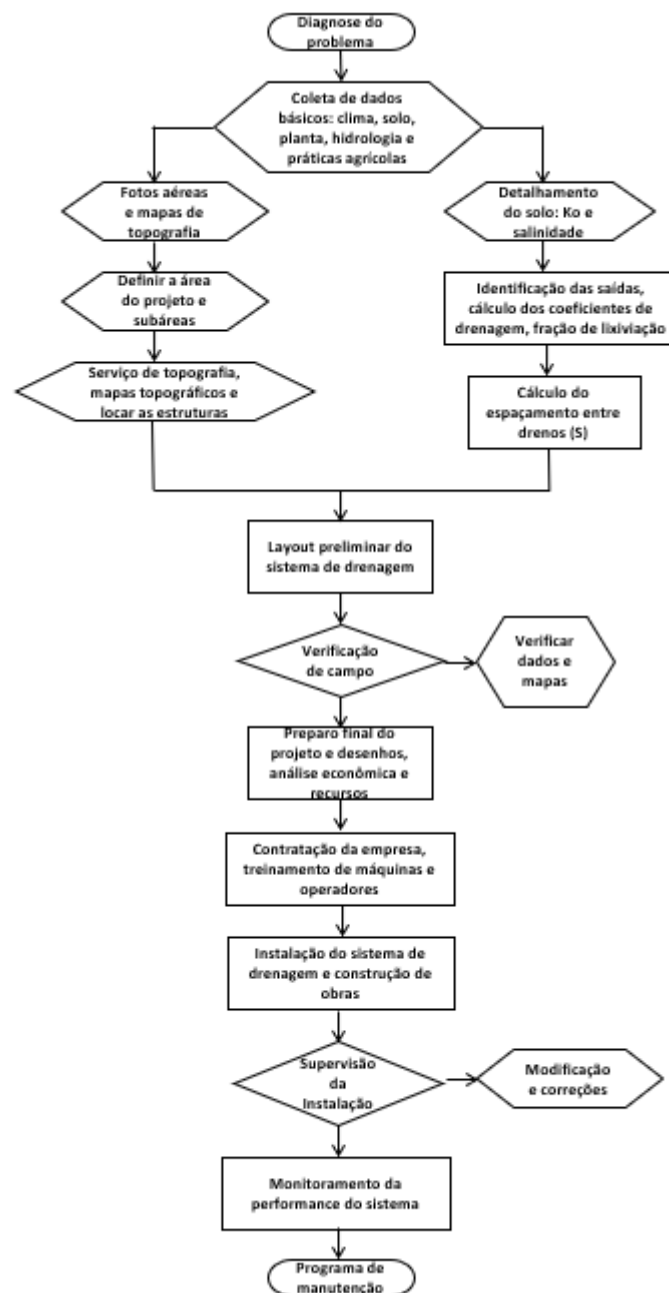


Figura 2. Fluxograma de atividades na elaboração de projetos de sistemas de drenagem (SKAGGS; VAN SCHILFGARDE, 1999).

Um dos primeiros passos de um projeto de drenagem é a definição da fonte do excesso de água (dependentes do tipo de solo, clima, comportamentos hidrogeológicos e práticas de irrigação) e dessa forma, definir quais serão os objetivos. Dentre as propriedades físico-hídricas do solo, a condutividade hidráulica (aquela que expressa a “facilidade” com que a água se desloca no solo) é o principal fator que influencia na dinâmica da água no solo. Diferentes métodos e considerações para sua determinação e aplicação são levadas em conta para se chegar a um valor representativo e dessa forma, auxiliar o projetista a desenvolver a melhor situação para propiciar um menor custo e um maior retorno em termos de produtividade. Portanto, o principal objetivo de um projeto de drenagem em regiões úmidas é o controle da profundidade do LF, de maneira que a chuva não cause danos de falta de oxigenação para as plantas e possa propiciar possibilidade de tráfego de máquinas. Um objetivo subsequente é a lixiviação de sais e/ou manutenção correta de nutrientes na zona

radicular, tornando-os disponíveis às plantas ao longo do tempo. Assim sendo, busca-se resolver tanto problemas de ordem econômica quanto problemas de aspectos ambientais. Segundo Skaggs *et al.* (1999) o seguinte fluxograma (Figura 2) define bem as etapas do planejamento e layout para implementação de projetos de drenagem.

6.2.2 Aspectos de legislação

Para se obter o licenciamento para um projeto de exploração dessas áreas (terras baixas) deve-se seguir um roteiro e aspectos legais. Segundo o Código Florestal Brasileiro (Lei 12.727, 17 de outubro de 2012) trata da proteção da vegetação nativa em território nacional, incluindo disposições sobre faixas de uso permitidas e restrições ambientais para empreendimentos ou atividades agrícolas em áreas de preservação permanente (APPs) ou reserva legal (RL).

As APPs são definidas na lei como área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas. Já a RL é definida como sendo uma área localizada no interior de uma propriedade ou posse rural com a função de assegurar o uso econômico de modo sustentável dos recursos naturais do imóvel rural, auxiliar a conservação e a reabilitação dos processos ecológicos e promover a conservação da biodiversidade, bem como o abrigo e a proteção de fauna silvestre e da flora nativa.

No corpo da referida Lei são especificadas as faixas marginais a serem destinadas a APP às margens de qualquer curso d'água natural perene ou lago/lagoa. A largura mínima dessas faixas, a partir da a borda da calha do leito regular, varia de acordo com a largura do curso d'água em questão conforme o seguinte: 30 m, para os cursos d'água de menos de 10 m de largura; 50 m, para os cursos d'água que tenham de 10 m a 50 m de largura; 100 m, para os cursos d'água que tenham de 50m a 200 m de largura; 200 m, para os cursos d'água que tenham de 200 m a 600 m de largura e 500 m, para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros.

Para o caso de lagos e lagoas, a largura mínima dessas faixas varia de acordo com a área superficial do lago/lagoa, conforme o seguinte: 100 m, em zonas rurais, exceto para o corpo d'água com até 20 ha de superfície, cuja faixa marginal será de 50 (cinquenta) metros e 30 m, em zonas urbanas.

A Lei também prevê faixas de APP no entorno de olhos d'água (afloramento natural do lençol freático) e nascentes (afloramento natural do lençol freático que apresenta perenidade e dá início a um curso d'água), as quais devem ter raio mínimo de 50m. São também consideradas áreas obrigatoriamente destinadas a APP os seguintes casos: encostas com declividade superior a 45°, restingas, manguezais, bordas de chapadas (faixas mínimas de 100 m), topos de morros, montanhas ou serras (com ao menos ao menos 100m de altura e inclinação maior que 25°), áreas com altitude maior que 1800 m e a faixa marginal de veredas (faixa mínima de 50m). As áreas destinadas a RLs não se misturam com as APPs, e tem dimensões mínimas distintas conforme sua localização. Se a propriedade se localiza dentro da Amazônia Legal (estados do Acre, Pará, Amazonas, Roraima, Rondônia, Amapá e Mato Grosso e as regiões situadas ao norte do paralelo 13° S, dos estados de Tocantins e Goiás, e ao oeste do meridiano de 44° W, do Estado do Maranhão) tem área mínima de RL de: 80%, no imóvel situado em área de florestas; 35%, no imóvel situado em área de cerrado; 20%, no imóvel situado em área de campos gerais.

Já propriedades que se encontram fora da Amazônia legal devem apresentar área mínima de RL de 20% de sua área total. A Lei prevê algumas exceções em que a área mínima

destinada a RL em propriedades na Amazônia legal em área de florestas pode ser reduzida para até 50%.

Nas áreas que segundo os critérios estabelecidos no código devam ser destinadas a APP, que já exista atividade sendo exercida (que comprovem já estar consolidadas até 22 de julho de 2008), a recomposição das faixas marginais obedece a critérios específicos. Áreas que não se encontravam consolidadas até esta data deverão ser recompostas seguindo os valores gerais apresentados no código.

Os critérios para áreas consolidadas no entorno de cursos d'água são demonstrados a seguir. Todas as faixas devem ser contadas da borda da calha do leito regular, independentemente da largura do curso d'água: Para os imóveis rurais com área de até 1 módulo fiscal: faixas marginais em 5 m. Para os imóveis rurais com área entre 1 e 2 módulos fiscais: faixas marginais em 8 m. Para os imóveis rurais com área entre 2 e 4 módulos fiscais: faixas marginais em 15m. Para os imóveis rurais com área superior a 4 módulos fiscais: faixas marginais entre 20 m e 100 m.

Nos casos de áreas rurais consolidadas em Áreas de Preservação Permanente no entorno de nascentes e olhos d'água perenes, será obrigatória a recomposição de faixas marginais de no mínimo 15 m.

Para os imóveis rurais que possuam áreas consolidadas em APP no entorno de lagos e lagoas naturais, a faixa marginal deve ter largura mínima de: 5m, para imóveis rurais com área de até 1 (um) módulo fiscal; 8m, para imóveis rurais com área entre 1 e 2 módulos fiscais; 15m, para imóveis rurais com área entre 2 e 4 módulos fiscais e 30m, para imóveis rurais com área superior a 4 módulos fiscais.

Para os imóveis rurais que possuam áreas consolidadas em veredas, a largura mínima das faixas marginais será de 30m, para imóveis rurais com área de até 4 módulos fiscais e 50m, para imóveis rurais com área superior a 4 módulos fiscais.

6.2.3 Seleção do método de drenagem

Os sistemas de drenagem são classificados como sendo de drenagem subterrânea ou superficial. Os métodos de drenagem superficial envolvem nivelamento da superfície, gradeamento, terraceamento e abertura de valetas. A drenagem superficial é especificamente necessária em áreas de encosta, ribeirinhas e para prevenção de escoamento superficial, conseqüentemente, rebaixamento do LF e prevenção de inundação de áreas, prejudicando, nesse sentido, os cultivos. Porém, há algumas desvantagens na drenagem superficial, tais como a perda de área cultivada e dificuldade do tráfego de máquinas quando da abertura de valetas. Além disso, nas valetas há necessidade de limpeza e manutenção, cujos gastos podem encarecer o projeto no final.

A drenagem subterrânea visa o controle do nível freático propiciando uma melhor aeração no sistema radicular. Para tal, é necessário o conhecimento das características físico-hídricas do solo, as características hidrológicas da região e características dos cultivos, ou seja, coeficientes de sensibilidade ao excesso e à falta de água.

6.2.3.1 Projetos de drenagem subterrânea

A maioria das áreas agrícolas com problemas de drenagem exigem técnicas de controle da água que estejam na superfície do solo (drenagem superficial) e/ou subsuperficialmente, no caso, controle do nível freático (drenagem subterrânea). Para o dimensionamento dos sistemas de drenagem agrícola é fundamental o conhecimento das recargas que esses sistemas estão sujeitos e que serão capazes de controlar, levando-se em conta as propriedades físico-hídricas dos solos. Uma dessas recargas denominadas como "seepage vertical", são

provenientes de encostas e são controladas por meio de drenos interceptores. Assim, cabe aos drenos de campo o controle da recarga proveniente das chuvas e excedentes da irrigação. Em termos de Brasil, as primeiras são mais relevantes e intensas e, portanto, são utilizadas como recarga de projeto.

As estruturas de controle de águas naturais não são dimensionadas para serem capazes de comportar a máxima vazão absoluta que possa vir a atingi-las. Primeiro, porque é impossível conhecer a magnitude desse evento e, segundo, porque possivelmente a obra ficaria antieconômica. Devem ser utilizadas vazões de dimensionamento que apresentem uma certa probabilidade de ocorrer, probabilidade que deve ser tanto menor quanto maior for a importância da estrutura.

Tendo em vista que o sistema de drenagem ainda não foi implantado, e conseqüentemente as vazões que escoam para os drenos não são conhecidas, essas devem ser estimadas por equações que transformam as chuvas intensas em vazões (subterrâneas e superficiais), já que os dados de chuva podem ser obtidos com relativa facilidade.

Entretanto, como o armazenamento e o movimento da água na superfície do solo é bastante diferente do armazenamento e do movimento da água abaixo do lençol freático (LF), para fins de equacionamento e para facilitar a obtenção da solução, é comum, inicialmente, encarar essas duas técnicas de drenagem separadamente. Posteriormente, obtidas as duas soluções, faz-se uma conciliação para a obtenção do resultado.

Pela Tabela 1, pode-se observar diferentes situações de aplicação dos respectivos tipos de projeto de drenagem.

Tabela 1. Exemplos de necessidade de drenagem superficial e subterrânea (DUARTE *et al.*, 2015).

Situação	Drenagem	Exemplo
LF ausente	Superficial	Campos de futebol, viveiros de mudas, aterros de estufas, campos de golfe
LF presente, mas de difícil controle	Superficial	Gleissolo com $K_0 < 0,1 \text{ m dia}^{-1}$
LF presente com possibilidade de controle	Superficial e Subterrânea	Maioria dos solos de baixadas
LF presente e solo com infiltração muito alta	Subterrânea	Areia quartzosa hidromórfica profunda
Controle da lâmina d'água e melhoria na trafegabilidade	Superficial	Arroz inundado

6.2.3.2 Aplicação de novas tecnologias em projetos de drenagem subterrânea

(i) Modelagem computacional aplicada em projetos de drenagem agrícola

Relacionando esses excessos de água com a movimentação do lençol freático (LF), várias técnicas foram desenvolvidas para avaliar a dinâmica da água no solo e procurar relacioná-la com aspectos climáticos, parâmetros físico-hídricos do solo e da cultura e parâmetros geométricos do sistema de drenagem. Estas técnicas são importantes para o dimensionamento racional e implantação de projetos eficientes de drenagem. O desenvolvimento de novos procedimentos de dimensionamento, principalmente os que fazem uso de modelos computacionais, cresceu muito na década de 80, principalmente nos países

desenvolvidos onde a drenagem é uma prática agrícola importante como nos Estados Unidos e na Holanda.

Alguns desses modelos tornaram-se ferramentas importantes pois permitem quantificar os impactos das práticas agrícolas sobre a produtividade das culturas e o meio ambiente (SABBAGH *et al.*, 1993).

Dentre esses modelos, um dos que vem sendo mais utilizados é o modelo norte-americano DRAINMOD (SKAGGS, 1981) aplicado por técnicos dos Estados Unidos como um método realmente efetivo para dimensionamento dos sistemas de drenagem (SKAGGS, 1990).

Esse modelo exige como dado de entrada séries históricas de precipitação de vários anos organizadas na forma horária. Nesse sentido, em termos de Brasil, Duarte (1997) desenvolveu o modelo SIMDRENO que simula a posição do LF e a umidade do solo na zona radicular, a partir de séries históricas de dados diários de precipitação, evapotranspiração, parâmetros físico-hídricos do solo, cultura e geometria do sistema de drenagem. O modelo estima a fração da precipitação que escoar superficialmente empregando o método do Número da Curva, calcula a posição do LF por meio de equações que consideram a recarga intermitente do lençol e estima a umidade do solo na zona radicular como base em um balanço hídrico.

Porém, apesar da sua funcionabilidade, o SIMDRENO apresentou algumas limitações quando comparado com o DRAINMOD. Em ausência de *seepage* vertical e em dias que não ocorrem precipitações o SIMDRENO não contabiliza o efeito do fluxo ascendente devido a evapotranspiração sobre o rebaixamento do LF, nem permite simular este rebaixamento abaixo da linha dos drenos. O SIMDRENO calcula o escoamento superficial independentemente do efeito de variações na umidade do solo e, portanto, não considera a influência da drenagem subterrânea sobre este escoamento.

Ao realizar o dimensionamento econômico dos sistemas de drenagem, o SIMDRENO permite a entrada de apenas 10 valores de espaçamentos a serem submetidos a simulação. Assim, para o usuário atingir a faixa mais econômica, é necessário realizar outra divisão de faixas em precisões maiores até atingir a mais econômica.

Com relação aos aspectos operacionais, o SIMDRENO foi desenvolvido para o sistema operacional DOS, o que o tornou difícil de ser operado por usuários que não tenham recebido um treinamento prévio. Além disso este modelo operava com dados de série histórica que são inseridos no programa via teclado, exigindo que sejam criados grandes arquivos com dados de precipitação e evapotranspiração diária anteriormente à realização das simulações.

Diante disso, Miranda (1997) considerou relevante o desenvolvimento de um novo modelo que superasse as limitações do modelo SIMDRENO e que pudesse atingir uma apresentação a nível comercial. Dessa forma, buscou-se na ocasião os seguintes objetivos: a) desenvolver um modelo de simulação de desempenho de sistemas de drenagem subterrânea no qual o efeito do fluxo ascendente seja contabilizado eficientemente sobre o rebaixamento do lençol freático; b) implementar no modelo a ser desenvolvido, uma rotina em que a estimativa do escoamento superficial dependa da profundidade do LF no dia corrente, permitindo assim contabilizar o efeito da drenagem subterrânea sobre a drenagem superficial e c) tornar mais interativa a relação entre o software e o usuário, bem como dotar o programa de uma apresentação comercial.

Daí surgiu o modelo SISDRENA (Sistema de DRENAGEM) (MIRANDA, 1997) que se trata de um modelo de avaliação de desempenho de sistemas de drenagem similar ao modelo norte-americano DRAINMOD (SKAGGS, 1990). Ambos os modelos são unidimensionais e contabilizam os principais componentes que afetam o balanço de água em um volume de solo homogêneo e de superfície unitária, equidistante entre dois drenos paralelos e que se estende desde a camada de impedimento até a superfície do solo. Visando superar a carência de dados

horários de chuva no Brasil, o SISDRENA utiliza séries de dados diários de precipitação e evapotranspiração potencial de vários anos.

Tabela 2. Parâmetros de Entrada e Saída do Modelo SISDRENA.

Dados de Entrada do Modelo SISDRENA	Dados de Saída do Modelo SISDRENA
Chuva diária (mm dia ⁻¹)	Escoamento superficial diário (mm dia ⁻¹)
Evapotranspiração diária (mm dia ⁻¹)	Infiltração diária (mm dia ⁻¹)
Condutividade hidráulica do solo saturado (m dia ⁻¹)	Posição diária do LF (m)
Profundidade da camada impermeável (m)	Fluxo diário de água no dreno (mm dia ⁻¹)
Espaçamento entre drenos (m)	Armazenamento de água na zona radicular (mm)
Profundidade dos drenos (m)	Evapotranspiração diária (mm dia ⁻¹)
Raio efetivo do dreno (m)	Parâmetros de avaliação do sistema de drenagem (produtividade do cultivo)
Fluxo ascendente por <i>seepage</i> (mm dia ⁻¹)	Análise Econômica dos Espaçamentos entre Dreno
Parâmetros da curva de retenção de água no solo	
Datas de plantio e colheita do cultivo	
Varição do sistema radicular	
Coefficientes de sensibilidade ao excesso e à falta de água	
Nível inicial do LV	
Umidade inicial do solo	

O escoamento superficial é calculado por uma modificação do método Número da Curva, a movimentação do LF é estimada pela equação proposta por de Zeeuw e Hellinga (SMEDEMA; RYCROFT, 1983) e a umidade na zona radicular da cultura é calculada por intermédio de um balanço hídrico. O SISDRENA determina os índices SEW_{30} (somatório das alturas diárias do LF acima de um plano localizado a 30 cm de profundidade) e o *deficit* de evapotranspiração, a partir dos quais se estimam os efeitos do excesso e da falta de umidade, respectivamente, sobre produtividades de milho e cana-de-açúcar. Uma vez obtida a produtividade relativa esperada com determinada probabilidade de sucesso para a série de dados climáticos utilizados e para cada espaçamento entre drenos submetidos à simulação, pelo modelo SISDRENA também é possível obter o espaçamento mais viável, por intermédio de uma análise econômica.

Pela Tabela 2 podem ser conferidos os dados de entrada e dados de saída do modelo SISDRENA e pela Figura 4 podem ser conferidas as simulações do modelo SISDRENA (sem a calibração necessária em relação ao tipo de solo para a localidade de Urbana, IL, EUA) comparado aos dados observados em campo e às simulações do modelo DRAINMOD.

Pela Figura 3, pode-se conferir o efeito do espaçamento entre drenos, para três tipos distintos de solo, na produtividade da cana-de-açúcar. Observa-se que em solos com menor capacidade de condução de água, menores são os valores de espaçamentos entre drenos que devem ser aplicados, para que se tenha uma produtividade e assim obter retornos positivos no projeto de drenagem subterrânea.

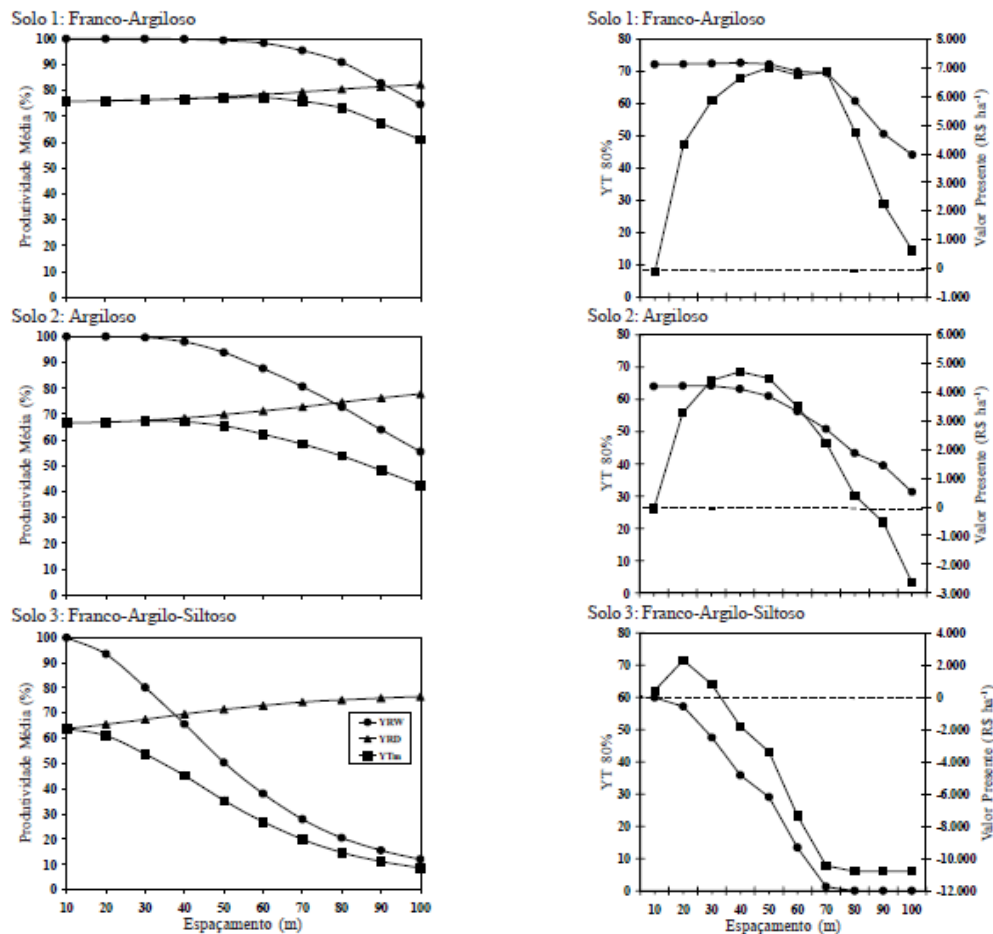


Figura 3. Simulações realizadas pelo modelo SISDRENA sobre a produtividade de cana-de-açúcar, evidenciando o efeito do espaçamento entre drenos na produtividade (DUARTE *et al.*, 2002).

Pela Figura 4, pode-se conferir algumas simulações realizadas pelo modelo DRAINMOD e SISDRENA, evidenciando um desempenho satisfatório do modelo SISDRENA em relação ao modelo DRAINMOD, mesmo sem a calibração do modelo SISDRENA em relação ao tipo de solo (para o qual foi aplicado), no qual os dados de campo foram coletados. Ou seja, caso fosse realizada uma “calibração” do modelo, o desempenho na simulação seria incrementado.

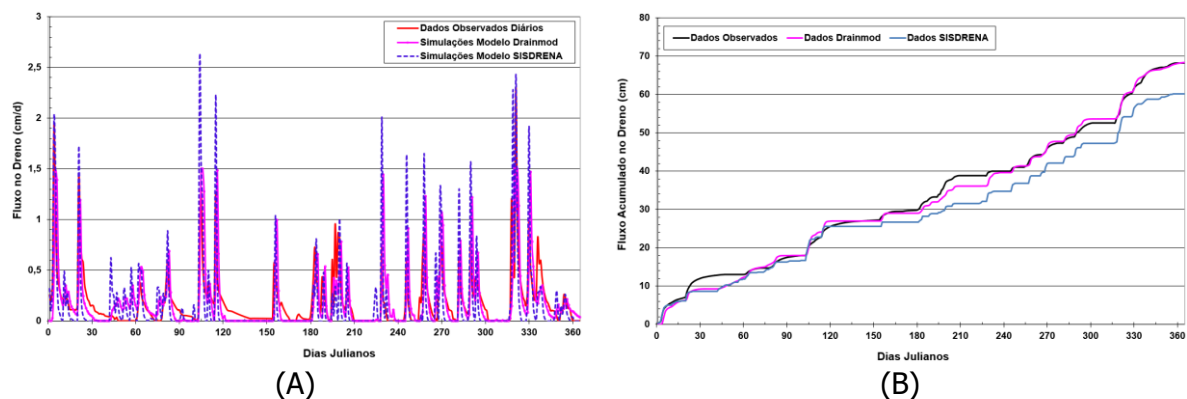


Figura 4. Simulações realizadas pelos modelos (A) DRAINMOD e (B) SISDRENA (sem a calibração para o solo em questão) para a localidade de Urbana (EUA) para o ano de 1993 (MIRANDA, 2011).

6.2.4 Aplicação de biorreatores em drenagem subterrânea

O Brasil é o 5º país do mundo com mais de 65 milhões de hectares de terras cultivadas. No entanto, essa área representa apenas 7,8% do território do país enquanto as áreas de preservação representam 66,3% da área total (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2020). De acordo com o programa Provarzeas, existem aproximadamente 30 milhões de ha de terras com solos mal drenados no Brasil, dos quais 768.000 ha são cultivados (LAMSTER, 1980).

Dessa forma, a busca por uma melhoria da drenagem do solo por meio da instalação de drenos subterrâneos é uma prática que apresenta um retorno positivo do investimento em áreas com solos mal drenados. No entanto, em termos de impacto ambiental, cabe ressaltar que as concentrações de nitrato-nitrogênio na drenagem subterrânea, por exemplo nos EUA, costumam ser da ordem de 10 a 20 mg NO₃-N/L com perdas de nitrato-nitrogênio geralmente variando de 15-30 kg [N] ha⁻¹ (CHRISTIANSON; HARMEL, 2015; HERTZBERGER *et al.*, 2019). Em relação ao caso brasileiro, existem alguns estudos relatando perdas quantitativas de nitrato-nitrogênio. Rosolém *et al.* (2018) mostrou que os sistemas de cultivo sem fornecimento de fertilizante N podem chegar a 33,6 kg [N] ha⁻¹ por ano. Outros sistemas brasileiros podem chegar a 87 kg [N] ha⁻¹ por ano de perdas de nitrato-nitrogênio (VILLALBA *et al.*, 2014). Embora nenhum sistema drenado seja utilizado, o nitrato ainda é uma fonte de comprometimento dos corpos d'água devido às características do solo que permitem o movimento desse soluto.

Nos EUA, biorreatores denitrificantes (também conhecidos como “*woodchip bioreactors*”) são uma opção atual de drenagem de conservação para mitigar o nitrato antes que a água de drenagem alcance o rio. Um biorreator, normalmente, consiste em uma trincheira cheia de lascas de madeira através do qual a água de drenagem é direcionada (CHRISTIANSON *et al.*, 2012; SCHIPPER *et al.*, 2010). Apresentam normalmente de 10 a 30 m de comprimento e de 2 a 8 m de largura e sua profundidade é determinada pela profundidade dos drenos do sistema de drenagem. O carbono nas lascas de madeira “alimenta” o processo natural de denitrificação, onde o nitrato da água é convertido em gás nitrogênio.

A denitrificação é um processo biológico realizado por bactérias denitrificantes, daí o nome de biorreator. Pelas Figuras 5A e 5B pode-se conferir a instalação do biorreator em condições de campo.

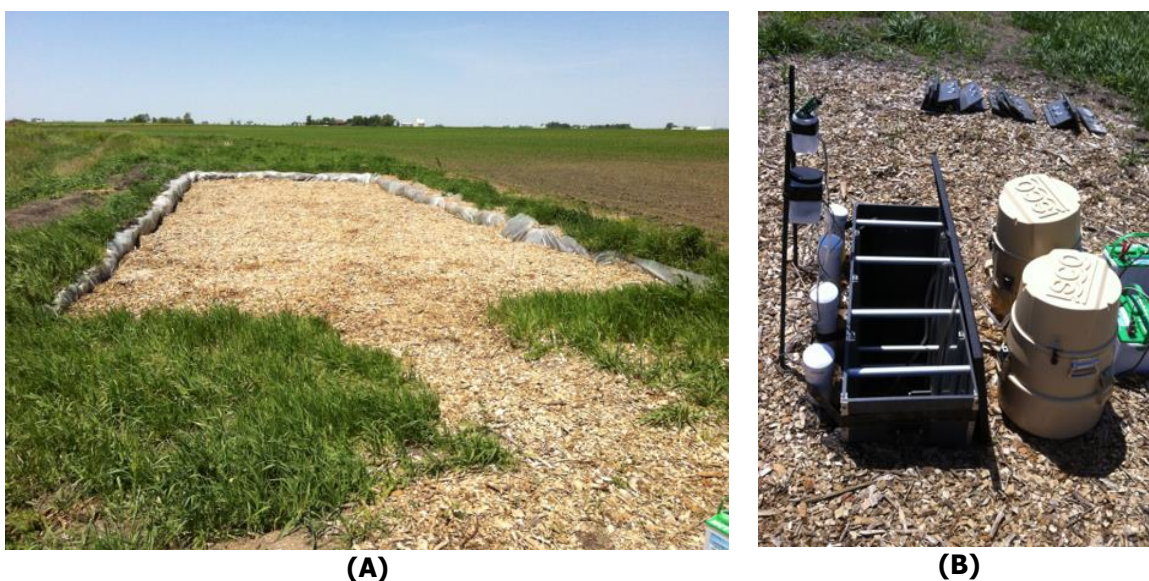


Figura 5. Instalação do biorreator em condições de campo (Illinois, EUA).

O projeto e a construção de biorreatores denitrificantes para o tratamento de nitrato em água de drenagem nos EUA são orientados pelo *United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service (NRCS) (Conservation Practice Standard 605: Denitrifying bioreactor; USDA NRCS, 2020)*. A maioria dos biorreatores são projetados com base em princípios de fluxo através de meios porosos (por exemplo, Lei de Darcy, equação de Forchheimer) emparelhados com a consideração do tempo de retenção hidráulica do projeto (CHRISTIANSON *et al.*, 2011; COOKE; BELL, 2014; GHANE *et al.*, 2014).

Práticas de drenagem de conservação, como biorreatores denitrificantes, não devem reduzir a capacidade de drenagem em campo, portanto, o tubo de fluxo de desvio de um biorreator é um componente de *design* essencial para minimizar a restrição de drenagem em campo durante eventos de alto fluxo. Isso significa que uma parte do volume total do fluxo de drenagem anual proveniente do campo contorna o biorreator do campo. A maioria das situações de campo exigiria um biorreator de um tamanho impraticável para tratar todo o volume de drenagem anual, com esse biorreator superdimensionado para as baixas taxas de fluxo que ocorrem na maior parte do ano.

As "maravalhas de madeira" são os meios mais comuns a serem utilizadas, porém, outros materiais também já foram testados (GIBERT *et al.*, 2008; CAMERON; SCHIPPER, 2010; HEALY *et al.*, 2012). O uso de maravalhas como preenchimento de biorreator geralmente reduz a manutenção do sistema, já que as maravalhas de madeira duram aproximadamente de 7 a 12 anos antes de precisarem ser substituídas (CHRISTIANSON *et al.*, 2020).

6.2.5 Projetos de drenagem superficial

Os sistemas de drenagem superficial são utilizados quando os problemas de drenagem ocorrem principalmente sobre a superfície do solo. Para tal, faz-se necessário "preparar" a superfície do solo para que a água possa se mover em direção a uma declividade projetada, de forma lenta e gradual, fazendo com que a superfície não fique inundada e que se aumente a capacidade de infiltração do solo.

As águas naturais são originadas por dois fenômenos principais: o escoamento subterrâneo e o escoamento superficial. Principalmente nos pequenos cursos d'água, quando ocorrem os picos de enxurrada, a maior parte da vazão escoada é de origem superficial, podendo o escoamento subterrâneo ser muitas vezes desprezado. Dessa forma, quando o escoamento superficial é estimado por modelos chuva-vazão, várias estruturas de controle podem ser dimensionadas como terraços, canais escoadouros, bueiros, aduelas, vertedores de pequenas barragens, drenos coletores e principais de áreas drenadas, entre outras.

Assim, durante um período de chuvas intensas, uma maior parte da chuva pode ser armazenada no solo levando a uma redução do escoamento superficial. Outro aspecto relevante para a drenagem superficial é a classificação da área-problema em uma área plana (declive médio menor que cerca de 1%) e área com declive (declividade média maior que cerca de 1%). No primeiro caso, o objetivo principal é eliminar a água estagnada na superfície, enquanto no segundo, o objetivo principal é o controle da erosão.

Pela Figura 6 pode-se conferir o efeito da drenagem do solo sobre seu arranjo poroso. Verifica-se que, quando é realizada drenagem superficial e subterrânea do solo, o solo passa a apresentar um maior volume de poros com ar (macroporos), revelando uma melhora na sua estruturação.

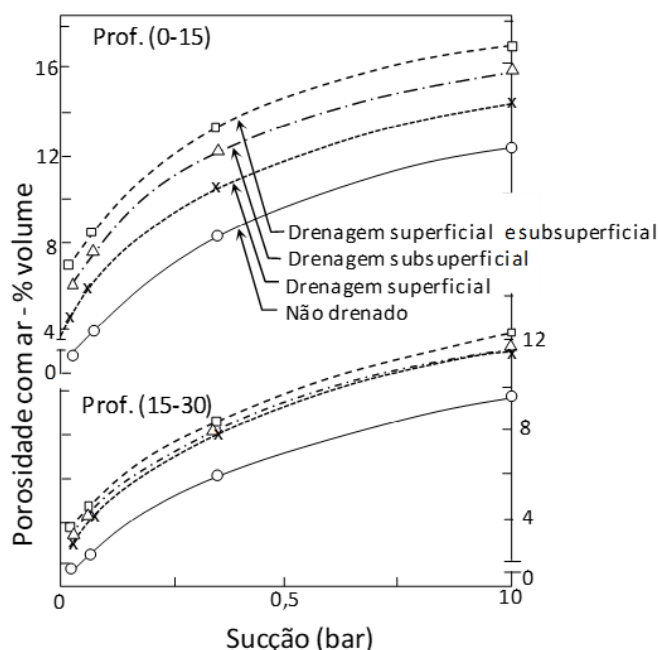


Figura 6. Porosidade livre de água, para duas amostras e diferentes tipos de manejo, em função da tensão à qual essas amostras são submetidas (DUARTE *et al.*, 2015).

Quando a área é plana, o objetivo da drenagem superficial é o de retirar, em tempo hábil, a água empoçada sobre a superfície do solo. Nesse caso as técnicas envolvem a sistematização ou o aplainamento da superfície do terreno, a abertura de sulcos e drenos rasos, a orientação das ruas de plantio e a subsolagem. Como o fenômeno da retenção e do escoamento da água sobre superfícies irregulares planas é de modelagem mais complexa do que o escoamento subterrâneo, a maioria desses sistemas ainda é projetado de forma empírica, tomando como base a experiência do projetista diante da observação do desempenho de sistemas já bem sucedidos e em operação. Entretanto, tal qual os sistemas de drenagem subterrânea, as estruturas que envolvem os sistemas de drenagem superficial de áreas planas englobam estruturas de campo, rede principal (coletores e canal principal) e sistema de saída. Tendo em vista que, geralmente, também há necessidade de controle do LF da área do projeto, a rede principal e a saída, normalmente, são compartilhadas entre os drenos campo superficiais e os subterrâneos.

O projeto e o dimensionamento dos sistemas são baseados no conhecimento historicamente originado da drenagem superficial urbana, e que posteriormente foi aplicado ao meio rural. Estruturas de campo superficiais para áreas planas: (i) camalhões, (ii) drenos rasos com sistematização, (iii) valetas paralelas, (iv) drenos torpedos, (v) trincheiras drenantes, e em (vi) áreas com declive, terraceamento (terraços em nível e em desnível). Pela Figura 7, pode-se conferir aberturas de valetas para o cultivo de bananeiras, em Costa Rica, bem como, conforme citado anteriormente, a necessidade de serviços de limpeza e manutenção.

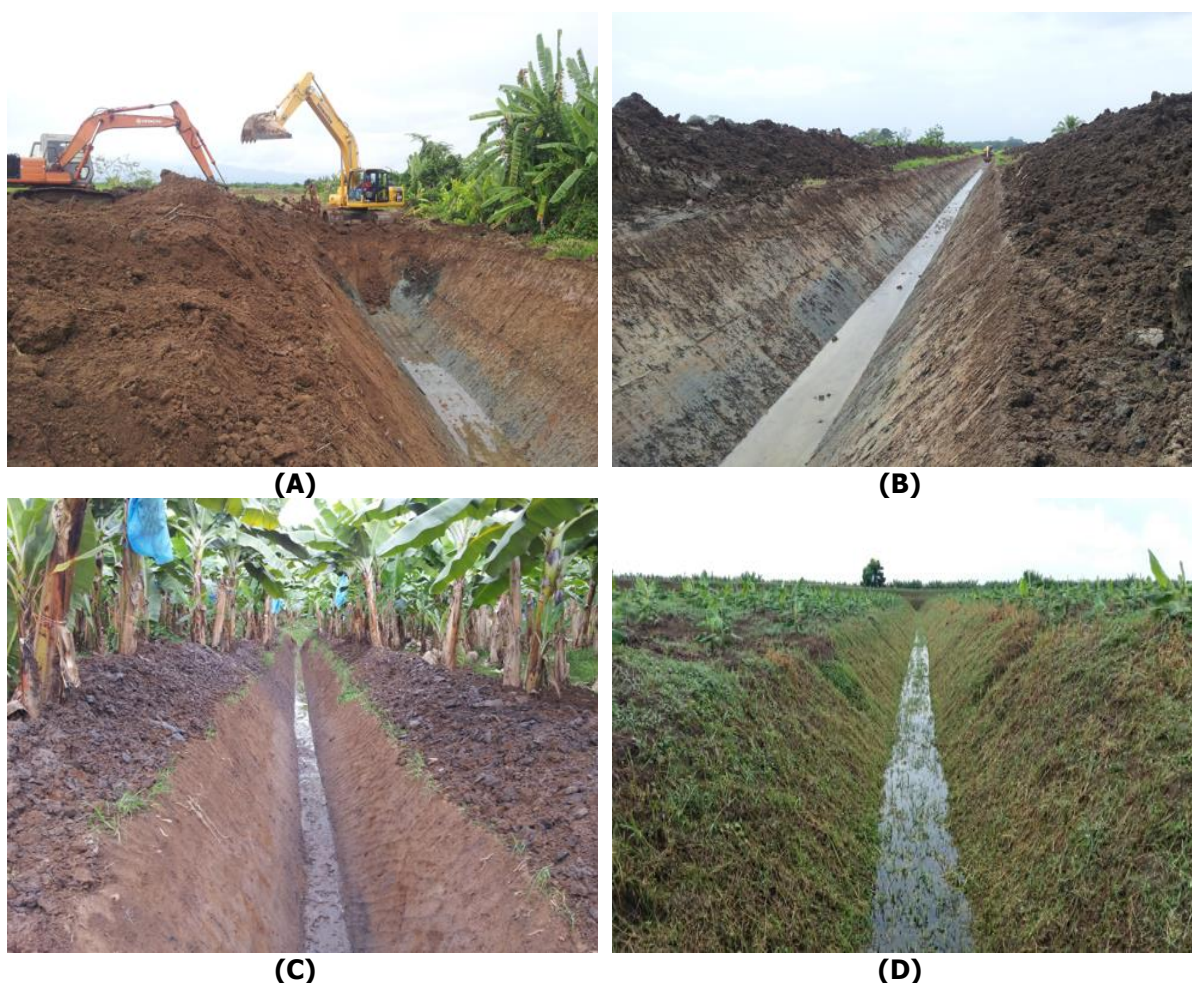


Figura 7. Abertura de valetas na Costa Rica (A) e (B) com posterior plantio de bananeiras (C) e a necessidade de serviços de manutenção (D) (Gentileza do Prof. Adrián Enrique Chavarría Vidal, Professor do Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola).

No caso de áreas com declive, o objetivo do sistema de drenagem superficial é o controle da erosão, e a conservação do solo e da água na microbacia. As estruturas, nesse caso, envolvem obras de infiltração e contenção da enxurrada ou de escoamento da enxurrada (terraços em desnível e canais escoadouros, por exemplo).

A Codevasf (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba) é uma empresa pública destinada a promover o desenvolvimento do progresso das regiões ribeirinhas dos rios São Francisco e Parnaíba. A região possui uma área total de 620 mil Km², abrangendo estados que Minas Gerais a Alagoas (MG, BA, SE, AL, GO e Distrito Federal), sendo que a maior parte se concentra entre os estados de Minas Gerais e Bahia, compreendendo 505 municípios brasileiros, dentre eles 54% está inserido no chamado "Polígono da Seca".

O vale do São Francisco é dividido em 4 regiões, quais sejam.: Alto São Francisco, Médio São Francisco, Submédio São Francisco e Baixo São Francisco (Figura 8).



Figura 8. Comitês de bacias implantados no São Francisco e suas novas divisões fisiográficas apresentadas na atualização do PBHSF (Plano de Recursos Hídricos 2016/2025 CBHSF, 2016).

Somente na cidade de Petrolina foram realizados projetos de drenagem com coletores abertos e subterrânea para 1140 km e 4000 ha respectivamente.

Os objetivos da implantação de projetos de drenagem são permitir a incorporação de áreas mal drenadas ao processo produtivo, evitar ocorrência de inundações, encharcamentos e salinização do solo. E criar condições para o desenvolvimento de uma agricultura produtiva.

Pela Tabela 3, pode-se conferir o custo atual para a implementação de ambos os projetos (drenos abertos e subterrâneos).

Tabela 3. Orçamento da implantação de sistemas de irrigação (Relatório de Gestão do Exercício 2018 da Codevasf).

Tipo	Custo (R\$)
Macro (Coletora aberta)	
Escavação	
Obras de arte	
Bueiros	
Junções	
Curva	
	R\$ 36.000,00 km ⁻¹
Micro (Subterrânea. E = 20 m)	
Aquisição e instalação de tubos corrugados	
	R\$ 10.200,00 ha ⁻¹

No entanto os valores apresentados anteriormente referem-se a obras de maior magnitude realizadas nas últimas décadas, como as de Nilo Coelho, Pontal e bebedouro. Anualmente a Codevasf atua com obras de drenagem em perímetros de irrigação distribuídos pela região do vale do São Francisco.

Em 2016 foi implementada a rede de drenagem superficial, bem como o levantamento topográfico e escavação de drenos coletores na região de Salitre em Juazeiro (BA), com o investimento total de 4.5 milhões de reais.

Em 2019 foram realizados estudos para a implantação de drenagem no rio Boacica em Igreja Nova (AL), com o investimento de 12 milhões de reais e geração de 7500 empregos, comprovando o potencial da agricultura irrigada na região e implementação de 150 km de canais, 146 km de drenos, 122 km de estradas, 46,6 km de diques e 3 estações de bombeamento.

Ainda em 2020 foi realizada a obra de esgotamento e drenagem pluvial em Floriano (PI), implantando cerca de 1,1 mil metros de galerias de drenagem, 680 metros de tubulação e o investimento de 61.7 milhões de reais visando a macrodrenagem da região do município de Floriano e o sistema de esgotamento sanitário através de 62 mil metros de redes coletoras de esgoto; 4,5 mil ramais prediais de esgotos; duas estações elevatórias de esgotos; 5,4 mil metros de emissários de recalques e uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE).

6.3 Considerações finais

A prática de drenagem de terras agrícolas, desde o início, apresenta a característica de propiciar o aproveitamento de novas áreas para a agricultura brasileira. Além do aumento da área agrícola, propiciar um aumento de produtividade nessas áreas. Atualmente, há uma grande discussão sobre a proteção de áreas naturais no território brasileiro. Dessa forma, a drenagem passa a assumir outros aspectos, não menos importantes, que são a proteção dessas áreas, bem como, evitar a contaminação de águas subterrâneas. Em termos futuros, na minha opinião pessoal, observo a necessidade de um aumento da aplicação de modelagem computacional, em estudos de drenagem agrícola, pois permite levar em consideração, de maneira rápida e eficaz, vários aspectos de solo, planta e atmosfera, sem a necessidade de implantação de projetos de drenagem em condições de campo, o que certamente seria inviável. Além disso, acredito no incremento de pesquisas na área de prevenção de contaminação ambiental, envolvendo principalmente estudos na área de dinâmica de solutos.

Referências

- BRASIL. Lei 12.727, 17 de outubro de 2012. Altera a Lei 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2º do art. 4º da Lei 12.651, de 25 de maio de 2012. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, p.1, 18 out. 2012.
- CAMERON, S.G.; SCHIPPER, L.A. Nitrate removal and hydraulic performance of organic carbon for use in denitrification beds. **Ecological Engineering**, v.36, n.11, p.1588-1595. 2010.
- CHRISTIANSON, L.; BHANDARI, A.; HELMERS, M. Potential design methodology for agricultural drainage denitrification bioreactors. In: EWRI CONGRESS PROCEEDINGS. Palm Springs, California. 2011.
- CHRISTIANSON, L.; HELMERS, M.; BHANDARI, A. A practice-oriented review of woodchip bioreactors for subsurface agricultural drainage. **Applied Engineering in Agriculture**, v.28, n.6, p.861-874. 2012.
- CHRISTIANSON, L.; HARMEL, R.D. 4R water quality impacts: An assessment and synthesis of forty years of drainage nitrogen losses. **Journal of Environmental Quality**, v.44, n.6, p.1852-1860, 2015.
- CHRISTIANSON, L.E.; FEYEREISEN, G.W.; HAY, C.H.; TSCHIRNER, U.W.; KULT, K.; WICKRAMARATHNE, N.; HOOVER, N.L.; SOUPIR, M.L. **Denitrifying bioreactor woodchip recharge**: Media properties after 9 years. Transactions of the ASABE, v.63, n.2, p.407-416, 2020.
- COOKE, R.; BELL, N. Protocol and interactive routine for the design of subsurface bioreactors. **Applied Engineering in Agriculture**, v.30, n.5, p.761-771, 2014.

- DUARTE, S.N. **Modelo para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem subterrânea e cálculo de espaçamento de drenos**, 143p., 1997. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.
- DUARTE, S.N.; MIRANDA, J.H.; FOLEGATTI, M.V. Dimensionamento econômico de sistemas de drenagem para a produção de cana-de-açúcar usando o modelo SISDRENA. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande: UFPB, v.6, n.1, p.1-6, 2002.
- DUARTE, S.N.; SILVA, E.F.F.; MIRANDA, J.H.; MEDEIROS, J.F.; LIMA FILHO, R.N.; GHEYI, H.R. **Fundamentos de drenagem agrícola**. 1. ed. Fortaleza: Expressão Gráfica, v.1, 356p., 2015.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Territorial. **Sistema de Inteligência Territorial Estratégica da Macrologística Agropecuária brasileira (SITE-MLog)**. Campinas, 2020. Disponível em: www.embrapa.br/macrologistica. Acesso em: 03 dez. 2020.
- GHANE, E.; FAUSEY, N.R.; BROWN, L.C. Non-Darcy flow of water through woodchip media. **Journal of hydrology**, v.519, p.3400-3409, 2014.
- GIBERT, O.; POMIERNY, S.; ROWE, I.; KALIN, R.M. Selection of organic substrates as potential reactive materials for use in a denitrification permeable reactive barrier (PRB). **Bioresource Technology**, v.99, n.16, p.7587-7596. 2008.
- HEALY, M.G.; IBRAHIM, T.G.; LANIGAN, G.J.; SERRENHO, A.J.; FENTON, O. Nitrate removal rate, efficiency and pollution swapping potential of different organic carbon media in laboratory denitrification bioreactors. **Ecological Engineering**, v.40, p.198-209, 2012.
- HERTZBERGER, A.; PITTELKOW, C.M.; HARMEL, R.D.; CHRISTIANSON, L.E. The manage drain concentration database: A new tool compiling North American drainage nutrient concentrations. **Agricultural Water Management**, v.216, p.113-117. 2019.
- LAMSTER, E.C. Programa nacional de aproveitamento racional de várzeas – Provárzeas. **Informe Agropecuária**, Belo Horizonte, v.6, n.65, p.3-8, 1980.
- MIRANDA, J.H. **Modelo para simulação da dinâmica da água em sistemas de drenagem subterrânea e cálculo do espaçamento econômico entre drenos**. 89p., 1997. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.
- MIRANDA, J.H.; COOKE, R.; DUARTE, S.N.; PINHO, R.E.C. Simulations of subsurface drainage systems with the SISDRENA model. In: 2011 ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2011, Louisville, Kentucky - EUA. **Asabe Technical Library**, p.1-17, 2011.
- PAVELIS, G.A. Economic survey of farm drainage. In Farm drainage in the United States: History, status and prospects, ed. G.A. Pavelis, p.110-136. **USDA Economic Research Service Miscellaneous Publication** 1455. Washington, DC: US Government Printing Office. 1987.
- ROSOLEM, C.A.; ROSOLEM, G.; CASTOLDI, L.A.; PIVETTA, T.E. Ochsner Nitrate leaching in soybean rotations without nitrogen fertilizer. **Plant and Soil**, v.423, 2018, p.27-40, 2018, DOI 10.1007/s11104-017-3494-4.
- SABBAGH, G.J.; FOUSS, J.L.; BENGSTON, R.L. Comparison of EPIC-WT and DRAINMOD simulated performance of land drainage systems. **Transactions of the ASAE**, v.36, n.1, p.73-79, 1993.
- SCHIPPER, L.A.; ROBERTSON, W.D.; GOLD, A.J.; JAYNES, D.B.; CAMERON, S.C. Denitrifying bioreactors--An approach for reducing nitrate loads to receiving waters. **Ecological Engineering**, v.36, p.1532-1543, 2010. DOI 10.1016/j.ecoleng.2010.04.008.
- SHADY, A.M. **Irrigation, Drainage and Flood Control in Canada**. Ottawa, Canada: Canadian International Development Agency, 1989.
- SKAGGS, R.W. **DRAINMOD** - Reference report: methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables. Raleigh: USDA, SCS, 329p., 1981.
- SKAGGS, R.W. **DRAINMOD**: user's manual. Raleigh: North Carolina State University, 101p., 1990.
- SKAGGS, R.W.; VAN SCHILFGAARDE, J. Agricultural drainage. Agron. Monogr., v.38., **American Society of Agronomy**, Madison, WI, 1999.

SMEDEMA, S.K.; SMEDEMA, L.K.; VLOTMAN, W.F. **Modern Land Drainage: Planning, Design and Management of Agricultural Drainage Systems**. London: Taylor and Francis Group, 2004.

SMEDEMA, L.K.; RYCROFT, D.W. **Land drainage**. Ithaca: Cornell University Press, 377p., 1983.

VILLALBA, H.A.G.; LEITE, J.M.; OTTO, R.; TRIVELLIN, P.C.O. Fertilizantes nitrogenados: novas tecnologias. **Informações Agronômicas**, n.148, p. 12-18, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/304354615_Fertilizantes_nitrogenados_Novas_tecnologias. Acesso em: 26 mar. 2021.

CAPÍTULO 7

7 IRRIGAÇÃO E FERTIRRIGAÇÃO EM AMBIENTE PROTEGIDO

Sergio Nascimento Duarte

Resumo

Há cerca de 30 anos, acompanhando o advento da Plasticultura, aumentou o estabelecimento de propriedades nas quais se cultiva sob estufas e tuneis plásticos, principalmente nas regiões Sudeste e Sul do Brasil. Trata-se de uma opção interessante para culturas muito intensivas como hortaliças, flores e mudas diversas. O sistema de irrigação mais adotado tem sido o localizado, também conhecido como microirrigação, devido à facilidade de controle da lâmina a aplicar, alta frequência e menor risco de erro de manejo propiciado pela baixa intensidade de aplicação de água. Acrescenta-se, ainda, a possibilidade de injeção de fertilizantes, CO₂, indutores de florescimento, entre outros produtos, junto com a água de irrigação. Entretanto, a experiência tem demonstrado que o cultivo em chão de estufa esbarra em cuidados adicionais devido aos riscos de salinização e compactação do solo, o que exige estratégias mais sofisticadas de condução. Devido a esse fato, vem crescendo a prática de cultivo em vasos e bags preenchidos com vários tipos de substratos. A essa prática soma-se a irrigação realizada sempre com solução nutritiva pré-preparada para se evitar enganos, o que tem sido chamado de nutrição ou hidroponia em substratos. Esse capítulo do Livro de Agricultura Irrigada aborda essa trajetória de desafios e soluções para a irrigação e a fertirrigação no crescente cultivo em ambiente protegido, que está se expandindo ultimamente para outras regiões do País.

7.1 Introdução

A atividade agrícola brasileira tem investido em tecnologia de produção em casas de vegetação, devido ao mercado consumidor extremamente exigente e ao alto valor econômico agregado às hortaliças e flores, principalmente (GUISELINI *et al.*, 2010). Olerícolas e plantas ornamentais podem ser cultivadas em diferentes épocas do ano em ambientes protegidos, o que permite aos produtores um melhor planejamento e uso dos recursos naturais, otimização da gestão e, principalmente, geração de preços competitivos de mercado (BOUERI; LUNARDI, 2006).

O cultivo em ambiente protegido oferece inúmeras vantagens, quando comparado ao tradicional realizado em campo, destacando-se, principalmente, a proteção das plantas contra chuvas torrenciais, vento, geadas (morangos, alface e flores, por exemplo, são sensíveis a chuva e vento intenso) e, ainda, redução do ataque de pragas e incidência de doenças. A estrutura desses ambientes e o material de cobertura proporcionam um microclima controlado, o qual pode ser manejado e adaptado às necessidades de cada cultura, e dessa forma, resultar em aumento do rendimento, qualidade e disponibilidade de produtos durante o ano (VOX *et al.*, 2010). Outros benefícios são o desenvolvimento mais acelerado dos cultivares e a possibilidade de se realizar a colheita precocemente (ROMANINI *et al.*, 2010). Em ambientes protegidos há um relevante aumento da produção e da qualidade do produto, proporcionando maior garantia de lucratividade ao produtor, uma vez que os efeitos das variações climáticas são minimizados (GOMES *et al.*, 2006).

Apesar da alta atratividade, o cultivo em ambientes protegidos exige cuidados em relação aos parâmetros micrometeorológicos, para que esses atendam às necessidades da cultura. A cobertura física dos ambientes protegidos implica em alterações de elementos micrometeorológicos no interior desses ambientes em relação ao ambiente externo, o que

pode as vezes impactar negativamente o desenvolvimento da cultura. Segundo Guiselini *et al.* (2010), a radiação solar, que chega ao ambiente de cultivo, afeta diversos fatores, como a temperatura, a umidade relativa do ar e a temperatura do solo ou do substrato; além disso, ela age direta e indiretamente sobre todos os processos vitais das plantas, como a fotossíntese, a transpiração, o fotoperíodo, o crescimento do tecido vegetal e a floração.

7.2 O cultivo em estufas agrícolas

Uma das técnicas da agricultura moderna muito utilizada para viabilizar o cultivo fora de época, diminuir os custos e aumentar a produtividade, é o cultivo sob estufas plásticas que, juntamente com as novas tecnologias aplicadas à área de irrigação, como a fertirrigação, têm propiciado bons resultados (FACTOR *et al.*, 2008). O cultivo protegido exige, também, o conhecimento de outros aspectos, como a distribuição da radiação dentro da estufa, a evapotranspiração e o consumo hídrico das plantas, sempre na busca da maximização, em quantidade e em qualidade, da produção por unidade de área ou por unidade de volume de água aplicado, como é o caso de regiões onde a água é o fator limitante.

O desenvolvimento do cultivo em estufas tem crescido no mundo a uma taxa muito elevada. Os países mediterrâneos europeus e do Oriente Médio, que antes tinham pouca tradição com o uso dessa tecnologia, passaram a utilizá-la intensivamente. Essa tecnologia desponta como uma boa alternativa para os horticultores, haja vista que minimiza os efeitos da variabilidade ambiental, melhorando o desenvolvimento dos cultivos, permitindo a produção durante todo o ano e alcançando, assim, maiores preços no mercado (SILVA *et al.*, 1999a). Acrescentam-se, ainda, as vantagens de se proteger a cultura dos efeitos negativos do vento, da chuva e do granizo, possibilitar aumentos consideráveis de produtividade, melhor qualidade, economia de insumos e precocidade na colheita (GOMES *et al.*, 1999).

No Brasil também se tem observado um aumento significativo do uso de estufas agrícolas, sobretudo nas regiões Sudeste e Sul, acarretando aumento de simpósios e congressos nos quais se discute esse tema, assim como eventos especializados da área de Olericultura e de Engenharia Agrícola. Entretanto, a pesquisa científica no Brasil sobre o cultivo em ambiente protegido ainda é incipiente. Assim, com a expansão da atividade, vários problemas surgidos têm sido relatados por agricultores e técnicos envolvidos com essa atividade agrícola. Devido à falta de conhecimento sobre a tecnologia apropriada para esse tipo de cultivo, têm sido frequentes os problemas de salinização do solo, prejudicando o cultivo de hortaliças e flores nessas condições. Esses problemas provavelmente estão associados ao manejo inadequado da irrigação e da fertilização.

7.3 Irrigação em estufas

7.3.1 O método da irrigação localizada ou microirrigação

A irrigação é uma alternativa artificial para suprir a demanda de água de culturas. Em geral, o excesso ou a falta de água acarretam em baixa eficiência do uso de recursos hídricos em sistemas irrigados e são limitantes para a produtividade e para a qualidade dos produtos (PIRES *et al.*, 2007). A irrigação excessiva ocorre devido, principalmente, ao planejamento incorreto, o qual muitas vezes é baseado apenas na experiência do produtor ao invés de cálculos e medições corretas da demanda de água pela cultura (THOMPSON *et al.*, 2007; PARDOSSI; INCROCCI, 2011; CARMASSI *et al.*, 2013).

O conhecimento da relação água-solo-planta-atmosfera permite inferir sobre a quantidade de água a ser aplicada e o melhor momento para a aplicação. A princípio, o correto manejo da irrigação, o qual proporciona a obtenção da produtividade economicamente viável, é aquele em que se aplica água no solo, no momento oportuno e em quantidades suficientes

para suprir as necessidades hídricas da cultura, sem falta ou desperdício (FRIZZONE *et al.*, 2012).

Atualmente, na Agricultura, os sistemas de irrigação são utilizados para garantir a qualidade e o padrão comercial dos produtos agrícolas. Estima-se que a área irrigada no mundo ocupe aproximadamente 17% de toda a terra agricultável e responda pela produção de mais de 40% de todo o alimento consumido (PAULINO *et al.*, 2011). Algumas técnicas de manejo da cultura podem ser associadas à irrigação e, dentre elas, a fertirrigação bem manejada se destaca como importante contribuição para o aumento da produtividade de culturas em muitas áreas irrigadas.

O método de irrigação localizada é o mais indicado quando se utiliza o cultivo em estufas, principalmente o gotejamento, pois esse sistema aplica água e nutrientes em quantidade e posição adequadas, proporcionando maior eficiência de aplicação e distribuição (MEDEIROS, 2010). Por ser um sistema de irrigação de alta frequência e baixa vazão, permite que a aplicação de fertilizantes via água de irrigação seja vantajosa, pois possibilita o incremento em quantidades precisas de nutrientes que a cultura demanda, em cada fase do seu ciclo vegetativo. Além disso, proporciona economia de água e energia (SOUZA, *et al.*, 2022), evita o molhamento excessivo das folhas, reduz a mão de obra para operação do sistema, aumenta o rendimento e a qualidade dos produtos (BILIBIO *et al.*, 2010; VILAS BOAS *et al.*, 2011).

7.3.2 Os sistemas de irrigação para estufas agrícolas

As plantas cultivadas sob estufas, obviamente privadas da chuva, são totalmente dependentes do sistema de irrigação para suprir suas necessidades hídricas. O conhecimento das condições climáticas e das condições ideais para cada espécie cultivada, o tamanho da estufa que se pretende implantar e a conveniência do agricultor facilitam na escolha do sistema que venha a trazer o melhor desempenho, podendo-se optar por um sistema mais simples ou mais automatizado. A seguir são abordados de forma resumida os principais tipos de sistema utilizados em ambientes protegidos.

Sistema de irrigação por gotejamento: é talvez aquele que possui um maior número de vantagens. São ótimos para a economia de água porque o fluxo ocorre junto ao solo podendo ser bem cronometrado e regulado. Levam água diretamente a cada planta ou recipiente, impedindo o crescimento de plantas daninhas, e são fáceis de montar. Além disso, todo o sistema pode ser ligado a sensores e temporizadores para automação. Os gotejadores podem possuir diferentes formatos, quais sejam, cilíndricos (bob), planos (chapinha), botão e labirinto contínuo. Podem ser não compensados ou autocompensados, sendo que esses últimos podem ter dispositivos anti sifão ou anti drenante. Devido à baixa pressão de serviço, geralmente, para estufas pequenas, de cerca de 200 m², um motor elétrico de 1,0 cv é suficiente para acionar a bomba. As bombas podem ser do tipo centrífuga ou periférica. Geralmente para a faixa de vazão versus pressão necessária, não é muito fácil achar bombas com rendimento acima de 60%. Possuem como desvantagem a susceptibilidade ao entupimento dos emissores, o que depende da qualidade da água de irrigação (JESUS *et al.*, 2017).

Sistema de irrigação por microaspersão: não tem de forma severa o problema de entupimento que têm os gotejadores. Pode ser instalado sobre o solo ou em tubulações aéreas, o que facilita o trânsito na estufa, principalmente quando dotado de válvula antigotas. Pode aspergir a quantidade de água desejada com precisão; sua uniformidade de distribuição, tal como os gotejadores, costuma ser maior que 90%. Os emissores, de vazão de 20 L h⁻¹ até de mais de 100 L h⁻¹, podem ser autocompensados ou não autocompensados, com difusor fixo ou giratório; o acionamento dos registros do sistema pode ser manual ou automatizado.

Permite lançar defensivos e fertilizantes sobre a parte aérea das folhas com rapidez (FRIZZONE *et al.*, 2012).

Sistema de nebulização: também conhecido como sistema de Misting (ou Fogger), é um sistema bem adaptado à irrigação de mudas e orquidários. Possuem tubos com *sprays* de bico fino que são colocados acima das fileiras de bandejas de mudas ou outras plantas. Os emissores trabalham com pressão de 30 a 40 m, fornecendo uma intensidade de aplicação de cerca de 3 mm h⁻¹. Esse sistema libera pequenas gotas de água (de cerca de 50 micras de diâmetro) em horários específicos, mantendo a planta úmida; ajuda a controlar a umidade e a temperatura uma vez que a névoa fina tende a evaporar, havendo uma troca de energia entre o ar quente e as gotículas frias ultrafinas lançadas no ambiente. A diminuição da temperatura no interior da estufa pode chegar de 4 a 6 graus Celsius. Os sistemas de nebulização se adaptam bem a flores tropicais e epífitas; é possível também a aplicação de defensivos agrícolas. Possuem como desvantagem, além do entupimento do bico (deve-se ter cuidado com a qualidade da água), a ineficiência em altas temperaturas e baixos valores de umidade relativa do ar (VOX *et al.*, 2010).

Sistema com barra de irrigação: consiste de uma barra móvel de alumínio com emissores, instalada em trilhos de aço galvanizado suspensos, que propicia um grande espaço livre na casa de vegetação. São oferecidas desde a forma mais simples (de empurrar) até completamente automatizada, quando não exigem a presença do operador dentro do ambiente protegido. Percorre a estufa em direção linear, longitudinalmente, com velocidades que podem ser reguladas. Permite aplicar pequenas lâminas por passada com alta uniformidade; se constituem em uma boa opção para mudas. Alguns modelos têm a altura do braço ajustável e conseguem realizar 3 operações, quais sejam, irrigação, fertirrigação e nebulização (COSTA *et al.*, 2019).

Sistema de irrigação por manta: é um sistema de rega relativamente inovador quando comparado aos sistemas convencionais. É um bom sistema se as plantas da estufa consistirem principalmente de vasos ou bandejas de propagação; isso porque a água é simplesmente absorvida por capilaridade, evitando-se mexer nas pequenas mudas. Nesse sistema, uma manta espessa é instalada sobre uma bancada com uma extremidade colocada em uma calha cheia de água. A ascensão capilar manterá a manta molhada, e os vasos com perfurações por baixo receberão água da mesma forma. Algumas mantas podem, também, vir com gotejadores integrados; esses são geralmente autocompensantes para uma faixa de 10 a 35 metros de pressão. Uma desvantagem desse tipo de irrigação é a eventual ocorrência de algas que podem entupir o sistema. Também não é um sistema adequado para se realizar fertirrigação (FRIZZONE *et al.*, 2012).

Sistema de irrigação por mangueira manual: é um dos métodos mais antigos, simples e baratos que ainda podem ser vistos em algumas estufas com mudas. Consiste na utilização de uma mangueira plástica para se regar manualmente as plantas. Possuem a desvantagem de demandar elevada mão de obra para cobrir toda a área, acarretar dificuldade de controle da lâmina aplicada e muitas vezes molhar mais as folhas do que as raízes, o que pode ter implicações fitopatológicas. Como a mangueira irriga com uma alta intensidade de aplicação, pode haver ainda problemas em substratos que apresentam um certo grau de hidrofobia, nos quais é comum a água percolar abaixo, para fora do vaso, antes que todo o substrato esteja umedecido. É um método usado mais comumente em pequenas estufas.

7.3.3 O cultivo em chão de estufa e o problema da salinidade

7.3.4 As causas da salinização em estufas

O conceito sobre tais problemas de salinização, comumente referentes a regiões semiáridas, pode facilmente ser transportado para sistemas de cultivo em ambiente protegido, visto que tais sistemas sempre dispõem da técnica da irrigação para reposição das necessidades hídricas das culturas, estando também protegidos das precipitações concentradas dos períodos chuvosos, o que inibe a lavagem natural dos sais acumulados no solo.

Embora as águas de irrigação utilizadas sejam geralmente de boa qualidade, altas doses de fertilizantes aplicados via água de irrigação, e muitas vezes de esterco animal, têm elevado os níveis de salinidade. Esse problema ocorre especialmente quando se utilizam recomendações de adubação quantificadas para campo aberto, em ambientes protegidos artificialmente e modificados em todos os sentidos; o manejo da irrigação e da fertirrigação também deve ser diferente, por ser a única fonte hídrica disponível para as culturas.

Torna-se necessário, portanto, estudos e posterior utilização de técnicas básicas para solucionar ou pelo menos reduzir os impactos causados pela utilização de procedimentos impróprios para estufas agrícolas, que são geralmente praticados ou por falta de informação do agricultor ou até mesmo pela ilusão de que haverá economia de recurso financeiro, deixando totalmente de lado a preservação do próprio empreendimento e a sustentabilidade dos recursos naturais.

Existem duas causas principais que proporcionam o acúmulo de sais no solo com maior frequência no cultivo comercial em estufas agrícolas. A primeira deve-se à utilização de águas de qualidade inferior (salobras), geralmente proveniente de poços. Embora não seja comum no Estado de São Paulo, na região de Piracicaba, Ipeúna e Rio Claro (SP), por exemplo, se localiza de forma aflorante o aquífero Passa Dois onde, segundo Oliveira e Salati (1981), é frequente a ocorrência, nos poços tubulares profundos, de águas ricas em cloretos e sulfatos de sódio, com teores responsáveis por valores de condutividade elétrica (CE) às vezes superior a $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ e razão de adsorção de sódio também elevada.

Caso a salinização seja consequência da utilização de águas de qualidade inferior, a técnica utilizada de controle é a mesma utilizada em campo aberto: consiste em permitir que lâminas excedentes de irrigação percolem no perfil do solo e garantam um equilíbrio favorável de sais na zona radicular da cultura. Essa lâmina de lixiviação pode ser aplicada intencionalmente ou pode ocorrer naturalmente como consequência das perdas por percolação espontâneas proporcionadas pela técnica de irrigação.

A quantificação da lâmina total a ser aplicada pode ser realizada com base na evapotranspiração da cultura, na condutividade elétrica da água de irrigação e na tolerância da cultura à salinidade. A razão entre a lâmina de lixiviação e a lâmina total de irrigação é denominada na literatura como fração de lixiviação.

Entretanto, para que essa prática de controle seja eficiente, é necessário que a drenagem natural do solo seja adequada (SILVA *et al.*, 1999) ou que se disponibilizem instalações artificiais para a drenagem, principalmente em se tratando de ambientes protegidos que são fechados e onde existe o risco de os solos cortados e sistematizados para a construção da estufa serem altamente compactados.

A irrigação praticada em ambientes protegidos, entretanto, faz uso principalmente de águas superficiais captadas em rios e em córregos, águas essas que na maior parte do País possuem baixos teores de sais. Assim sendo, pode-se considerar que o excesso e o inadequado manejo da adubação sejam a principal causa do problema, em virtude da adição de sais

fertilizantes de elevado índice salino e em quantidades superiores às requeridas para a nutrição das plantas, além da adição dos adubos orgânicos.

O excesso de aplicação de fertilizantes pelos agricultores em ambiente protegido ocorre, principalmente, porque são utilizadas as mesmas recomendações de adubação preconizadas para campo aberto, devido à ausência de investigações específicas, considerando a extração de nutrientes pelas plantas cultivadas em ambiente protegido. Mas, nas estufas agrícolas, as condições ambientais e as práticas agrícolas são bastante diferenciadas, destacando-se a ausência de chuvas que poderiam promover lavagem de nutrientes por lixiviação ou escoamento superficial. Recomendações existentes de adubação para o cultivo em campo aberto devem servir apenas como referenciais, havendo, portanto, a necessidade de obtenção de informações específicas para estufas (GOMES *et al.*, 1999).

Em condições protegidas as plantas de pimentão, por exemplo, têm maior crescimento vegetativo em relação às de campo aberto, principalmente em virtude da aplicação de quantidades elevadas de nitrogênio (SILVA *et al.*, 1999). Além disso, as condições de cultivo em ambientes protegidos são diferentes daquelas observadas em campo a céu aberto, sobretudo com relação à menor evapotranspiração e à ausência de perdas de nutrientes por erosão e lixiviação profunda.

Tabela 1. Índice salino dos principais fertilizantes solúveis utilizados na fertirrigação em ambiente protegido (SILVA, 2002).

Fertilizantes	Solubilidade (g L ⁻¹ a 20°C)	Índice Salino (1,0 g ⁻¹ a 25°C)
Nitrato de Cálcio (Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O)	1200,00	82,25
Nitrato de Potássio (KNO ₃)	327,58	99,47
Nitrato de Amônia (NH ₄ NO ₃)	2075,00	32,80
Fosfato monoamônico (NH ₄ H ₂ PO ₄)	361,29	68,06
Fosfato monopotássico (KH ₂ PO ₄)	238,53	55,60
Sulfato de Potássio (K ₂ SO ₄)	123,80	112,94
Sulfato de Magnésio (MgSO ₄ · 7H ₂ O)	500,00	91,45
Sulfato de Amônio ((NH ₄) ₂ SO ₄)	830,00	34,50
Ureia (CO(NH ₂) ₂)	1170,00	75,00

O acúmulo de sais no solo em cultivos protegidos é bastante comum em virtude, principalmente, das altas doses de fertilizantes aplicadas e da falta de lixiviação dos sais acumulados após sucessivos ciclos de cultivo. Acrescenta-se a esses fatores a possibilidade de utilização de águas de poços de má qualidade (salobras) (BLANCO, 2004), o que tem motivado a condução de diversos estudos nos últimos anos, visando avaliar métodos de controle da salinidade nessas condições de cultivo.

Uma alternativa apontada para minimizar o incremento da salinidade em ambientes protegidos é a utilização de fertilizantes com menor poder de salinização, como as alternativas que constam da Tabela 1, na qual estão apresentados diversos fertilizantes e comparados seus índices salinos.

Existem, assim, opções de fertilizantes que podem ser selecionados para o fornecimento de uma determinada quantidade de nutrientes a ser aplicada ao solo, com maior ou menor efeito sobre o incremento na condutividade elétrica da solução do solo.

Aplicando uma solução nutritiva com uma condutividade elétrica em torno de $4,0 \text{ dS m}^{-1}$, está-se aplicando aproximadamente uma solução com concentração de $2,56 \text{ kg m}^{-3}$ de sais. Se for levado em conta, por exemplo, o consumo hídrico de uma cultura em torno de 400 mm de lâmina por ciclo, instalada em um espaçamento de 0,5 m x 1,2 m, será colocado no solo 0,61 kg de sais por planta e, conseqüentemente, 10.240,00 kg de sais por hectare ao longo de um ciclo da cultura. Entretanto, considerando que esses sais fertilizantes são nutrientes e que parte desses ser absorvidos pela cultura e exportados da estufa, apenas o excesso será acumulado no solo. Todavia, ciclos de cultivos sucessivos vão proporcionar incremento no teor de sais no solo, se tal fato ocorrer frequentemente.

Na realidade, a principal causa do uso excessivo de fertilizantes por parte dos agricultores se deve geralmente à busca por elevadas produtividades, procurando garantir maiores lucros para o pagamento do investimento realizado com a estufa plástica, sem a preocupação com os possíveis impactos ambientais gerados e com a sustentabilidade da própria atividade agrícola a médio prazo.

7.3.5 Recuperação de solos salinizados em estufas agrícolas

Caso a salinidade do solo não seja controlada pelos métodos preventivos ou os diagnósticos revelem problemas de salinidade em estágios avançados, devem ser utilizados como solução métodos de recuperação do solo, tanto para o caso da salinização causada pelo uso de águas salobras quanto para o caso de salinização ocasionada pela aplicação de adubos em excesso. É importante salientar que o controle da salinização por meio de técnicas de prevenção é primordial e mais barato, e que as técnicas de recuperação do solo deverão ser utilizadas apenas quando realmente necessárias, tendo em vista o grande volume de água envolvido e o possível transtorno ambiental.

Considerando também que tal operação demanda uma certa quantidade de capital, principalmente em se tratando de estufas agrícolas cujas as estruturas são montadas em locais estratégicos em relação à radiação solar e à topografia, deve-se realizar uma avaliação econômica e pesar as alternativas para a escolha da melhor decisão (recuperar ou não o solo salinizado).

Quando o diagnóstico da salinização do solo realizado revela situações nas quais a concentração eletrolítica encontra-se elevada, e considerando positiva a viabilidade econômica e ambiental, torna-se recomendável a aplicação de lâminas de lavagem de recuperação do perfil. Esta técnica promove a eliminação dos sais solúveis por intermédio da aplicação de uma ou mais lâminas de água que lixiviam os sais para camadas de solo abaixo da zona radicular, o que é essencial para a recuperação dos solos afetados por sais; essa lâmina deve ser eliminada do perfil do solo por um sistema eficiente de drenagem artificial, quando o solo for raso ou quando a drenagem natural do solo não for boa.

De acordo com Hoffman *et al.* (1992), a aplicação de uma pequena lâmina de recuperação no final de cada ciclo da cultura é viável para prevenir o excesso de sais na zona radicular, quando a salinidade da água de irrigação não é muito elevada.

É bastante difícil estimar com exatidão a lâmina necessária à lixiviação de recuperação devido à presença de fendas no solo, dissolução dos sais precipitados, restrições à difusão dos sais e à dispersão hidrodinâmica. Os modelos matemáticos desenvolvidos, como o americano Hydrus (SIMUNEK *et al.*, 2005), e o brasileiro MIDI (MIRANDA; DUARTE, 2002), por exemplo, ainda não conseguem representar adequadamente todas as grandes variações verticais e horizontais de solo que ocorrem em condições naturais de campo. Devido a isso, as estimativas

baseadas em relações empíricas provenientes de experiências de campo de alguns autores ainda são as mais utilizadas.

Grosso modo, considera-se que de 70 a 80% dos sais solúveis poderão ser lavados por meio da aplicação de uma lâmina de água igual à profundidade de solo desejada, variando sua eficiência de acordo com a textura (SILVA; DUARTE, 2017; Silva *et al.*, 2019). Outra recomendação de cunho prático consiste em deixar a estufa descoberta, durante cerca de 2 meses de verão chuvoso (regiões SE e CE do Brasil, principalmente), no ano em que houver a troca do plástico de cobertura da estufa.

O primeiro requisito para a recuperação de qualquer solo afetado por sais é a existência de drenagem adequada no perfil. Tendo-se boa drenagem, a salinidade pode ser reduzida para um nível aceitável por meio da lixiviação; para solos sódicos, pode haver necessidade de aplicação e incorporação de corretivos químicos apropriados antes da adição da lixiviação, para permitir o deslocamento, lavagem e redução do teor de sódio (Na) trocável (AYERS; WESTCOT, 1991; RHOADES; LOVEDAY, 1990).

A quantidade de água necessária para realizar a lavagem de sais do perfil do solo é determinada em função das seguintes variáveis: nível inicial de salinidade do solo, nível final desejado, profundidade de solo a recuperar (que depende da cultura que será explorada), propriedades importantes do solo e da área, método de aplicação de água e nível de salinidade da água de recuperação (RHOADES; LOVEDAY, 1990).

Hoffman (1980), baseando-se em dados experimentais de campo, estabeleceu a seguinte relação para a estimativa da lâmina de lixiviação de recuperação (Equação 1):

$$\frac{CE_f}{CE_0} \cdot \frac{D_1}{D_s} = k \quad (1)$$

em que CE_f é a condutividade elétrica final do extrato de saturação desejada no perfil, ($dS\ m^{-1}$), CE_0 a condutividade elétrica média inicial do extrato de saturação do solo ($dS\ m^{-1}$); D_1 a lâmina de lixiviação a ser aplicada, m; e D_s a profundidade do perfil a ser recuperado (m).

O valor da constante k varia com o tipo de solo e com o método de aplicação de água. Segundo Hoffman (1980), os valores representativos de k para recuperação por inundação contínua são: 0,45 para solo orgânico; 0,3 para argiloso e 0,1 para solo franco arenoso. Geralmente o valor mais usado para inundação contínua é 0,3.

Miller *et al.* (1965) e mais recentemente Silva *et al.* (2019), comparando a irrigação por inundação contínua com a irrigação por inundação intermitente para recuperação de solos salinos, verificaram que houve uma redução para um terço da água requerida quando se utilizou a inundação de forma intermitente. A lixiviação de sais ainda pode ser mais eficiente quando se utiliza irrigação por aspersão (NIELSEN *et al.*, 1966). Também Hoffman (1980) mostra que k praticamente não depende do tipo de solo quando a lavagem é feita por inundação intermitente ou por aspersão, podendo assumir o valor fixo de 0,1 para lavagem de recuperação, usando um desses métodos de irrigação, independentemente da textura do solo.

Estudando a recuperação de um solo salinizado por irrigação com água salobra em ambiente protegido, Blanco e Folegatti (2001) observaram que o aumento das lâminas de lavagem aplicadas realmente proporcionou redução da salinidade, sendo que as aplicações foram realizadas por inundação e por gotejamento. Os autores afirmam ainda que, para o método de irrigação por inundação, o perfil de salinidade do solo apresentou-se mais uniforme. Verificou-se também que o coeficiente k proposto por Hoffman (1980) subestimou a lâmina de lavagem ideal quando a aplicação foi feita por inundação e superestimou a lâmina para lavagem por gotejamento ($k = 0,1$).

Por outro lado, Duarte *et al.* (2007) concluíram, a respeito da recuperação de um solo salinizado devido ao excesso de fertilizantes em ambiente protegido, que a utilização da fórmula de Hoffman aplicada com a constante k de 0,1 subestimou a lâmina de lavagem ideal para a recuperação do solo por gotejamento, havendo na realidade a necessidade de se aplicar mais água para se atingir o valor planejado de CEF.

Essa controvérsia de resultados indica a necessidade de se realizar mais estudos sobre essa técnica, principalmente no que diz respeito aos tipos de solos, métodos de irrigação e íons envolvidos no processo de recuperação dos solos naturalmente existentes sob as estufas, quando salinizados devido à adubação excessiva.

7.3.6 O cultivo em substratos

Considerando a complexidade anteriormente apresentada sobre o cultivo sustentável dos solos originalmente existentes em chão de estufas, os substratos surgem como uma boa alternativa de condução. Os substratos consistem da combinação de dois ou mais componentes orgânicos, minerais ou mesmo sintéticos, que reunidos fornecem as propriedades químicas e físicas adequadas para o cultivo das plantas. A composição do substrato pode reunir matéria orgânica, areia, casca de pinus, fibra de coco, vermiculita, calcário, entre outros materiais que possuam boa retenção de água e ao mesmo tempo propiciem boa aeração por meio da facilidade de drenagem da lâmina eventualmente excedente.

Do ponto de vista da Horticultura, o substrato deve permitir que uma planta se desenvolva e produza com qualidade e em um breve período de tempo, com menores custos possíveis e considerando o nível tecnológico do produtor (BERJÓN *et al.*, 2005).

O produtor pode escolher dentre os substratos comerciais que apresentem boa aceitação no mercado e qualidade reconhecida, mas esta opção pode elevar os custos de produção. Portanto, pode optar por formular seu próprio substrato a partir de produtos disponíveis na propriedade ou na região de produção, com redução do custo final (ALMEIDA, 2017).

Nesse sentido, para a formulação dos substratos, objetiva-se que se reúna o máximo das qualidades de um substrato ideal que apresentaria as seguintes características: fácil manuseio e mobilidade, corpo e firmeza, boa capacidade de retenção de água, drenagem e aeração, estar livre de organismos nocivos com a presença dos úteis, não ser salino e nem possuir substâncias tóxicas, possibilitar a esterilização química e/ou física, ser uniforme e apresentar baixa taxa de encolhimento das partículas, não ser alcalino e nem ácido demais, e ser acessível e de baixo custo.

A maioria dos substratos minerais não se decompõem quimicamente ou biologicamente de maneira significativa durante os ciclos das culturas anuais. Portanto, na prática são considerados desprovidos de nutrientes.

Como os sistemas produtivos com uso de substrato, de maneira geral, são realizados utilizando-se recipientes ou vasos, o volume disponível é pequeno, o que limita o espaço a ser explorado pelas raízes, acarretando em uma maior densidade de raízes por volume de substrato, exigindo que esse apresente boa porosidade para promover melhores condições de respiração do sistema radicular.

Em relação à água disponível no substrato, vale ressaltar que, como há uma limitação do volume a ser explorado pelas raízes e a maior proporção de água armazenada se encontra em baixos potenciais, quando comparados com o solo, é recomendável realizar o manejo da fertirrigação com potenciais de água entre -1 e -10 kPa, dependendo da curva de retenção de

água do substrato, o que quase sempre resulta em uma maior frequência de irrigação (SANJUÁN; GAVILÁN, 2004).

Apesar do volume do substrato ser restrito e inerte, na solução do substrato os nutrientes se encontram mais solúveis e são disponibilizados rapidamente, estando diretamente relacionados com as condições da solução nutritiva fornecida (ADAM, 2004).

Os sistemas produtivos que se caracterizam pelo uso de substrato em vasos ou slabs, com a aplicação de nutrientes em todas as irrigações (fertirrigação), são englobados nas denominações de cultivo sem solo (do inglês *soiless*) e chamados em Português de hidroponia aberta, sistema semi-hidroponico ou prática de nutrição (GAVILÁN, 2004), ou mesmo hidroponia em substrato.

7.4 Fertirrigação em estufas

Com o aumento da população mundial e a perspectiva de escassez dos recursos naturais, é necessário o desenvolvimento de uma agricultura mais intensiva e sustentável em seus diferentes aspectos, na qual os produtos químicos e os fertilizantes minerais sejam usados com o objetivo de aumentar a produção de alimentos com o mínimo de impactos ao ambiente.

Destaca-se entre as tecnologias que podem ser empregadas no cultivo de hortaliças, flores e mudas, o cultivo em ambiente protegido, associado à fertirrigação e ao uso de diferentes telados, que surgem como alternativas que podem permitir o aumento da produção da cultura de forma sustentável, reduzindo os riscos e combinando o suprimento nutricional via água de irrigação, bem como o controle da radiação fotossinteticamente ativa.

A fertirrigação consiste na aplicação de fertilizantes via água de irrigação. Essa técnica proporciona aumento da eficiência de absorção de nutrientes, parcelamento da adubação de acordo com sua absorção pela cultura, facilidade de incorporação do fertilizante ao solo e economia de mão de obra e de energia (OLIVEIRA *et al.*, 2016). A fertirrigação permite controlar o local e a profundidade da aplicação do adubo, o que pode contribuir para a economia de fertilizantes. Adicionalmente, essa técnica permite uma melhor uniformidade de distribuição de nutrientes, além de os tornar prontamente disponíveis na solução do solo, o que facilita a absorção pelas raízes das plantas (MARCUSI, 2005; ELOI, 2007).

Nos ambientes protegidos, em geral, são cultivadas culturas intensivas, as quais, se irrigadas com excesso de água, resultam em degradação ambiental e do cultivo, causados pela falta de aeração e lixiviação de fertilizantes (VOX *et al.*, 2010). São necessários cuidados na adição de fertilizantes via irrigação, pois essa prática pode contribuir para o aumento dos níveis de salinidade do solo, muitas vezes ultrapassando os limites de tolerância das culturas, reduzindo o crescimento e o rendimento ao longo dos sucessivos cultivos (SILVA *et al.*, 2013). Portanto, o conhecimento das propriedades do solo, principalmente textura, estrutura, pH, capacidade de troca de cátions (CTC), densidade e condutividade elétrica (CE), e das propriedades da água de irrigação, como a concentração de sais e o pH, são de extrema relevância para o manejo adequado da fertirrigação e para o bom desenvolvimento das culturas.

7.4.1 Características da fertirrigação em estufas

A fertirrigação tem se destacado como uma das tecnologias de maior impacto na produção agrícola, possibilitando a distribuição de nutrientes durante o ciclo da cultura, de acordo com a necessidade nutricional das plantas, reduzindo os riscos de desperdício de fertilizantes e a contaminação ambiental (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Em ambiente protegido, a irrigação é imprescindível, mas o manejo inadequado do sistema de irrigação, da fertirrigação e da cultura podem inviabilizar o processo produtivo a médio prazo (PEREIRA, 2005).

Os sistemas de irrigação localizada são os mais indicados quando se utiliza a fertirrigação, principalmente o gotejamento, pois esses sistemas aplicam água e nutrientes na quantidade e posição adequadas, com maior eficiência de distribuição. A aplicação de fertilizantes via água de irrigação é vantajosa quando se usa sistemas de irrigação de alta frequência, pois possibilita a aplicação da quantidade correta de fertilizantes os quais o vegetal demanda para o seu ciclo vegetativo e produtivo (MEDEIROS, 2010). Além disso, tem sido uma prática comum para culturas que são desenvolvidas dentro de ambiente protegido, o que proporciona uma melhor utilização do sistema de irrigação, resultando em uma vantajosa relação custo/benefício para o agricultor (QUADROS *et al.*, 2010; PEDÓ *et al.*, 2013; SILVA; SILVEIRA, 2012).

A fertirrigação surge como a maneira mais eficiente e econômica de aplicar fertilizantes às plantas. Isto ocorre porque a aplicação desses fertilizantes, em menor quantidade por vez, mas com maior frequência, possibilita manter um nível uniforme de nutrientes no solo, aumentando a eficiência do uso pelas plantas e sua produtividade (BENINCASA *et al.*, 2011). Para se realizar o manejo da fertirrigação de forma eficiente é necessário um equilíbrio entre a quantidade de nutrientes e a quantidade de água a ser aplicada durante cada fase do ciclo da cultura, o que se reflete na concentração de fertilizantes adequada a ser utilizada na água de irrigação (BLANCO; FOLEGATTI, 2001).

Com o propósito de obter rendimentos elevados na cultura, estão sendo aplicadas doses excessivas de fertilizantes, o que pode resultar em um acúmulo de resíduos de fertilizantes e, por consequência, no aumento da salinidade do solo (OLIVEIRA *et al.*, 2015). Alguns fatores são de fundamental importância na produção de vegetais e para o bom desenvolvimento e crescimento da cultura. A nutrição das plantas é um dos fatores mais importantes e tem um impacto direto na produção e na qualidade dos vegetais. A fertirrigação é uma ferramenta que permite às plantas obter a quantidade de nutrientes exigida em cada fase fenológica, resultando em maior eficiência e economia na utilização de fertilizantes (FRIZZONE *et al.*, 2012). Desse modo, a fertirrigação deve ser gerenciada para manter uma concentração iônica adequada na solução do solo ou do substrato, nem excessiva, nem subestimada.

Depois do nitrogênio, o potássio é o elemento requerido em maiores quantidades pelas espécies de plantas cultivadas. Mais especificamente, está associado ao controle da abertura e fechamento dos estômatos, permite maior translocação de carboidratos produzidos nas folhas para outros órgãos da planta, maior eficiência enzimática e melhoria da qualidade comercial da planta (SILVA, 2002). De acordo com esse autor, o potássio e o nitrogênio são os nutrientes mais acumulados pelos brotos em sistemas convencionais e protegidos de cultivo de plantas. A importância das funções que esses nutrientes desempenham nas plantas tem sido reconhecida, como na formação de componentes celulares (TAIZ; ZEIGER, 2013; INKHAM *et al.*, 2022) e na regulação do potencial osmótico e da ativação enzimática (STREIT *et al.*, 2005).

Por meio das curvas de acúmulo de nutrientes é possível conhecer a demanda nutricional em cada etapa do crescimento, sendo importante, portanto, monitorar a necessidade por determinado nutriente ao longo do ciclo de uma cultura em cada fase fenológica. Pode-se, assim, reduzir o risco de aplicações de doses excessivas de fertilizantes, bem como reduzir o risco de se fornecer doses abaixo do mínimo exigido pela planta para atingir metas de produtividade (CAMERON *et al.*, 2013).

7.4.2 Controle da concentração da solução do solo

Dentre os métodos empregados para se monitorar a concentração de íons na solução do solo e controlar a salinidade desses em ambiente protegido, destaca-se a medição da condutividade elétrica da solução do solo, que se apresenta como um método bastante prático.

A medida da condutividade elétrica pode ser realizada em soluções de solo com diversos níveis de diluição; todavia, a quantificação da condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) é a mais evidenciada na literatura e, portanto, tida como o método padrão (Richards, 1954). Entretanto, esse método se revela excessivamente trabalhoso para um controle rotineiro em nível de propriedade rural. Experiências bem sucedidas vêm sendo realizadas com métodos que propõem diferentes relações solo: água destilada como 1:1, 1:2,5 e, ainda, com o uso de extratores de cápsula porosa ou da Time-Domain Reflectometer (TDR).

A extração da solução do solo por intermédio de cápsulas porosas em umidades próximas à máxima capacidade de retenção ("capacidade de campo") é de fácil execução. Também deve-se levar em consideração que os poros da cápsula do extrator se assemelham muito aos poros do solo. O fluxo dos íons no solo para o interior da cápsula ocorre muitas vezes devido ao processo de difusão, que é o movimento de íons devido ao gradiente de atividade, e principalmente devido ao processo de transferência de massa, que é o movimento de íons arrastados pelo fluxo de água. Os extratores podem ser recomendados também para quantificar íons específicos solúveis na solução do solo, como o nitrato e o potássio, podendo ser utilizados para controlar e monitorar a quantidade desses elementos fertilizantes, evitando uma possível contaminação ambiental (BURGUEÑO, 1996; SILVA, 2002).

Outras vantagens do uso dos extratores são: a solução encontra-se em umidade equivalente ao momento em que a solução do solo é absorvida pela planta e os solutos dissolvidos serão os mesmos; a amostragem é sistemática, verdadeiramente pontual e não destrutiva; a aferição da condutividade é praticamente instantânea, podendo ser automatizada com equipamentos facilmente disponíveis e simples; e tais instrumentos de medida da CE podem ser utilizados sem calibração prévia, mesmo que, no solo, ocorra a presença de sais de baixa solubilidade, bastando, pois, que sejam conhecidas a umidade no momento da extração e a umidade da pasta saturada do solo.

A solução do solo pode ser extraída em diferentes níveis de umidade do solo, sendo esses quantificados por meio da instalação de tensiômetros, e fazendo o uso da curva característica de retenção de água no solo, com relativa precisão (Figura 1). Conhecendo-se a umidade atual (no momento da aplicação do vácuo) e a umidade da pasta, corrige-se a leitura da CE obtida no extrator para a CE do extrato de saturação, por meio de um cálculo simples de diluição.

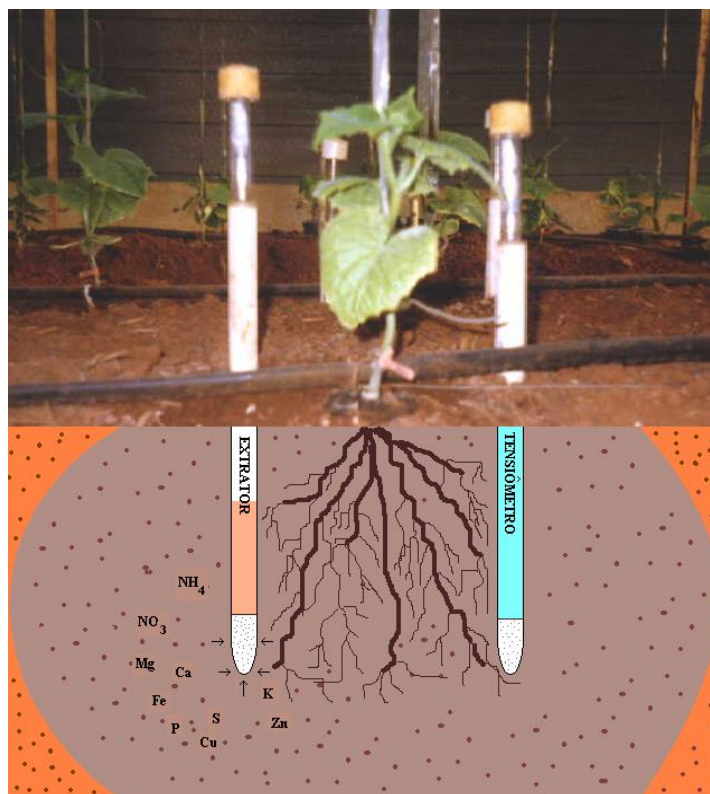


Figura 1. Extrator de cápsula porosa para sucção da solução do solo (à esquerda) e tensiômetro para correção da umidade (a direita) (SILVA, 2002).

Uma vez que o monitoramento periódico tenha sido estabelecido, a concentração de fertilizantes aplicados via água de irrigação, geralmente com frequência diária ou de poucos dias, pode ser controlada de forma a manter a concentração da solução do solo oscilando em uma faixa de CE adequada (BURGUEÑO, 1996), garantindo boa disponibilidade de nutrientes sem a ocorrência de problemas osmóticos.

Considerando que a aplicação de fertilizantes esteja monitorada, não há geralmente necessidade de aplicações intencionais de frações de lixiviação de manutenção, evitando possíveis desperdícios com água, energia e fertilizantes, além da contaminação do subsolo (SILVA, 2002; DIAS, 2004; ELOI, 2007; MEDEIROS, 2009).

A aplicação de fertilizantes deve ser diferenciada ao longo do ciclo da cultura, visto que a absorção de nutrientes específicos é função da fase fenológica da cultura (CHO *et al.*, 2018). Assim, é inevitável que com o passar do tempo ocorram certos desequilíbrios nutricionais, em virtude da dificuldade de se quantificar com precisão os nutrientes absorvidos pela planta e as interferências inerentes do efeito do complexo de troca catiônica da matriz sobre a solução do solo. Tendo em vista a ocorrência de situações nas quais se perde o controle sobre o estado nutricional do solo, pode-se lançar mão de testes rápidos para a medição da concentração de íons da solução do solo.

O conhecimento da concentração iônica da solução do solo é importante para se verificar a disponibilidade de nutrientes às plantas. Entretanto, a amostragem e a realização periódica de análise de solo, com a finalidade de acompanhar as concentrações de nitrato e de potássio na solução, durante as fases de crescimento e de produção da cultura, frequentemente realizadas em pesquisas, são inviáveis técnica e economicamente em uma atividade agrícola comercial, além de não ser uma metodologia instantânea que possibilite tomar decisões imediatas. O extrator de solução surge, então, como uma alternativa capaz de solucionar o problema de forma eficaz e a baixo custo, principalmente se associado a determinações rápidas da concentração de íons no campo. Entretanto, são necessários mais

estudos para validar os resultados obtidos por meio de extração via cápsulas porosas, assim como a utilização de testes rápidos (cartelas) para determinar íons específicos.

Silva (2002) conclui que, com o auxílio dos extratores providos de cápsulas porosas cerâmicas e testes rápidos, é possível determinar a concentração de nitrato e de potássio com boa precisão, e monitorar a concentração do íon cálcio na solução do solo com precisão média, quando comparado aos métodos padrões. Segundo Dias (2004), o monitoramento da condutividade elétrica da solução do solo, extraída por cápsulas porosas, permite evitar possíveis processos de salinização e/ou deficiência nutricional em estufas agrícolas.

A metodologia mais usual para a quantificação dos fertilizantes a serem adicionados à água de irrigação baseia-se em recomendações realizadas após estudos sobre a necessidade nutricional das culturas e da sua marcha de absorção de nutrientes ao longo do ciclo. Entretanto, esses estudos são realizados em uma determinada região, sob os efeitos climáticos locais e para certas variedades e/ou híbridos específicos, gerando dúvidas quanto à extrapolação dos resultados.

Nesse aspecto, seria mais viável racionalizar o manejo da fertirrigação, por meio da determinação da condutividade elétrica e/ou da concentração parcial de íons da solução do solo. Caso a condutividade elétrica da solução do solo apresente valores inferiores ao máximo tolerado pela cultura, sem decréscimo de rendimento relativo, e superiores ao mínimo necessário para sua nutrição, a concentração da solução do solo estaria controlada (BURGUEÑO, 1996; XU *et al.* 1995).

Silva (2002) comparou o efeito de dois tipos de manejos de fertirrigação sobre o rendimento da cultura do pimentão, quais sejam: (i) monitoramento da concentração da solução do solo e (ii) manejo tradicional de fertirrigação, via aplicação de doses específicas pré-estabelecidas, segundo a marcha de absorção da cultura, sendo ambos os manejos sob ambiente protegido. Concluiu que os valores de condutividade elétrica da solução do solo mostram maior estabilidade quando o manejo é baseado no monitoramento das concentrações. Esse mesmo autor afirma que os manejos de fertirrigação utilizados não acarretaram em diferenças no rendimento da cultura, possivelmente em consequência da utilização de recomendações acertadas, adotadas no manejo tradicional (ii). Entretanto, o manejo com monitoramento da solução (i) propiciou economia de fertilizantes, o que leva à conclusão de que o manejo baseado em doses fixas recomendadas pode, durante cultivos sucessivos, estar sujeito a um maior risco de causar aumento da salinidade e redução de rendimento, ao longo de vários ciclos na mesma estufa. Posteriormente a Silva (2002), outros autores (DIAS, 2005; ELOI, 2007; MEDEIROS, 2009; SILVA *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2015) chegaram a conclusões semelhantes trabalhando com outras culturas em ambiente protegido.

7.4.3 Uso de soluções nutritivas no cultivo em substratos

Em sistemas produtivos sem o uso do solo, a disponibilização de nutrientes é realizada com a solubilização fertilizantes na água, na preparação da solução nutritiva a ser utilizada como irrigação. A escolha das fontes e quantidades a serem usadas na formulação depende de vários fatores, como o clima e a proporção entre os nutrientes ideal para cada cultura (RESH, 2012; ZOTARELLI *et al.*, 2008).

A solução nutritiva deve conter os nutrientes essenciais às plantas. Na literatura, existem diversas formulações de soluções nutritivas com diferentes balanços entre os nutrientes (Tabela 2), que são recomendadas desde que observado o sistema produtivo adotado, a cultura, o clima, entre outros fatores (TEIXEIRA, 1996; RESH, 2012).

Tabela 2. Faixas de concentrações dos nutrientes das soluções nutritivas encontradas na literatura (TEIXEIRA, 1996).

Nutriente	Concentração (mg L ⁻¹)
Nitrogênio (N)	100 – 300
Fosforo (P)	35 – 75
Potássio (K)	200 – 400
Calcio (Ca)	100 – 200
Magnésio (Mg)	40 – 80
Enxofre (S)	50 – 80
Boro (B)	0,5 – 1,0
Cobre (Cu)	0,02 – 0,10
Ferro (Fe)	2,0 – 10,0
Manganês (Mn)	0,5 – 1,0
Molibdênio (Mo)	0,01 – 0,05
Zinco (Zn)	0,05 – 0,1

Independente da formulação da solução nutritiva adotada, deve-se atentar para o monitoramento do pH e da condutividade elétrica. O pH é uma variável que deve ser controlada na solução nutritiva; seus valores estão diretamente relacionados com a disponibilidade e a absorção dos nutrientes; por exemplo, em um pH alto os fosfatos se tornam menos solúveis (LI *et al.*, 2018). De maneira generalizada, o pH da solução nutritiva para a maioria das culturas deve ser mantido na faixa de 5,5 a 6,2, pois é nessa faixa em que o balanço entre as disponibilidades dos nutrientes é mais equilibrado, o que facilita suas respectivas absorções em níveis ideais (ADAM, 2004; COVA *et al.*; 2017).

A condutividade elétrica da solução nutritiva é uma variável diretamente proporcional à concentração de sais dissolvidos e ao potencial osmótico, sendo usada para avaliar o potencial de salinidade de uma solução nutritiva. A mensuração dessa variável é considerada fácil e barata, quando comparada com a determinação individual de cada nutriente. Uma condutividade elétrica baixa indica que há pouca disponibilidade de nutrientes. Quando a condutividade elétrica é mais alta do que o ideal, geralmente há redução da absorção de água e nutrientes pela planta devido aos efeitos da salinidade, afetando diretamente o crescimento das plantas e a produtividade (ADAM, 2004). Por outro lado, soluções nutritivas com CE menor que 2,0 dS m⁻¹ não costumam causar problemas osmóticos (ROOSTA *et al.*, 2009).

Para algumas culturas em sistema de cultivo sem uso do solo, existem soluções nutritivas bem ajustadas às suas especificidades, como por exemplo, para o tomate (SCHWARZ; GROSCHE, 2003; RESH, 2012), para a alface (FURLANI, 1998; FURLANI *et al.*, 2009) e para o pepino (GISLEROD; ADAMS, 1983; ROOSTA *et al.*, 2009), entre outras culturas.

7.5 Considerações finais

O método de irrigação mais usado em ambientes protegidos tem sido o localizado. Uma tendência que se pode vislumbrar na irrigação utilizando esses sistemas atualmente é a automação, pois o agricultor almeja depender cada vez menos de mão de obra. Atualmente já é possível selecionar o melhor horário, período do dia e quantidade de água a ser aplicada, assim como programar o sistema para que ligue a nebulização quando detectada uma queda na umidade relativa do ar. Desse modo, são crescentes os estudos para automatizar cada vez

melhor a irrigação, envolvendo, inclusive, complexos sensores aéreos e de solo, e até sistemas de inteligência artificial com aprendizado de máquina.

Já o manejo da fertirrigação em estufas agrícolas vem englobando uma faixa que vai desde: (i) os conceitos tradicionais de Fertilidade do Solo até (ii) as técnicas mais modernas de Hidroponia e condução em substratos. Quando se cultiva em solo argiloso, principalmente em chão de estufa e com frequência de irrigação não muito alta, valem as recomendações clássicas da ciência da Fertilidade, na qual a CTC do solo é o principal foco a ser observado. Por outro lado, quando se utiliza areia ou outros substratos, muitas vezes em vasos, com frequência de irrigação diária ou maior, o foco passa a ser a solução do solo. Muitas vezes irriga-se sempre com a própria solução nutritiva para se evitar enganos, o que vem sendo chamado de nutrição ou hidroponia em substrato.

No primeiro caso (cultivo sobre o solo natural existente sob a estufa), como a CTC do solo tende a ser mais alta e como o tempo de difusão dos cátions adsorvidos para a solução é maior e mais intenso, espera-se que se possa obter melhores resultados mantendo-se valores de CE mais baixos na solução do solo. No segundo caso (cultivo em substratos), dada a pequena CTC e a frequente reposição da solução que tende a não se concentrar entre as irrigações, valores de CE mais altos tendem a garantir uma melhor nutrição, mesmo sob uma certa depleção osmótica, principalmente nos meses de inverno.

A tendência que se observa nas localidades brasileiras com maior quantidade de estufas é a utilização cada vez maior de substratos, ou seja, pode ser necessário um trabalhoso monitoramento constante da solução do solo para se obter o delicado equilíbrio do segundo caso, relatado no parágrafo anterior, caso se irrigue com água pura. Na prática, como alternativa mais simples, tem-se realizado a nutrição, irrigando-se com a própria solução nutritiva. Muitas vezes é aplicada uma lâmina de solução nutritiva em excesso para lixiviação, propositalmente, como forma de controle da salinidade. Entretanto, essa alternativa pode pecar pelo problema de uma certa contaminação ambiental, dependendo da localização da estufa na propriedade.

Conclui-se, portanto, que em termos de manejo da fertirrigação sob estufas, está havendo a abertura de um amplo caminho, para uma promissora e complexa linha de estudos interdisciplinares, que englobam Química do Solo, Fertilidade do Solo, Nutrição Mineral de Plantas, Uso de Substratos, Fertirrigação e Salinidade.

Referências

- ADAM, P. Aspectos de la nutrición mineral em cultivos sin suelo em relación al suelo. In: GAVILÁN, M.U. (Ed.) **Tratado de cultivo sin suelo**, 3. Ed. rev. y ampl. Editora Mundi-Prensa: Madrid, Barcelo, México. 81-112p., 2004.
- ALMEIDA, J.M.D. **Avaliação de três variedades de lisianthus em ambiente protegido com telas de sombreamento de diferentes aspectos de cor**. 52p., 2017. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. A qualidade da água na agricultura. Tradução de GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F.; DAMASCENO, F.A.V. Campina Grande: UFPB, FAO. **Estudos de Irrigação e Drenagem**, v.29, 218p., 1991.
- BENINCASA, P.; GUIDUCCI, M.; TEI, F. The Nitrogen use efficiency: Meaning and sources of variation - Case studies on three vegetable crops in central Italy. **HortTechnology**, v.21, p.266-273, 2011.
- BILIBIO, C.; CARVALHO, J.D.A.; MARTINS, M.; REZENDE, F.C.; FREITAS, E.A.; GOMES, L.A. Desenvolvimento vegetativo e produtivo da berinjela submetida a diferentes tensões de água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.7, p.730-735, 2010.

- BLANCO, F.F. **Tolerância do tomateiro à salinidade sob fertirrigação e calibração de medidores de íons específicos para determinação de nutrientes na solução do solo e na planta.** 115p., 2004. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- BLANCO, F.F.; FOLEGATTI, M.V. Recuperação de um solo salinizado após cultivo em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.76-80, 2001.
- BOSCO, M.R.O.; OLIVEIRA, A.B.; HERNANDEZ, F.F.F.; LACERDA, C.F. Influência do estresse salino na composição mineral da berinjela. **Revista Ciência Agrônômica**, v.40, n.2, p.157-164, 2009.
- BOUERI, M.A.; LUNARDI, D.M.C. Avaliação de elementos agro meteorológicos no cultivo do cravo-de-defunto (*Tagetes sp.*) em ambiente protegido e a campo. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v.21, n.3, p.45-54, 2006.
- BURGUEÑO, H. **La fertirrigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico.** Culiacan, Sin. Mexico, v.1, 45p., 1996.
- CAMERON, K.C.; DI, H.J.; MOIR, J.L. Nitrogen losses from the soil/plant system: A review. **Annals of Applied Biology**, v.162, n.2, p.145-173, 2013.
- CARMASSI, G.; BACCI, L.; BRONZINI, M.; INCROCCI, L.; MAGGINI, R.; BELLOCHI, G.; MASSA, D.; PARDOSSI, A. Modelling transpiration of greenhouse gerbera (*Gerbera jamesonii* H. Bolus) grown in substrate with saline water in a Mediterranean climate. **Scientia Horticulturae**. v.156, n.7, p.9-18, 2013.
- CHO, W.J.; KIM, H.J.; JUNG, D.H.; KIM, D.W.; AHN, T.I.; SON, J.E. On-site ion monitoring system for precision hydroponic nutrient management. **Computers and electronics in Agriculture**, v.146, n.3, p. 51-58, 2018.
- COSTA, V.M.; FOLEGATTI, M.V.; DUARTE, S.N.; DIAS, N.S.; SILVA, C.R. Construção e avaliação de uma barra de irrigação semiautomática para casa de vegetação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.13, p.3297-3305, 2019.
- COVA, A.M.W.; FREITAS, F.T.O.; VIANA, P.C.; RAFAEL, M.R.S.; AZEVEDO NETO, A.D.; SOARES, T.M. Content of inorganic solutes in lettuce grown with brackish water in diferent hidroponic systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.3, p.150-155, 2017.
- DIAS, N.S. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade em solo cultivado com melão rendilhado sob ambiente protegido**, 110p., 2004. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- DIAS, N. da S.; DUARTE, S.N.; GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F. de; SOARES, T.M. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade do solo sob ambiente protegido, utilizando-se extratores de solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.496-504, 2005.
- DIAS, N.S.; DUARTE, S.N.; YOSHINAGA, R.T.; TELES FILHO, J.F. Produção de alface sob diferentes níveis de salinidade do solo. **Irriga**, v.10, n.1, p.20-29, 2005.
- DUARTE, S.N.; DIAS, N.S.; TELES FILHO, J.F. Recuperação de um solo salinizado devido a excesso de fertilizantes em ambiente protegido. **Irriga**, Botucatu, v.12, n.3, p. 422-428, 2007.
- ELOI, W.M. **Níveis de salinidade e manejo da fertirrigação sobre o cultivo do tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill) em ambiente protegido.** 110p., 2004. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- ELOI, W.M.; DUARTE, S.N.; SOARES, T.M. Níveis de salinidade e manejo da fertirrigação sobre características do tomateiro cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.2, p.83-89, 2007.
- FACTOR, T.L.; ARAÚJO, J.A.C.; VILELLA JÚNIOR, V.E. Produção de pimentão em substratos e fertirrigação com efluente de biodigestor. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p.143-149, 2008.

- FRIZZONE, J.A.; FREITAS, P.S.L.; REZENDE, R.; FARIAS, M.A. **Microirrigação. Gotejamento e Microaspersão**. Editora Eduem, 356p. 2012.
- FURLANI, P.R. Instruções para hortaliças de folhas pela técnica de Hidroponia NFT. Instituto Agrônomo. **Boletim técnico** 168, 30p., 1998.
- FURLANI, P.R.; SILVEIRA, L.C.P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. **Cultivo hidropônico de plantas parte 2** - Solução nutritiva. Disponível em: Infobibos.com/artigos/2009_2/hidroponiap2/index.htm. Acesso em: 17 nov. 2020.
- GAVILÁN, P.; RUIZ, N.; LOZANO, D. Daily forecasting of reference and strawberry crop evapotranspiration in greenhouses in a Mediterranean climate based on solar radiation estimates. **Agricultural Water Management**, v.159, p.307-317, 2015.
- GOMES, A.R.M.; D'ÁVILA, J.N.T.; GORDIM, R.S.; BEZERRA, F.C.; BEZERRA, F.M.L. Estimativa da evapotranspiração e coeficiente de cultivo da *Heliconia psittacorum* L x *H. spathocircinata* (Arist) cultivada em ambiente protegido. **Revista Ciência Agrônômica**, v.37, n.1, p.13-18, 2006.
- GOMES, L.A.A.; SILVA, E.C.; FAQUIN, V. Recomendações de adubação em ambientes protegidos. In: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª. Aproximação**. Viçosa, 360p., 1999.
- GUISELINI, C.; SENTELHAS, P.C.; PANDORFI, H.; HOLCMAN, E. Manejo da cobertura de ambientes protegidos: Radiação solar e seus efeitos na produção da gérbera. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.81, p.645-652, 2010.
- HOFFMAN, G.J. Guidelines for reclamation of salt-affected soils. In: INTER-AMERICAN SALINITY WATER MANAGEMENT TECHNICAL CONFERENCE, Juarez. **Proceedings**. Juarez, p.49-64. 1980.
- HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. **Management farm irrigation systems**. ASAE Monograph, 9. St. Joseph: ASAE, 1040p., 1992.
- INKHAM, C., PANJAMA, K., SATO, T., RUAMRUNGSRI, S. Effect of N source on growth and N uptake of *Hippeastrum* using ¹⁵N tracers. **The Horticulture Journal**, v.91, n.1, p.85-93, 2022.
- JESUS, F.L.F.; NASCIMENTO, J.G.; COELHO, R.D.; DUARTE, S.N.; MENDONÇA, F.C. Water use in irrigated agriculture: An approach to water productivity in drip and sprinkler systems. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.11, n.5, p.1677-1684, 2017.
- LI, Z.; WANG, P.; MENZIES, N.W.; KOPITTKKE, P.M. Defining appropriate methods for studying toxicities of trace metals in nutrient solutions. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.147, n.1, p.872-880, 2018.
- MARCUSSI, F.F.N. Uso da fertirrigação e teores de macronutrientes em planta de pimentão. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.3, p.642-650, 2005.
- MEDEIROS, P.R.F. **Manejo da fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade para a cultura do pepino enxertado**. 82p., 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- MEDEIROS, P.R.F. de. **Manejo da fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade para a cultura do tomate em solo franco-argiloso**. 85p., 2010. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- MEDEIROS, P.R.F.; DUARTE, S.N.; DIAS, C.T.S. Tolerância da cultura do pepino à salinidade em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.406-410, 2009.
- MEDEIROS, P.R.F. **Manejo da fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade para a cultura do tomate em solo franco-argiloso**. 85p., 2010. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- MILLER, R.J.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Chloride displacement in Panoche clay loam in relation to water movement and distribution. **Journal of Water Resource Research**, v.1, p.63-73, 1965.

- MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N. Modelo de simulação da dinâmica do nitrato em colunas verticais de solo não saturado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.6, n.2, p.235-241, 2002.
- NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; LUTHIN, J.N. Desalination of soils under controlled unsaturated flow conditions. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL COMMISSION OF IRRIGATION AND DRAINAGE, 6. New Delhi: **Proceedings**. New Delhi: ICID, p.15-24, 1966.
- OLIVEIRA, A.S.; SALATI, E. Um estudo sobre as águas subterrâneas da região de Piracicaba. **Anais, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, v.38, p.163-190, 1981.
- OLIVEIRA, F.A.; DUARTE, S.N.; MEDEIROS, J.F.; DIAS, N.S.; OLIVEIRA, M.K.; SILVA, C.P.; LIMA, K.S. Nutrição mineral do pimentão submetido a diferentes manejos de fertirrigação. **Horticultura Brasileira** (Impresso), v.33, p.216-223, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620150000200013>. Acesso em: 23 mar. 2021.
- OLIVEIRA, J.M.; REZENDE, R.; FREITAS, P.S.L.; MALLER, A.; HARA, A.T.; SANTOS, F.A.S. Fertirrigação na cultura da rúcula (*Eruca sativa* Miller) conduzida em ambiente protegido. **Irriga**, v.21, n.3, p.438-448, 2016.
- PARDOSSI, A.; INCROCCI, L. Traditional and new approaches to irrigation scheduling in vegetable crops. **HortTechnology**, v.21, p.309-313, 2011.
- PAULINO, J.; FOLEGATTI, M.V.; ZOLIN, C.A.; ROMÁN, R.M.S.; JOSÉ, J.V. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga**, v.16, n.2, p.163-176, 2011.
- PEDÓ, T.; MARTINAZZO, E.G.; AUMOND, T.Z.; CAPELLARI, M.R.; DE SOUZA, V.L.; SOUZA, E.A.; VILLELA, F.A.; LOPES, N.F.; MAUCH, C.R. Adução nitrogenada e sua relação à biometria e partição de assimilados em plantas de rabanete cultivar "Comprido de Ponta Branca". **Tecnologia e Ciência Agropecuária**, v.7, n.3, p.31-36, 2013.
- PEREIRA, J.R.; CARVALHO, J.D.A.; MIGUEL, D.S.; SANTANA, M.J.D. Consumo de água pela cultura do Crisântemo cultivada em ambiente protegido. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.3, p.651-659, 2005.
- PIRES, R.M.; FOLEGATTI, M.V.; PASSOS, F.; SAKAI, E.; SILVA, T.A.; ARRUDA, F. Produção do morangueiro em diferentes níveis de água, cobertura do solo e ambiente de cultivo. **Irriga**, v.12, n.3, p.338-353, 2007.
- QUADROS, B.R.; SILVA, E.S.; SILVA BORGES, L.; ARAÚJO MOREIRA, C.; MORO, A.L.; VILAS BOAS, R.L. Doses de Nitrogênio na produção de rabanete fertirrigado e determinação de clorofila por medidor portátil nas folhas. **Irriga**, v.15, n.4, p.353-360, 2010.
- RESH, H.M. **Hydroponic food production: a definitive guidebook of soilless food-growing methods**. 7.Ed. California: Woodbridge Press, 2012. 527p.
- RHOADES, J.D.; LOVEDAY, J. Salinity in irrigated agriculture. In: STEWART, D.R.; NIELSEN, D.R. (Ed.). **Irrigation of Agricultural Crops**. Agronomy 30. Madison: ASA, CSSA, SSSA, p.1089-1142, 1990.
- RICHARDS, L.A. (Ed.) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: United States Salinity Laboratory, USDA. **Agriculture Handbook**, v.60, 160p., 1954.
- ROMANINI, C.E.; GARCIA, A.P.; ALVARADO, L.M.; CAPPELLI, N.L.; UMEZU, C.K. Desenvolvimento e simulação de um sistema avançado de controle ambiental em cultivo protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.14, n.11, p.1194-1201, 2010.
- ROOSTA, H.R.; SAJJADINIA, A.; RAHIMI, A.; SCHJOERRING, J.R. Responses of cucumber plant to NH_4^+ and NO_3^- nutrition: the relative addition rate technique vs. cultivation at constant nitrogen concentration. **Scientia Horticulturae**, v.121, n.4, p.397-403, 2009.
- SANJUÁN, M.C.S.; GAVILÁN, M.U. Métodos de Riego y fertirrigación em cultivo sin suelo. In: GAVILÁN, M.U. (Ed). **Tratado de cultivo sin suelo**, 3. Ed. rev. y ampl. Editora Mundi-Prensa: Madrid, Barcelona, México, 238 p., 2004.
- SCHARZ, D.; GROSCHE, R. Influence of nutrient solution concentration and a root pathogen (*Pythium aphanidermatum*) on tomato and morphology. **Scientia Horticulturae**, v.97, n.2, p.109-120, 2003.

SILVA, E.F.F.; DUARTE, S.N.; COELHO, R.D. Salinização dos solos cultivados sob ambientes protegidos no Estado de São Paulo. In: FOLEGATTI, M. V. (Ed.). Fertirrigação: citros, flores, hortaliças. Guaíba: **Agropecuária**, p.267-277, 1999a.

SILVA, E.F.F.; MIRANDA, J.H.; COELHO, R.D. *et al.* Determinação da salinidade do solo utilizando extratores de cápsulas porosas e soluções diluídas (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28, Pelotas, 1999. **Anais**. Pelotas, 1999. Pelotas: SBEA, 1999b.

SILVA, E.F.F. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo**. 136p., 2002. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SILVA, P.F.; LIMA, C.J.G.; BARROS, A.C.; SILVA, B.M.; DUARTE, S.N. Sais fertilizantes e manejo da fertirrigação na produção de tomateiro cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.11, p.1173-1180, 2013.

SILVA, C.R.M.; SILVEIRA, M.H.D. Fertirrigação da cultura do rabanete com diferentes dosagens de nitrogênio. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.8, n.15, p.946-953, 2012.

ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M.T. The HIDRUS 1-D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Riverside: U.S. Salinity Laboratory - Agricultural Research Service - U.S. Department of Agriculture, 2005.

SOUZA, D. F., GUARDA, E. L. A., SILVA, W. T. P., SAUER, I. L., TATIZAWA, N. Perspectives on the advancement of industry 4.0 technologies applied to water pumping systems: trends in building pumps. **Energies**, v.15, 3319, p.1-17, 2022.

STREIT, N.M.; CANTERLE, L.P.; CANTO, M.W.D.; HECKTHEUER, L.H.H. As clorofilas. **Ciência Rural**, v.35, p.748-755, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.Ed. Porto Alegre: Artemed, 2013.

TEIXEIRA, T.N. **Hidroponia**: uma alternativa para pequenas propriedades. Guaíba: Editora Agropecuária. 86p., 1996.

THOMPSON, R.B.; MARTÍNEZ-GAITAN, C.; GALLARDO, M.; GIMÉNEZ, C.; FERNÁNDEZ, M.D. Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey. **Agricultural Water Management**. v.89, p.261-274, 2007.

VILAS BOAS, R.C.; PEREIRA, G.M.; REIS, R.P.; LIMA JUNIOR, J.A.; CONSONI, R. Viabilidade econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura da cebola. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, n.4, p.781-788, 2011.

VOX, G.; TEITEL, M.; PARDOSSI, A.; MINUTO, A.; TINIVELLA, F.; SCHETTINI, E. Sustainable greenhouse systems. Sustainable agriculture: technology, planning and management. **Nova Science Publishers**, Inc., New York, NY, USA, p.1-79, 2010.

XU, H.L.; GAUTHIER, L.; GOSSELIN, A. Effects of fertigation management on growth and photosynthesis of tomato plants grown in peat, rockwool and NFT. **Scientia Horticulturae**, v.63, n.1-2, p.11-20, 1995.

ZOTARELLI, L.; DUKES, M.D.; SCHOLBERG J.M.; HANSELMAN, T.; LE FEMINELLA, K.; MUNOZ-CARPENA, R. Nitrogen and water use efficiency of zucchini squash for plastic mulch bed system on a sandy soil. **Scientia Horticulturae**, v.116, n.1, p.8-16, 2008.

CAPÍTULO 8

8 SUBSÍDIOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL

João Carlos Cury Saad

Resumo

Os sistemas de irrigação por aspersão convencional estão presentes em quase 25% das propriedades agrícolas irrigadas. Tipicamente implantados em pequenas áreas, nem sempre são adequadamente dimensionados e operados, uma vez que as características locais como formato irregular e declividade da área, dentre outras, possibilitam muitas alternativas de configuração da rede hidráulica e de operação, requerendo uma análise técnica criteriosa para que se obtenha os resultados esperados. Este capítulo visa fornecer subsídios para auxiliar profissionais envolvidos com o dimensionamento e com a operação destes sistemas, bem como para fundamentar o desenvolvimento de programas computacionais e de aplicativos objetivando incrementar a qualidade dos projetos de aspersão convencional e promover boas práticas de irrigação.

8.1 Introdução

Os sistemas de irrigação por aspersão convencional são muito utilizados na irrigação de pequenas áreas, muitas vezes de agricultura familiar, atendendo as mais diversas culturas, desde hortaliças até cereais. Uma característica importante é que estes sistemas requerem mão de obra permanente para realizar o esquema operacional, que envolve a troca de posições com deslocamento da linha lateral, constituída de tubulação de engate rápido.

Por envolver pequenas áreas, normalmente com formato e declividade variáveis, tem-se muitas possibilidades de configuração da rede hidráulica, bem como de esquemas operacionais. Estes cenários de projeto nem sempre são devidamente explorados para que se tenha boas práticas de irrigação por aspersão convencional, em parte devido à falta de subsídios e de aplicativos para que os projetistas e outros técnicos possam desenvolver alternativas a serem apresentadas ao irrigante.

A analogia feita por Keller e Bliesner (1990) de que a técnica de projetar um sistema de irrigação é como a montagem de um quebra-cabeça do tipo Tangram, é muito apropriada. A arte do projetista de irrigação consiste em associar componentes individuais que se encaixam para formar um sistema de irrigação viável e adequado para uma condição local específica. Estes componentes englobam aspersores, tubulação, bomba hidráulica, motor e também processos como a sequência de mudança de posição das linhas laterais móveis, além das características locais de período diário disponível para irrigar e de disponibilidade de recursos hídricos. Tal habilidade requer experiência e conhecimento para que as condições locais sejam respeitadas e o sistema de irrigação seja efetivo.

Este capítulo visa fornecer subsídios que contribuam para o desenvolvimento desta habilidade de projetar sistemas de irrigação por aspersão convencional, incentivar o desenvolvimento de planilhas e aplicativos que agilizem, com qualidade técnica, as etapas necessárias e permitir que um número cada vez maior de técnicos pratique sua arte para que se tenha boas práticas de irrigação por aspersão convencional, no campo.

8.2 Sequência sugerida

Dada a grande liberdade de escolha que os sistemas de irrigação por aspersão convencional possibilitam, há muitos caminhos para se chegar ao projeto final, que será sempre variável de projetista para projetista. A sequência sugerida neste capítulo não pretende ser nem a única, nem a melhor alternativa, e sim um exemplo de como organizar as etapas com fundamentação em princípios consolidados e em recursos recentes. As fases propostas são: (i) escolha do espaçamento entre aspersores; (ii) definição da área efetivamente irrigada; (iii) lâmina líquida e lâmina bruta; (iv) turno de irrigação; (v) vazão do projeto; (vi) configuração da rede hidráulica; (vii) definição do esquema operacional, número de posições de operação irrigadas por dia e eventual ajuste dos dados; (viii) seleção do aspersor e suas características operacionais; (ix) dimensionamento da linha lateral; (x) dimensionamento da linha principal; (xi) dimensionamento da adutora; (xii) condição operacional crítica; (xiii) altura manométrica total e (xiv) potência do conjunto motobomba.

8.3 Espaçamento entre aspersor

A escolha do espaçamento entre aspersores na linha lateral (E1) e do espaçamento entre linhas de aspersores (E2) é fundamental para que se tenha uniformidade de aplicação de água e é dependente da velocidade média do vento. Estes espaçamentos são múltiplos de 6m pois é o comprimento usual dos tubos de irrigação.

8.4 Definição da área efetivamente irrigada

Uma vez definidos os espaçamentos E1 e E2 dos aspersores, pode-se definir a área efetivamente irrigada, sendo que a largura e o comprimento serão múltiplos dos correspondentes espaçamentos.

8.5 Lâmina líquida e lâmina bruta

A lâmina de água retida na profundidade efetiva do sistema radicular da cultura a ser irrigada que pode ser utilizada sem causar redução importante na produtividade é dada pela Equação 1. Ela será a própria lâmina líquida (L_L) de irrigação em situações em que a precipitação efetiva não for significativa ou não for considerada (como neste capítulo).

$$L_L = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) f z \quad (1)$$

ou

$$L_L = (\theta_{cc} - \theta_i) z \quad (2)$$

em que L_L se refere à lâmina líquida, em mm; θ_{cc} à umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) correspondente à condição de capacidade de campo; θ_{pmp} à umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) correspondente ao ponto de murchamento permanente; θ_i à umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) correspondente ao momento de irrigar para a cultura de interesse; f ao fator de depleção de água no solo para a cultura; z à profundidade efetiva do sistema radicular (mm).

A lâmina bruta (L_b) é dada por:

$$L_b = \frac{L_L}{E_f} \quad (3)$$

em que E_f se refere à eficiência do sistema de irrigação (em valor decimal).

8.6 Turno de irrigação

O turno de irrigação é a razão entre a lâmina líquida e a evapotranspiração potencial da cultura. A operação do sistema de irrigação por aspersão convencional utilizando integralmente o turno de irrigação, implica na menor vazão horária. Um período de folga pode ser adotado dentro do turno de irrigação, quando necessário.

$$TI = \frac{L_L}{ET_c} \quad (4)$$

em que TI se refere ao turno de irrigação (dias), L_L à lâmina líquida (mm) e ET_c à evapotranspiração potencial da cultura de interesse (mm d^{-1}).

8.7 Vazão do projeto

A vazão do sistema de irrigação (Q) é estimada por:

$$Q = \frac{A ET_c}{E_f TD} \quad (5)$$

em que Q é a vazão do sistema ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$), A a área do projeto (m^2), ET_c a evapotranspiração da cultura (m d^{-1}), E_f a eficiência de aplicação do sistema de irrigação (decimal), e TD o tempo disponível para irrigar (h d^{-1}).

A evapotranspiração da cultura deve ser criteriosamente estimada, considerando a maior demanda hídrica dentre os cultivos atendidos pelo sistema de irrigação, além de considerar a frequência de distribuição da evapotranspiração de referência.

A disponibilidade diária de mão de obra para a atividade de irrigar é um dado fundamental, uma vez que o sistema de aspersão convencional requer frequente mudança de posição, o que normalmente limita a atividade ao período diurno.

A vazão calculada pela Equação 5 é a de menor valor para as condições de contorno do projeto (irrigação total), pois considera que a operação do sistema de irrigação por aspersão convencional irá utilizar plenamente o turno de irrigação. Este valor seria reduzido no caso de se considerar a precipitação efetiva.

Quando se prevê um período de folga dentro do turno de irrigação, a vazão dada pela Equação 5 deve ser multiplicada pelo fator $\left(\frac{TI}{TI - \text{folga}}\right)$, com os parâmetros TI e folga em dias.

8.8 Configuração da rede hidráulica

Definir a configuração da rede hidráulica significa distribuir a tubulação na área irrigada respeitando algumas premissas práticas, como por exemplo: a) o comprimento da linha lateral deve ser igual ou submúltiplo da dimensão da área na direção da qual ela será disposta; b) o mesmo vale para as linhas laterais em relação à outra dimensão da área. Há um grande número de possibilidades, ainda mais quando a área é irregular e com desnível desuniforme. Algumas recomendações práticas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Recomendações práticas para definir a configuração da rede hidráulica.

Parâmetro	Recomendação
Soma das vazões das linhas laterais operando simultaneamente (conjunto operacional)	Deve ser aproximadamente a mesma, tanto em projetos em áreas regulares como em projetos em áreas irregulares
Área irrigada simultaneamente	Ser submúltiplo da área total
Número de horas de irrigação por conjunto operacional	Ser submúltiplo do tempo diário disponível (TD) para a atividade de irrigar

8.9 Esquema operacional, número de posições irrigadas e ajuste dos dados

Na Figura 1 são apresentados alguns exemplos de possíveis configurações hidráulicas de sistemas de irrigação por aspersão convencional, com números distintos de linhas laterais operando simultaneamente.

Em um dado projeto, as linhas laterais que operam simultaneamente formam um **conjunto operacional**, que será deslocado por diferentes posições de operação até que toda a área seja irrigada, dentro do turno de irrigação estabelecido.

O esquema operacional irá definir o número de posições de operação irrigadas por dia (NP_d), o tempo de irrigação por posição operacional e a sequência de deslocamento na área. Calcula-se NP_d por:

$$NP_d = \frac{\text{número total de posições de operação}}{TI} \quad (6)$$

Para facilitar a operação no campo, NP_d deve ser um número inteiro, de igual valor ou submúltiplo do tempo diário disponível para a atividade de irrigar (TD). Se não for, deve ser ajustado, aumentando o seu valor para atender a esta condição, o que implicará na redução do turno de irrigação. Se este ajuste gerar folga dentro do turno de irrigação, deve-se recalcular a vazão do projeto.

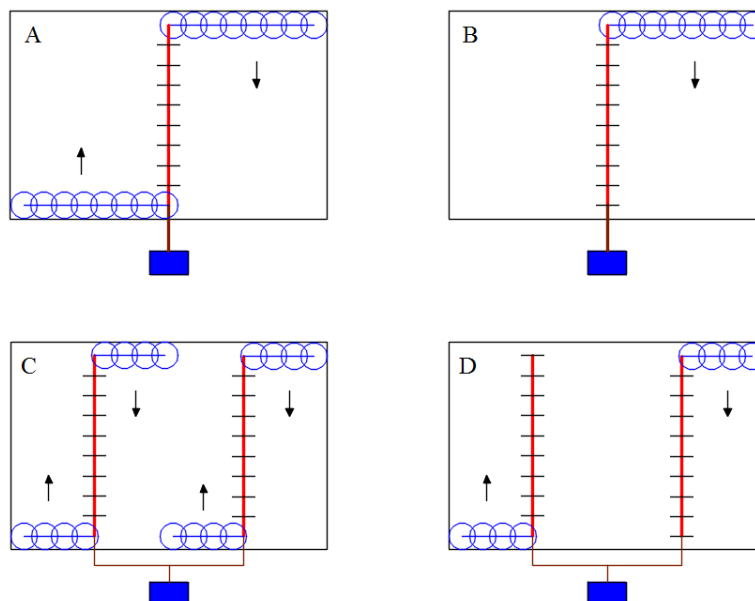


Figura 1. Algumas opções de configuração hidráulica e de esquemas operacionais em sistemas de irrigação por aspersão convencional.

8.10 Seleção do aspersor e suas características operacionais

A vazão do aspersor será calculada por:

$$q = \frac{Q}{\text{número de aspersores operando simultaneamente}} \quad (7)$$

A escolha do aspersor comercial é feita com base na vazão e nos espaçamentos E1 e E2, selecionando um modelo que atenda tais condições, preferencialmente, com uma carga de pressão intermediária, dentro da faixa recomendada pelo fabricante. Esta será a pressão de serviço do aspersor ($H_{\text{serviço}}$), que terá importância fundamental no critério de dimensionamento da linha lateral.

8.11 Hidráulica de tubulações com múltiplas saídas

Na sequência, tem-se o dimensionamento da rede hidráulica, começando pela linha lateral. As linhas laterais de aspersores são tubulações com múltiplas saídas e suas características hidráulicas estão bem definidas em Scaloppi e Allen (1993).

8.11.1 Cálculo da perda de carga

A estimativa da perda de carga (hf) é fundamental no dimensionamento da rede hidráulica de sistemas de irrigação pressurizados. A equação de Darcy-Weisbach (Equação 8), devido à sua acurácia e ampla faixa de aplicação (BROWN, 2002), é predominantemente recomendada (LIOU, 1998).

$$hf = \frac{8 f L Q^2}{\pi^2 D^5 g} \quad (8)$$

em que: hf é a perda de carga (mca); L é o comprimento da tubulação (m); Q é a vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); D é o diâmetro interno da tubulação (m); g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{m s}^{-2}$); f é o fator de atrito.

A necessidade de estimar o fator de atrito, f , já foi considerada a principal limitação ao amplo uso da equação Darcy-Weisbach, porém com a evolução dos recursos computacionais e mesmo de aplicativos para smartphones, esta restrição é cada vez menos significativa. A busca por uma única equação explícita que represente todas as regiões do Diagrama de Moody e estime adequadamente o fator de atrito para quaisquer combinações de Número de Reynolds (Re) e de rugosidade relativa do tubo (ε), é tema de pesquisa continuamente estudado (PIMENTA *et al.*, 2018; MINHONI *et al.*, 2020).

A Equação 9, proposta por Swamee e Jain (1976), é recomendada para as faixas de $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 10^{-2}$ e $5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^8$, com erros inferiores a $\pm 1\%$ em relação ao fator de atrito f calculado pela equação de Colebrook-White, considerada como referência, porém nem sempre adotada por ser uma equação implícita.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (9)$$

Para a viscosidade cinemática da água (ν) de $1,01 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, o número de Reynolds é dado por:

$$Re = 1,26 \cdot 10^6 \frac{Q}{D} \quad (10)$$

em que ε é a rugosidade absoluta do tubo, em m.

Para a elaboração de planilhas, programas computacionais e aplicativos de smartphones, recomenda-se a equação de Vatankhah (2018) para estimar o coeficiente de atrito f , dada sua precisão em todo a abrangência do Diagrama de Moody (MINHONI *et al.*, 2020), ou seja, para todas as combinações úteis de Re e de $\frac{\varepsilon}{D}$, sendo representada por:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0,8686 \cdot \ln \left[\frac{0,3984 \cdot Re}{(0,8686 s)^{\frac{s-0,645}{s+0,39}}} \right] \quad (11)$$

com $s = 0,12363 Re \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) + \ln(0,3984 Re) \quad (12)$

Perda de carga em tubulações com múltiplas saídas

As equações de perda de carga, como a de Darcy-Weisbach, aplicam-se a tubulações em que a vazão (Q) é constante ao longo do comprimento (L), de diâmetro (D) único. Em tubulações com múltiplas saídas, como é o caso das linhas laterais de aspersão convencional, a vazão que flui decresce a cada saída (aspersor), sendo que a perda de carga total pode ser estimada de duas formas: calculando trecho a trecho ou calculando para o comprimento total e aplicando um fator de correção.

8.11.2 Método trecho a trecho

Consiste em aplicar a equação de perda de carga de Darcy-Weisbach em cada trecho da tubulação e calcular a perda de carga total pelo somatório das perdas de carga nos trechos.

$$hf_L = \sum_{n=1}^N hf_n \quad (13)$$

sendo: hf_L = perda de carga total na tubulação com múltiplas derivações, em mca; hf_n = perda de carga no trecho n , calculada pela equação de Darcy-Weisbach, em mca; n = número do trecho ($n = 1$ a N).

8.11.3 Fator de correção para múltiplas saídas

Calcula-se a perda de carga com a equação de Darcy-Weisbach considerando que a vazão total percorre todo o comprimento L , de diâmetro D , ou seja, como se não houvesse derivações. O valor obtido é corrigido para o caso de múltiplas saídas, multiplicando pelo fator de correção de perda de carga, F_a , desenvolvido por Scaloppi (1988). Desta forma:

$$hf_L = hf \cdot F_a \quad (14)$$

$$F_a = \frac{(N \cdot F) + x - 1}{N + x - 1} \quad (15)$$

com $x = \frac{\text{distância do primeiro aspersor}}{\text{distância regular entre os demais aspersores}} \quad \text{sendo } x \leq 1 \quad (16)$

em que: hf = perda de carga com a vazão total percorrendo todo o comprimento L no diâmetro D , calculada pela equação de Darcy-Weisbach, em mca; N = número de saídas (derivações ou aspersores); F = fator de correção de perda de carga de Christiansen.

O fator de correção F_a está fundamentado no fator F de Christiansen (Eq. 17) e tem como vantagem ampliar sua aplicabilidade, uma vez que pode ser adotado para qualquer distância da primeira saída (aspersor), ou seja, para qualquer valor de x (Eq. 16).

O fator de correção F de Christiansen (1942), considera que a primeira derivação dista do início da tubulação, a mesma distância regular entre os demais aspersores na linha lateral, ou seja, $x = 1$, e é calculado por:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2.N} + \frac{(m-1)^{0,5}}{2.N} \quad (17)$$

em que: m = expoente da velocidade na equação de perda de carga utilizada. Para a equação de Darcy-Weisbach, $m = 2$.

8.11.4 Perda de carga em tubulação com dois diâmetros e múltiplas saídas

Na Figura 2 tem-se uma tubulação de irrigação com dois trechos, L_1 e L_2 , com os respectivos diâmetros, D_1 e D_2 , e número de saídas N_1 e N_2 .

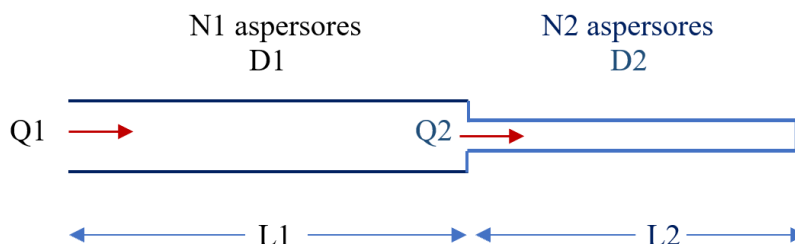


Figura 2. Representação esquemática da tubulação com múltiplas derivações e dois diâmetros.

O fator de correção F (CHRISTIANSEN, 1942) foi desenvolvido assumindo que todas as saídas tinham a mesma vazão e que a vazão total de entrada era totalmente descarregada pelas derivações, ou seja, não haveria mais fluxo após a última saída da tubulação ou do trecho da tubulação. Ao desenvolver o fator F_a , Scaloppi (1988) manteve estas premissas. Desta forma, não se pode aplicar F ou F_a diretamente nos dois trechos de diâmetros distintos, mas somente no segmento final. Keller e Bliesner (1990) apresentaram um procedimento indireto, caracterizado por 3 etapas de cálculo, que permite contornar esta situação e utilizar estes coeficientes, calculando a perda de carga em uma tubulação com dois diâmetros e com múltiplas saídas (hf_{LT}) por:

$$hf_{LT} = hf_A - hf_B + hf_C \quad (18)$$

em que hf_A é a perda de carga calculada com D_1 , Q_1 o comprimento total da linha lateral (L_1+L_2), multiplicada pelo F_a de Scaloppi, utilizando o número total de saídas (N_1+N_2), hf_B a perda de carga calculada com D_1 , Q_2 e L_2 , multiplicada por F_a estimado com $x = 1$ e N_2 (número de aspersores no trecho 2), hf_C a perda de carga calculada com D_2 , Q_2 e L_2 , multiplicada por F_a adotando $x = 1$ e N_2 .

8.11.5 Carga de pressão na tubulação com múltiplas saídas

A carga de pressão em qualquer ponto s da tubulação com múltiplas saídas é dada por:

$$H_s = H_0 - hf_s - d_s \quad (19)$$

em que H_s se refere à carga de pressão a uma distância s do início da tubulação com múltiplas saídas (m); H_0 à carga de pressão na entrada da tubulação (m); hf_s à perda de carga do início da tubulação até a distância s (m); d_s à diferença de cota entre o início da tubulação e o ponto s (m); s à distância em relação ao início da tubulação (m).

O componente carga de velocidade não é considerado na Equação 19 e nas demais que derivam de sua utilização.

Se a declividade da tubulação sobre o terreno for uniforme, pode-se utilizar:

$$d_s = S_0 \cdot s \quad (20)$$

em que S_0 = declividade média (uniforme) da tubulação sobre o terreno, em $m \cdot m^{-1}$. Por convenção adotada neste capítulo, S_0 é positivo para a cota em auge e negativo para a condição em declive.

A perda de carga do início da tubulação até a distância s pode ser estimada por (SCALOPPI; ALLEN, 1993):

$$hf_s = hf_L \left[1 - \left(1 - \frac{s}{L} \right)^3 \right] \quad (21)$$

O expoente 3 da Equação 21 é decorrente de $(m+1)$, em que m é o expoente da velocidade na equação de perda de carga utilizada (neste capítulo, $m = 2$; equação de Darcy-Weisbach).

8.11.6 Carga de pressão média na tubulação com múltiplas saídas

A carga de pressão média na tubulação com múltiplas saídas é dada por:

$$H_{med} = H_0 - 0,75 hf_L - \frac{d_L}{2} \quad (22)$$

em que H_{med} é a carga de pressão média na tubulação com múltiplas saídas, em mca; hf_L = perda de carga total na tubulação, mca; d_L = diferença de cota entre o início e o final da tubulação, em m.

Quando a declividade for uniforme, pode-se utilizar $(S_0 \cdot L)$ no lugar de d_L .

A localização da carga de pressão média é dada pela Tabela 2.

Tabela 2. Localização da carga de pressão média conforme a condição de declividade.

Condição	Localização do H_{med}
Em nível e $m = 2$	0,37 de L
Em desnível (active ou declive)	Variável

8.11.7 Cargas de pressão máxima e mínima na tubulação com múltiplas saídas

Para poder calcular as cargas de pressão máxima e mínima na tubulação com múltiplas saídas é preciso saber a localização das mesmas, que varia conforme a condição de desnível.

Em tubulações em nível e em auge a carga de pressão máxima está no início da linha e a mínima, no final:

$$H_x = H_0 \text{ e } H_n = H_f \quad (23)$$

em que H_x é a carga de pressão máxima na tubulação (m), H_n a carga de pressão mínima na tubulação (m), e H_f a carga de pressão no final da tubulação (m).

No entanto, em tubulações com múltiplas saídas e em declive, há diversas possibilidades de perfis de pressão em função da declividade e da perda de carga, com diferentes posicionamentos das cargas de pressão máxima e mínima, conforme pode ser verificado em Wu *et al.* (1983).

8.11.8 Variação de pressão e de vazão

A variação de vazão (Δq) na linha lateral de aspersão convencional é um importante indicador da qualidade do dimensionamento, uma vez que um projeto é considerado adequado quando apresenta $\Delta q \leq 10\%$.

$$\Delta q = \frac{(q_x - q_n)}{q_x} \quad (24)$$

em que: q_x é a vazão máxima na linha lateral; q_n é a vazão mínima na linha lateral.

Pode-se também avaliar a linha lateral de aspersores pela variação carga de pressão, dada por:

$$\Delta H = \frac{(H_x - H_n)}{H_x} \quad (25)$$

Para um dado aspersor, tem-se:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}} \quad (26)$$

ou, neste caso:

$$\frac{q_x}{q_n} = \frac{\sqrt{H_x}}{\sqrt{H_n}} \quad (27)$$

Combinando as Equações 24, 25 e 26 obtém-se que:

$$\Delta q = 10\% \text{ equivale a } \Delta H = 19\% \quad (28)$$

Considerando que é mais fácil medir a carga de pressão do que a vazão em diferentes pontos de uma tubulação, pode-se inferir que sempre que $\Delta H \leq 19\%$, tem-se $\Delta q \leq 10\%$.

8.12 Dimensionamento da linha lateral

8.12.1 Critérios de dimensionamento

O dimensionamento das linhas laterais de aspersão convencional, proposto neste capítulo, está fundamentado em dois critérios básicos: (i) que a variação de vazão seja de, no máximo, 10% (KELLER; BLIESNER, 1990), e (ii) que a carga de pressão média na tubulação seja igual à pressão de serviço do aspersor mais a altura da haste, quando houver.

Resumo dos critérios:

$$\Delta q \leq 10\% \text{ e } H_{\text{med}} = H_{\text{serviço}} + H_h \quad (29)$$

em que: $H_{\text{serviço}}$ se refere à carga de pressão de serviço (ou de operação) do aspersor (mca), correspondente ao valor médio do intervalo de operação recomendado pelo fabricante; H_h à altura da haste (m).

Nesta etapa do projeto, diversas variáveis da linha lateral já foram definidas, como: vazão de entrada, comprimento da tubulação, rugosidade absoluta do tubo e número de aspersores. O critério de dimensionamento de $\Delta q \leq 10\%$ irá definir qual deve ser a perda de carga máxima admissível na linha lateral para que este limite seja respeitado. Com isso, a única variável que resta ser determinada é o diâmetro da tubulação.

Como converter o critério de $\Delta q \leq 10\%$ em perda de carga máxima admissível na linha lateral contendo os aspersores? Esta conversão dependerá da condição topográfica da tubulação.

8.12.1.1 Linha lateral em nível: critério de dimensionamento

Para converter o critério de, no máximo, 10% de variação de vazão na linha lateral em correspondente perda de carga total, adotou-se as seguintes premissas: (i) $\Delta q = 10\%$ equivale a $\Delta H = 19\%$, (ii) nas linhas laterais em nível, H_x está no início da tubulação e H_n , no final, (iii) H_{med} é dado pela Eq. 22 e que $H_{med} = H_{serviço} + H_h$, e (iv) ΔH é dado pela Eq. 24.

Desta forma:

$$H_x = H_0 = H_{med} + 0,75 hf_L \text{ e } H_n = H_{final} = H_{med} - 0,25 hf_L \quad (30)$$

$$\text{Sendo } \Delta H = \frac{(H_x - H_n)}{H_x}, \text{ tem-se:} \quad (31)$$

$$0,19 = \frac{(H_{med} + 0,75.hf_L) - (H_{med} - 0,25.hf_L)}{H_{med} + 0,75.hf_L} \quad (32)$$

Portanto, para a condição em nível:

$$hf_L = 0,22 H_{med} \quad (33)$$

ou

$$hf_L = 0,22 (H_{serviço} + H_h) \quad (34)$$

8.12.1.2 Linha lateral em active: critério de dimensionamento

As mesmas considerações feitas para a condição em nível são válidas para a situação em active, diferindo quanto à estimativa de H_{med} , que será dada por:

$$H_x = H_0 = H_{med} + 0,75 hf_L + \frac{d_L}{2} \quad (35)$$

$$H_n = H_{final} = H_{med} - 0,25 hf_L - \frac{d_L}{2} \quad (36)$$

Portanto, para a condição EM ACLIVE:

$$hf_L = 0,22 H_{med} - 1,06 d_L \quad (37)$$

ou

$$hf_L = 0,22 (H_{serviço} + H_h) - 1,06 d_L \quad (38)$$

Novamente, quando declividade da tubulação sobre o terreno for uniforme, pode-se utilizar ($S_0 L$) no lugar de d_L .

8.12.1.3 Linha lateral em declive: critério de dimensionamento

No caso de linhas laterais em declive, não há uma equação única que estabeleça a relação entre hf_L e H_{med} , uma vez que a localização de H_x e H_n é variável conforme o perfil de pressão, que é função da perda de carga total e da declividade da tubulação.

8.12.2 Determinação do diâmetro da linha lateral às condições em nível e em active

Tanto para a linha lateral em nível, quanto para a linha lateral em active, uma vez que se conhece a vazão de entrada, o comprimento, a rugosidade absoluta do tubo, o número de aspersores e a perda de carga total (hf_L) que gera Δq de 10%, resta determinar o diâmetro interno da tubulação, que pode ocorrer de duas formas: analiticamente, obtendo-se um

diâmetro teórico que será aproximado para o diâmetro comercial superior mais próximo; ou por um processo de tentativas utilizando diâmetros comerciais e verificando qual deles mais se aproxima do hf_L correspondente a $\Delta q = 10\%$.

8.12.2.1 Determinação analítica do diâmetro da linha lateral

Combinando a equação de perda de carga de Darcy-Weisbach com a equação para cálculo do coeficiente f desenvolvida por Swamee & Jain (1976), tem-se:

$$D = 0,66. \left[\varepsilon^{1,25} \left(\frac{L Q^2}{hf g} \right)^{4,75} + \nu Q^{9,4} \left(\frac{L}{hf g} \right)^{5,2} \right]^{0,04} \quad (39)$$

em que: ν = viscosidade cinemática da água = $1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

A Equação 39 é válida para $3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 3 \cdot 10^8$ e $2 \cdot 10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 2 \cdot 10^{-2}$ e tem erro de $\pm 2\%$. Um procedimento analítico mais preciso é encontrado em Babajimopoulos e Terzidis (2013).

8.12.2.2 Definição do diâmetro da linha lateral por tentativas

Pode-se também testar diâmetros comerciais e verificar qual deles resulta em perda de carga na linha lateral (hf_L) que mais se aproxima do valor que representa $\Delta q = 10\%$.

8.12.3 Determinação do diâmetro da linha lateral para a condição em declive

A condição em declive permite diversos perfis de pressão, dependendo da perda de carga total e da declividade da tubulação, com as cargas de pressão máxima e mínima em diferentes posições da linha lateral, o que impossibilita o estabelecimento de uma equação única para correlacionar hf_L e H_{med} , de tal forma que se tenha $\Delta q = 10\%$.

A planilha SLIDE (Figura 3) foi desenvolvida por Andrini *et al.* (2019) para subsidiar o dimensionamento de linhas laterais de aspersão convencional em qualquer condição topográfica, inclusive em declive. Na Figura 3 tem-se os dados de entrada requeridos e os dados de saída, a saber: carga de pressão no início da linha lateral, carga de pressão máxima, carga de pressão mínima, carga de pressão média, variação de pressão, variação de vazão, perfil de carga de pressão e seu tipo segundo a classificação apresentada por Wu *et al.* (1983). De forma interativa, é possível testar diferentes possibilidades de dimensionamento alterando as variáveis de entrada e verificando a variação de vazão correspondente, que deve ser inferior a 10%.

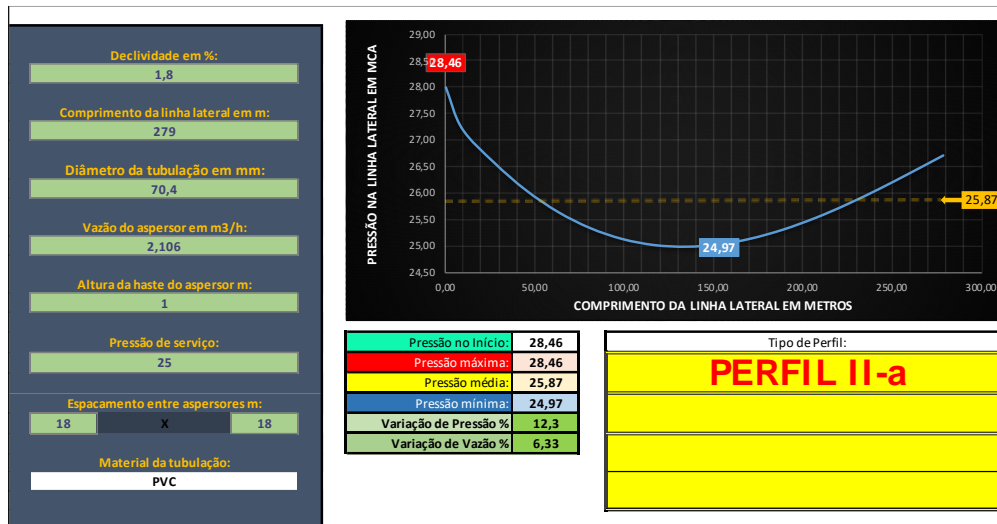


Figura 3. Planilha SLIDE (ANDRINI *et al.*, 2019) para dimensionamento de linhas laterais de aspersão convencional em qualquer condição de declividade uniforme.

8.12.4 Linhas laterais emparelhadas em desnível

Denomina-se de linhas emparelhadas (Figura 4) quando as tubulações (linhas laterais) se estendem em direção opostas na linha principal, sendo usual que tenham o mesmo diâmetro. O dimensionamento de linhas laterais emparelhadas em terrenos com declividade uniforme consiste em definir o comprimento dos trechos em aclave em declive, tendo o mesmo diâmetro e aproximadamente a mesma carga de pressão mínima.

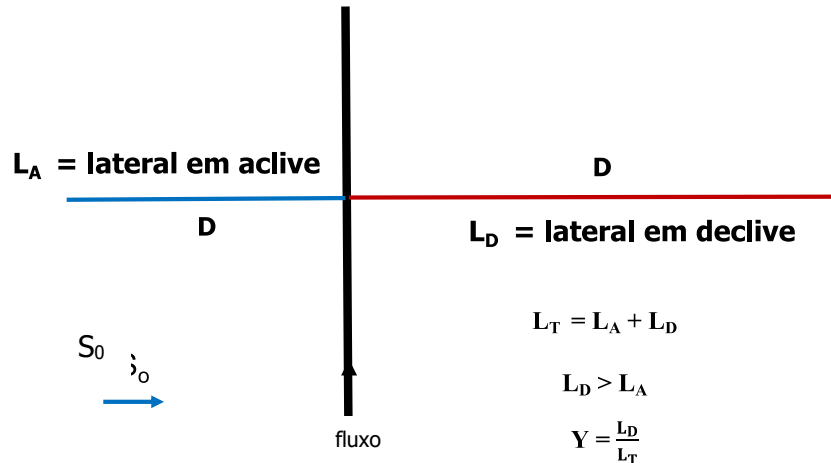


Figura 4. Linhas laterais emparelhadas.

No caso de linhas laterais emparelhadas em condição em nível, a linha principal estará situada no centro e os dois trechos terão o mesmo comprimento e o mesmo diâmetro. Neste caso, define-se o diâmetro pela metodologia já apresentada.

No caso de linhas laterais emparelhadas em condição de declividade uniforme, adota-se o mesmo diâmetro que se teria na condição em nível seguindo a metodologia apresentada anteriormente. O passo seguinte é determinar quais serão os comprimentos dos trechos em aclave (L_A) e em declive (L_D), de tal a forma a compensar os efeitos da declividade com $L_D > L_A$ e assegurar a mesma carga de pressão mínima em ambos. Adaptando a metodologia proposta por Keller e Bliesner (1990) para determinar a melhor posição da linha de derivação de sistemas de irrigação por gotejamento em terreno inclinado, tem-se a seguinte equação:

$$\frac{S_0 \cdot L_T}{hf_L} \cdot \left[1 - \left(\frac{F_a \cdot S_0 \cdot L_T}{hf_L} \right)^{0,5} \right] + \left(\frac{F_a \cdot S_0 \cdot L_T}{hf_L} \right)^{1,5} = Y^3 - (1-Y)^3 \quad (40)$$

em que Y se refere à fração do comprimento total correspondente ao trecho em declive; S_0 = declividade média (uniforme) da tubulação sobre o terreno, em $m \cdot m^{-1}$, L_T ao comprimento total (trecho em aclave + trecho em declive), em m, hf_L à perda de carga da tubulação com múltiplas saídas (mca) de comprimento L_T , com vazão de entrada equivalente à soma dos trechos em aclave e em declive, e F_a ao fator de Scaloppi (adimensional).

O elevado valor de hf_L utilizado na Equação 40 é pouco usual, pois é decorrente de uma condição hipotética representada pela perda de carga (hf) estimada pela equação de Darcy-Weisbach para uma tubulação de comprimento L_T , que é a soma dos trechos em aclave e em declive, transportando a vazão Q_T (soma das vazões dos trechos em aclave e em declive), em um diâmetro único (igual ao que se teria na condição em nível). Para se estimar hf_L , deve-se multiplicar hf pelo coeficiente F_a , obtido com $x = 1$ e N equivalente a soma total de aspersores (equivalente ao comprimento L_T).

A Equação 40 preconiza que se tenha a mesma carga de pressão mínima nos trechos em aclave em declive, gerando variação de vazão muito semelhante entre as linhas emparelhadas. Ela também pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{S_0}{S_f F_a} \left[1 - \left(\frac{S_0}{S_f} \right)^{0,5} \right] + \left(\frac{S_0}{S_f} \right)^{1,5} = Y^3 - (1 - Y)^3 \quad (41)$$

em que: S_f é a declividade da linha de energia da tubulação (ou gradiente de perda de carga de pressão), em mca m^{-1} , sendo calculada por $S_f = \frac{hf}{L_T}$.

Os trechos em declive e em aclave serão calculados por:

$$L_d = Y \cdot L_T \quad (42)$$

$$L_a = L_T - L_d \quad (43)$$

em que L_d se refere ao comprimento da linha lateral em declive (m); L_a ao comprimento da linha lateral em aclave (m).

É necessário ajustar o valor de L_d obtido pela Equação 42 para que se tenha um número inteiro de aspersores no trecho.

8.13 Condição operacional crítica

Considerando a sequência de deslocamento das linhas laterais que irrigam simultaneamente nas diferentes posições de operação da área irrigada, definida anteriormente no item 7.9, deve-se identificar a condição mais crítica, ou seja, aquela que requer a maior carga de pressão no início da linha principal (primeira derivação, H_1). Isto é fundamental para calcular a altura manométrica total e também para dimensionar as linhas de alimentação (secundária ou principal).

8.14 Dimensionamento da linha principal

Para dimensionar a linha principal e também as secundárias (se houver), pode-se adotar o critério da velocidade máxima, que deve ser inferior a $2m \cdot s^{-1}$. Quando possível, deve-se utilizar mais de um diâmetro.

8.15 Cálculo da altura manométrica total

A altura manométrica total corresponde à carga de pressão que o conjunto motobomba deve fornecer para assegurar H_0 na posição mais crítica. Para isso, deve-se considerar todas as perdas de carga e as perdas (e ganhos, se houver) por desnível desde a bomba até a linha lateral na condição mais crítica. Ao valor total calculado, deve-se acrescentar 5% para compensar as perdas de carga localizadas.

8.16 Potência do conjunto motobomba

Com a vazão do projeto (Q , $m^3 s^{-1}$) e a altura manométrica (H_{man} , m), seleciona-se um modelo de bomba hidráulica que atenda tais características, com o melhor rendimento.

A potência líquida do motor será dada por:

$$\text{Potência líquida (CV)} = \frac{9,81 Q H_{man}}{0,735 \eta_b \eta_m} \quad (44)$$

em que η_b se refere ao rendimento da bomba hidráulica (decimal), e η_m o rendimento do motor elétrico (decimal).

A potência bruta será a potência líquida multiplicada por um fator de segurança, denominado de reserva de potência, sendo que o valor obtido irá orientar a escolha do motor comercialmente disponível.

8.17 Estudo de caso: dimensionamento de um sistema de irrigação por aspersão convencional com linhas laterais emparelhadas em desnível

A área do projeto está representada na Figura 5, tendo dimensões de 440m por 180m, na qual pretende-se irrigar a cultura do feijão pelo sistema de irrigação por aspersão convencional. Dados: (i) profundidade efetiva do sistema radicular: 40cm; (ii) umidade na capacidade de campo: $0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; (iii) umidade no ponto de murchamento permanente: $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; (iv) fator de depleção (f): 0,5; (v) evapotranspiração da cultura: $5,2 \text{ mm d}^{-1}$; (vi) eficiência de aplicação: 80%; (vii) tempo diário disponível para a atividade de irrigar (TD): 10 h; (viii) altura da haste: 1 m; e (ix) a precipitação efetiva não será considerada e nem o período de folga entre turnos de irrigação.

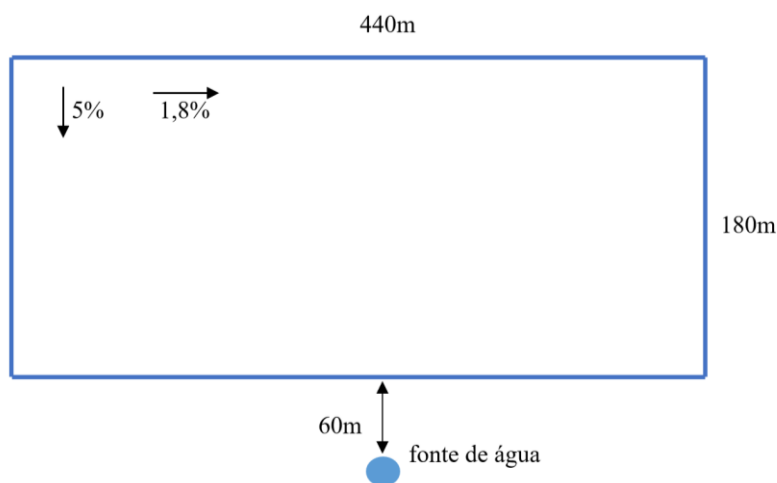


Figura 5. Croqui da área do projeto.

8.17.1 Espaçamento entre emissores

Considerando as dimensões da área e que os ventos são moderados, escolheu-se o espaçamento entre aspersores de 18 m por 18 m.

8.17.2 Área efetivamente irrigada

Ajustando a área original para que se tenha um número inteiro tanto de aspersores na linha lateral, como de linhas laterais, obteve-se 432 m x 180 m.

8.17.3 Lâmina líquida e lâmina bruta

$$L_L = (0,38 - 0,22) \times 0,5 \times 400\text{mm} = 32 \text{ mm} \quad (45)$$

$$L_b = \frac{32 \text{ mm}}{0,80} = 40 \text{ mm} \quad (46)$$

Cálculo do turno de irrigação

$$\text{Turno máximo de irrigação} = \frac{L_L}{ET_c} = \frac{32}{5,2} = 6,15 \text{ dias} \cong 6 \text{ dias} \quad (47)$$

8.17.4 Cálculo da vazão do projeto

$$Q = \frac{A \cdot ET_c}{Ef \cdot NI} = \frac{432\text{m} \times 180\text{m} \times 0,0052 \text{ m/d}}{0,8 \times 10 \text{ h/d}} = 50,54 \text{ m}^3\text{h}^{-1} \quad (48)$$

8.17.5 Definição da configuração da rede hidráulica e do esquema operacional

A linha principal será disposta na direção dos 180 m, operando em aclave, tendo linhas laterais em aclave e em declive, ou seja, linhas laterais emparelhadas.

A maior direção (432m) permite 24 aspersores com espaçamento de 18m, que serão oportunamente distribuídos entre as linhas laterais em aclave e em declive.

Há diversas configurações possíveis da rede hidráulica, sendo que algumas foram representadas na Figura 1, no item 7.9. A opção selecionada para este Estudo de Caso é semelhante àquela da Figura 1A, com duas linhas laterais operando simultaneamente e constituindo o conjunto operacional, sendo que o deslocamento se dá em sentido opostos, começando das extremidades da área. No entanto, dada a declividade, serão linhas emparelhadas de comprimentos diferentes, seguindo o esquema operacional que está detalhado na Figura 6, no qual operam simultaneamente duas laterais de mesma numeração (cor), sendo uma em aclave e outra em declive, deslocando-se em sentidos opostos.

Para dimensionar linhas laterais emparelhadas em desnível, deve-se inicialmente calcular o diâmetro como se elas tivessem o mesmo comprimento e operassem em nível. Desta forma, a linha principal estaria no centro da área, com linhas laterais em ambos os lados, de mesmo comprimento (207 m), tendo cada uma 12 aspersores, sendo que o primeiro estaria a 9m do ponto de derivação. Assume-se também que o final da linha lateral dista do limite da área o equivalente à metade do espaçamento regular entre emissores, ou seja, $\frac{18}{2} = 9 \text{ m}$.

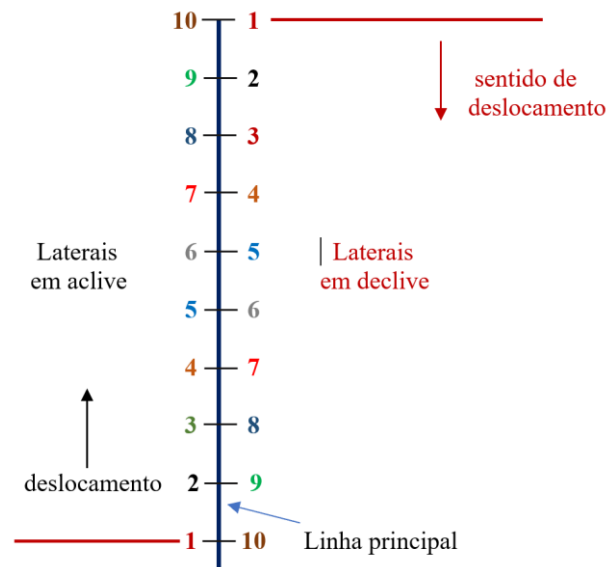


Figura 6. Esquema operacional, em que operam simultaneamente duas linhas laterais de mesma numeração (cor), sendo uma em aclive e outra em declive, deslocando-se em sentidos opostos.

8.17.6 Definição das condições operacionais dos aspersores

Na Tabela 3 tem-se a definição das condições operacionais dos aspersores. Selecionou-se um aspersor comercial que fornece $2,106 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e é recomendado para o espaçamento $18\text{m} \times 18\text{m}$. O modelo escolhido tem as seguintes características: (i) aspersor com dois bocais: 4mm e $4,6 \text{ mm}$, e (ii) vazão de $2,085 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ na carga de pressão de 25 m .

Para se ter $q = 2,106 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ será necessário $H = 25,5 \text{ m}$ (Eq. 26).

Tabela 3. Definição das condições operacionais dos aspersores.

Item	Valor
Nº de aspersores por conjunto operacional (linhas laterais operando simultaneamente)	$\frac{432\text{m}}{18\text{m}} = 24$
Vazão do projeto (Q)	$50,54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Vazão do aspersor (q) para $H_{\text{serviço}} = 25,5 \text{ mca}$	$\frac{50,54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}}{24 \text{ aspersores}} = 2,106 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Número total de posições de operação	10
Tempo disponível para irrigar/dia (TD; dado de entrada)	10 h
Turno de irrigação (TI)	6 d
Número de posições de operação irrigadas por dia (NP_d)	$\frac{10 \text{ posições de operação}}{6 \text{ d}} = 1,67 \text{ posições/d}$
Ajuste:	2 posições de operação/d
Aproxima-se NP_d para o inteiro superior que seja submúltiplo do TD	Tempo por posição de operação = 5h Turno ajustado = $\frac{10 \text{ posições}}{2 \text{ posições/d}} = 5 \text{ d}$
	Lâmina líquida ajustada = $5\text{d} \times 5,2 \text{ mm/d} = 26 \text{ mm}$
	Lâmina bruta = $32,5 \text{ mm}$
Intensidade de aplicação de água do aspersor	$\frac{32,5 \text{ mm}}{5 \text{ h}} = 6,5 \text{ mm h}^{-1}$

8.17.7 Dimensionamento das linhas laterais como se estivessem em nível

As linhas emparelhadas em aclave e em declive terão o mesmo diâmetro, que corresponde àquele que se teria caso as linhas estivessem em nível. Desta forma, deve-se determinar o diâmetro da linha lateral em nível, com base nos seguintes dados: (i) comprimento: 207 m, (ii) número de aspersores: 12, (iii) vazão de entrada: $12 \times 2,106 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 25,27 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, (iv) altura da haste: 1 m, e (v) rugosidade absoluta da tubulação de PVC: 0,00334 mm (ROCHA *et al.*, 2017).

Pelo critério de variação de vazão de 10% na linha lateral em nível, tem-se que a perda de carga deve ser de, no máximo:

$$hf_L = 0,22 (H_{\text{serviço}} + H_h) \quad \text{em nível} \quad (49)$$

Portanto:

$$hf_L = 0,22 \times (25,5 + 1) = 5,83 \text{ mca} \quad (50)$$

A etapa seguinte consiste em determinar qual o diâmetro da tubulação da linha lateral que atenderá este conjunto de condições. Pode-se determinar este diâmetro de duas formas: (i) testando diâmetros comerciais para verificar qual deles gera hf_L próximo de 5,83 mca; (ii) utilizando a Equação 39 para definir o diâmetro teórico que gera $hf_L = 5,83 \text{ mca}$ e aproximar para o diâmetro comercial imediatamente superior.

Para $N = 12$ e primeiro aspersor a 9 m, tem-se que: $x = 0,5$, $F = 0,3762$ e $F_a = 0,3490$. Desta forma:

$$hf = \frac{5,83 \text{ mca}}{0,3490} = 16,70 \text{ mca} \quad (51)$$

Pela Eq. 39, obtém-se: $D = 61,8 \text{ mm}$. O diâmetro comercial mais próximo de tubo de engate rápido em PVC é DN 75, com diâmetro interno de 70,4mm. Com $D = 0,0704\text{m}$, tem-se: $hf = 8,46 \text{ mca}$ e $hf_L = 2,95 \text{ mca}$ (menor que o valor corresponde a Δq de 10%, que era de 5,83 mca).

8.17.8 Dimensionamento das linhas laterais em declividade

Utilizando o diâmetro de 70,4mm obtido para a linha lateral em nível, determina-se os comprimentos dos trechos em aclave e em declive, com base na Eq. 40 (ou Eq. 41). Os dados de entrada são: $D = 0,0704\text{m}$; declividade na direção das linhas laterais (S_0) = 0,018m/m; $Q_T = 50,54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; $L_T = 2 \times 207 = 414\text{m}$; $F_a = 0,354$ correspondente a $N = 24$, $m = 2$ e $x = 1$; $hf = 59,8 \text{ mca}$ referente à perda de carga com Q_T em toda o comprimento L_T , de diâmetro único igual a 0,0704m; $hf_L = 21,2 \text{ mca}$. Substituindo-se estes valores na Eq. 40, obtém-se:

$$Y^3 - (1 - Y)^3 = 0,271 \quad \Rightarrow \quad Y = 0,673 \quad (52)$$

$$\text{Portanto:} \quad L_D = Y \cdot L_T = 0,673 \times 414\text{m} = 278,6 \text{ m} \quad (53)$$

Ajustando L_D para um número inteiro de aspersores, com o primeiro aspersor na metade do espaçamento regular, tem-se $L_D = 279 \text{ m}$ com 16 aspersores, sendo o primeiro a 9m do início da linha e os demais regularmente espaçados de 18m; a vazão de entrada (Q_D) é de $33,70 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Consequentemente, $L_A = 135\text{m}$, com 8 aspersores, sendo o primeiro a 9m do início das linhas e os demais regularmente espaçados de 18m; vazão de entrada (Q_A) de $16,84 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

A carga de pressão no início da linha lateral (H_0) será a mesma para o trecho em aclave e para o trecho em declive. No entanto, deve ser calculada para o trecho em aclave utilizando a Eq. 22, considerando que $H_{\text{serviço}} = 25,5 \text{ mca}$, a altura da haste é de 1m e hf_L é de 0,95 mca (obtido com $L_A = 135\text{m}$, $Q_A = 16,84 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, $D = 0,0704\text{m}$, $N = 8$ e $F_a = 0,3583$):

$$H_0 = 25,5 + 1 + (0,75 \times 0,95) + (135 \times 0,018)/2 = 28,43 \text{ mca} = 28,4 \text{ mca} \quad (54)$$

Para a linha lateral em declive, será o mesmo valor de H_0 , ou seja, 28,4 mca. Utilizando uma planilha Excel para calcular a carga de pressão em cada aspersor da linha em aclave e da linha em declive, obteve-se a variação de pressão (ΔH) para cada segmento (Tabela 4).

Verifica-se que as variações de vazão nas linhas laterais em aclave e em declive foram muito próximas e ficaram abaixo de 10%, conforme o recomendado. Portanto, a metodologia de Keller e Bliesner (1990), representada pela Eq. 40, foi eficaz em atribuir, aproximadamente, a mesma pressão mínima nos trechos em aclave e em declive (Figura 7).

Tabela 4. Características das linhas laterais emparelhadas, em aclave e em declive.

Item	Linhas Laterais Emparelhadas	
	Aclave	Declive
Comprimento (m)	135	279
Número de aspersores	8	16
Vazão ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	16,84	33,70
Pressão na entrada (m)	28,4	28,4
Pressão mínima (m)	25,0	24,9
Variação de pressão (%)	12,0	12,3
Variação de vazão (%)	6,2	6,4

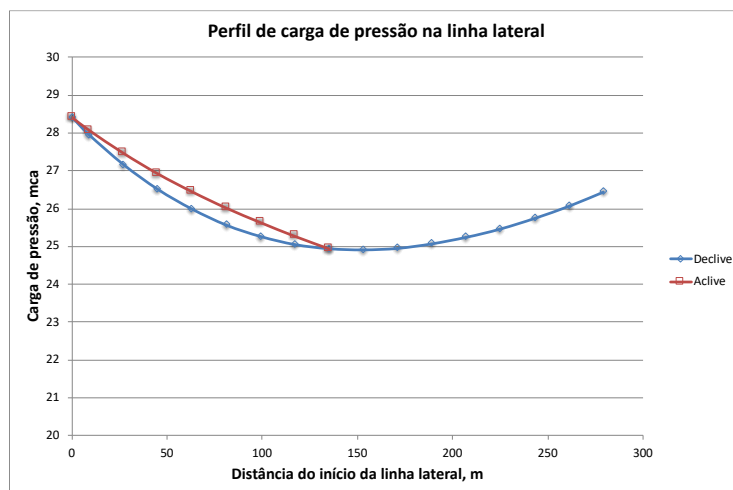


Figura 7. Perfis de carga de pressão para as linhas emparelhadas em aclave e em declive, tendo ambas $H_0 = 28,4$ m.

8.17.9 Dimensionamento da linha principal

Adotou-se o critério de velocidade máxima na tubulação de 2 m s^{-1} para dimensionar a linha principal. Conforme o esquema operacional estabelecido, no qual as linhas laterais de mesma numeração operam simultaneamente (Figura 6), a vazão Q_T não ultrapassa a posição 5 em aclave (ou a posição 6 em declive). A partir deste ponto, fluirá ou Q_A ou Q_D , dependendo da posição do conjunto operacional, sendo que Q_D é mais crítica por ter maior valor. Pode-se ter, então, um diâmetro maior até a posição 5 em aclave e outro menor a partir deste ponto, respeitando o critério de velocidade máxima de 2 m s^{-1} .

Para tubos de PVC PN60, tem-se DN 100 com diâmetro interno de 96mm e DN75 com diâmetro interno de 71,5 m. Com DN100, obteve-se a velocidade de $1,94 \text{ m s}^{-1}$ para Q_T ($50,54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) e de $1,30 \text{ m s}^{-1}$ para Q_D ($33,70 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$). Avaliou-se a possibilidade de adotar DN75 no trecho em que flui, no máximo, Q_D , porém a velocidade obtida foi de $2,33 \text{ m s}^{-1}$, superior à permitida. Desta forma, toda a linha principal será de PVC PN60 e DN100 (com diâmetro interno de 96 mm).

8.17.10 Condição operacional crítica

Dentre as 10 posições percorridas pelo conjunto operacional durante o turno de irrigação, uma delas é a mais crítica, ou seja, irá requerer a maior altura manométrica. Para identificá-la, foram obtidas as perdas de carga unitárias (J) para três valores de vazão que podem ocorrer em trechos da linha principal, conforme a posição do conjunto operacional: (i) $Q_T = 50,54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ com $J = 0,03212 \text{ m m}^{-1}$, equivalente à vazão total, (ii) $Q_D = 33,70 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ com $J = 0,01541 \text{ m m}^{-1}$; para a vazão da linha em declive, e (iii) $Q_A = 16,84 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ com $J = 0,00443 \text{ m m}^{-1}$, referente à vazão da linha em aclave.

Neste caso, embora sejam 10 possíveis posições, pode-se reduzir a investigação a duas delas para identificar qual é a mais crítica, quais sejam:

(i) Posição 1 em aclave com posição 1 em declive

Quando operam simultaneamente a linha lateral 1 em aclave com a linha lateral 1 em declive, o objetivo é que se tenha na posição mais distante (1 em declive) a carga de pressão requerida na entrada da linha lateral ($H_0 = 28,4 \text{ mca}$). Neste caso, a carga de pressão necessária na primeira saída da linha principal (H_1) é dada por:

$$H_1 = \underbrace{28,4}_{H_0} + \underbrace{(9 \text{ espaçamentos} \times 18\text{m}) \times 0,05 \text{m/m}}_{\text{desnível}} + \underbrace{0,01541 \text{mca/m} \times (9 \times 18\text{m})}_{\text{perda de carga}} = \mathbf{39 \text{ m}}$$

(ii) Posição 5 em aclave com posição 5 em declive

Quando operam simultaneamente as linhas laterais de número 5 (em aclave e em declive), é requerido que se tenha $H_0 = 28,4 \text{ mca}$ na entrada da linha lateral 5 em declive. Desta forma, H_1 deve ser:

$$H_1 = 28,4 + (5 \times 18\text{m}) \times 0,05 \text{ m m}^{-1} + (4 \times 18\text{m} \times 0,03212 \text{ mca m}^{-1}) + (18\text{m} \times 0,01541 \text{ mca m}^{-1}) = 35,5 \text{ m}$$

Portanto, a posição mais crítica é a 1, com $H_1 = \mathbf{39 \text{ m}}$.

Na Tabela 5 são apresentadas as cargas de pressão em cada derivação da linha principal, conforme o esquema operacional detalhado na Figura 6. Por exemplo: quando estiverem operando as linhas laterais de número 3, a carga de pressão na entrada da linha lateral em aclave será de 36 m e a carga de pressão na entrada da linha lateral em declive será 30,2 m.

Caso o processo de identificação da condição operacional crítica tivesse sido equivocado, isto ficaria evidente ao analisar a Tabela 5, pois o menor valor de carga de pressão não estaria na posição definida. Neste caso, houve assertividade, pois a carga de pressão mínima ocorreu na entrada da linha lateral 1 em declive.

Observa-se, ainda, na Tabela 5, que todas as posições apresentam carga de pressão igual ou superior ao valor requerido ($H_0 = 28,4 \text{ mca}$). Desta forma, nas derivações que apresentam valores superiores pode-se realizar o controle da carga de pressão para que se tenha H_0 , sendo que a forma mais simples e usual se dá por meio do uso de manômetro e fechamento parcial da válvula de linha. Desta forma, mesmo tendo um número par de posições

operacionais e um esquema operacional em que as linhas laterais que operam simultaneamente se deslocam em sentidos opostos, tem-se a condição de linhas emparelhadas que apresentam o mesmo H_0 no trecho em acive e em declive (7.17.8), posto que todas as posições terão H_0 assegurado pelo controle de carga de pressão.

Tabela 5. Carga de pressão, durante a operação, nas diferentes posições em que o conjunto operacional é deslocado na área irrigada. As linhas laterais em acive e declive de mesma numeração (cor) operam simultaneamente.

Posição	Carga de pressão (m) na entrada da linha em ACLIVE	Posição	Carga de pressão (m) na entrada da linha em DECLIVE
10*	30,2	1	28,4
9	30,7	2	29,3
8	31,1	3	30,2
7	31,6	4	31,0
6	32,1	5	31,9
5	33,1	6	33,1
4	34,6	7	34,6
3	36,0	8	36,0
2	37,5	9	37,5
1	39,0	10	39,0

Posições com mesma numeração (cor) operam simultaneamente

8.17.11 Cálculo da altura manométrica e da potência do conjunto motobomba

A linha adutora corresponde à distância do conjunto motobomba até a posição 1 da linha principal (Figura 8), tendo comprimento de 69m, com desnível de 6,5m e perda de carga de 2,2mca, considerando que este trecho também será de PVC PN60 e DN100. A altura de sucção é de 2m e acrescenta-se 5% ao valor da altura manométrica para compensar as perdas localizadas em todo o sistema. Desta forma, considerando que a carga de pressão na posição 1 da linha principal é de 39 m, tem-se:

$$H_{\text{man}} = (39 + 6,5 + 2,2 + 2) \times 1,05 = 52,2 \text{ m} \quad (55)$$

O conjunto motobomba deverá fornecer 52,2 mca e uma vazão de 50,54 m³ h⁻¹. Considerando que o rendimento da bomba centrífuga selecionada é de 70% e que o do motor elétrico é de 88%, a potência do motor será de:

$$P = \frac{9,81 Q_T H_{\text{man}}}{0,735 \eta_m \eta_b} = \frac{9,81 \times 0,014 \times 52,2}{0,735 \times 0,88 \times 0,7} = 15,9 \text{ CV} \quad (56)$$

Adotando uma reserva de potência de 15%, a potência bruta será de 18,3 CV. Comercialmente, tem-se o motor de 20 CV.

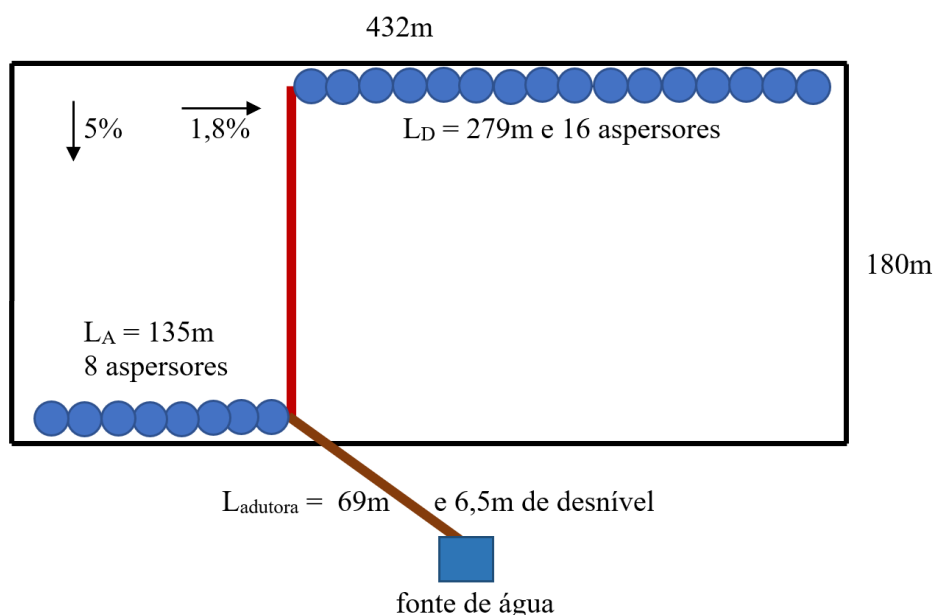


Figura 8. Croqui do projeto com linhas laterais emparelhadas, em aclive e em declive.

8.18 Considerações finais

Os sistemas de irrigação por aspersão convencional são estratégicos para a agricultura irrigada brasileira, presentes em, aproximadamente, 25% dos estabelecimentos agrícolas que utilizam irrigação. Cada vez mais concentrados em pequenas áreas, são dimensionados por técnicos que atuam na Extensão Rural ou em revendas de produtos agrícolas em geral, quando não são definidos pelos próprios agricultores irrigantes. Há um grande potencial de melhoria destes sistemas de irrigação, em particular, dos projetos, sendo que o desenvolvimento de programas computacionais e de aplicativos para smartphones com fundamentação conceitual é um dos caminhos para viabilizar esta evolução. A crescente disponibilização de sensores e a difusão da internet no meio rural, abrem caminho para o monitoramento dos equipamentos e o manejo da irrigação, com baixo custo. Fomentar estas linhas de atuação e promover o treinamento dos técnicos e irrigantes serão etapas fundamentais para que a irrigação por aspersão convencional seja adequada desde o projeto até o manejo cotidiano.

Agradecimentos

Alguns itens apresentados neste capítulo foram desenvolvidos a partir de apontamentos de aula do Prof. Dr. Edmar José Scaloppi, uma referência na área de Irrigação e que muito contribuiu na minha formação acadêmica. Agradeço também ao Eng^o Agr^o Caio Nascimento Fernandes, pela revisão do texto.

Referências

- ANDRINI, M.; SOUZA, C.; SAAD, J.C.C. Software slide para dimensionamento de linhas laterais em irrigação por aspersão convencional. **Irriga**, v.1. p.18-24, 2019. DOI: 10.15809/irriga.2019v1n1p18-24.
- BABAJIMOPOULOS, C.; TERZIDIS, G. Accurate explicit equations for the determination of pipe diameters. **International Journal of Agriculture and Forestry**, v.2, p.115-120, 2013. DOI: 115-120. 10.5923/j.ijhe.20130205.05.

- BROWN, G. The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance. **Proc. Environmental Water Resources History**, v.38, p.34-43, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/40650\(2003\)4](https://doi.org/10.1061/40650(2003)4). Acesso em: 30 abr. 2021.
- CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by Sprinkling, **California Agricultural Experiment Station Bulletin 670**, University of California, Berkeley. 1942.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkler and Trickle Irrigation**, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- LIOU, C.P. Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, n.124, p.951-954, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:9\(951\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:9(951)). Acesso em: 25 mar. 2021.
- MINHONI, R.T.A.; PEREIRA, F.F.S.; SILVA, T.B.G.; CASTRO, E.R.; SAAD, J.C.C. The performance of explicit formulas for determining the darcy-weisbach friction factor. **Engenharia Agrícola**, v.40, n.2, p.258-265, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p258-265/2020>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- PIMENTA, B.D.; ROBAINA, A.D.; PEITER, M.X.; MEZZOMO, W.; KIRCHNER, J.H.; BEN, L.H.B. Performance of explicit approximations of the coefficient of head loss for pressurized conduits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.5, p.301-307, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p301-307>. Acesso em: 23 mar. 2021.
- ROCHA, H.S.; MARQUES, P.A.A.; CAMARGO, A.P.; FRIZZONE, J.A.; SARETTA, E. Internal surface roughness of plastic pipes for irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, p.143-149, 2017. DOI 10.1590/1807-1929/agriambi.v21n3p143-149.
- SCALOPPI, E.J. Adjusted F factor for multiple outlet pipes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.114, p.169-174, 1988. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9437(1988)114:1(169).
- SCALOPPI, E.J.; ALLEN, R.G. Hydraulics of center-pivot laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.19, n.3, p.554-567, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:1\(91\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:1(91)). Acesso em: 23 mar. 2021.
- SWAMEE, P.K.; JAIN, A.K. Explicit equations for pipe flow problems. **Journal of Hydraulics Division**, n.102, p.657-664, 1976.
- VATANKHAH, A.R. Approximate Analytical Solutions for the Colebrook Equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, n.144, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001454.
- WU, P.; SARUWATARI, C.A.; GITLIN, H.M. Design of drip irrigation lateral length on uniform slopes. **Irrigation Science**, v.4, p.117-135, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00273380>. Acesso em: 23 mar. 2021.

CAPÍTULO 9

9 IRRIGAÇÃO COM DEFICIT

Luís Henrique Basso

Resumo

A ocorrência de *deficit* hídrico em plantas cultivadas afeta o crescimento e o desenvolvimento das culturas. Porém, em situações onde há a restrição quanto a disponibilidade de água para a irrigação, a necessidade de priorização de suprimento de água a um setor usuário que não seja a agricultura, e a existência de um elevado custo para a prática da irrigação, a aplicação de uma lâmina de água menor que a requerida em determinadas fases fenológicas das culturas, definida como irrigação com *deficit* ou deficitária, pode trazer menor custo operacional, pequena redução da produtividade, aumento da qualidade da produção, entre outros. Neste texto discute-se a irrigação com *deficit*, no tocante aos aspectos econômicos envolvidos; a importância da análise da irrigação sob o contexto da produtividade da água; a possibilidade do seu uso no Semiárido do Brasil, onde existem inúmeras áreas irrigadas; de modo geral, o conhecimento das respostas fisiológicas morfológicas e dos componentes de produção das culturas e, especificamente, de algumas culturas de interesse para o Brasil, com base nos resultados da pesquisa agrícola brasileira. Ao final, comentários e sugestões são apresentadas em relação ao caminho a seguir para que a prática da irrigação com *deficit* possa ser melhor conhecida, difundida e praticada na agricultura brasileira.

9.1 Introdução

A percepção que as pessoas têm sobre a falta de água e, especificamente, em relação àquela destinada à agricultura, está ligada geralmente aos ambientes semiáridos e áridos. No entanto, isso vem sendo mudado paulatinamente há alguns anos, em razão de alguns acontecimentos caracterizados pela redução temporária da disponibilidade de água em regiões onde existem elevada precipitação pluvial com boa distribuição ao longo do ano.

A crise hídrica de 2014 e 2015 na Região Sudeste e a de 2017, com maior impacto na Região Nordeste (principalmente Bahia, Ceará e Pernambuco) e no Distrito Federal são acontecimentos recentes. Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), foi observada a redução nos valores mensais de chuvas desde 2012 na Região Nordeste e desde outubro de 2013 na Região Sudeste, em relação aos registros históricos. Além das menores taxas pluviométricas verificadas, a gestão da demanda e a garantia da oferta podem agravar ou atenuar a ocorrência de uma crise hídrica. A valorização do recurso hídrico como bem público finito e a conscientização da necessidade de um uso mais racional e sustentável da água são essenciais para que se tenha maior garantia da oferta hídrica para os usos múltiplos. Deve-se também apoiar e aprimorar técnicas de reúso da água; reduzir o desperdício pelos diferentes setores usuários; implementar ações de conservação de mananciais; e investir em infraestrutura de forma a garantir maior capacidade de reservação e de acesso à água (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2015; 2018).

Em todos esses acontecimentos, houve restrição ao uso da água para irrigação e outras finalidades, e chamou a atenção da sociedade civil no tocante ao uso da água pela agricultura irrigada. Isso tem levado a acirrados debates sobre o uso da água destinada à agricultura, notadamente a irrigada, chegando até ao questionamento sobre o porquê do uso desse recurso natural para esse fim, em detrimentos de outros setores da sociedade que também utilizam água, como residências, indústrias e prestadores de serviços (hospitais, clínicas e

laboratórios de saúde humana e animal, hotéis, bares, restaurantes, padarias, etc.). Infelizmente, nem sempre a abordagem e a interpretação sobre a agricultura irrigada foram adequadas ou corretas.

Mas o que e como a agricultura irrigada pode contribuir para que haja uma maior eficácia e eficiência quanto ao uso da água? A irrigação com *deficit* pode ser um dos meios para que isso seja alcançado.

9.2 Irrigação com *deficit*: considerações sobre o seu uso

A possibilidade ou a viabilidade da irrigação com *deficit* tem sido avaliada há várias décadas, com diferentes relatos ou abordagens, os quais dependem da interação de diversos fatores. Deve-se ressaltar que a irrigação por *deficit* também pode ocorrer, indesejavelmente, por falhas no delineamento de um sistema de irrigação de uma cultura agrícola (a lâmina de água não atende a demanda hídrica da cultura) e, em uma maior escala, por falhas no planejamento e alocação de água em uma extensa área irrigada – perímetros irrigados (o volume de água entregue nas áreas a serem irrigadas é menor que o requerido).

9.3 Aspectos econômicos

Inicialmente, serão comentados superficialmente alguns aspectos econômicos sobre a prática da irrigação com *deficit*, relacionados às limitações de disponibilidade de água e de área agrícola.

A irrigação com *deficit* é a prática deliberada de irrigar uma cultura com um volume de água menor que o necessário, quando a disponibilidade desse recurso natural destinado a esse fim é limitada ou os custos para a prática da irrigação são elevados. O produtor deve admitir um possível estresse à cultura, o que pode trazer perdas à produção. Existem diferentes maneiras de manejar a irrigação deficitária, e estão relacionadas à redução da lâmina de irrigação, recarregando apenas parte da capacidade de armazenamento da água do solo na zona radicular da cultura. No caso da irrigação com *deficit* ser praticada com alta frequência ou o intervalo entre as irrigações for pequeno, a lâmina de água será aplicada em quantidades pequenas para evitar a redução brusca da umidade do solo ou permitir a diminuição da umidade do solo a um nível no qual a cultura sofrerá um estresse mais ou menos contínuo. Caso a irrigação com *deficit* seja praticada com baixa frequência ou em maiores intervalos entre as irrigações, a variação da umidade do solo ocorrerá em um intervalo bem maior, podendo haver um estresse à cultura. Ainda nesta última condição, caso haja uma aplicação de elevada lâmina de água seguida por um período sem irrigação, ou seja, ocorrendo apenas a extração de água do solo pela cultura, as plantas podem passar da elevada disponibilidade de água para um estresse em nível elevado, sendo que esse ciclo pode se repetir quando da realização da irrigação seguinte. As respostas das culturas a esses regimes de irrigação com *deficit* são diferentes (ENGLISH; NUSS, 1982; OEWIS; HACHUM, 2003). Na irrigação de superfície, a utilização de sulcos alternadamente ou mais separados é uma forma de implementar a irrigação deficitária (OEWIS; HACHUM, 2003). Para garantir o sucesso da irrigação deficitária, é necessário considerar a capacidade de retenção de água do solo. Em solos arenosos, as plantas podem rapidamente sofrer estresse hídrico sob irrigação deficitária, enquanto as plantas em solos profundos de textura fina, que possuem maior capacidade de retenção de água que solos arenosos, podem ter um maior tempo para se ajustar a menor disponibilidade de água e assim ter menores prejuízos. Portanto, é provável que a obtenção de bons resultados com a irrigação deficitária seja maior em solos de textura fina (KIRDA, 2002).

Quanto ao desempenho e custo do sistema de irrigação, pode haver um menor custo de capital com a prática da irrigação com *deficit*, pois a menor vazão requerida pode possibilitar

a utilização de tubos com menor diâmetro em sistemas que conduzem a água sob pressão. O requerimento de água e energia podem também ser menores e até ganhos podem ocorrer caso seja possível haver maiores intervalos entre irrigações - no caso do pivô central, pode não ser viável pelo tempo requerido para uma volta completa do sistema - ou pode ser viável a aplicação de água com menor uniformidade quanto ao umedecimento do solo - em sistemas de aspersão convencional (ENGLISH; NUSS, 1982).

No passado, as necessidades de irrigação das culturas não consideravam as limitações dos suprimentos de água disponível. O projeto de sistemas de irrigação não aborda as situações em que a disponibilidade de umidade do solo é a principal restrição à produtividade das culturas. Medidas agrônômicas como práticas de preparo do solo, uso de cobertura morta e de antitranspirantes e irrigação com *deficit*, podem reduzir a demanda por água de irrigação. Nesta última, plantas expostas a certos níveis de estresse hídrico durante um determinado período de crescimento ou durante todo o seu crescimento, pode não ter redução significativa na produtividade. As práticas de irrigação deficitária diferem das práticas tradicionais de fornecimento de água. O técnico encarregado do manejo da irrigação precisa saber o nível de deficiência de transpiração permitido sem redução significativa no rendimento da cultura. O principal objetivo da irrigação deficitária é aumentar a eficiência do uso de água de uma cultura, eliminando irrigações que têm pouco impacto sobre a produtividade. A redução de rendimento resultante pode ser pequena em comparação com os benefícios obtidos por meio do desvio da água economizada para irrigar outras culturas, para as quais a água normalmente seria insuficiente sob as práticas tradicionais de irrigação. Antes de implementar um programa de irrigação deficitária, é necessário conhecer as respostas do rendimento da cultura ao estresse hídrico, seja durante estágios de crescimento definidos ou ao longo de toda o ciclo de produção. As variedades de alto rendimento são mais sensíveis ao estresse hídrico do que as variedades de baixo rendimento. As culturas ou variedades de culturas mais adequadas para irrigação deficitária são aquelas com um período de crescimento menor e tolerantes à seca. Sob práticas de irrigação deficitária, as práticas agrônômicas podem exigir modificações, como a diminuição do estande de plantas, aplicação de menores doses de fertilizantes, adoção de datas de plantio flexíveis e seleção de variedades de estações mais curtas (KIRDA, 2002).

O uso de modelos de predição pode auxiliar na tomada de decisão quanto à alocação de água armazenada no subsolo ou na superfície, o chamado "banco de água", e pode ser importante ferramenta para a gestão da água em maior escala, inclusive para a prática da irrigação com *deficit*, quando deve-se decidir sobre qual espécie vegetal será cultivada, qual a área a ser cultivada e irrigada, e qual a lâmina de água a ser aplicada, o que está diretamente à quantidade e qualidade do produto agrícola (MARTIN *et al.*, 1989).

Uma análise econômica teórica desenvolvida por English (1990) mostra que, sob certas circunstâncias, o rendimento econômico máximo pode ser atingido com a irrigação com *deficit*, mas sob o contexto da engenharia de irrigação, é algo difícil de ser realizado, uma vez que o delineamento, planejamento ou manejo de um sistema de irrigação para tal prática tem que se basear em funções de produção, para que se saiba qual será a redução da produtividade da cultura com a redução de lâmina de irrigação. Existem incertezas nas funções de produção, devido à variabilidade do clima, solo, incidência de pragas e doenças, etc., o que implica em um risco econômico. Do ponto do custo de oportunidade da água (que reflete o valor da água para o seu melhor uso possível, e que é zero quando não há limitação de água ou possibilidade de mais de um uso), pode haver uma redução da capacidade da bomba e do diâmetro do tubo para condução da água em sistema de irrigação pressurizado. Outro fato a considerar é que o preço do produto agrícola influenciará em quanto a lâmina de irrigação poderá ser reduzida, uma vez que poderá reduzir a produtividade. Maior o preço do produto, maior será a possibilidade da redução da lâmina de irrigação para que se obtenha lucro.

Os benefícios da irrigação com *deficit* podem não ser aparentes quando apenas os custos imediatos de aplicação de água (energia, mão de obra) são considerados. Outros custos fixos, os custos variáveis e o capital empregado no sistema de produção devem também ser avaliados, uma vez que pode haver redução de gastos com sementes, defensivos agrícolas, colheita, juros aplicados ao capital de giro, impostos, etc. Em um caso de estudo com a cultura do trigo irrigada por aspersão, o custo de produção reduziu significativamente com a prática da irrigação com *deficit*, sendo que a redução dos custos diretos da irrigação (energia, mão de obra e manutenção) não foram tão significantes como as reduções com os custos variáveis (semente, defensivos agrícolas, colheita) e fixos. Além disso, a produtividade média de trigo por volume de água aplicada foi substancialmente maior para as áreas sob irrigação com *deficit*, em comparação com as áreas com irrigação plena, ou seja, sem restrição hídrica. O retorno líquido em relação à terra e em relação à água aplicada sob irrigação com *deficit* foram, respectivamente, menor em 25% e maior em 14,5%, em relação às áreas com irrigação plena (ENGLISH *et al.*, 1990).

English e Raja (1996) mostraram que, para culturas anuais (trigo, algodão e milho), o uso ótimo da água, que é a obtenção de lucro ou produtividade máximos por volume de água ou unidade de área, é dependente da finalidade do seu uso, ou seja, maximizar o lucro ou a produção de alimento, e qual é o fator mais limitante, a água ou a área a ser cultivada. No caso da irrigação com *deficit*, deve-se adicionalmente conhecer quais os níveis de *deficit* hídrico nos quais o retorno líquido se equivale ao obtido quando da prática da irrigação plena. No entanto, existem incertezas relacionadas às funções de produção – principalmente, custo e preço do produto agrícola, o que implica em riscos.

Também podem haver condições pouco favoráveis ou pouco viáveis para a prática da irrigação com *deficit*: quando os custos relacionados ao insumo água forem baixos em relação a outros custos de produção de uma determinada cultura; quando métodos ou sistemas de irrigação forem capazes de proporcionar uma alta eficiência ou uniformidade de irrigação - o que pode levar a uma alta eficiência de uso de água; quando a chuva for responsável apenas por uma pequena porcentagem das necessidades totais de água - indicando que o uso da irrigação poderá acarretar em ganhos consideráveis de produtividade; quando a produtividade é alta, resultantes da otimização do uso de outros insumos e o preço de mercado do produto é alto; quando haver problemas com salinidade - por não haver a aplicação da lâmina de lixiviação; e quando a área irrigável for limitada e a disponibilidade de água não for limitante (HARGREAVES; SAMANI, 1984). Complementando essas considerações, o custo da energia, quando baixo, poderia também desfavorecer o emprego da irrigação com *deficit*.

Uma outra abordagem considera duas situações em relação à agricultura irrigada. Na primeira, a necessidade de água de qualquer cultura poderá ser atendida pela irrigação durante todo o período correspondente ao seu ciclo de produção, enquanto que na segunda a disponibilidade de água não é suficiente para atender a necessidade de água de todas as culturas ou não é suficiente para atender a demanda durante todo o ciclo. Além disso, o delineamento do sistema na primeira situação, o da irrigação plena, poder ser mais simples que na segunda, o da irrigação com *deficit* (MANNOCCHI; MECARELLI, 1994).

9.4 Produtividade da água e sua relação com a irrigação com *deficit*

Em um sentido amplo, a produtividade da água pode ser estar relacionada ao valor ou ao benefício derivado do uso da água, sendo que a definição desse conceito pode variar em função do profissional envolvido quanto ao uso da água na agricultura. A obtenção de mais uma maior quantidade de biomassa (kg ou t) por unidade de água transpirada (mm) é um meio de expressar a produtividade quando a análise é realizada tendo a cultura como foco, mas em áreas extensas, como um perímetro irrigado ou uma bacia hidrográfica, a obtenção de um maior retorno econômico (R\$) por unidade de água utilizada para a irrigação (m³) ou

mesmo para culturas dependentes de chuvas pode ser uma maneira melhor de expressar a produtividade da água. Vê-se então que a medida da produtividade da água depende da escala de interesse (MOLDEN *et al.*, 2003). É um conceito mais amplo que a eficiência de uso da água, definida pela relação entre a biomassa produzida por unidade de volume de água por unidade de área cultivada ($\text{kg m}^{-3} \text{ha}^{-1}$, $\text{t m}^{-3} \text{ha}^{-1}$).

A necessidade de prestar mais atenção à produtividade da água é claramente vista quando olhamos para as relações entre produção e fornecimento de água às plantas. Após um aumento inicial abrupto, a produtividade da cultura atinge o seu máximo com uma determinada quantidade de água fornecida às plantas e, em seguida, diminui ou permanece em um nível relativamente alto mesmo que haja o aumento do fornecimento de água. Em situações sem restrição hídrica, a água é sempre utilizada na tentativa de maximizar a produção, mas isso acarreta na sua utilização em uma forma menos produtiva. Se a água é mais escassa do que a terra (nesse caso, a área a ser irrigada), então a irrigação deficitária é uma estratégia lógica porque maximiza o recurso mais escasso, a terra. No entanto, é improvável que os usuários de água para irrigação usem as chamadas funções de produção como uma grande motivação para usar a água de forma mais produtiva. A aplicação de lâminas de água menores que os valores requeridos é uma estratégia que pode ser altamente benéfica se houver a perspectiva de chuvas que resultarão em grandes aumentos de produtividade, mas também é uma estratégia de alto risco se o fornecimento de água pela irrigação for menor que as expectativas (MOLDEN *et al.*, 2003).

A prática da irrigação deficitária, com base em funções de produção das culturas em função da água fornecida às plantas, pode aumentar a produtividade da água em áreas irrigadas. A produtividade da água de uma cultura mostra uma variação espacial e temporal significativa. O risco de irrigação deficitária pode ser minimizado por meio de uma programação de irrigação adequada para evitar o estresse hídrico durante as fases de crescimento e desenvolvimento da cultura mais sensível ao estresse hídrico, ou seja, implica no conhecimento apropriado do uso da água pela cultura e suas respostas aos deficits hídricos, incluindo a identificação de períodos críticos de crescimento da cultura e dos impactos econômicos das estratégias de redução da produtividade. Os índices de sensibilidade ao estresse hídrico têm uma implicação importante para o planejamento da irrigação, em particular para a irrigação com *deficit*. O monitoramento quanto ao momento e a quantidade de lâminas de irrigação tornam-se então condição importante para o sucesso da irrigação com *deficit* (OWEIS; HACHUM, 2003; ZHANG, 2003). Além disso, outras práticas agrícolas, como a data de semeadura, que está relacionada com a necessidade de irrigação, e a irrigação suplementar com *deficit*, pode aumentar a produtividade da água. Neste caso, o conhecimento sobre a distribuição temporal das chuvas na área ou região também é primordial (OWEIS; HACHUM, 2003).

9.5 Irrigação com *deficit* no Semiárido do Brasil

No Semiárido do Brasil, região onde a quantidade de chuvas não é capaz de repor as perdas de água do sistema solo-planta para a atmosfera, as quais ocorrem pelo processo de evapotranspiração das culturas, a prática da irrigação é essencial para aumentar a possibilidade de êxito com a atividade agrícola. Nesta região, a fruticultura irrigada é uma das principais atividades econômicas, e é praticada em extensas áreas, dentro e fora de diversos perímetros irrigados implantados naquela região. Dessa forma, a viabilidade da irrigação com *deficit* pode parecer inviável nesta região. Os solos classificados como Latossolos e Argissolos formados sobre formação geológica de rochas cristalinas, representam a maior parte dos solos irrigados. No entanto, em outros tipos de solos no Semiárido, quando irrigados durante todo o ano e ao longo de vários anos, podem apresentar uma lenta redistribuição de água (drenagem) em suas camadas subsuperficiais, fazendo com que as mesmas armazenem água por longos períodos. Isso ocorre devido à presença de camadas adensadas do solo, originadas

durante o processo de formação (gênese) do solo e à sua profundidade de pequena a média. Desse modo, quando do cultivo de espécies frutíferas com sistemas radiculares profundos e tolerância à seca, o uso de práticas de irrigação com *deficit* fazer com que essa água armazenada no perfil do solo seja aproveitada pelas plantas. Para isso, o conhecimento do tipo de solo e o monitoramento da água no solo e na planta são essenciais para auxiliar os produtores na adoção de práticas de irrigação com *deficit*. Dependendo da cultura, benefícios como a eficiência no uso da água devem aumentar em cada unidade de área irrigada, sem prejuízo significativo da produção da cultura (BASSOI, 2014). A utilização de estratégias de irrigação por *deficit* é vista como uma oportunidade, entre outras, para diminuir a lâmina de água aplicada às culturas, e aumentar a eficiência de uso de água (BASSOI *et al.*, 2017).

9.6 Estratégias de irrigação com *deficit*

As práticas de irrigação com *deficit* - ID (*deficit irrigation - DI*) difere das práticas tradicionais de aplicação de água em uma cultura agrícola. O técnico irrigante precisa saber o nível de deficiência de transpiração permitido sem redução significativa na produtividade da cultura. O principal objetivo da irrigação deficitária é aumentar a eficiência de uso de água de uma cultura, eliminando irrigações que têm pouco impacto sobre a produtividade. A redução de rendimento agrícola resultante pode ser pequena em comparação com os benefícios obtidos com a economia de água para irrigar outras culturas para as quais a água normalmente seria insuficiente sob a prática de irrigação plena, sem restrição hídrica (KIRDA, 2002).

A irrigação com *deficit* controlado - IDC (*Regulated Deficit Irrigation - RDI*), foi desenvolvida para melhorar o controle do vigor vegetativo em pomares de alta densidade, e otimizar o tamanho, a fecundidade e a qualidade dos frutos. O IDC é geralmente aplicado durante o período de crescimento lento dos frutos, quando o crescimento dos ramos é rápido. No entanto, também pode ser aplicado após a colheita em variedades de maturação precoce. Além disso, o IDC pode gerar uma economia considerável de água. Assim, é útil para reduzir o vigor vegetativo excessivo e também para minimizar a irrigação e a perda de nutrientes por lixiviação (GOODWIN; BOLAND, 2002).

A IDC e a irrigação com o secamento parcial da zona radicular - SPR (*partial rootzone drying - PRD*) são executados para limitar o vigor vegetativo e melhorar a eficiência do uso da água em plantas perenes, como as espécies frutíferas. Essa mudança no manejo da cultura, em comparação com a irrigação plena, que usa mais água, é uma característica comum tanto para a IDC quanto para o SPR. Essas duas estratégias de irrigação deficitária, entretanto, diferem pelo fato que na IDC, a aplicação de água é manipulada ao longo do tempo, enquanto que no SPR a água é manipulada no espaço (KRIEDEMANN; GOODWIN, 2003).

A IDC é a prática de usar irrigação para manter o estado da água na planta dentro dos limites previstos de *deficit* em relação ao potencial máximo de água na planta. O objetivo da IDC é controlar o crescimento e desenvolvimento reprodutivo, crescimento vegetativo e / ou melhorar a eficiência do uso da água. O reumedecimento (retorno à aplicação de água) sob a IDC pode ser determinado com base no monitoramento do potencial de água na planta, da umidade do solo ou com base nas estimativas de uso de água pela cultura com base na evapotranspiração. O SPR é a prática de usar irrigação para alternadamente umedecer e secar os dois lados do sistema radicular da planta, e manter simultaneamente o estado da água na planta elevado, controlar o crescimento vegetativo, melhorar a eficiência do uso da água, mantendo o crescimento e desenvolvimento reprodutivo. O reumedecimento no SPR pode ser determinado de modo idêntico a IDC (KRIEDEMANN; GOODWIN, 2003).

9.7 Respostas fisiológicas e morfológicas das plantas ao *deficit* hídrico

As plantas perdem água do seu interior para a atmosfera através da transpiração, e caso essa perda leve a uma condição de *deficit* hídrico, há a interferência em alguns processos fisiológicos, como o acúmulo de ácido abscísico e de solutos, e a redução da fotossíntese, condutância estomática, síntese proteica, síntese de parede celular e expansão celular. Este último é o mais facilmente afetado pela falta de água. A sensibilidade de determinado processo fisiológico aos deficits hídricos é, em grande parte, um reflexo da estratégia da planta em lidar com a faixa de variação na disponibilidade de água que ela experimenta em seu ambiente. No entanto, a falta de água impõe alguns limites (potencial hídrico) aos processos fisiológicos, os quais variam com as espécies vegetais (HOLBROOK, 2017).

As plantas podem alterar a sua morfologia em resposta à falta de água (estresse abiótico). Uma alteração muito comum e facilmente reconhecida na área agrícola é a alteração das formas das folhas, como diminuição da área, modificação da orientação em relação à incidência de raios solares, o enrolamento e o aumento da espessura da cutícula, para diminuir a transpiração. A relação entre as raízes e a parte aérea é influenciada pela absorção de água pelo sistema radicular e a realização da fotossíntese pelas folhas. O dossel vegetativo tende a crescer até que a absorção de água pelas raízes seja limitante a o seu crescimento. Por sua vez, o sistema radicular tende a crescer até que sua demanda por produtos da fotossíntese seja maior que o fornecimento pelas folhas. No caso de um estresse hídrico acontecer, essa relação é modificada, pois a água é fator limitante para a parte aérea, o que faz com que a expansão foliar seja reduzida antes que a fotossíntese seja afetada, diminuindo assim o consumo de fotossintetizados pelo dossel vegetativo. Conseqüentemente, uma maior quantidade destes é enviado às raízes para que o seu crescimento continue, mas o mesmo também é sensível à disponibilidade de água no solo (BLUMWALD; MITTLER, 2017).

9.8 Respostas de culturas ao *deficit* hídrico

São apresentados a seguir alguns resultados de pesquisas realizadas no Brasil com algumas culturas que apresentam extensa área irrigada, ou apresentam interesse agrônômico e econômico elevados para o agronegócio brasileiro, ou ainda apresentam potencial para a irrigação com *deficit*. Evidentemente, a quantidade de culturas apresentadas não se esgota aqui, nem as informações apresentadas sobre as culturas listadas, mas demonstram que o tema *deficit* hídrico em culturas agrícolas é objeto de estudo pela pesquisa agropecuária brasileira há décadas.

9.8.1 Arroz

A época de interrupção da aplicação de água interfere no período de irrigação do arroz, podendo influenciar a produtividade e o uso da água pela cultura. No Rio Grande do Sul, a irrigação intermitente e a antecipação da interrupção da aplicação de água nos estádios de grão pastoso e leitoso reduziram, em média, o período de irrigação em 32, 16 e 9 dias, respectivamente, com correspondentes economias de água de 27,9%; 17,6% e 11,6%, relativamente à manutenção da irrigação por inundação até a maturação dos grãos. Esses manejos da água não afetaram a produtividade do arroz, e promoveram incremento na eficiência de uso da água (SCIVITTARO *et al.*, 2010). Caso o *deficit* hídrico seja imposto no perfilhamento (fase vegetativa), o número de panículas pode ser afetado significativamente, mas se imposto após a iniciação da panícula (fase reprodutiva), pode não haver diferenças em relação ao fornecimento de água sem restrições (CONCENÇO *et al.*, 2018). Em outra abordagem com o arroz irrigado por inundação, também no Rio Grande do sul, o potencial matricial da água no solo, ou a força com que o solo retém a água, não deve ser maior que 30 kPa (PARFITT *et al.*, 2017) para que não ocorra redução na produtividade, enquanto o

valor de 40 kPa é reportado (SILVA *et al.*, 2018) para que não haja perda da qualidade do grão.

Em Goiás, a resposta da taxa de transpiração ao *deficit* hídrico nas fases vegetativa e reprodutiva de três cultivares modernos de arroz de terras altas (BRS Primavera, BRSMG Curinga e BRS Soberana) mostrou que o fator de depleção de água no solo p , ou seja, em quanto o armazenamento de água no solo pode ser reduzido, deve ser menor na fase vegetativa em relação à fase reprodutiva, o que indica uma maior tolerância à restrição de água nesta segunda fase (HEINEMANN *et al.*, 2011). Também em Goiás, o genótipos de arroz de terras altas que apresentaram maior tolerância à deficiência hídrica apresentaram produtividade negativamente relacionada com a temperatura da folha (maior a temperatura, pior o estado hídrico da planta, menor a produtividade), a esterilidade de espiguetas e o número de dias para a ocorrência de 50% da emissão das panículas, enquanto que a fertilidade de perfilhos, número de panículas por m², massa de 100 grãos e altura da planta foi maior quanto mais tolerante a seca for o genótipo (GUIMARÃES *et al.*, 2013). A evapotranspiração do arroz de terras altas na fase de emissão da panícula (R₃) é maior em relação à observada no início do enchimento do grão (R₅), quando submetido a períodos semelhantes de redução da irrigação em ambas as fases de crescimento. A produção de grãos de arroz é mais sensível à irrigação com *deficit* imposto desde o início do enchimento de grãos do que a partir da emissão da panícula (GUIMARÃES *et al.*, 2016).

9.8.2 Feijão

Em Goiás, à medida que o intervalo de irrigação do feijoeiro aumentou, 20 dias após a semeadura, em função da adoção de diferentes potenciais de água no solo para definição do momento de aplicação de água, houve uma redução do número de vagens por planta e de grãos por vagem e, conseqüentemente, da produção de feijão, sendo que este decréscimo dependeu da demanda de evapotranspiração (STONE *et al.*, 1988). Também em Goiás, observou-se que durante 4 ciclos de cultivo do feijoeiro irrigado por aspersão convencional, com variação da lâmina de irrigação apenas entre 10 e 35 dias após a semeadura, a deficiência hídrica na fase vegetativa interferiu na produtividade (STONE; MOREIRA, 2001). Em Alagoas, comparativamente, a falta de água na fase vegetativa pode causar maiores perdas que na fase reprodutiva, entre floração e enchimento de grãos. O estresse causado pela deficiência hídrica também acarreta no aumento na temperatura foliar e da relação temperatura foliar / temperatura do ar, a redução da condutância estomática, da quantidade de água na folha e da fotossíntese (ENDRES *et al.*, 2010).

Em relação ao feijão caupi (gênero *Vigna*), no Ceará, quando o estresse hídrico foi aplicado em um único estágio fenológico, a sensibilidade à falta de água da cultura foi maior na fase de enchimento de grãos, seguida pela fase vegetativa e floração; quando o *deficit* de água foi aplicado em dois estágios fenológicos, a maior sensibilidade foi na fase vegetativa e enchimento de grãos (CORDEIRO *et al.*, 1998). No Piauí, o estresse hídrico aplicado durante a floração do feijão caupi causou redução da produção (número de vagens e número de sementes por vagem), independente do estresse hídrico ocorrido ou não na fase vegetativa (NASCIMENTO *et al.*, 2011). No mesmo estado, a redução da lâmina de irrigação no feijão caupi a partir de 30 dias após a semeadura, com base em 25, 50 e 75% da evapotranspiração de referência, mostrou que à medida que o *deficit* hídrico aumentou, houve menor conteúdo de água e de clorofila na folha, índice de área foliar e produtividade de grãos (BASTOS *et al.*, 2012).

9.8.3 Milho

Na cultura do milho, o período crítico da deficiência hídrica está compreendido entre a pré-floração ao início do enchimento de grãos, sendo que o número de grãos por espiga e o

número de espigas por planta são os componentes da produção de grãos mais afetados pelo *deficit* hídrico (BERGAMASCHI *et al.*, 2004). A falta de água durante a polinização das plantas ocasiona a maior redução na produção do milho, sendo que lâminas de irrigação correspondentes a cerca de 60% da lâmina necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo podem aumentar a eficiência da irrigação (BERGAMASCHI *et al.*, 2006). No milho doce, a reposição de lâminas de água menor que a correspondente a 80% da evapotranspiração da cultura (ETc) limita o crescimento das plantas e a produção (BRITO *et al.*, 2013). No Piauí, o *deficit* hídrico no milho, correspondente a 50% da lâmina de água requerida, reduziu os números de grãos e de espigas por m² e o rendimento de grãos, e aumentou a eficiência do uso da água, além de revelar diferenças significativas no tocante as respostas entre os genótipos avaliados (SOUSA *et al.*, 2015).

9.8.4 Trigo

A deficiência hídrica no trigo, aplicada quando as plantas atingiram o estágio fenológico de quarta folha (40 dias após a semeadura-das), folha-bandeira (64 das), antese (abertura da flor - 82 das) e grão leitoso (98 das), mostrou que, quanto ao rendimento de grãos, o estágio mais sensível foi o da folha bandeira (18 dias antes da antese), seguido do estágio da antese, nos quais houve redução de, respectivamente, 94% e 50% da produtividade; que no estágio de grão leitoso os níveis de deficiência hídrica impostos não afetam significativamente o rendimento de grãos, em relação às plantas sem *deficit* hídrico; que independentemente do estágio de desenvolvimento, o nível de deficiência hídrica de até -2,0 MPa (potencial hídrico foliar) não afeta significativamente o rendimento de grãos; e que dos componentes de rendimento, o número de grãos por espiga é o mais associado à redução da produtividade de grãos sob efeito da deficiência hídrica (RODRIGUES *et al.*, 1998). O *deficit* hídrico do solo fez com que houvesse uma redução do peso dos grãos de trigo quando ocorrido nos períodos de quarenta e um a sessenta dias anteriores à colheita. No período de quarenta e um a cinquenta dias anteriores à colheita, o rendimento de grãos também foi afetado negativamente. No entanto, o peso dos grãos foi influenciado positivamente pelo *deficit* hídrico do solo no período de um a dez dias anteriores à colheita (GUARIENTI *et al.*, 2005). A presença do *deficit* hídrico no início do período de florescimento de plantas de trigo ocasionou uma menor produção de fitomassa e de grãos, sendo que a diferença entre o desempenho de cultivares de trigo quanto a manutenção do potencial produtivo em condições de restrição de água pode ser avaliada pela recuperação do teor relativo de água nas folhas (SANTOS *et al.*, 2012b).

Sob a influência do estresse hídrico, a síntese de proteínas é inibida e a degradação de proteínas é acelerada, o que leva a um acúmulo de aminoácidos e aminas livres. Uma característica marcante de um distúrbio no metabolismo das proteínas é a mudança nas proporções dos aminoácidos e, frequentemente, um aumento elevado na concentração de prolina, diamina (putrescina) e poliaminas (espermidina e espermina). O aumento dos teores de prolina (aminoácido) e putrescina (diamina) em plantas de trigo é um indicativo da presença de estresse hídrico. O acúmulo desses compostos sob *deficit* hídrico tem sido associado com a tolerância das plantas a essa condição desfavorável, podendo representar um mecanismo regulador da perda de água, mediante aumento do potencial hídrico (FUMIS; PEDRAS, 2002).

9.8.5 Cana-de-açúcar

A deficiência hídrica durante a fase inicial de crescimento vegetativo da cana-de-açúcar pode reduzir a condutância estomática, transpiração foliar, fotossíntese líquida e a eficiência de uso da água de produção. Algumas variedades de cana-de-açúcar podem apresentar maior sensibilidade estomática, não apresentando redução na fotossíntese líquida, indicando maior tolerância à falta de água. O estresse hídrico, seja moderado (40 a 60% da água disponível do solo) ou severo (0 a 20 % da água disponível no solo), provocou pouca redução na

eficiência fotoquímica potencial da cana-de-açúcar (GONÇALVES *et al.*, 2010). Essa resposta da cana-de-açúcar à deficiência hídrica no início de seu desenvolvimento pode diferir entre cultivares, e as que apresentam maior largura da folha, número de folhas verdes, área foliar e densidade de estômatos podem ser consideradas tolerantes a um período prolongado de seca, podendo ser também mais produtivas (PINCELLI; SILVA, 2012). Considerando as fases de crescimento inicial, crescimento máximo e de acúmulo de sacarose no colmo, a susceptibilidade da cana-de-açúcar à restrição de água caracterizou-se pela redução de trocas gasosas (transpiração) nestas três fases, e de redução de matéria seca do colmo e do conteúdo de sólidos solúveis no caldo (MACHADO *et al.*, 2009).

Durante dois ciclos de produção de cana-de-açúcar, a redução da lâmina de água (55, 70, 85% da evapotranspiração da cultura - ETC) em três fases de seu desenvolvimento (brotação e perfilhamento, desenvolvimento e maturação) causou efeitos no seu crescimento (altura da planta) quando a restrição hídrica ocorreu na primeira fase de desenvolvimento. A área foliar foi prejudicada com a falta de água em todas as fases do seu desenvolvimento, em relação às plantas irrigadas com 100% da ETC. A qualidade tecnológica da cana-de-açúcar não foi alterada em função do *deficit* hídrico controlado nas diferentes fases de desenvolvimento. A produtividade da cana-de-açúcar foi maior utilizando-se *deficit* hídrico controlado de 70% da ETC na fase de brotação e perfilhamento de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. A fim de se garantir maior eficiência do uso da água, recomenda-se a aplicação de uma lâmina correspondente a 85% da ETC nas fases de maior desenvolvimento ou maturação do ciclo da cultura (SIMÕES *et al.*, 2018).

9.8.6 Soja

A fixação biológica de nitrogênio é altamente afetada pelo estresse hídrico, e pode reduzir significativamente o número de nódulos. Além disso, maiores rendimentos são obtidos quando existe disponibilidade de água no solo (SANTOS *et al.*, 2012a). Diferentes genótipos de soja apresentaram comportamentos diferentes quanto a fotossíntese e a transpiração quando em condições de restrição hídrica (30% da capacidade de campo), em comparação com a condição de 70% da capacidade de campo (CEREZINI *et al.*, 2012).

No Rio Grande do Sul, a ocorrência de *deficit* hídrico na soja de baixo e alto vigor de semente, aos 1-10, 11-20, 21-30 e 31-40 dias após a emergência (dae), mostrou que as plantas oriundas de semente com maior vigor apresentaram maior altura de planta, diâmetro do caule, índice de colheita aparente e rendimento biológico aparente, em relação àquelas originadas de semente com menor vigor, proporcionando aumento de até 20% na produtividade. O *deficit* hídrico no período vegetativo da soja não afetou a altura de inserção da primeira vagem, número de nós da haste principal, número de vagens com uma e duas sementes e o rendimento de sementes por planta, mas reduziu a altura de planta, diâmetro do caule e o número de vagens com três sementes, tanto em plantas oriundas de sementes de alto como de baixo vigor. O *deficit* hídrico a partir de 20 dias após emergência provoca redução da qualidade fisiológica das sementes de soja, sendo mais severo em plantas provenientes de sementes de baixo vigor (TAVARES *et al.*, 2013).

Em São Paulo, a avaliação da aplicação de água correspondente a 50% da evapotranspiração (ETC) da soja durante o desenvolvimento vegetativo, entre floração e início da frutificação, entre a completa formação de vagens à formação da produção, na maturação e durante todo o ciclo, mostrou que o *deficit* hídrico causou redução na produtividade quando aplicadas no ciclo total da cultura, e que a menor disponibilidade de água apenas no enchimento de grãos representa o mesmo risco de perdas em relação à ocorrência no ciclo total. A altura total das plantas, número de vagens por planta, número de grãos por planta, a massa de grãos foi prejudicada, o que afetou diretamente na produtividade. Em relação à altura de inserção da primeira vagem, variável qualitativa que pode representar perdas no

momento da colheita mecanizada, o *deficit* aplicado no estágio inicial foi prejudicial (GAVA *et al.*, 2015).

Os valores de condutância estomática, transpiração, taxa de fotossíntese da soja foram reduzidos significativamente com o aumento da tensão de água no solo, o que reduziu a produção de biomassa na parte aérea e nas raízes. As trocas gasosas (transpiração) nas plantas de soja também foram reduzidas com o aumento da tensão da água no solo, e as mais críticas foram observadas a partir de 25 kPa (SILVA *et al.*, 2020).

9.8.7 Algodão

No Piauí, foi observado que cultivares de algodão apresentaram tolerância ao *deficit* hídrico, não apresentando redução no seu desenvolvimento vegetativo e na produtividade quando o *deficit* foi aplicado na fase que antecede o florescimento, ou na fase compreendida entre o florescimento e o aparecimento das maçãs (BLANCO *et al.*, 2011).

Na Paraíba, o *deficit* hídrico restringiu o crescimento de dois cultivares de algodoeiro herbáceo (BRS 286 e BRS 336), com as fases mais sensíveis sendo as de crescimento inicial, de botão floral e de flor. O *deficit* de 14 dias, aplicados nas diferentes fases fenológicas, não influenciou a fotossíntese das plantas dos cultivares, mas alterou a condutâncias estomática e a transpiração das mesmas. As fases fenológicas de flor e de maçã foram as mais sensíveis ao *deficit* hídrico por apresentarem menor produção. Os tratamentos sem *deficit* em todo o ciclo e com *deficit* nas fases de crescimento inicial e de capulho, de ambos os cultivares de algodoeiro herbáceo, permitiram produtividade satisfatória em relação à média nacional (CORDÃO *et al.*, 2018).

No Rio Grande do Norte, a irrigação com *deficit* ocasionou declínio na produtividade de algodão em caroço, na percentagem e qualidade das fibras. Os cultivares FiberMax-993 e BRS-286 apresentaram as maiores produtividades e percentagem de fibras entre os cultivares avaliadas. Com a lâmina de irrigação de 40% da ET_c os cultivares de fibra média (FiberMax-993, BRS-286 e BRS-335) apresentaram fibras curtas, e o cultivar de fibra longa (BRS-336) apresentou fibra média. De forma geral, a redução na qualidade da fibra não foi severa, estando dentro da faixa de qualidade aceitável pela indústria têxtil nacional, mesmo em condições de *deficit* hídrico. Em regiões com *deficit* hídrico o algodoeiro pode ser irrigado com lâmina de 70% da ET_c, com produtividade média acima de 4.000 kg ha⁻¹e boa qualidade da fibra (ZONTA *et al.*, 2015).

9.8.8 Uva

A irrigação com *deficit* é utilizada para controlar o vigor vegetativo da videira de vinho, e a composição da uva pode ser influenciada pela disponibilidade de água no solo.

A irrigação com *deficit* controlado - IDC (esgotamento até 60% da água total disponível no solo, iniciada no início da maturação dos frutos) e o secamento parcial do sistema radicular - SPR (14 dias de irrigação em um lado da videira, iniciada na frutificação) foram avaliados na videira 'Syrah' em Pernambuco. A quantidade de água aplicada foi ligeiramente menor no SPR, e a eficiência do uso da água foi um pouco maior que no IDC. A fenologia, medidas fisiológicas (fotossíntese líquida, transpiração, resistência estomática, potencial hídrico foliar), produção, número e peso dos cachos, sólidos solúveis totais e acidez total titulável não foram influenciados pelas estratégias de irrigação. Apenas a concentração de fenol foi maior com o SPR (BASSOI *et al.*, 2007).

Também em Pernambuco, as estratégias de irrigação com *deficit* - ID e irrigação com *deficit* controlado - IDC aplicadas na videira de vinho 'Syrah', durante a estação chuvosa e seca, alteraram alguns componentes quantitativos e qualitativos da uva, de maneiras distintas.

As plantas de ambas as estratégias apresentaram diferenças quanto ao potencial hídrico foliar, indicando um estresse hídrico moderado. O número de cachos não foi afetado em ambos os ciclos pelas estratégias de irrigação deficitária, mas o peso de cachos por planta, peso médio do cacho e sólidos solúveis foram maiores na irrigação plena, sem restrição hídrica no ciclo do período "seco". As estratégias de irrigação com *deficit*, aplicadas após o pegamento do fruto, propiciaram uma economia na utilização da água (BASSOI *et al.*, 2015). A redução da lâmina de irrigação reduziu o potencial hídrico das folhas, influenciando na atividade fotossintética e causando o decréscimo de produção. Vinhos obtidos de uvas de plantas sob ID e IDC apresentaram maiores valores de teor alcoólico, ácidos málico e láctico, flavonóis, estilbenos, antocianinas, epicatequina, epicatequina galato e procianidina A2, podendo ser destinados à elaboração de vinhos de guarda, enquanto que vinhos de videiras com irrigação plena (IP) apresentaram os maiores valores de ácidos ascórbico e tartárico, menores teores alcoólicos e compostos fenólicos em geral, podendo ser classificados como vinhos jovens (NASCIMENTO *et al.*, 2016). O IDC também favoreceu maior teores de Mg, Na e Mn, enquanto o P foi maior na IP. O Cd, Cr, Fe e Zn não foram influenciados pelas estratégias de irrigação. As estratégias de irrigação podem ser recomendadas para a obtenção de diferentes produtos, sendo a IP para vinhos jovens e de menor valor agregado, e a IDC e a ID para vinhos de guarda e de maior valor agregado (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

9.8.9 Mangueira

No Sudoeste da Bahia, o *deficit* total ou parcial de água no solo causou a redução da taxa de fotossíntese da mangueira 'Tommy Atkins'. A aplicação de irrigação com *deficit* controlado com 50% ETc durante a fase de maturação fisiológica dos frutos resultou em maior produtividade e melhor eficiência no uso da água, mas o IDC com 50% da ETC aplicado durante a fase de frutificação e a ausência de irrigação causaram redução significativa da produtividade (SANTOS *et al.*, 2014).

9.8.10 Citros

Na Bahia, o SPR foi realizado pela alternância periódica (7, 14 ou 21 dias) dos lados em que o microaspersor umedecia o sistema radicular das plantas de lima ácida 'Tahiti', e aplicava uma lâmina d'água equivalente a 50% da evapotranspiração da cultura (ETc). A comparação foi feita com a irrigação com *deficit* com 50% da ETc, tendo o microaspersor fixo em um dos lados das plantas, e ao tratamento 100% da ETc, com microaspersores de ambos os lados das plantas. Avaliou-se também o SPR (21 dias) com diminuição da irrigação em 25% da ETc. O SPR com 50% da ETc não difere da IDC com esse mesmo *deficit* e sem alternância de lados da irrigação em relação à produtividade, eficiência do uso da água, e diâmetro e peso dos frutos, independentemente do período de alternância dos lados de irrigação. O SPR com diminuição da irrigação em 25% da ETc não causou perdas em relação à irrigação sem *deficit* e sem localização da irrigação (SAMPAIO *et al.*, 2010).

A produtividade da laranja Pera-IAC, a qualidade do suco e a eficiência do uso da água foram avaliados durante cinco ciclos de produção em São Paulo. A irrigação melhorou a produção de frutos em três das cinco safras, mesmo aplicando apenas 25% da ETc. Os incrementos de rendimento da irrigação variaram de 15 a 64% quando comparados às plantas não irrigadas. A irrigação deficitária melhorou a qualidade dos frutos em comparação com as plantas irrigadas com 100% da ETC, uma vez que resultou em menor acidez e maior índice de maturação. Após cinco colheitas, a produção de frutos nos tratamentos irrigados aumentou 30,8% em relação às plantas não irrigadas. A eficiência do uso da água mostrou que a irrigação deficitária com 50% de ETc é uma estratégia interessante para aumentar a produtividade, qualidade e economia de água (SILVEIRA *et al.*, 2020).

9.8.11 Café

Em São Paulo, avaliação feita com base em 16 anos mostrou que o mês de maio é o mais importante quanto à redução da evapotranspiração do cafeeiro, o que afetou a sua produção. O mês de agosto deve ser o mês indicado para a suspensão da irrigação para a indução do florescimento no cafeeiro (ARRUDA; GRANDE, 2003).

Em Goiás, a irrigação por gotejamento durante todo o ano total e sem *deficit* hídrico no cafeeiro 'Mundo Novo' proporcionou a maior produtividade, com acréscimos de até 100% quando comparada às plantas não irrigadas, em três anos de avaliação. A supressão da irrigação no período chuvoso provocou redução de até 32% na produção, devido à incidência de veranicos e má distribuição de chuvas (FERNANDES *et al.*, 2000).

No Espírito Santo, o cafeeiro 'Conilon' irrigado por aspersão fixa, com cinco anos de idade, foi avaliado quanto a interrupção da irrigação por três, cinco, sete e nove semanas, a partir do início de julho. As plantas não irrigadas, irrigadas durante todo o período e com irrigação interrompida durante nove semanas, apresentaram maiores percentuais de uniformidade da florada no estágio E₆. O estágio E₅ de desenvolvimento do botão floral se mostrou como melhor estágio para definir o momento para retornar a irrigação. O emprego de um período de supressão das irrigações não afetou o crescimento dos ramos que dão origem a ramos terciários, independente, independente da irrigação ou não (MARSETTI *et al.*, 2013).

No Cerrado, Minas Geras, a concentração da florada foi avaliada em função do *deficit* hídrico aplicado nos meses de julho e agosto, nos cultivares de café Bourbon Amarelo J9 e Catuaí Vermelho IAC-144. O primeiro cultivar atingiu maior nível de *deficit* hídrico. As trocas gasosas (transpiração), a produtividade, a uniformidade de maturação de frutos e a classificação dos grãos beneficiados não foram afetados por níveis moderados de *deficit* hídrico. O percentual máximo de botões florais no estágio E₄, imediatamente antes da ocorrência da "chuva de florada", não é afetado pelos níveis de *deficit* impostos durante o inverno. O estado hídrico dos botões florais não se sobrepõe ao efeito da chuva de florada, que foi determinante para sua abertura (RONCHI *et al.*, 2015).

9.9 Considerações finais

A irrigação com *deficit* pode trazer benefícios em determinadas condições, as quais dependerão do delineamento do sistema de irrigação, de um manejo de irrigação adequado às condições locais de disponibilidade de água, solo, clima e espécie vegetal a ser cultivada. A irrigação com *deficit* requer mais controle sobre a quantidade e o tempo de aplicação de água do que a prática da irrigação plena, sem restrição hídrica. No entanto, informações são necessárias para orientar os agricultores sobre quando e quanto aplicar com a irrigação deficitária, a fim de reduzir o efeito do estresse hídrico na produtividade das culturas. A avaliação de genótipos de espécies vegetais de interesse agrônomo em relação ao *deficit* hídrico há muito tempo é realizada por instituições de pesquisa agrícola no Brasil. Com funções confiáveis de produção de água da cultura e conhecimento das fases da cultura que são sensíveis ao estresse hídrico, a irrigação com *deficit* ideal pode ser programada com uma redução de rendimento mínima em comparação com a irrigação plena e, portanto, o recurso água poderá ser utilizado de forma mais eficiente. Existem informações insuficientes a esse respeito no Brasil, o que aponta uma área de pesquisa a ser desenvolvida no nosso país.

Em muitos dos trabalhos realizados sobre *deficit* hídrico em uma cultura agrícola, muitas respostas das plantas são medidas, como a condutância ou resistência estomática (abertura dos estômatos), transpiração, temperatura e teor de clorofila da folha, potencial (força com que a água é retida) e conteúdo de água no tecido vegetal (folha). Em relação ao solo, as medidas do seu conteúdo de água (umidade do solo) e da força com que o solo a

retém (potencial matricial de água no solo) são as mais frequentes. Uma mesma cultura, mas em locais diferentes, pode apresentar respostas de comportamentos fisiológico e morfológico similares ou diferentes, em função do genótipo ou cultivar, das condições de solo (profundidade; porcentagem de areia, silte e argila; capacidade de armazenamento de água; presença ou não de gradiente textural), clima (magnitude e distribuição das chuvas ao longo do período de cultivo; incidência de radiação solar que por sua vez afeta a temperatura, umidade e *deficit* de saturação do ar e a evapotranspiração) e das práticas culturais adotadas (tipo e dose de fertilizante; época e espaçamento de plantio). Por isso, a experimentação local é importante para que se conheçam as respostas das plantas ao *deficit* hídrico onde serão cultivadas, as quais são expressas por medidas que servem como índices do momento de ocorrência e da intensidade do *deficit* hídrico e suas possíveis consequências, os quais podem auxiliar no manejo da irrigação com *deficit*. Assim, a instrumentação tem papel importante para que esse comportamento da água na planta e no solo possa ser seja conhecido e auxiliie na definição de quando e quanto aplicar água, e quando diminuir ou interromper, ou ainda, em quanto diminuir a aplicação de água. Instrumentos de custo acessível aos produtores e técnicos, e de fácil operacionalidade, são necessários, além da difusão do conhecimento sobre o seu uso e capacitação de usuários para o seu correto manuseio e interpretação de suas medidas.

A irrigação com *deficit* é uma prática que vem sendo avaliada e difundida em vários países (África do Sul, Austrália, Estados Unidos, Índia, Israel, Turquia, etc.), sendo recomendada por agências governamentais. No Brasil, essa prática precisa ter uma maior abordagem nas universidades, em órgãos governamentais relacionados à gestão da água na agricultura e ao desenvolvimento de áreas irrigadas, e em empresas particulares de implantação de projetos e consultoria em irrigação. As incertezas (margem de erro) sobre o risco envolvido na prática da irrigação com *deficit* sobre a redução da produtividade agrícola e do lucro podem justificar a falta de interesse, mas não devem impedir a dedicação sobre o assunto, tornando-se assim um tema para futuras ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018**: informe anual. Brasília: ANA, 72p., 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos Hídricos no Brasil**. Informe 2014. Encarte Espacial sobre a Crise Hídrica. Brasília: ANA, 30p., 2015.
- ARRUDA, F.B.; GRANDE, M.A. Fator de resposta da produção do cafeeiro ao *deficit* hídrico em Campinas. **Bragantia**, v.62, n.1, p.139-145, 2003.
- BASSOI, L.H. Monitoring soil water in irrigated soils of the Brazilian semi-arid region: An opportunity to improve water use. In: TEIXEIRA, W.G.; CEDDIA, M.B.; OTTONI, M.V.; DONNAGEMA, G.K. (Org.). **Application of Soil Physics in Environmental Analyses**, 1. Ed. Cham: Springer International Publishing, p.223-236, 2014.
- BASSOI, L.H.; CORREIA, J.S.; SANTOS, A.R.L.; SILVA, J.A.; COSTA, B.R.S. Deficit irrigation in grapevine cv. Syrah during two growing seasons in the Brazilian Semiarid. **Engenharia Agrícola**, v.35, p.430-441, 2015.
- BASSOI, L.H.; DANTAS, B.F.; LIMA FILHO, J.M.P.; LIMA, M.A.C.; LEÃO, P.C.S.; SILVA, D.J.; MAIA, J.L.T.; SOUZA, C.R.; SILVA, J.A.M.; RAMOS, M.M. Preliminary results of a long-term experiment about RDI and PRD irrigation strategies in wine grapes in São Francisco Valley, Brazil. **Acta Horticulturae**, p.275-282, 2007.
- BASSOI, L.H.; GONDIM, R.S.; RESENDE, R.S.; ANDRADE JUNIOR, A.S. A agricultura irrigada no Nordeste do Brasil: estado da arte, desafios e oportunidades. In: RODRIGUES, L.N.; DOMINGUES,

- F.D. (Org.). Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável. Fortaleza: **Inovagri**, p.131-166, 2017.
- BASTOS, E.A.; RAMOS, H.M.M.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; NASCIMENTO, F.N.; CARDOSO, M.J. Parâmetros fisiológicos e produtividade de grãos verdes do feijão-caupi sob *deficit* hídrico. **Water Resources and Irrigation Management**, v.1, n.1, p.31-37, 2012.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BERGONCI, J.I.; BIANCHI, C.A.M.; MÜLLER, A.G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.831-839, 2004.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J.I.; MÜLLER, A.G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A.O.; RADIN, B.; BIANCHI, C.A.M.; PEREIRA, P.G. *Deficit* hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.243-249, 2006.
- BLANCO, F.F.; RIBEIRO, V.Q.; RIBEIRO, J.L.; NOGUEIRA, C.C.P.; VELOSO, M.E.C. Crescimento e produção de cultivares de algodão sob irrigação com *deficit*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 8, 2011, São Paulo. **Anais**. Brasília: ABRAPA, 2011.
- BLUMWALD, E.; MITTLER, R. Estresses abióticos. In: TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. (Ed.). **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed. p.731-761, 2017.
- BRITO, M.E.B.; ARAÚJO FILHO, G.D.; WANDERLEY, J.A.C.; MELO, A.S.; COSTA, F.B.; FERREIRA, M.G.P. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v.29, n.5, p.1244-1254, 2013.
- CEREZINI, P.; FAGOTTI, D.S.L.; KUWANO, B.H.; SOUZA, D.I.; PIPOLO, V.C.; PIPOLO, A.E.; HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M.A. Aspectos nutricionais e fisiológicos em genótipos de soja com diferentes níveis de tolerância à restrição hídrica. In: FERTBIO 2012, Maceio. Viçosa: SBCS, 2012.
- CONCENÇO, G.; PARFITT, J.M.B.; MOISINHO, I.S.; BUENO, M.V.; SILVA, J.T.; CONCENÇO, S.E. Rice yield components under water stress imposed at different growth stages. **Journal of Agricultural Science**, v.10, n.3, p. 290-297, 2018.
- CORDÃO, M.A.; ARAÚJO, W.P.; PEREIRA, J.R.; ZONTA, J.H.; LIMA, R.P.; FERREIRA, F.N. Cultivares de algodoeiro herbáceo sob *deficit* hídrico aplicado em fases fenológicas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.13, n.3, p.313-321, 2018.
- CORDEIRO, L.G.; BEZERRA, F.M.L.; SANTOS, J.J.A.; MIRANDA, E.P. Fator de sensibilidade ao *deficit* hídrico da cultura do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.2, p.153-157, 1998.
- ENDRES, L.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; MARROQUIM, P.M.G.; SANTOS, C.M.; BRITO, J.E.D. Gas exchange alteration caused by water deficit during the bean reproductive stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.1, p.11-16, 2010.
- ENGLISH, M. Deficit irrigation. I: Analytical framework. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.116, n.3, p. 399-412, 1990.
- ENGLISH, M.; JAMES, L.; CHEN, C.F. Deficit Irrigation. II: Observations. In: Columbia Basin. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.116, n.3, p.413-426, 1990.
- ENGLISH, M.; RAJA, S.N. Perspectives on deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v.32, p.1-14, 1996.
- ENGLISH, M.J.; NUSS, G.S. Designing for deficit irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.108, n.2, p.91-106, 1982.
- FERNANDES, A.S.L.T.; SANTINATO, R.; LESSI, R.; YAMADA, A.; SILVA, V.A. Deficiência hídrica e uso de granulados em lavoura cafeeira irrigada por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.3, p.376-381, 2000.
- FUMIS, T.F.; PEDRAS, J.F. Variação nos níveis de prolina, diamina e poliaminas em cultivares de trigo submetidas a deficits hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.4, p.449-453, 2002.

- GAVA, R.; FRIZZONE, J.A.; SNYDER, R.L.; JOSE, J.V.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; PERBONI, A. Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.9, n.6, p.349-359, 2015.
- GONÇALVES, E.R.; FERREIRA, V.M.; SILVA, J.V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T.P.; DUARTE, W.G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.378-386, 2010.
- GOODWIN, I.; BOLAND, A.M. Scheduling deficit irrigation of fruit trees for optimizing water use efficiency. In: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Ed.). **Water Reports, Deficit irrigation practices**. Rome: FAO. n.22, p.67-78, 2002.
- GUARIENTI, E.M.; CIACCO, C.F.; CUNHA, G.R.; DEL DUCA, L.J.A.; CAMARGO, C.M.O. Efeitos da precipitação pluvial, da umidade relativa do ar e de excesso e *deficit* hídrico do solo no peso do hectolitro, no peso de mil grãos e no rendimento de grãos de trigo. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, n.3, p.412-418, 2005.
- GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; RANGEL, P.H.N.; SILVA, A.C.L. Tolerance of upland rice genotypes to water deficit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.8, p.805-810, 2013.
- GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; SILVA, A.C.L. Evapotranspiration and grain yield of upland rice as affected by water deficit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.5, p.441-446, 2016.
- HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Economic considerations of deficit irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage**, v.110, n.4, p.343-358, 1984.
- HEINEMANN, A.B.; STONE, L.F.; FAGERIA, N.K. Transpiration rate response to water deficit during vegetative and reproductive phases of upland rice cultivars. **Scientia Agrícola**, v.68, n.1, p.24-30, 2011.
- HOLBROOK, N.M. Água e células vegetais. In: TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. (Ed.). **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, p.83-98, 2017.
- KIRDA, C. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. In: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Ed.). **Water Reports. Deficit irrigation practices**. Rome: FAO, n.22, p.3-10, 2002.
- KRIEDEMANN, P.E.; GOODWIN, I. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. An overview of principles and applications. Canberra: **Land & Water Australia**, 102p., 2003.
- MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao *deficit* hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.
- MANNOCCHI, F.; MECARELLI, P. Optimization analysis of deficit irrigation systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.120, n.3, p.484-503, 1994.
- MARSETTI, M.M.S.; BONOMO, R.; PARTELLI, F.L.; SARAIVA, G.S. *Deficit* hídrico e fatores climáticos na uniformidade da florada do cafeeiro Conilon irrigado. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.7, n.6, p.371-380, 2013.
- MARTIN, D.; BROCKLIN, J.; WIMES, G. Operating Rules for Deficit Irrigation Management. **Transactions of the ASAE**, v.32, n.4, p.1207-1215, 1989.
- MOLDEN, D.; MURRAY-RUST, H.; SAKTHIVADIVEL, R.; MAKIN, I. A water-productivity framework for understanding and action. In: JACOB, W; KIJNE, R.B.; DAVID, M. (Ed). **Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement**. Colombo: International Water Management Institute, p.1-18, 2003.
- NASCIMENTO, R.L.; SILVA, J.A.B.; BASSOI, L.H.; PEREIRA, G.E.; COSTA, B.R.S.; OLIVEIRA, V.S. Trocas gasosas e composição físico-química de vinhos em função de estratégias de irrigação. **Irriga**, v.especial, p.205-217, 2016.

- NASCIMENTO, S.P.; BASTOS, E.A.; ARAÚJO, E.C.E.; FREIRE FILHO, F.R.; SILVA, E.M. Tolerância ao *deficit* hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.8, p-853-860, 2011.
- OLIVEIRA, V.S.; PEREIRA, G.E.; LIMA, A.M.M.; SALVIANO, A.M.; NASCIMENTO, R.L.; BASSOI, L.H. Influence of irrigation strategies on the physicochemical properties of 'Syrah' wine produced in São Francisco Valley. **Irriga**, v.23, p.818-834, 2018.
- OWEIS, T.Y.; HACHUM, A.Y. Improving water productivity in the dry areas of West Asia and North Africa. In: JACOB, W.; KIJNE, R.B.; DAVID, M. (Ed). **Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement**. Colombo: International Water Management Institute, p.179-189, 2003.
- PARFITT, J.M.B.; CONCENÇO, G.; DOWNING, K.; LARUE, J.; SILVA, J.T. Rice growth under water stress levels imposed at distinct developmental stages. **Revista de Ciências Agrárias**, v.40, n.3, p.587-596, 2017.
- PINCELLI, R.P.; SILVA, M.A. Alterações morfológicas foliares em cultivares de cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica. **Bioscience Journal**, v.28, n.4, p. 546-556, 2012.
- RODRIGUES, O.; LHAMBY, J.C.B.; DIDONEP, A.D.; MARCHESI, J.A.; SCIPIONI, C. Efeito da deficiência hídrica na produção de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.6, p.839-846, 1998.
- RONCHI, C.P.; ARAÚJO, F.C.; ALMEIDA, W.L.; SILVA, M.A.A.; MAGALHÃES, C.E.O.; OLIVEIRA, L.B.; DRUMOND, L.C.D. Respostas ecofisiológicas de cafeeiros submetidos ao *deficit* hídrico para concentração da florada no Cerrado de Minas Gerais. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.50, n.1, p.24-32, 2015.
- SAMPAIO, A.H.R.; COELHO FILHO, M.A.; COELHO, E.F.; DANIEL, R.; MACHADO, V.V.; CARVALHO, G.C.; SANTANA JUNIOR, E.B. *Deficit* hídrico e secamento parcial do sistema radicular em pomar de lima ácida. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.45, n.10, p.1141-1148, 2010.
- SANTOS, D.; GUIMARÃES, V.F.; KLEIN, J.; FIOREZE, S.L.; MACEDO JÚNIOR, E.K. Cultivares de trigo submetidas a *deficit* hídrico no início do florescimento, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.8, p.836-842, 2012.
- SANTOS, E.L.; CATTELAN, A.J.; PRETE, C.E.C.; NEUMAIER, N.; OLIVEIRA, M.C.N.; FARIA, J.R.B.; CARVALHO, J.F.C.; NEPOMUCENO, A.L. Water stress affecting nodulation, oil, protein and grain yield of soybean cultivars. **Global Science and Technology**, v.5, n.2, p.109-120, 2012.
- SANTOS, M.R.; MARTINEZ, M.A.; DONATO, S.L.R.; COELHO, E.F. 'Tommy Atkins' mango yield and photosynthesis under water deficit in semiarid region of Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.9, p.899-907, 2014.
- SCIVITTARO, W.; STEINMETZ, S.; SEVERO, A.C.M. **Demanda hídrica e eficiência de uso da água pelo arroz**: influência do período de supressão da irrigação. Boletim de pesquisa e desenvolvimento. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, n.132, 21p., 2010.
- SILVA, J.A.; SANTOS, P.A.B.; CARVALHO, L.G.; MOURA, E.G.; ANDRADE, F.R. Gas exchanges and growth of soybean cultivars submitted to water deficiency. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.50, e58854, 2020.
- SILVA, J.T.; CAMPOS, A.D.S.; TIMM, P.A.; BUENO, M.V.; PARFITT, J.M.B.; CONCENÇO, G. Soil water tension and rice grain quality. **Revista de Ciências Agrárias**, v.41, n.2, p.502-509, 2018.
- SILVEIRA, L.K.; PAVÃO, G.C.; SANTOS DIAS, C.T.; QUAGGIO, J.A.; PIRES, R.C.M. Deficit irrigation effect on fruit yield, quality and water use efficiency: A long-term study on Pêra-IAC sweet orange. **Agricultural Water Management**, v.231, p.106019, 2020.
- SIMÕES, W.L.; CALGARO, M.; GUIMARÃES, M.J.M.; OLIVEIRA, A.R.; PINHEIRO, M.P.M.A. Sugarcane crops with controlled water deficit in the Sub-middle São Francisco Valley, Brazil. **Revista Caatinga**, v.31, n.4, p.963-971, 2018.

SOUSA, R.S.; BASTOS, E.A.; CARDOSO, M.J.; RIBEIRO, V.Q.; BRITO, R.R. Desempenho produtivo de genótipos de milho sob *deficit* hídrico. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.14, n.1, p.49-60, 2015.

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A. Resposta do feijoeiro ao nitrogênio em cobertura, sob diferentes lâminas de irrigação e preparos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.3, p.473-481, 2001.

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A.; SILVA, S.C. Efeitos da tensão da água do solo sobre a produtividade e crescimento do feijoeiro I. Produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.23, n.2, p.161-167, 1988.

TAVARES, L.C.; RUFINO, C.A.; TUNES, L.M.; BARROS, C.S.A. Rendimento e qualidade de sementes de soja de alto e baixo vigor submetidas ao *deficit* hídrico. **Interciência**, n.1, v.38, p.73-80, 2013.

ZHANG, H. Improving water productivity through deficit irrigation: Examples from Syria, the North China Plain and Oregon, USA. In: JACOB, W.; KIJNE, R.B.; DAVID, MOLDEN (Ed). **Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement**. Colombo: International Water Management Institute, p.301-310, 2003.

ZONTA, J.H.; BEZERRA, J.R.C.; SOFIATTI, V.; FARIAS, F.J.C.; CARVALHO, L.P. Efeito da irrigação no rendimento e qualidade de fibras em cultivares de algodoeiro herbáceo. **Revista Caatinga**, n.4, v.28, p.43-52, 2015.

CAPÍTULO 10

10 IRRIGAÇÃO DE BAIXO CUSTO POR SULCOS

Edmar José Scaloppi

Resumo

A irrigação por sulcos representa um dos sistemas mais econômicos e, provavelmente, um dos mais utilizados no mundo, apesar de pouco difundido no Brasil. Apresenta uma lista considerável de características vantajosas e admite-se que a reduzida participação na área irrigada nacional seja determinada por desconhecimento de suas potencialidades, a inexistência de divulgação por não envolver interesses comerciais e a consequente marginalização em cursos de graduação, pós-graduação e aperfeiçoamento. A reduzida proporção das áreas irrigadas relativamente às áreas cultivadas no país revela que, apesar dos reconhecidos benefícios, a irrigação constitui uma alternativa onerosa, restritiva à maioria dos agricultores. A presente proposta foi desenvolvida basicamente para redução de custos fixos e variáveis, em função de rigoroso protocolo tecnológico, econômico, ambiental e social, procurando inserir um maior número de agricultores aos reconhecidos benefícios da agricultura irrigada e envolver os interessados no dimensionamento, instalação e operação do sistema e no manejo da irrigação, tornando-os competentes gestores em seus projetos. O processo de aplicação de água foi intencionalmente simplificado, resumindo-se apenas nas fases de avanço e recesso da água na superfície de escoamento. O dimensionamento procura satisfazer 1/3 do comprimento das parcelas com alguma percolação controlada, 1/3 com uma quantidade infiltrada próxima à recomendada, e 1/3 com um *deficit* hídrico intencional, na expectativa de aumentar a eficiência de uso de água, além de possibilitar um maior aproveitamento das chuvas e eliminar o deflúvio superficial no final dos sulcos. Deve-se destacar que a percolação controlada não representa uma perda efetiva de água, pois permanecerá na bacia hidrográfica com melhor qualidade para eventual reutilização. Com a redução da velocidade de avanço ao longo do comprimento, as linhas de plantio podem ser deslocadas, coincidindo com a seção de escoamento dos sulcos. Essa localização da aplicação de água junto ao sistema radicular das plantas contribui para aumentar a eficiência de uso de água pela cultura, além de favorecer a produção em condições de salinidade, reduzindo a concentração de sais solúveis no ambiente radicular. Além de incorporar a prática de quimigação de baixo custo, é o único sistema que permite a aplicação de fertilizantes orgânicos em sistemas de produção que não utilizam fertilizantes minerais.

10.1 Introdução

A irrigação por sulcos integra os sistemas de irrigação por superfície, nos quais, a distribuição da água na área irrigada resulta da energia associada à gravidade, em pequenos canais condutores, em geral, executados mecanicamente, na superfície do solo. Representa um dos mais antigos e difundidos sistemas, prevalecendo em grande parte das áreas irrigadas do mundo. O prêmio anual da *American Society of Agricultural and Biological Engineers* (ASABE, 2020) foi conferido ao pesquisador László Hayde (*Institute for Water Education, The Netherlands*) por promover a aceitação e o uso eficiente da irrigação por superfície. A premiação reconhece a predominância de 75% desses sistemas nas áreas irrigadas mundiais, em torno de 180 milhões de hectares. Nos Estados Unidos, respondem por 9,4 milhões de hectares (37% da área irrigada) segundo o United States Geological Survey (2015) em culturas anuais extensivas (algodão, milho, soja, etc.) frutíferas e olerícolas. A Figura 1 ilustra uma irrigação por sulcos em uma cultura de algodoeiro nos Estados Unidos. Por outro lado, o Atlas da Irrigação publicado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2017) registra

apenas 1,54 milhões de hectares (22% da área irrigada nacional) para a irrigação por inundação na cultura do arroz, sem mencionar a área irrigada por sulcos. Com base nas informações relativas a outros sistemas, acredita-se aproximar de 200.000 ha, apenas 3% da área irrigada nacional. A existência de 11,2 milhões de hectares com grande potencial de recursos hídricos, solos e topografias favoráveis à irrigação pode criar uma expectativa favorável ao incremento das áreas irrigadas por sulcos no país, desde que algumas ações sejam devidamente incentivadas.



Figura 1. Irrigação por sulcos em uma cultura de algodoeiro nos Estados Unidos. Crédito: Alamy Stock Photo, www.alamy.com.

Evidentemente, existem razões, justificáveis ou não, para explicar a reduzida participação da irrigação por superfície na área irrigada nacional. Na previsão da agricultura irrigada para 2030 (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2017) foi antecipado que “métodos não mecanizados de irrigação, como sulcos e inundação, devem prosseguir numa tendência de retração, desativados ou substituídos por outros métodos”, manifestando o descrédito que a instituição demonstra nesses sistemas, motivando sua exclusão como alternativa de irrigação, reforçando ainda mais a marginalização predominante na divulgação, no ensino e na pesquisa. Aparentemente, ignorou-se que em vários países, a irrigação por sulcos tem merecido notáveis avanços tecnológicos (KOECH *et al.*, 2014; UDDIN *et al.*, 2018), equiparando-a aos referidos métodos mecanizados, uma realidade que, infelizmente, não tem sido observada em nossas condições. Não se deve ignorar, entretanto, que a contribuição de muitos profissionais para o incremento da destacada irrigação mecanizada no país tem sido apenas repassar o contato dos interessados às revendedoras das empresas fabricantes, algumas multinacionais. Ao contrário, a irrigação por superfície requer um envolvimento efetivo do profissional, habilitando-o ao preenchimento cabal da Anotação de Responsabilidade Técnica junto ao CREA, valorizando suas atividades curriculares. Além disso, caso exista um objetivo social na agricultura irrigada, seria oportuno expressar o potencial da irrigação não apenas no acréscimo na área irrigada, mas também, no número de agricultores potencialmente beneficiados por este acréscimo.

Deve-se destacar que o sistema de irrigação de baixo custo por sulcos, apresentado neste capítulo, está proposto sob quatro protocolos: tecnológico, econômico, ambiental e social. Seria desejável que os argumentos contrários ao sistema fossem sempre apresentados nesse contexto, permitindo assim, esclarecimentos mais motivadores aos interessados. Esses protocolos fundamentam-se em adotar procedimentos dimensionais e operacionais com o objetivo de proporcionar um elevado desempenho da irrigação, com redução de custos fixos e variáveis, preservando a qualidade do solo, da água e da paisagem, procurando inserir

agricultores descapitalizados aos benefícios da agricultura irrigada, em especial, à melhoria da qualidade de vida, tornando-os competentes gestores em seus projetos, à semelhança do comportamento dos irrigantes de *San Joaquin Valley*, na Califórnia, EUA. Para tanto, há um incentivo para integrá-los no dimensionamento, instalação e operação dos sistemas, bem como no manejo das irrigações. Em 2013, os projetos de irrigação de baixo custo, incluindo aspersão e gotejamento, foram incorporados ao acervo de Tecnologias Sociais da Fundação Banco do Brasil. O elevado interesse neste e em outros sistemas alternativos de baixo custo foi revelado em uma reportagem exibida pela TV Unesp (2015) quando, em novembro de 2020, ultrapassou 3 milhões de visualizações, com média superior a 1.430 visualizações diárias.

Principais características: (i) Em geral, revela um custo total anual reduzido (soma de custos fixos e variáveis) razão principal de sua predominância nas áreas irrigadas em várias regiões do mundo. Talvez, o controle da superfície freática através de drenos (SKAGGS *et al.*, 1972) possa oferecer menor custo, porém, requer condições naturais raramente encontradas em áreas agrícolas. Solos argilosos, com reduzida razão de infiltração, e topografias relativamente planas, permitem maiores comprimentos de sulcos, contribuindo para reduzir proporcionalmente os custos do sistema de irrigação, (ii) Dispensa a pressurização da água, ou o próprio bombeamento, caso a cota do manancial esteja um pouco acima daquela da área a ser irrigada. Assumindo uma carga manométrica requerida em sistemas por aspersão entre 5 a 10 vezes superior à requerida por sulcos, é fácil demonstrar que, para resultar no mesmo consumo energético, a eficiência da irrigação no sistema por sulcos deveria variar entre 8 e 16%, tornando o projeto técnica e ambientalmente inviável, (iii) Aplicável à maioria das culturas anuais ou perenes, independente da altura das plantas, desde que tenham sido instaladas com a previsão de serem irrigadas por sulcos, ou seja, deve haver um pequeno desnível, em geral, entre 0,5 e 1%, relativamente uniforme na direção das linhas de plantio. Em condições de solos com reduzida razão de infiltração e comprimentos inferiores a cerca de 50m, pode-se adotar a execução em nível, sendo o gradiente hidráulico responsável pelo avanço da frente líquida na superfície de escoamento, (iv) Em culturas cujas plantas de interesse se apresentam razoavelmente espaçadas, como os pomares em geral, cafezais, videiras, bananeiras, coqueiros, maracujazeiros, meloeiros, etc., os sulcos devem estar próximos às raízes das plantas cultivadas. Nesses casos, o sistema adquire uma característica vantajosa de irrigação localizada em faixas, com grande economia de água, quando comparado aos sistemas por aspersão e mesmo microaspersão, (v) A possibilidade de irrigação em sulcos alternados e o plantio coincidente com a seção de escoamento, após a redução da velocidade de avanço, reduzem a quantidade de água aplicada sem prejudicar significativamente a quantidade e qualidade da produção, resultando em acréscimos na eficiência de uso de água (produção por quantidade de água aplicada), (vi) A recomendação intencional de irrigação deficitária (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION 2002; OUDA *et al.*, 2020) nas porções finais dos sulcos favorece a eficiência de uso de água pela cultura, além de eliminar o deflúvio superficial e disponibilizar espaço para o armazenamento de água de chuvas que podem ocorrer durante o ciclo fenológico, reduzindo a deficiência hídrica estacional, (vii) Pequena dependência à qualidade da água, podendo utilizar águas superficiais poluídas ou residuárias, sem tratamento ou filtragem. Em geral, a qualidade da produção não é comprometida, mesmo para o consumo *in natura* (sem processamento) uma vez que não ocorre contato da água com a parte aérea das plantas. Águas com elevada quantidade de material orgânico beneficiam as características físicas, químicas e microbiológicas do solo e favorecem a nutrição vegetal, com economia de fertilizantes minerais e orgânicos. Entretanto, a presença de poluentes prejudiciais ao solo e às plantas cultivadas, ou contaminantes dificilmente degradáveis, deve ser evitada, (viii) Dispensa equipamentos especiais ou mão de obra especializada no processo de aplicação de água, (ix) Possibilita a aplicação de agroquímicos (fertilizantes, corretivos e outros agroquímicos de solo) com facilidade na água de irrigação, empregando equipamento de baixo custo e com reduzida possibilidade de

obstrução. A exigência de solubilidade é menor que em outros sistemas e, portanto, os fertilizantes são mais baratos. Mesmo em suspensão, podem ser aplicados, com sucesso, na água de irrigação. A possibilidade exclusiva de aplicação de fertilizantes orgânicos deve ser valorizada em cultivos praticados na agricultura orgânica, (x) Não interfere nos tratamentos fitossanitários aplicados na parte aérea da cultura. Portanto, não há a possibilidade de lixiviação de agroquímicos, como ocorre na irrigação por aspersão, (xi) Pouco material manufaturado, reduzindo o consumo de matéria prima e energia na fabricação e o eventual descarte ao meio ambiente ao final do período de vida útil da tubulação utilizada, (xii) Reduzida perda de água por evaporação pela exposição de uma pequena superfície de molhamento e menor frequência das irrigações. Esta redução é evidenciada na expressão do coeficiente de cultura – $K_c = K_{cb} \times K_s + K_e$, empregada no cálculo da evapotranspiração, onde K_e , coeficiente de evaporação, atribuído ao molhamento da superfície, sempre apresenta um valor inferior aos sistemas de irrigação pressurizados que incorporam a água através da superfície do solo, (xiii) A operação do sistema admite uma aplicação de água nas partes iniciais do sulco que pode exceder a capacidade de armazenamento no ambiente radicular da cultura. Entretanto, esse excesso pode retornar às raízes, por ascensão capilar, ou se incorporar à superfície freática, por percolação. Assim, permanece disponível na bacia hidrográfica e, portanto, não pode ser considerada uma perda efetiva de água como a evaporação. Além disso, sendo incorporado à superfície freática, deve retornar aos mananciais com melhor qualidade, devido à efetiva filtragem que o solo oferece nesse processo, (xiv) Grande potencial para a geração de empregos diretos e indiretos, com maior e menor qualificação, (xv) Acentuada dependência à topografia, podendo requerer sistematização da superfície, para assegurar uma declividade relativamente uniforme na direção do escoamento e favorecer a uniformidade de distribuição de água na área irrigada, (xvi) Inadequado para solos rasos, pedregosos ou excessivamente permeáveis que podem resultar em dificuldades para instalação ou restringir o alcance lateral da água no solo e acentuar o processo de percolação à superfície freática, (xvii) Parâmetros hidráulicos variáveis com as sucessivas irrigações que promovem modificações na condição superficial e nas características de infiltração, requerendo medidas corretivas na vazão e/ou no período de aplicação de água, para assegurar níveis satisfatórios de desempenho, (xviii) Integrado às áreas para as quais está dimensionado. Portanto, à exceção do equipamento utilizado na distribuição da água, não pode ser deslocado para outras áreas, como ocorre em sistemas por aspersão convencional ou mecanizados, (xix) Dificuldades para operação noturna e automação, quando comparado aos sistemas de irrigação pressurizados, (xx) Em geral, marginalizado em cursos de graduação, pós-graduação e aperfeiçoamento, provavelmente por desconhecimento de suas potencialidades, apesar da expressiva predominância mundial em diversas culturas extensivas, frutíferas e hortaliças, além de satisfazer protocolos rigorosos de desempenho, economia, ambiência e inclusão social, (xxi) Divulgação limitada ou inexistente por não envolver interesses comerciais, dificultando a aceitação, discussão e solução de muitos problemas de natureza técnica ou prática. O número de usuários no país, em geral, é reduzido e disperso, dificultando ações associativas, (xxii) Requer assistência técnica especializada para orientar o dimensionamento e a operação do sistema e o manejo das irrigações. Entretanto, essas informações são facilmente assimiladas pelos irrigantes interessados que, através de uma desejável interação com o sistema de irrigação, tornam-se competentes gestores dessa tecnologia, (xxiii) A exigência de acompanhamento no campo impõe dificuldades que, em geral, favorece outros sistemas de irrigação, com maior facilidade no dimensionamento e operação, além de estimular a conveniência, muitas vezes assumida, de repassar essa responsabilidade às empresas revendedoras de equipamentos comerciais pressurizados, e (xxiv) Impossibilidade de aplicar "*variable rate irrigation*" e dificuldades para inserção na "*Internet of Things*" podem desestimular o envolvimento de pesquisadores motivados por essas atualidades tecnológicas. É inexpressivo o número de profissionais envolvidos em irrigação por sulcos, o que contribui para a usual omissão em iniciativas de incentivo à agricultura irrigada no país.

10.2 O processo de irrigação de baixo custo por sulcos

Hidraulicamente, o processo de irrigação por sulcos é descrito como escoamento não uniforme, instável e gradualmente variado, em meio poroso, seção irregular e infiltração variáveis com o espaço e o tempo, descrito pelas equações da continuidade e quantidade de movimento (Equações de *Saint Venant*). Soluções analíticas dessas equações diferenciais parciais, não lineares e hiperbólicas não são disponíveis. Portanto, a solução é normalmente aproximada por métodos numéricos, em geral, diferenças finitas. As analogias hidráulicas são o rastreamento da onda de choque em rompimento de barragens e a propagação de tsunamis em oceanos e áreas costeiras. O dimensionamento de canais, com seções de escoamento geométricas bem definidas e sem infiltração, requer procedimentos computacionais mais simplificados.

O conceito de irrigação de baixo custo envolve importantes modificações nos conceitos clássicos associados ao dimensionamento e operação de sistemas de irrigação tradicionais. Em consequência, o processo de irrigação por sulcos, aqui considerado, será simplificado, resumindo-se a apenas duas fases principais: avanço e recesso da água na superfície de escoamento. As fases de reposição (o período necessário para haver a reposição da quantidade de água requerida em todo o comprimento do sulco) e depleção (o período necessário para a água ser removida da superfície na extremidade inicial do sulco, após a interrupção no fornecimento) não serão consideradas nesta análise. Assim, a maior parte da reposição de água ao solo deve ser assegurada durante a fase de avanço.

Portanto, para cada ponto inserido no comprimento do sulco, a diferença entre o tempo de recesso (quando a água desaparece da superfície) e o de avanço (quando a água atinge aquele ponto) determina o período de infiltração. Períodos de infiltração semelhantes, associados a pequenas variações no perímetro molhado ao longo do comprimento, favorecem a uniformidade de distribuição de água.

Deve-se considerar, entretanto, que a razão de infiltração em solos agrícolas diminui com o tempo, ou seja, 30 minutos de ocorrência de um processo de infiltração, podem incorporar, por exemplo, 20 mm de água; porém, 60 minutos devem corresponder a lâminas bem inferiores a 40 mm. Essa redução torna-se mais significativa com o aumento do tempo do processo de infiltração. Portanto, diferenças no tempo de infiltração não resultam em diferenças proporcionais nas quantidades infiltradas ao longo dos sulcos, uma condição que será oportunamente explorada para favorecer o dimensionamento desse sistema.

A determinação de equações simples para representar o processo de infiltração em sulcos, nas condições onde as irrigações são praticadas, é fundamental para o dimensionamento e avaliação desse sistema e, portanto, deve ser executada por pessoal técnico especializado. Aos interessados, recomenda-se consultar o trabalho publicado por Scaloppi *et al.* (1995) para maiores detalhes sobre o procedimento teórico e computacional dessa determinação.

10.3 Preparo da área a ser irrigada

A primeira providência consiste em adequar a condição da superfície do solo ao sistema de irrigação, através de uma mobilização do solo com implementos apropriados (grade aradora e niveladora ou enxada rotativa). Em seguida, sistematizar a superfície (eliminar irregularidades) utilizando implementos mecanizados adequados (plaina niveladora ou lâmina traseira) procurando manter uma declividade uniforme na direção retilínea ou em contorno, dependendo da condição topográfica original do terreno. Cultivos sucessivos na mesma área contribuem para aprimorar a uniformidade da superfície. Por outro lado, o inconveniente de gradientes significativos na direção transversal ao escoamento consiste em um eventual transbordamento e rompimento da seção de escoamento, que poderá resultar em um processo

de erosão localizada difícil de ser corrigido. Em alguns locais, é recomendável dividir a área em parcelas que apresentam condições topográficas semelhantes que serão dimensionadas separadamente. Trabalhos mais rigorosos em tecnologia devem merecer consulta aos textos publicados por Scaloppi e Willardson (1986) e Scaloppi (2003b).

Após a sistematização, marcar uma desnivelada básica representativa, com declividade média entre 0,5% e 1%, que definirá a direção das linhas de plantio (os maiores valores de declividade são recomendáveis em condições mais grosseiras ou ausência de sistematização). Ajustar a desnivelada, procurando respeitar as curvaturas observadas no terreno. Caso o comprimento seja limitado pelas dimensões da área (em geral, inferior a 100m) será assumido que o comprimento das parcelas já está definido. Por outro lado, sendo essas dimensões mais expressivas, com algumas centenas de metros, o comprimento dos sulcos deverá ser determinado por procedimentos apresentados oportunamente.

10.4 Classificação do sistema de irrigação de baixo custo por sulcos

Duas alternativas podem ser consideradas nesse sistema: (i) Aplicação de vazão constante aos sulcos, e (ii) Aplicação de vazões continuamente reduzidas aos sulcos.

A diferença operacional entre as duas alternativas baseia-se na declividade da tubulação responsável pela derivação de água aos sulcos. Na primeira, a tubulação é posicionada em nível e a reduzida perda de carga praticamente assegura uma vazão uniforme nos orifícios em operação. Nesse caso, os orifícios inoperantes devem ser bloqueados, simplesmente deslocando-se um segmento do tubo sobre os mesmos, reproduzindo os tradicionais "*gated pipes*" ou tubos janelados, amplamente utilizados em áreas irrigadas por sulcos.

Na segunda alternativa, a tubulação é posicionada seguindo um gradiente de declive uniforme e a vazão do projeto é bloqueada por um plug instalado em seu interior. Esse bloqueio determina pressões diferenciais nos orifícios, resultando vazões progressivamente reduzidas à medida que se afasta do plug. Toda a vazão do projeto é derivada a um número de orifícios determinado pela declividade da tubulação e diâmetro dos orifícios que devem estar desobstruídos. Como o plug não assegura estanqueidade recomenda-se destinar esta reduzida vazão transpassante ao último sulco da área irrigada.

10.5 Composição do sistema de irrigação

Pesquisadores do USDA *Agricultural Research Service*, em Kimberly, Idaho, EUA, (KEMPER *et al.*, 1981) desenvolveram um equipamento para aplicação de água aos sulcos, denominado "*cablegation*" que foi adaptado com razoável sucesso à exigência do conceito de baixo custo (Figura 2) com a aplicação de vazões progressivamente reduzidas. Apropriadamente, os autores descreveram o equipamento como "*automatic furrow irrigation*", sendo assim reconhecido pelo *Soil Conservation Service* (USDA).



Figura 2. Irrigação de baixo custo por sulcos com 180 m de comprimento em área demonstrativa da FCA/Unesp, em Botucatu, SP.



Figura 3. Detalhe da parte superior de uma garrafa PET de 2 L que atuará como um plug no interior da tubulação.

O sistema simplificado consiste basicamente de uma pequena caixa de recepção de água (cerca de 50 L) conectada a uma tubulação de PVC para aplicações sanitárias (esgoto) com 100 mm de diâmetro nominal (DN 100), no interior da qual desloca-se um plug constituído pela parte superior de uma garrafa PET de 2 L (Figura 3). Este artefato é conectado a um fio de nylon preso a um esticador de arame liso para cercas que deve ser fixado à parte superior da caixa de recepção (Figuras 4 e 5).



Figura 4. Parte superior da garrafa PET de 2 L e linha de nylon para bloquear o escoamento na tubulação e forçar a saída de água nos orifícios.



Figura 5. Detalhe da roldana e do estecedor, adaptado com uma manopla para facilitar a operação, instalados na caixa de recepção.

A derivação de água aos sulcos é obtida através de orifícios perfurados na tubulação, tendo dimensões ajustadas ao comprimento dos sulcos, e seguindo um alinhamento posicionado cerca de 60° em relação à superfície do terreno (Figura 6). A tubulação deve ser instalada procurando atender a uma declividade uniforme mínima de 0,5%, para favorecer a distribuição de água. Caso a condição topográfica natural da superfície não favoreça a exigência de uniformidade, deve-se providenciar a instalação de estacas de madeira para apoiar a tubulação (Figura 6), procurando um posicionamento o mais próximo possível da superfície, para evitar a desagregação do solo causada pelo impacto da água que flui através dos orifícios. Em qualquer condição, entretanto, recomenda-se dispor um anteparo na área de impacto, para dissipar a energia cinética causada pelo lançamento da água sobre a superfície de escoamento, sendo o mais usual a utilização de embalagens plásticas descartadas de fertilizantes, sementes, rações, etc.



Figura 6. Vazões decrescentes aplicadas através de orifícios perfurados na tubulação a 60° em relação à superfície. A suspensão em estacas uniformiza o gradiente de declive.

A irrigação inicia na extremidade inicial da tubulação e movimenta-se em direção descendente, deslocando-se o plug conectado ao esticador através de uma linha de nylon com diâmetro aproximado de 0,5 mm. O período para o deslocamento do plug resume um procedimento operacional criterioso, que deve resultar em um desempenho satisfatório da irrigação, conforme será discutido a seguir.

A vazão recebida pela caixa e a declividade da tubulação determinam o número de sulcos irrigados simultaneamente. A pressão diferencial em cada orifício resulta em vazões decrescentes, a partir do orifício mais próximo ao plug. Assim, cada sulco receberá uma sucessão de vazões em cada aplicação. Este esquema favorece a condição de escoamento, proporcionando maiores distâncias de avanço com as maiores vazões, que vão sendo sucessivamente reduzidas, uma operação que se aproxima do regime de aplicação denominado "*surge flow*" ou "*pulse flow*", introduzido por Stringham e Keller (1979).

A redução na razão de infiltração, que constitui a base do sucesso do "*surge flow*", é atribuída aos seguintes processos (STRINGHAM *et al.*, 1988): (i) migração e consolidação das partículas do solo reduzindo a permeabilidade na região próxima à superfície (SAMANI *et al.*, 1985). Durante o recesso, a fração mais grosseira (areia) sedimenta-se primeiro, seguida pelas partículas mais finas (limo e argila) que acabam selando a superfície e reduzindo a infiltração, (ii) aprisionamento do ar que penetra na superfície do solo durante a interrupção na aplicação de água (LINDEN *et al.*, 1977) causando uma pressão contrária à infiltração, (iii) redistribuição de água reduz o gradiente hidráulico no perfil do solo responsável pela infiltração, e (iv) redução da rugosidade hidráulica da seção de escoamento causada pela migração de partículas com as sucessivas irrigações, favorecendo o escoamento superficial.

10.6 Dimensionamento de sistemas de irrigação de baixo custo por sulcos

O dimensionamento de um sistema de irrigação de baixo custo por sulcos consiste em se atribuir dimensões a três parâmetros básicos: (i) comprimento das parcelas, (ii) regime de aplicação de água aos sulcos (vazões), e (iii) período de aplicação de água.

Maiores detalhes sobre o dimensionamento de sistemas de irrigação por superfície, incluindo faixas e inundação para o cultivo de arroz, podem ser obtidos em Scaloppi (2003a). Quando as características topográficas da área não são uniformes, pode ser necessário executar operações preliminares de sistematização ou regularização da superfície. Deve-se destacar, entretanto, que as áreas potencialmente favoráveis ao sistema por sulcos devem

apresentar uma topografia relativamente plana (inclinação máxima em torno de 5% na direção transversal) e uniforme (manutenção da direção da declividade). Na direção do escoamento, a declividade não deve ultrapassar 2% e, preferencialmente, entre 0,5 e 1%. Esse valor pode compensar pequenas variações que ocorrem no gradiente de declive, evitando sua reversão, principalmente, em condições menos rigorosas de sistematização.

Convém esclarecer que à medida que se afastam as condições favoráveis ao sistema, não significa sua exclusão sumária, porém, um aumento nos custos e maiores cuidados dimensionais e operacionais para evitar eventuais comprometimentos ambientais.

O dimensionamento pode ser conduzido sob duas possibilidades: (i) simulação utilizando modelos matemáticos (SCALOPPI, 1996); ou (ii) um procedimento empírico executado nas condições do projeto. Deve-se destacar que os modelos de simulação requerem determinações locais de equações representativas da infiltração (SCALOPPI *et al.*, 1995) e da geometria da seção de escoamento, através de determinações procedidas no campo, após se comprovar uma aceitável definição dos elementos geométricos no sulco, utilizando um perfilômetro, conforme procedimento detalhado em Scaloppi (2003a).

10.7 Determinação do comprimento dos sulcos

É importante observar, que o regime de aplicação de água deve estar associado ao comprimento das parcelas para resultar no melhor desempenho da irrigação, cuja avaliação será discutida oportunamente. Assim, tendo dimensões reduzidas, identificar a vazão e o período de aplicação que proporcionem os melhores desempenhos. Em condições extensivas, o regime de aplicação deve promover o acréscimo do comprimento dos sulcos, sem comprometer o desempenho. Dois regimes serão apresentados: vazão constante e vazão progressivamente reduzida.

10.7.1 Regime com vazão constante

A vazão requerida em um projeto independe do sistema de irrigação considerado, exceto pela expectativa da eficiência de aplicação e do período operacional diário, sendo computada pela equação (1):

$$Q = \frac{10.A.D}{Ef.T} \quad (1)$$

em que Q se refere à vazão requerida ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$), A à área irrigada (ha), D à demanda hídrica da cultura adotada no dimensionamento (mm d^{-1}), Ef à eficiência de aplicação de água pretendida (adimensional e decimal), e T ao período operacional da irrigação (h d^{-1}). Recomenda-se que esse período seja ponderado em base semanal, quando pode estar prevista interrupção operacional, usualmente programada para os finais de semana.

Partindo da vazão requerida, a primeira providência consiste em determinar a vazão a ser aplicada a cada sulco, através de observações do escoamento superficial nas condições do projeto.

As características da instalação, como o diâmetro dos orifícios de derivação de água aos sulcos e o gradiente hidráulico da tubulação, que determina a carga manométrica nos orifícios, determinam o número de sulcos irrigados simultaneamente. Dividindo-se a vazão requerida por esse número, obtém-se a vazão média. Por sua vez, o tempo de aplicação de água em cada sulco pode ser estimado, dividindo-se o volume requerido pela vazão média, conforme estabelece a equação (2):

$$T = \frac{L.w.z}{q} \quad (2)$$

em que T se refere ao tempo de aplicação de água em cada sulco (min), L ao comprimento do sulco (m), w à largura da faixa de reposição de água desejada (m), z à lâmina de reposição requerida (mm), e q à vazão média de aplicação ($L \text{ min}^{-1}$).

10.7.1.1 Procedimento de cálculo

Aplicando-se a vazão máxima não erosiva a um sulco pode-se avaliar, simultaneamente, pelo método do balanço volumétrico proposto por Scaloppi *et al.* (1995), duas características importantes no dimensionamento e manejo da irrigação: o avanço da frente líquida e a infiltração. Assim, o comprimento mais adequado das parcelas fica facilmente evidenciado, após executar uma consistente avaliação de desempenho, conforme será demonstrado em sequência.

O diâmetro da tubulação e dos orifícios depende das dimensões da área irrigada e, particularmente, do comprimento das parcelas. Na versão mais usual, a tubulação utilizada é DN 100, especificada para esgotamento sanitário, com diâmetro nominal de 100 mm, perfurada com orifícios de 3 cm de diâmetro, para sulcos entre 100 e 200 m de comprimento.

Após aplicar a vazão máxima não erosiva, anotar os tempos de avanço até a frente líquida reduzir-se apreciavelmente, conforme ilustrado na Tabela 1. Em seguida, calcular as lâminas médias aplicadas quando a água atinge as estacas de interesse previamente identificadas.

10.7.1.2 Exemplo numérico

Vazão = $0,4 \text{ L s}^{-1}$. Lâmina média requerida = 30 mm. Largura da faixa de reposição de água = 0,6 m.

Tabela 1. Avanço da água na superfície de escoamento do sulco.

Tempo (min)	2	4	7	12	18	26	36	48	62	80
Distância (m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Essas informações permitem comparar as seguintes alternativas de dimensionamento:

(i) Assumindo um comprimento de 80 m, com um tempo de avanço de 48 min:

$$\text{Vazão} = 0,4 \text{ L s}^{-1} = 24 \text{ L min}^{-1} = 1440 \text{ L h}^{-1},$$

$$\text{Volume aplicado} = 48 \text{ min} \times 24 \text{ L min}^{-1} = 1.152 \text{ L, e}$$

Lâmina média aplicada = $1.152 / (80 \times 0,6) = 24 \text{ mm}$, insuficiente para repor a lâmina requerida.

(ii) Assumindo um comprimento de 100 m, com um tempo de avanço de 80 min:

$$\text{Volume aplicado} = 80 \text{ min} \times 24 \text{ L min}^{-1} = 1.920 \text{ L, e}$$

$$\text{Lâmina média aplicada} = 1.920 / (100 \times 0,6) = 32 \text{ mm.}$$

Observa-se que o comprimento de 100 m resulta em lâminas médias aplicadas que se aproximam da requerida, revelando-se como o mais adequado. Estando o comprimento definido, executar diques de contenção no final dos sulcos com a finalidade de eliminar o deflúvio superficial e aumentar a reposição hídrica das áreas de remanso (Figura 7). Por outro lado, havendo continuidade da área irrigada, o equipamento será deslocado para prosseguir a operação sequencial da irrigação.

Para obter uma avaliação criteriosa do desempenho da irrigação, é necessário estimar a distribuição do perfil infiltrado ao longo do comprimento do sulco, através de uma equação representativa da infiltração determinada no local. Esse procedimento computacional será demonstrado oportunamente. Entretanto, é possível antecipar uma avaliação expedita, assumindo uma lâmina líquida de 28 mm, com turno de irrigação de 7 dias, operando 10 h/d, em uma área hipotética cultivada de 2 ha:

$$\text{Área irrigada por sulco} = 60 \text{ m}^2$$

$$\text{Área cultivada por sulco} = 100 \text{ m}^2$$

$$\text{Área efetiva irrigada} = 0,6 \times 2 \text{ ha} = 12.000 \text{ m}^2$$

$$\text{Volume de água requerido pelo projeto} = (1,92 \text{ m}^3/60 \text{ m}^2) \times 12.000 \text{ m}^2 = 384 \text{ m}^3$$

$$\text{Vazão} = 384 \text{ m}^3/70 \text{ h} = 5,5 \text{ m}^3/\text{h} = 5.500 \text{ L/h}$$

$$\text{Número de sulcos irrigados simultaneamente} = 5.500 \text{ L/h}/1440 \text{ L/h/sulco} = 4 \text{ sulcos}$$

10.7.2 Regime com vazões progressivamente reduzidas

Em regimes de aplicação com decréscimos progressivos de vazão, o gradiente de declive da tubulação desempenha um papel importante no esquema operacional. Sendo gradientes mais reduzidos (inferiores a 0,5%), duas alternativas podem ser oferecidas: (i) apoiar a tubulação em estacas instaladas de acordo com o gradiente escolhido, conforme pode ser observado na Figura 6, e (ii) vedar alguns orifícios com vazões mais reduzidas para aumentar a vazão em outros ainda em processo de irrigação. A possibilidade de vedar facilmente os orifícios já irrigados, sobrepondo-se um segmento de tubo ao orifício, favorece bastante a dotação criteriosa de água aos sulcos. Este recurso pode ser utilizado para irrigar os primeiros e os últimos sulcos da instalação, uma vez que seguem uma dotação diferenciada no esquema operacional proposto.

10.7.2.1 Dimensionamento empírico ilustrativo

Aplicar a vazão requerida a um esquema de irrigação instalado, e avaliar o comportamento do escoamento e da infiltração. Por exemplo:

Área = 2 ha cultivados; demanda hídrica estimada = 4 mm/d; eficiência de aplicação prevista = 80% ou 0,8 na aplicação da equação; regime operacional = 10 h/d; lâmina líquida requerida = 30 mm.

$$\text{Vazão requerida} = 10 \times 2 \times 4 / (0,8 \times 10) = 10 \text{ m}^3/\text{h}$$

A determinação do número de orifícios fluindo simultaneamente depende da vazão média observada na instalação. Considerando que tanto a carga manométrica, determinada pela declividade da tubulação, quanto o diâmetro dos orifícios, determinam as vazões em cada orifício, recomenda-se adotar o seguinte procedimento:

Estando a instalação definida, avaliar, tentativamente, o diâmetro dos orifícios objetivando o melhor desempenho da irrigação. Para tanto, perfurar com serra copo apenas os tubos suficientes para conduzir essa avaliação, iniciando com diâmetros reduzidos, por exemplo, 2 cm, que podem ser aumentados gradativamente, até observar um desempenho satisfatório da irrigação nas parcelas irrigadas. Estando o comprimento indefinido, identificar uma combinação de vazões decrescentes que maximizem essa dimensão, sem provocar arrastamento significativo de partículas do solo. A redução do número de orifícios fluindo, determinada pelo aumento do diâmetro dos mesmos, aumenta a vazão média com maiores distâncias de avanço da água nos sulcos.

Assumindo que tenha sido identificado um comprimento satisfatório de 100 m, sendo 0,6 m a largura média da faixa de reposição de água, pode-se calcular:

$$\text{Área de reposição de água por sulco} = 60 \text{ m}^2$$

$$\text{Área cultivada por sulco} = 100 \text{ m}^2$$

$$\text{Volume de água requerido por sulco} = 60 \text{ m}^2 \times 30 \text{ mm} = 1.800 \text{ L} = 1,8 \text{ m}^3$$

O período para deslocamento do plug independe do número de orifícios fluindo na instalação, sendo calculado pelo volume de água requerido por sulco dividido pela vazão do projeto:

$$1,8 \text{ m}^3 / 10 \text{ m}^3/\text{h} = 0,18 \text{ h} = 11 \text{ min}$$

Supondo 4 orifícios em operação simultânea:

$$\text{Vazão média por orifício} = 10.000 \text{ L/h} / 4 \text{ orifícios} = 2.500 \text{ L/h} = 42 \text{ L/min} = 0,7 \text{ L/s}$$

Supondo 8 orifícios em operação simultânea:

$$\text{Vazão média por orifício} = 10.000 \text{ L/h} / 8 \text{ orifícios} = 1.250 \text{ L/h} = 21 \text{ L/min} = 0,35 \text{ L/s}$$

10.7.2.2 Avaliação do desempenho da irrigação

Para avaliar o desempenho de um sistema de irrigação por sulcos é necessário identificar a equação de infiltração representativa do local, os respectivos períodos de infiltração e os perímetros molhados médios em alguns pontos equidistantes do comprimento. O número de pontos recomendado pode variar de 5 a 10, dependendo do rigor requerido e da conveniência desejada nas determinações realizadas no campo. O procedimento pode ser ilustrado assumindo um dimensionamento consolidado:

$$\text{Comprimento dos sulcos} = 100 \text{ m}$$

$$\text{Largura da faixa de reposição de água por sulco} = 0,6 \text{ m}$$

A largura da faixa de reposição de água (Figura 7) pode ser restrita ao fornecimento de água às raízes das plantas cultivadas, independente do espaçamento entre sulcos ou das entrelinhas da cultura, caracterizando uma forma de irrigação localizada em faixas contínuas. Nesses casos, os cálculos serão efetuados considerando apenas a largura dessas faixas.

$$\text{Volume de água aplicado por sulco} = 60 \text{ cm} \times 30 \text{ mm} = 1.800 \text{ L}$$

$$\text{Perímetro molhado médio dos sulcos} = 0,3 \text{ m}$$

Recomenda-se a execução de dique no final do sulco para conter o deflúvio superficial e aumentar a infiltração na área de remanso do escoamento (Figura 7).

Equação de infiltração ilustrativa obtida pelo procedimento proposto por Scaloppi *et al.* (1995):

$$z = 0,5 t^{0,6} \quad z = \text{lâmina infiltrada, cm, e } t = \text{período de infiltração, min}$$

$$\text{Período de infiltração} = \text{tempo de recesso} - \text{tempo de avanço}$$

$$\text{Volume de água requerido por unidade de comprimento: } Az_r = 60 \times 3 = 18 \text{ L/m}$$

$$\text{Volume de água infiltrado por unidade de comprimento: } Az = 30 \times 0,5 \times t^{0,6} = 15 \times t^{0,6}$$

$$Az = \text{cm}^3/\text{cm}; t = \text{min}$$

Adotando-se 6 pontos de determinação uniformemente espaçados de 20 m, calcular as quantidades de água infiltradas anotadas na Tabela 2.

Tabela 2. Quantidades de água infiltradas calculadas ao longo do comprimento do sulco.

Distância - m	0	20	40	60	80	100	Totais
Recesso - min	90	94	96	98	105	115	
Avanço - min	0	6	18	36	62	90	
Infiltração - min	90	88	78	62	43	25	
Az - cm ²	223	220	204	178	143	103	908
Disponível - cm ²	180	180	180	178	143	104	823
Percolação - cm ²	43	40	24	0	0	0	86

* Os pontos extremos (0 e 100 m) devem ser ponderados por 0,5.



Figura 7. Detalhes das faixas infiltradas a partir dos perímetros molhados e obstrução do escoamento por diques no final dos sulcos (boaspraticasagronicas.com.br).

10.7.2.3 Eficiências de aplicação e de armazenamento de água

A eficiência de uso de água, expressa pela quantidade da produção por unidade de água aplicada, é considerada o principal índice de desempenho porque integra os demais índices adimensionais e pode ser aplicado diretamente na análise financeira do investimento. Porém, na ausência dessa informação, podem-se calcular índices tradicionais de avaliação de desempenho, a eficiência de aplicação - E_{apl} e a eficiência de armazenamento - E_{arm} , conforme será demonstrado a seguir:

$$\text{Volume aplicado por sulco} = 1.800 \text{ L} = 1.800 \text{ dm}^3$$

Distribuindo-se esse volume uniformemente ao longo do comprimento do sulco (100 m), obtém-se:

$$1.800 \text{ dm}^3 / (1.000 \text{ dm}) = 1,8 \text{ dm}^3/\text{dm} = 180 \text{ cm}^3/\text{cm} = 18 \text{ L/m}$$

Considerando cinco pontos de determinação da infiltração (os pontos extremos representam metade do espaçamento regular adotado) obtém-se:

$$E_{apl} = \text{água disponível} / \text{água aplicada} = 823 / (180 \times 5) = 0,91 = 91\%$$

$$\text{Percolação} = \text{água percolada} / \text{água aplicada} = 86 / 900 = 0,09 = 9\%$$

$$E_{arm} = \text{água disponível} / \text{água requerida} = 823 / 900 = 0,91 = 91\%$$

$$\text{Lâmina média aplicada} = 180 \text{ cm}^2 / 60 \text{ cm} = 3 \text{ cm}$$

$$\text{Lâmina média efetiva} = (823 / 5) / 60 = 2,74 \text{ cm} = 27,4 \text{ mm}$$

$$\text{Turno de irrigação previsto} = 27,4 \text{ mm} / 4 \text{ mm/d} = 6,85 \approx 7 \text{ dias}$$

$$\text{Área efetiva irrigada} = 12.000 \text{ m}^2 = 1,2 \text{ ha}$$

$$\text{Número de sulcos na área irrigada} = 200 / 0,6 = 333 \text{ sulcos}$$

Período para irrigar a área total = $1,8 \text{ m}^3/\text{sulco} \times 333 \text{ sulcos} = 600 \text{ m}^3 / 10 \text{ m}^3/\text{h} = 60 \text{ h}$

Deve-se observar a aceitável representatividade da equação de infiltração utilizada, apesar de ilustrativa, evidenciada no cálculo das lâminas infiltradas ao longo do comprimento dos sulcos (Tabela 2). Este procedimento pode ser atualizado a cada irrigação, utilizando simples rotinas computacionais, possibilitando a introdução de eventuais ajustamentos operacionais em tempo real (KOECH *et al.*, 2014).

10.7.2.4 Quimigação de baixo custo por sulcos

O sistema de irrigação por sulcos pode integrar um equipamento simples para promover a quimigação (aplicação de produtos químicos via água de irrigação). No caso da adição de fertilizantes à água de irrigação (fertirrigação) pode-se parcelar a aplicação e reduzir as perdas por volatilização e eventual percolação. Existe um reconhecimento generalizado para a quimigação ser sistematicamente incorporada aos sistemas de irrigação, melhorando a uniformidade de distribuição do produto aplicado na área irrigada, além de eliminar a utilização de recursos mecanizados ou manuais nessa aplicação. Em adição, o fornecimento gradativo de nutrientes às culturas reduz eventuais perdas e melhora o seu aproveitamento pelas plantas cultivadas.

O equipamento requerido é simplesmente um recipiente volumétrico dotado de um registro, ambos resistentes à ação corrosiva da solução química. O recipiente é instalado sobre a caixa de recepção de água e a solução química é adicionada à água de irrigação na dosagem recomendada (Figura 8). A turbulência da água na caixa de recepção favorece a homogeneização da mistura.

A solução química é introduzida no recipiente, cuja capacidade volumétrica deve satisfazer um período de aplicação pré-determinado. Por exemplo, assumindo-se que o sistema irriga $1.000 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$, determinar a razão de aplicação de 20 kg de ureia por ha, com um recipiente de 20 L.

Solução: dissolvendo-se 10 kg de uréia em água para completar 20 L de solução obtém-se uma concentração de $0,5 \text{ kg L}^{-1}$. A dose de uréia para os $1.000 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ de área irrigada será 2 kg ou 4 L de solução. Portanto, a razão de aplicação será 4 L h^{-1} ($67 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ ou $1,1 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$) e o recipiente deverá ser reabastecido a cada 5 h.

Reduzindo a quantidade do produto em solução, aumenta proporcionalmente a razão de aplicação. Por exemplo, 2 kg de uréia em 20 L de solução ($0,1 \text{ kg L}^{-1}$) requer uma aplicação de 20 L h^{-1} e, portanto, reabastecimento a cada hora.

O simples artifício conhecido como vaso ou frasco de Mariotte, representado pelo tubo branco introduzido no recipiente (Figura 8), manterá constante a razão de aplicação até o nível da solução atingir a extremidade inferior do tubo, posicionada acima do registro, local indicativo de reabastecimento.



Figura 8. Equipamento para quimigação de baixo custo em sulcos.

A aplicação exclusiva de fertilizantes orgânicos pode obstruir o registro e, portanto, devem ser lançados diretamente na caixa de recepção, observando a dosagem recomendada de acordo com o procedimento descrito na aplicação de fertilizantes minerais.

Com o parcelamento da fertirrigação, pode-se avaliar a eficácia da aplicação realizada. Sendo necessário, recalcular as dosagens para as próximas aplicações. Para assegurar a preservação ambiental recomenda-se restringir a quimigação apenas à área efetivamente cultivada, eliminando a ocorrência de deflúvio superficial no final dos sulcos.

10.7.2.5 Custo de investimento e operacional do sistema

Conectando-se os tubos DN 100 com auxílio de um lubrificante adequado (sem adesivo) pode-se avaliar o custo de investimento em função do comprimento das parcelas irrigadas. Assim, adquirindo-se 14 tubos (84 m) para irrigar parcelas com 120 m de comprimento, o custo estimado será R\$ 560,00/ha. O restante, caixa de recepção (pode ser sucata), esticador e fio de nylon não deve ultrapassar R\$ 80,00, totalizando então cerca de R\$ 640,00/ha (valores prevalentes no Estado de São Paulo em 2020). Aumentando o comprimento das parcelas ou deslocando o equipamento para irrigar sequencialmente outros 120 m de comprimento, o custo será reduzido pela metade (R\$ 320,00/ha); outro deslocamento e redução a 1/3 (R\$ 213,00/ha), e assim, sucessivamente.

Em condições mais rigorosas de restrições orçamentárias, deve-se considerar também, a possibilidade de adquirir um menor comprimento de tubulação e promover, também, o deslocamento lateral do equipamento na área irrigada. Enfim, existem alternativas para promover uma redução significativa no custo de investimento, procurando adequá-las aos recursos orçamentários disponíveis.

Assumindo a impossibilidade de avaliar um eventual custo relativo ao consumo de energia por bombeamento, em geral, reduzido ou inexistente, resta avaliar o custo de mão de obra para operar o sistema, responsável pela liberação da catraca do esticador a intervalos de tempo definidos. Esta ação promove o deslocamento do plug no interior da tubulação, até alcançar um novo orifício e, conseqüentemente, interromper a operação daquele com menor vazão. Sendo o deslocamento causado pela pressão hidrostática, a operação consiste apenas em liberar e travar a catraca do esticador instalada na caixa de recepção de água. Por ser simples e eventual, pode ser executada por alguém que esteja envolvido em outras atividades no projeto, onerando modestamente o custo operacional do sistema. A possibilidade de

automação deste processo tem sido sempre considerada. A dificuldade, porém, reside em obter colaboração especializada sem comprometer o objetivo de baixo custo intrínseco ao projeto de irrigação proposto.

10.8 Considerações finais

Os primeiros expressivos projetos de irrigação no país foram implementados pela iniciativa governamental, muitas vezes assessorada por empresas de consultoria internacional (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2017). Assim, por exemplo, o atual Distrito de Irrigação Nilo Coelho, em Petrolina, PE, originalmente denominado Massangano, tinha a irrigação por sulcos como o principal sistema, mesmo em uma área com solos desfavoráveis, que motivou a oportuna sugestão da *Overseas Development Administration* para aspersão convencional (DISTRITO DE IRRIGAÇÃO NILO COELHO, 2020) e, atualmente, irrigação localizada, bem adaptada à surpreendente fruticultura predominante no projeto.

Fato semelhante ocorreu no Estado de São Paulo (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1972) onde estudos pioneiros identificaram 4,5 milhões de hectares potencialmente irrigáveis, maioritariamente por sulcos. Na verdade, essas iniciativas trouxeram uma experiência internacional, na qual, os sistemas de irrigação por superfície predominavam na maior parte das áreas irrigadas no mundo.

Entretanto, uma inevitável indignação se manifesta atualmente, ao observar grandes áreas irrigadas por sulcos nas mais variadas condições de solos, disponibilidade hídrica e culturas ao redor do mundo e a escassez desse sistema no país. Aparentemente, não se identificam iniciativas para promover sistemas de irrigação desvinculados de interesses comerciais, contribuindo para concentrar esforços de ensino, pesquisa e extensão apenas em sistemas pressurizados. Em algumas excursões empreendidas aos projetos de irrigação em Juazeiro, BA, e arredores, era possível constatar uma irrigação por sulcos, com bom desempenho, em diversas culturas, apesar da limitada orientação técnica. Chamava a atenção os sistemas implantados nas áreas canavieiras da Agrovale, com sulcos de até 300 m de comprimento, executados em Vertissolos muito apropriados ao sistema, ao que parece, orientados por técnicos estrangeiros. Segundo Soares *et al.* (2003) a área irrigada por sulcos aproximava-se de 14.000 ha. Em outra oportunidade, observou-se grande quantidade de mangueiras de irrigação por gotejamento, descartadas por problemas de obstrução, e pivôs centrais em operação, provocando enormes enxurradas em direção aos drenos. Ficou demonstrado que, mesmo sistemas altamente tecnológicos, porém mal orientados, resultam em flagrantes desastres de desempenho e comprometimento ambiental.

Não há informação precisa sobre o número de propriedades agrícolas, com seus titulares descapitalizados, que poderiam ser beneficiados pelo sistema de irrigação aqui proposto. Temos que reconhecer a sutileza do Prof. J.G.Peres, UFSCar, Araras, que em congressos profissionais apregoava, com sabedoria, que estimular a irrigação por superfície no país "*es una tarea calificada para Don Quijote, peleando contra los molinos de viento*". De fato, os adversos da irrigação por superfície têm apresentado apenas argumentos imaginários para justificar seu descrédito nesses sistemas. Seria desejável que direcionassem suas inoportunas manifestações depreciativas aos quatro protocolos que orientam o desenvolvimento do sistema de irrigação aqui proposto, notadamente, o econômico e o social. É pouco provável identificar alternativa de irrigação com custo de investimento em torno de R\$ 640,00/ha, que pode chegar a R\$ 320,00/ha, reunindo as inquestionáveis características vantajosas aqui discutidas.

Deve-se reconhecer, todavia, a facilidade e conveniência em se dimensionar sistemas de irrigação pressurizados (SCALOPPI; ALLEN, 1993a), até mesmo pivôs centrais (SCALOPPI; ALLEN, 1993b), com informações facilmente disponibilizadas e fornecidas aos confortáveis ambientes climatizados. Ao contrário, a irrigação por superfície não envolve interesses

comerciais e requer ensaios no campo, onde muitas vezes, não há sequer cooperação, ressarcimento de despesas ou pagamento de honorários profissionais, apesar de conferir ao técnico, o reconhecimento da autoria e responsabilidade pelo projeto. Considerando essa desfavorável realidade, deve-se reconhecer que, mesmo revelando a potencialidade testemunhada em todo o mundo, a divulgação e opção por sistemas de irrigação por superfície dependem de iniciativas individuais ou apoio de entidades governamentais ou não governamentais, cooperativas diferenciadas ou empresas comprometidas com a melhoria da qualidade de vida dos agricultores. Este apoio poderia constituir equipes técnicas especializadas, a nível regional, para divulgar e orientar os agricultores em seus projetos, que seriam disponibilizados como áreas de demonstração aos interessados em multiplicar essa iniciativa, capaz de transformar agricultores tradicionais em competentes empresários rurais gestores de seus projetos.

Considerando a estimativa da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2017) de 11,2 milhões de hectares reunindo condições muito favoráveis de recursos hídricos, topografias e solos, para ampliação da área irrigada nacional, é possível reconhecer que uma parte significativa dessa área possa aumentar também, o número de agricultores contemplados em usufruir os benefícios globalmente reconhecidos dos sistemas de irrigação por superfície em suas iniciativas empreendedoras. Entretanto, seria desejável que o aumento no número de agricultores compartilhando a expansão das áreas irrigadas fosse incluído como um dos objetivos dessa promissora realidade.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas da Irrigação: Uso da Água na Agricultura Irrigada**, 86p., 2017. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/AtlasIrrigacao-UsodaÁguanaAgriculturaIrrigada.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURE AND BIOLOGICAL ENGINEERS. ASABE, 2020. Disponível em: <https://www.un-ihe.org/news/l%C3%A1szl%C3%B3-hayde-receives-american-society-agricultural-and-biological-engineers-award>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- BALI, K.; GILL, T.; LENTZ, D.; ZACCARIA, D.; PUTMAN, D. **Automation of surface irrigation systems**. 2015. University of California, Agriculture and Natural Resources, Cooperative Extension, 45p., 2021. Disponível em: <https://ucanr.edu/sites/programteams/files/208233.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Diagnóstico Básico para o Plano Estadual de Irrigação**, DAEE, 1972.
- DISTRITO DE IRRIGAÇÃO NILO COELHO, DINC, 2020. Disponível em: <https://www.dinc.org.br/histórico>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Deficit irrigation practices. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Water report**, Rome, n.22, 102p., FAO, 2002.
- KEMPER, W.D.; HEINEMANN, W.H.; KINCAID, D.C.; WORSTELL, R.V. **Cablegation: I. Cable controlled plugs in perforated supply pipes for automatic furrow irrigation**. Transactions of the ASAE, St. Joseph, n.6, v.24, p.1526-1532, 1981.
- KOECH, R.; SMITH, R.J.; GILLIES, M.H. A real-time optimization for automation of furrow irrigation. **Irrigation Science**, v.32, p.319-327, 2014.
- LINDEN, D.R.; DIXON, R.M.; GUITJENS, J.C. Soil air pressure under successive border irrigation and simulated rain. **Soil Science**, v.124, p.135-139, 1977.
- OUDA, S.; ZOHRY, A.E.; NORELDIN, T.E. Deficit irrigation - a remedy for water scarcity. **Springer International Publishing**, Switzerland, 196p., 2020.

- SAMANI, Z.A.; WALKER, W.R.; WILLARDSON, L.S. Infiltration under surge flow irrigation. **Trans. ASAE**, v.28, p.1539-1542, 1985.
- SCALOPPI, E.J. **Two-dimensional soil-water flow and solute transport simulation in surface irrigation**. 158p., 1996. Dissertação (Ph.D. em Engenharia de Irrigação) - Utah State University, Logan, Utah, EUA, 1996.
- SCALOPPI, E.J. Irrigação por superfície. In: MIRANDA, J.H.; PIRES, R.C.M. (Ed.) Irrigação. **Série Engenharia Agrícola**. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, v.2, p.311-404, 2003a.
- SCALOPPI, E.J. Sistematização da superfície para irrigação e drenagem. In: MIRANDA, J.H.; PIRES, R.C.M. (Eds.) Irrigação. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, **Série Engenharia Agrícola**, v.2, p.405-470, 2003b.
- SCALOPPI, E.J. Sistemas alternativos de irrigação de baixo custo. Fundação de Estudos Agrônômicos e Florestais, **Boletim Técnico**. Botucatu, SP, v.2, 47p., 2011.
- SCALOPPI, E.J.; ALLEN, R.G. Hydraulics of irrigation laterals: comparative analysis. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, New York, v.110, n.1, p.91-115, 1993a. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9437](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9437). Acesso em: 25 mar. 2021.
- SCALOPPI, E.J.; ALLEN, R.G. Hydraulics of center-pivot laterals. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, New York, v.110, n.3, p.554-567, 1993b. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9437%281993%29119%3A3%28554%29>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- SCALOPPI, E.J.; MERKLEY, G.P.; WILLARDSON, L.S. Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, New York, n.1, v.121, p.57-70. 1995.
- SCALOPPI, E.J.; WILLARDSON, L.S. Practical land grading based on least squares. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, New York, v.112, n.1, p.98-109, 1986.
- SKAGGS, R.W.; KRIZ, G.J.; BERNAL, R. Irrigation through subsurface drains. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, ASCE, New York, v.98, n.3, p.363-373, 1972.
- SOIL CONSERVATION SERVICE. USDA. **Cablegation - an automated furrow irrigation system**. NE Leaflet, Lincoln, Nebraska. n.12, 2020. Disponível em: http://irrigationtoolbox.com/IrrigationToolBox/Section7_IWMPlan/CablegationPamphlet.pdf. Acesso em: 25 mar. 2021.
- SOARES, J.M.; VIEIRA, V.J.S.; GOMES, J.R.W.F.; ARAUJO FILHO, A.A. Agrovale, uma experiência de 25 anos em irrigação de cana-de-açúcar na região do submédio São Francisco. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, v.60, p.55-62, 2003.
- STRINGHAM, G.E.; DUKE, H.R.; WALKER, W.R.; HUMPHERYS, A.S.; EVANS, R.G.; BASSETT, D.L.; MILLER, D.E.; AARSTAD, J.S.; BLAIR, A.W.; SMERDON, E.T.; McCORMICK, P.S.; PODMORE, T.H. Surge flow irrigation. Final Report of the Western Regional Research Project W-163, Utah Agric. Exp. Sta., Logan, Utah, Research Bulletin 515, 92p., 1988.
- STRINGHAM, G.E.; KELLER, J. Surge flow for automatic irrigation. In: ASCE IRRIGATION AND DRAINAGE DIVISION SPECIALTY CONFERENCE, Albuquerque, NM, p.132-142, 1979.
- TV Unesp, 2015. Ciência Sem Limites: veja como fazer irrigação de baixo custo eficiente. Disponível em: [youtube.com/watch?v=cuEPebF88Nw&ab_channel=TVUnesp](https://www.youtube.com/watch?v=cuEPebF88Nw&ab_channel=TVUnesp). Acesso em: 25 mar. 2021.
- UDDIN, J.; SMITH, R.J.; GILLIES, M.H.; MOLLER, P.; ROBSON, D. Smart automated furrow irrigation of cotton. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, New York, v.144, n.5, 2018. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0001282>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. USGS, 2015. Disponível em: https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/irrigation-methods-furrow-or-flood-irrigation?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. Acesso em: 25 mar. 2021.

CAPÍTULO 11

11 VARIABILIDADE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CONTEXTO DA AGRICULTURA IRRIGADA

Paulo Cesar Sentelhas

Resumo

O clima e sua variabilidade se constituem num dos principais fatores condicionantes da produção vegetal, determinando o sistema agrícola a ser empregado (sequeiro ou irrigado), o crescimento e o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, os níveis de produtividade e a qualidade dos produtos agrícolas, além de interferir na relação das plantas com os microrganismos (pragas e doenças) e de afetar as condições para as operações agrícolas de campo. No contexto da agricultura irrigada, além dos aspectos mencionados, as condições meteorológicas interferem no planejamento e dimensionamento dos sistemas de irrigação, assim como no manejo de água, já que as variáveis meteorológicas, juntamente com as características da cultura e do solo, definem a demanda hídrica das culturas (evapotranspiração) e os níveis de *deficit* hídrico a que essas ficam sujeitas ao longo do ciclo. Assim, avaliar a variabilidade das condições meteorológicas e seus impactos no balanço hídrico das culturas e na necessidade de irrigação é fundamental para que se obtenha sucesso com os sistemas irrigados. Além disso, torna-se importante também considerar como as mudanças climáticas, que já vem ocorrendo e as que deverão continuar nas próximas décadas, poderão impactar o uso da irrigação, ou ainda, como a intensificação da irrigação, onde possível, poderá se tornar uma aliada na mitigação dos efeitos negativos das mudanças climáticas na agricultura. Este capítulo abordará, de forma objetiva, os principais aspectos relacionados aos impactos da variabilidade e das mudanças climáticas no contexto da agricultura irrigada, contribuindo, assim, para que os leitores possam ter uma visão crítica dos impactos do clima futuro na agricultura irrigada e do papel da irrigação na minimização do risco climático para a agricultura e na melhoria da segurança alimentar.

11.1 Introdução

A irrigação é uma prática agrícola que tem por objetivo suprir os requerimentos hídricos das culturas anuais e perenes em épocas ou regiões em que as deficiências hídricas ocorrem com frequência e intensidade elevadas, não permitindo que produtividades economicamente viáveis sejam alcançadas (PEREIRA *et al.*, 2002). Nessas condições, a irrigação poderá ser feita de forma emergencial (salvamento), parcial (irrigação com *deficit*) ou plena, sendo que a lâmina de água a ser aplicada irá depender das características do ambiente de produção (clima e solo), da cultura em questão e sua fenologia e do sistema de irrigação empregado. Sendo assim, a irrigação é uma prática que visa trazer estabilização das produtividades e, conseqüentemente, da oferta de alimentos, fibras e energia, ajudando a atender a demanda desses produtos ao redor do mundo (DÖLL, 2002).

Dentre os fatores que determinam a necessidade do uso da irrigação e como esta deve ser manejada, as condições climáticas figuram como o principal, já que são as variáveis meteorológicas (radiação solar, temperatura do ar, *deficit* de pressão de vapor e velocidade do vento) que definem a magnitude da taxa de evapotranspiração dos sistemas agrícolas, controlando, juntamente com as chuvas, o balanço hídrico das culturas, que por sua vez define a disponibilidade de água no solo e a necessidade de irrigação (quando e com quanto irrigar) (PEREIRA *et al.*, 2002). Assim, o conhecimento das características climáticas da região, especialmente sua variabilidade sazonal e interanual, é fundamental para o gerenciamento

racional dos recursos hídricos de uma propriedade agrícola, desde o planejamento eficiente de projetos até o manejo da irrigação.

Em razão da crescente demanda mundial por produtos agrícolas, a agricultura irrigada figura como uma das possíveis soluções para a elevação da produção agrícola mundial, já que a expansão das áreas agricultáveis está cada vez mais limitada por razões climáticas, ambientais e socioeconômicas. Atualmente, a agricultura irrigada ocupa cerca de 1/5 da área agrícola do mundo, porém é responsável por 2/5 da produção agrícola mundial (DÖLL, 2002). Considerando-se que a área com irrigação que atualmente se tem no Brasil ainda é muito pequena, o potencial de expansão da agricultura irrigada em diversas regiões brasileiras, incluindo aquelas onde agricultura irrigada já vem sendo praticada, é enorme, da ordem de 12 milhões de ha, de acordo com Borghetti *et al.* (2017). No entanto, essa expansão deverá ser feita de forma ordenada, levando-se em conta, inclusive, aspectos relativos à variabilidade e às mudanças climáticas, já que ambas afetam tanto a demanda hídrica das culturas como a disponibilidade de água nos mananciais (rios e reservatórios) para a irrigação.

Se por um lado a irrigação é uma prática que visa incrementar a produção agrícola mundial por meio do uso de terras inaptas ao cultivo de sequeiro, por outro, ela também figura como uma estratégia de mitigação para os possíveis impactos a serem causados pelas mudanças climáticas na produtividade das culturas em áreas onde atualmente essas vem sendo cultivadas sob regime de sequeiro (CUNHA *et al.*, 2014; NECHIFOR; WINNING, 2019). A complexidade deste tema, fez com que nos últimos anos muitos trabalhos abordassem os efeitos da variabilidade e das mudanças climáticas sob essas duas óticas, ou seja, como as oscilações e alterações climáticas vem impactando e irão impactar a demanda de irrigação e como a irrigação pode vir a ser uma solução para manter a produtividade das culturas em níveis compatíveis com a demanda futura.

11.2 Variabilidade, tendências, anomalias e mudanças climáticas

A variação espacial e temporal do tempo e do clima são características intrínsecas dos sistemas meteorológicos. A variação temporal é uma característica que deve ser estudada em detalhes, já que esta, nas suas mais variadas escalas, permite entender como era o clima local no passado distante (centenas de anos), no passado recente (décadas) e no presente (meses a anos), além de possibilitar, a partir de modelos climáticos globais (MCG), projetar o clima futuro. Para uma melhor compreensão das variações climáticas de um dado local ou região, é pertinente conhecer os conceitos de tempo e clima, assim como de variabilidade, tendência, anomalia e mudanças climáticas. Para tanto, deve-se considerar, de acordo com a recomendação da Organização Mundial de Meteorologia (OMM), um período de no mínimo de 30 anos (ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007), em que as condições específicas de um dado dia ou período representem a média aritmética das variáveis meteorológicas. Assim, o clima é uma condição média e supostamente estática, enquanto o tempo é extremamente dinâmico (PEREIRA *et al.*, 2002).

A combinação das escalas temporal e espacial dos fenômenos meteorológicos resulta no que se denomina de variabilidade climática, que nada mais é do que a oscilação das condições meteorológicas em torno da média aritmética, também conhecida como normal climatológica. A variabilidade climática é resultante da combinação dos diversos fatores meteorológicos dinâmicos que atuam na região, associados às variações na circulação da atmosfera. Dentre esses fatores temos o Dipolo do Atlântico (DDA), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o El Niño Oscilação Sul (ENOS), a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação de Madden-Julian (OMJ). Para exemplificar a variabilidade climática, a Figura 1 apresenta as chuvas anuais em Piracicaba, SP, entre os anos de 1903 e 2020, as quais apresentam uma variação interanual em torno da normal climatológica (1286 mm), sendo o desvio-padrão dessa série histórica (± 227 mm), a variabilidade esperada. Além disso, a Figura 1 permite, ainda, se observar diversos intervalos de curto prazo com tendências, que

representam períodos em que as chuvas são crescentes (tendência positiva), como ocorreu entre 1978 e 1983, ou decrescente (tendência negativa), como foi observado entre os anos de 1947 e 1956, o que, no entanto, não representam mudanças do clima. Finalmente, na Figura 1 é possível se identificar, também, os eventos de chuvas extremas, que vão muito além da variabilidade esperada, o que caracteriza as anomalias climáticas. Essas condições anômalas são normalmente causadas pelos fenômenos naturais já mencionados, sendo o principal deles o ENOS, em suas fases quente (El Niño), fria (La Niña) e neutra. Na Figura 1, observa-se que ao longo dos 118 anos da série histórica de Piracicaba, houve diversas anomalias negativas, como em 1916, 1921, 1978, 1984 e 2014, assim como positivas em 1904, 1911, 1912, 1983 e 1984. O importante, nesse contexto, é entender que tanto as tendências como as anomalias são eventos intrínsecos da variabilidade climática e que essas oscilações nas condições meteorológicas são responsáveis, em grande parte, pelos riscos para a agricultura, seja ela de sequeiro ou irrigada. Finalmente, vale ressaltar que os padrões de variabilidade climática são distintos nas diferentes regiões do Brasil e do mundo, havendo aquelas onde há mais variabilidade sazonal e interanual e outras onde essas variabilidades são menores.

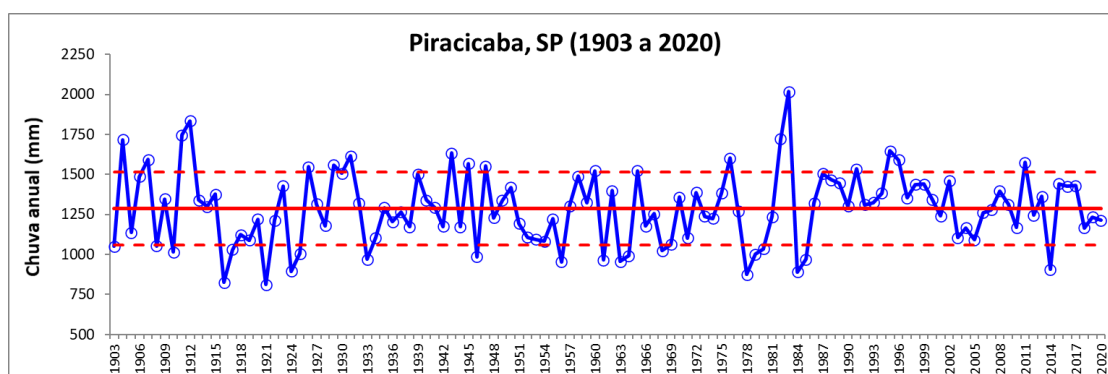


Figura 1. Variação interanual da chuva anual em Piracicaba, SP, de 1903 a 2020, onde são destacadas a condição média (linha vermelha contínua) e a variação esperada (desvio-padrão - linhas vermelhas tracejadas). (Posto Meteorológico do Departamento de Engenharia de Biosistemas, Esalq/USP).

No caso das mudanças climáticas, esta pode ser considerada como uma tendência de longo prazo, o que denota alteração expressiva da média de uma dada variável meteorológica ou da variabilidade interanual ao longo de períodos sucessivos de pelo menos 30 anos. É importante se ressaltar que os termos variabilidade, tendência, anomalia e mudança climática estão muitas vezes associados entre si, não havendo uma distinção clara entre eles, já que dependendo da escala de tempo considerada, uma dada variação que poderia ser classificada com uma variabilidade climática numa escala de milênios, seria considerada como uma mudança climática na escala de décadas ou séculos. A Figura 2 apresenta a variação da temperatura média da Terra desde 1850, na qual observa-se uma tendência contínua de aumento da temperatura global, especialmente a partir de 1910. No período entre 1910 e 2018, a temperatura média global sofreu um aumento de cerca de 1,3°C, o que caracteriza uma mudança do clima (BERKELEY EARTH, 2020). Isso é confirmado a nível local com os dados apresentados na Figura 3, em que se observa que a temperatura média anual de Piracicaba, SP, sofreu igualmente um incremento de 1,3°C em 118 anos, passando de cerca de 21°C para a normal de 1903 a 1932 para 22,3°C para a normal de 1990 a 2019.

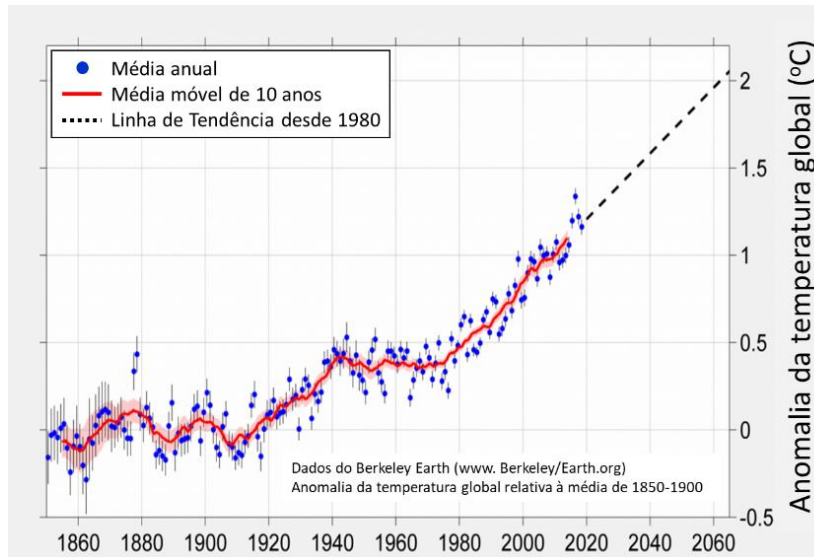


Figura 2. Variação da temperatura média global nos últimos 170 anos, expressa pelas diferenças (anomalias) em relação à média de 1850 a 1900, e a projeção até 2060 (BERKELEY EARTH, 2020).

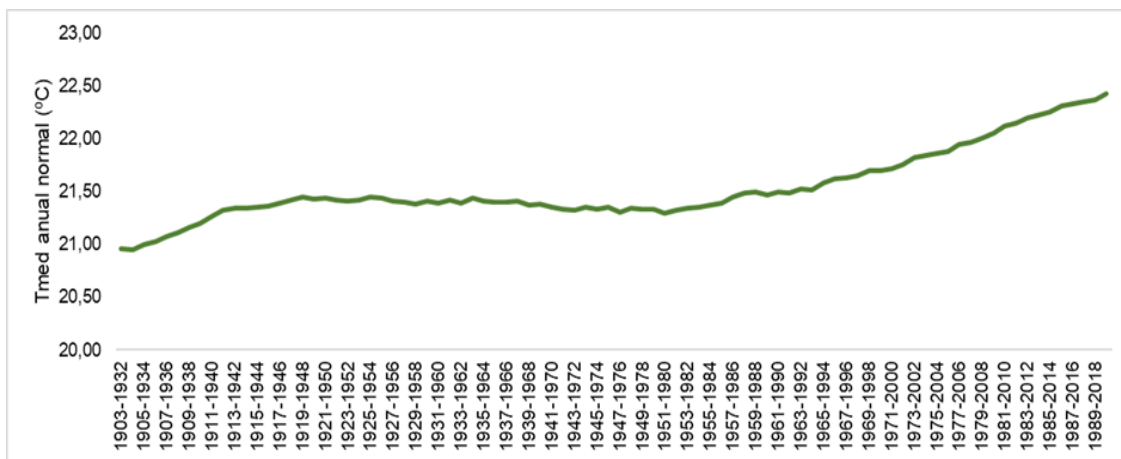


Figura 3. Temperatura média anual normal para períodos sucessivos de 30 anos (1903-1932, 1904-1933,..., 1989-2018 e 1990-2019) em Piracicaba, SP (VIEIRA, 2020).

Desse modo, é importante se destacar que as mudanças climáticas não estão apenas relacionadas às alterações que estão por vir, mas também com aquelas que já ocorreram ao longo dos últimos séculos, decorrentes de diferentes causas, conforme os fatores apresentados a seguir (PEREIRA *et al.*, 2002): (i) Extraterrestres: neste caso a causa é a variação da atividade solar, como mostra a Figura 4, a qual mostra que de 1880 até 1960 houve um aumento da atividade solar, o que em parte justificou o aumento observado na temperatura global. No entanto, a partir da década de 60 do século XX, a atividade solar primeiramente se estabilizou, passando, então, a diminuir, o que deixou de justificar o contínuo aquecimento global observado especialmente a partir da década de 1970, (ii) Astronômicas: as causas de origem astronômicas são aquelas relacionadas, basicamente a três aspectos das relações Terra-Sol (Figura 5): precessão, a qual está relacionada ao tempo necessário para que o eixo terrestre transcreva uma volta completa em torno da perpendicular ao plano da Eclíptica (o tempo para que isso ocorra é estimado em 25,8 mil anos); obliquidade, a qual indica a variação da inclinação do eixo terrestre em relação à perpendicular ao plano da Eclíptica, cujo tempo estimado para uma variação completa é de 41 anos; e, finalmente, a excentricidade da órbita, que indica a mudança da distância Terra-Sol, o que estima-se levar por volta de 100 mil anos. Assim, vemos que esses fatores, devido à longa escala de tempo

requerida, não podem ser os responsáveis pelas mudanças recentes do clima da Terra e nem das projeções de alteração para as próximas décadas, e (iii) Terrestres: dentre os fatores denominados terrestres, ou seja, que ocorrem exclusivamente em nosso planeta, a modificação da composição química da atmosfera, principalmente pelo aumento emissão dos gases de "efeito estufa" absorvedores de ondas longas emitidas pela Terra, são os mais plausíveis para gerar alteração da condição térmica do planeta. Seja por causas naturais ou antropogênicas, este fator vem sendo considerado como o principal causador das mudanças climáticas recentes (a partir de 1850). No caso da ação antrópica, a intensificação do uso de combustíveis fósseis, os desmatamentos, as queimadas e as atividades agropecuárias são as principais responsáveis pela modificação da concentração dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, fator determinante para o aquecimento global, com efeitos que podem durar séculos. Dentre os GEE, o CO_2 , é o principal já que a variação da sua concentração na atmosfera tem sido muito grande ao longo dos últimos 60 anos, como mostra a Figura 6.

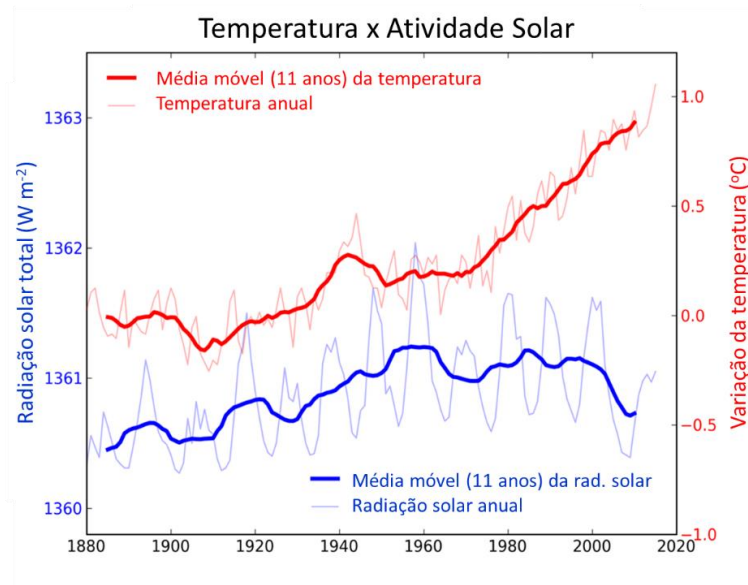


Figura 4. Atividade solar versus variação da temperatura global para o período de 1880 a 2015. Adaptado de NASA GISS & TSI.

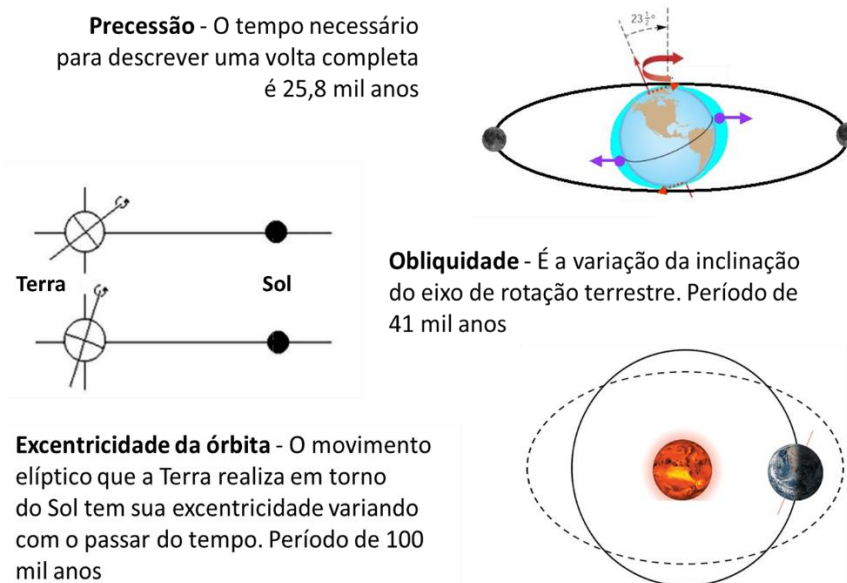


Figura 5. Principais fatores astronômicos responsáveis por mudanças no clima da Terra.

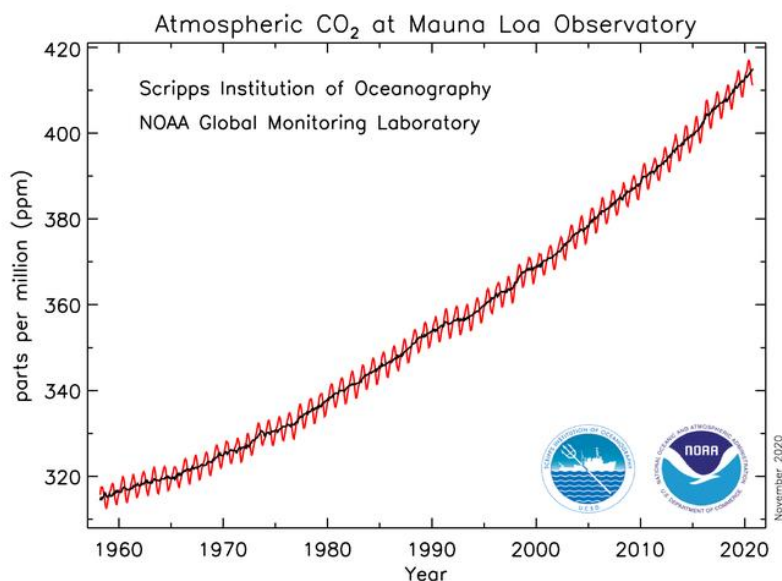


Figura 6. Variação temporal da concentração de CO₂ atmosférico observado na ilha de Mauna Loa, Havai, Estado Unidos, desde o final dos anos 50 (EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY, 2020).

Considerando-se os fatores causadores das mudanças climáticas listado acima, o mais plausível em termos do que já vem sendo detectado e do que está por vir nas próximas décadas é a alteração da concentração dos GEE, já que há uma alta correlação entre o aumento da concentração de CO₂ (Figura 6) e o aumento da temperatura global (Figura 2).

Diante do quadro traçado pelos últimos relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), as projeções climáticas futuras indicam a continuidade do aquecimento global nas próximas décadas (Figura 7). No entanto, o cenário é bastante incerto já que a intensidade da mudança irá depender dos padrões futuros de consumo de combustíveis fósseis. De acordo com a Figura 7, existem basicamente quatro cenários mais prováveis em que as temperaturas até 2100 podem subir de 1°C até 4°C, respectivamente, para um cenário de menor consumo de combustíveis fósseis (RCP2.5) até um cenário em que os padrões se mantenham nos níveis atuais ou até mesmo piores (RCP8.5). Sendo assim, apesar de haver um consenso de que as temperaturas continuem subindo nas próximas décadas, não se sabe ao certo a que nível chegaremos. A expectativa em relação à emissão de GEE é incerta, o que traz igual incerteza para as projeções futuras de clima. Em decorrência dessas incertezas, as projeções climáticas futuras vêm sendo feitas considerando-se diferentes cenários de emissões, conhecidos como RCPs (*Representative Concentration Pathways*), que expressam as possíveis trajetórias da concentração de GEE para o futuro e, em função disso, os cenários esperados de temperatura do ar (Figura 7). Com relação às chuvas, os cenários futuros são ainda mais incertos, já que não há consenso entre os modelos empregados para a realização das projeções futuras (Figura 8).

Para o Brasil, os modelos climáticos globais/regionais indicam projeções de elevação das temperaturas, porém, com taxas que variam entre eles. Para a chuva, os cenários não são conclusivos, com indícios de aumento em algumas regiões e redução em outras, dependendo do modelo considerado (AMBRIZZI *et al.*, 2007; MARENGO, 2009; TORRES; MARENGO, 2013; CHOU *et al.*, 2014; REBOITA *et al.*, 2014; SÁNCHEZ *et al.*, 2015).

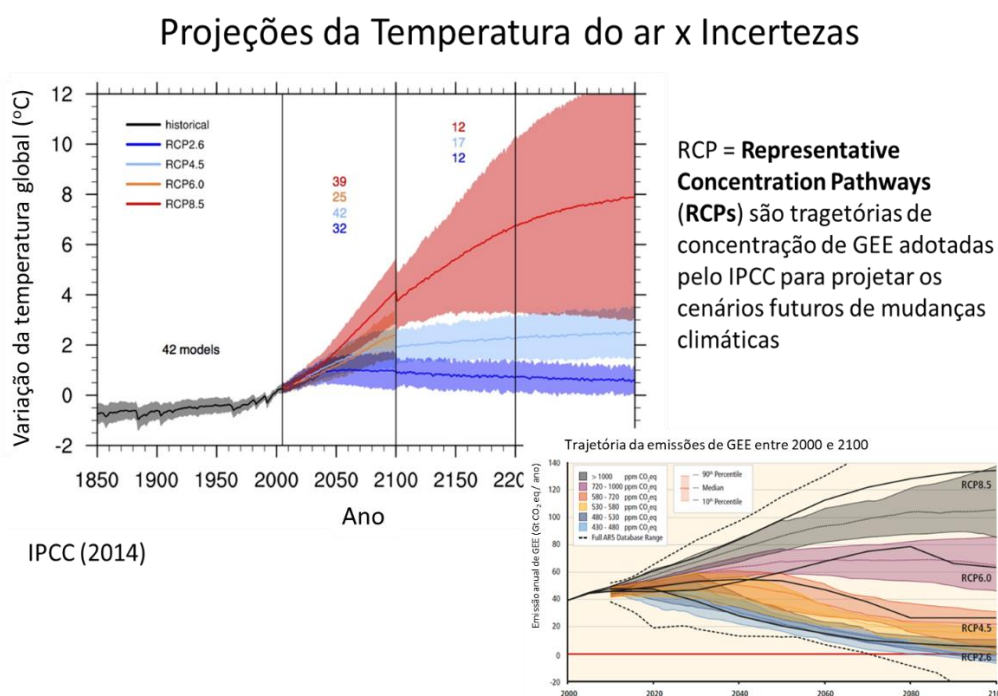


Figura 7. Cenários de mudanças climáticas (temperatura do ar) para os próximos anos em decorrência dos padrões de consumo de combustíveis fósseis (INTERGOVERNAMENTAL PANEL CLIMATE CHANGE, 2014).

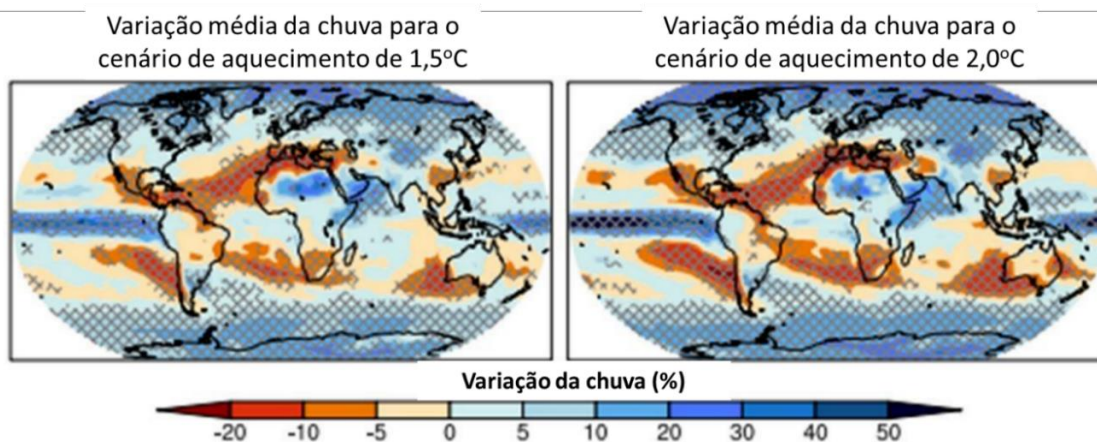


Figura 8. Cenários de mudanças climáticas (chuva) para 2100, considerando-se os cenários de aumento da temperatura de 1°C e 2°C, onde observa-se redução de chuvas em grande parte do Brasil (INTERGOVERNAMENTAL PANEL CLIMATE CHANGE, 2014).

11.3 Impactos da variabilidade e das mudanças climáticas nas culturas agrícolas

O efeito da variabilidade e das mudanças climáticas nas culturas agrícolas se dará principalmente na duração do ciclo, em função do aumento das temperaturas, e na produtividade, como consequência das alterações nas condições térmicas, hídricas e na concentração de CO₂ (BENDER, 2017). No caso do CO₂, sendo este gás fonte de carbono para o processo fotossintético, espera-se que a elevação de seus níveis aumente a produção de fotoassimilados, promovendo uma maior taxa de crescimento das plantas, resultando em maiores produtividades (STRECK, 2005; MARTINEZ *et al.*, 2015). Por outro lado, a elevação da concentração de CO₂ resultará em redução da condutância estomática, em razão da redução da abertura dos estômatos, reduzindo a taxa de transpiração das plantas (LEAKEY, 2009; SILVA *et al.*, 2012), o que por sua vez irá afetar a quantidade de água absorvida pelo

sistema radicular, resultando em redução da quantidade de nutrientes a serem absorvidos. Esse fato poderá levar à necessidade de adubações em maior quantidade de modo a atender as necessidades da cultura para obtenção de altas produtividades (WALTER *et al.*, 2015).

Apesar das abordagens descritas acima serem plausíveis, é esperado que a resposta das diferentes espécies vegetais (C₃ e C₄) à elevação da concentração de CO₂ varie (GRAY; BRADY, 2016). Assim, sob maior concentração de CO₂ as plantas de metabolismo C₃ deverão apresentar uma redução das perdas por fotorrespiração, havendo um aumento na taxa de fotossíntese líquida, enquanto as plantas com metabolismo C₄ não deverão responder na mesma proporção ao incremento de gás carbônico atmosférico (ARAÚJO *et al.*, 2015; MARTINEZ *et al.*, 2015). Por outro lado, as plantas de metabolismo C₄ poderão ser beneficiadas pela elevação na concentração de CO₂, quando submetidas às condições de *deficit* hídrico ou nutricional (LEAKEY, 2009). As respostas das plantas C₃ e C₄ ao aumento na [CO₂] foram avaliadas no estudo de simulação de Jalota *et al.* (2009), os quais mostraram que a duplicação da concentração desse GEE, mantendo-se as temperaturas nos padrões atuais, resultou em aumentos na produtividade nas culturas do milho (6,5%), algodão (5,5%) e arroz (4,9%). Por outro lado, Vanaja *et al.* (2015), utilizando cultivos em câmaras de topo aberto, para três genótipos de milho, sob condições atuais (390 ppm) e de elevada (550 ppm) [CO₂], mostraram ganhos mais expressivos tanto da biomassa da parte aérea, variando de 32 a 47%, como da produtividade de grãos, entre 46 a 127%.

Se considerados os impactos da elevação das temperaturas no crescimento e desenvolvimento das plantas, os efeitos benéficos do aumento da [CO₂] na produtividade das culturas poderão ser anulados, em função dos seguintes fatores: encurtamento do ciclo; aumento da respiração de manutenção; e aumento das condições de estresse hídrico (STRECK, 2005). Tripathy *et al.* (2009) observaram que a redução na produtividade, devido ao stress térmico, pode ser compensada pela duplicação na [CO₂]. Esses autores encontraram que o dobro de gás carbônico na atmosfera pode mitigar as perdas na produtividade devido ao efeito adverso do aumento de até 1°C no caso do milho, 2°C para as culturas do trigo e do arroz, e de até 3°C no caso da cultura do milho. Resultados similares foram obtidos por Jalota *et al.* (2009), que mostraram que as produtividades das culturas de milho, arroz e algodão não foram afetadas quando submetidas a um aumento da temperatura em 2°C e com o dobro da [CO₂] em relação ao cenário atual (390 ppm).

No Brasil, Costa *et al.* (2009) e Bender (2017) mostraram que, sob condições de temperaturas mais elevadas, a produtividade do milho, tanto na safra quanto na safrinha, deverá ser reduzida nos cenários climáticos futuros, mesmo se considerando o aumento na concentração de CO₂ atmosférico, já que os efeitos negativos das temperaturas mais elevadas serão mais pronunciados do que o efeito benéfico do aumento na [CO₂], o que corrobora os resultados de Benlloch-Gonzalez *et al.* (2014) que verificaram que para a cultura do trigo que temperaturas elevadas reduziram os benefícios do incremento da [CO₂], em decorrência do desenvolvimento reduzido do sistema radicular, possivelmente associado à redução na condutância estomática e transpiração, o que ocasionou aumento da temperatura das folhas e do dossel, reduzindo o crescimento e a partição de biomassa. A compensação entre os efeitos negativos do aumento da temperatura do ar e os positivos decorrentes do incremento da concentração de CO₂ na atmosfera também foram observados por Verhage *et al.* (2017) para a cultura do cafeeiro arábica nas principais regiões produtoras do Brasil. Os resultados desse estudo mostraram que as perdas de produtividade decorrentes do aumento da temperatura do ar e do *deficit* hídrico irão aumentar para o período 2040-2070, enquanto as perdas por geada irão diminuir. No entanto, essas perdas de produtividade serão compensadas pelo incremento da concentração de CO₂, havendo inclusive um ligeiro aumento das produtividades (0,8%), desde que mantidas as proporções entre as áreas de produção de sequeiro e irrigada. Mais recentemente, Bender e Sentelhas (2020) observaram para a cultura da batata no Brasil que o impacto das mudanças climáticas irá depender da região produtora

e da época de plantio. Na região Sul, a produtividade da batata será beneficiada pelas mudanças climáticas, especialmente no cultivo de inverno. Por outro lado, nas regiões produtoras com climas mais quentes e secos, a produtividade da batata será penalizada nos cenários futuros, especialmente no cultivo de verão, quando as altas temperaturas e o maior *deficit* hídrico limitarão o crescimento das plantas.

11.4 Impactos da variabilidade e das mudanças climáticas no requerimento hídrico das culturas

Sendo as condições meteorológicas o principal fator condicionador do balanço de água no solo, é evidente que tanto a variabilidade como as mudanças climáticas irão impactar o requerimento hídrico das culturas. Enquanto a variabilidade climática faz com que as lâminas de irrigação variem temporalmente, nas escalas sazonal e interanual, e, também, espacialmente (THOMAS, 2008), as mudanças climáticas irão provocar aumento das necessidades hídricas das culturas e, conseqüentemente, da lâmina de irrigação requerida ao longo dos anos, apresentando uma tendência crescente e contínua (ZHANG; CAI, 2013).

De acordo com Döll (2002), as mudanças climáticas irão afetar não apenas os recursos hídricos, mas também a demanda hídrica das culturas e vegetações nativas. Assim, a segurança hídrica e alimentar no futuro irá depender, entre outros fatores, dos impactos que as alterações do clima provocarão na demanda hídrica das culturas, na disponibilidade de água no solo e, conseqüentemente, na irrigação. O aumento da evapotranspiração das culturas, resultante das maiores temperaturas, poderão levar a condições mais frequentes de *deficit* hídrico, mesmo que não haja expressivas mudanças no regime de chuvas (volume e distribuição), requerendo irrigação onde antes as culturas eram cultivadas sob a condição de sequeiro e maiores lâminas de irrigação nas regiões onde essa prática já vem sendo empregada (ZHANG; CAI, 2013; RIEDIGER *et al.*, 2014).

Wada *et al.* (2013), em um estudo a nível mundial, indicaram que a tendência observada desde o final da década de 1990, de expansão das áreas de agricultura irrigada no mundo, irá continuar no futuro, fazendo com que o uso de água pela irrigação em relação ao uso total se eleve em relação aos atuais 70%.

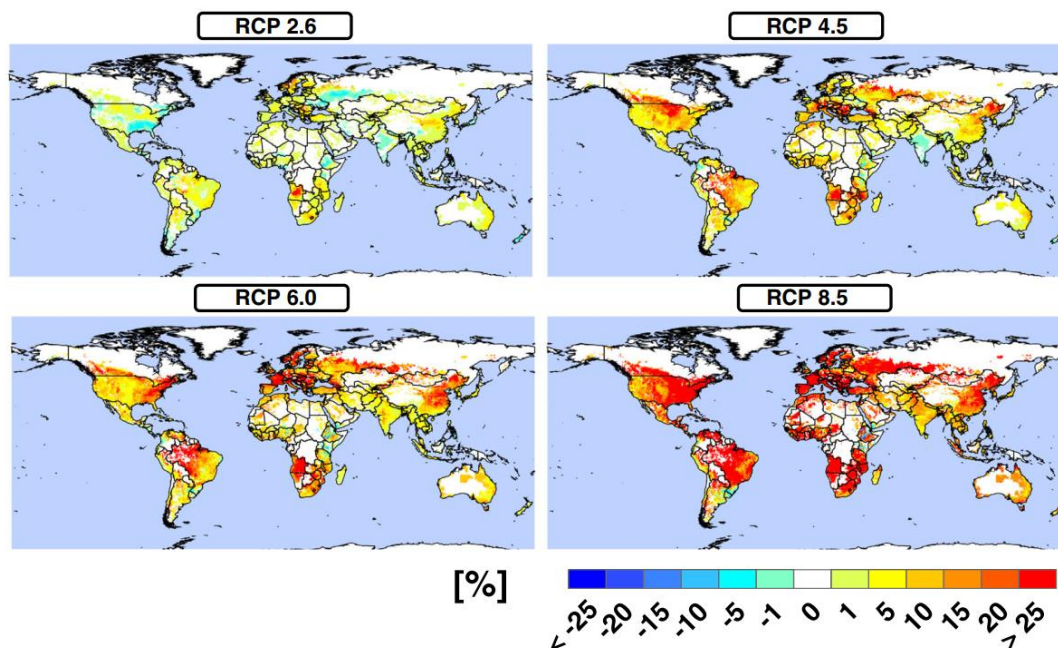


Figura 9. Mudança relativa da demanda de irrigação a nível mundial para o final do século XXI em relação à condição presente (2000). Os resultados são as médias das combinações de cinco modelo hidrológicos globais e cinco modelo climáticos globais, para os quatro cenários de emissões de gases de efeito estufa (RCP2.5, RCP4.5, RCP6.5 e RCP8.5) (WADA *et al.*, 2013).

Assim, a demanda futura de água para a irrigação irá aumentar, apesar das grandes incertezas associadas a essas previsões. Esses autores empregaram sete modelos hidrológicos globais (MHG) para quantificar o impacto das mudanças climáticas projetadas para o final do século XXI na demanda de irrigação para as áreas atualmente irrigadas. A combinação dos diferentes modelos resultou em aumento da demanda da irrigação, porém variando de acordo com o grau de aquecimento e das mudanças nas chuvas nas diferentes regiões do planeta e em função dos cenários de emissões de GEE (RCP) projetados (Figura 9). Sob o cenário menos crítico (RCP2.5), são observadas regiões onde a demanda de irrigação por volta de 2100 irá diminuir, em razão do aumento das chuvas. Isso irá ocorrer principalmente no hemisfério norte, incluindo regiões na América do Norte, Europa e Ásia, enquanto no hemisfério sul haverá um predomínio de leve aumento na demanda por irrigação. Ao se considerar o cenário mais crítico de emissões de GEE (RCP8.5), a demanda de irrigação irá aumentar consideravelmente em praticamente todas as regiões do planeta, sendo que no Brasil esse aumento deverá oscilar entre 15 e mais de 25% em 2100, com exceção apenas para o extremo sul do país, onde deve haver uma leve redução.

A Figura 10, também extraída de Wada *et al.* (2013), apresenta as relações da variação da demanda de irrigação com o aumento da temperatura (Figura 10a) e com a alteração da chuva (Figura 10b). Observa-se nessas análises que a relação entre a elevação das temperaturas e a demanda de irrigação é mais bem definida, com os coeficientes de correlação (R) para cada RCP variando de 0,54 a 0,97. Já a relação entre a demanda de irrigação e a alteração da chuva apresentou maior dispersão, com R entre 0,01 e 0,78, indicando um maior grau de incerteza em relação ao efeito da variação da chuva na demanda de irrigação, já que os cenários futuros projetados para a chuva são mais variáveis, com aumentos e diminuições em diferentes partes do planeta. Apesar dessas incertezas nas projeções futuras da demanda de irrigação ao redor do mundo, é notório que as mudanças climáticas irão, muito provavelmente, aumentar a necessidade de irrigação. Esse aumento, trará desafios para a produção agrícola mundial, já que em razão da crescente demanda por alimentos, fibras e energia, esta terá que ser substancialmente aumentada, sendo a irrigação um fator decisivo

para isso. Assim, todos os atores da cadeia produtiva, desde o agricultor até os órgãos governamentais, terão que trabalhar em conjunto para viabilizar e racionalizar o uso da irrigação.

Os resultados obtidos por Cunha *et al.* (2014) corroboram aqueles encontrados por Wada *et al.* (2013), confirmando a expectativa de que a irrigação será influenciada pelas mudanças do clima e que esse impacto irá variar entre as diferentes regiões brasileiras. Ainda de acordo com Cunha *et al.* (2014), as expectativas a médio prazo (30 anos) é de que haja um aumento no uso da irrigação no país, o que deverá se alterar a longo prazo, em função das limitações hídricas impostas pelas mudanças do clima.

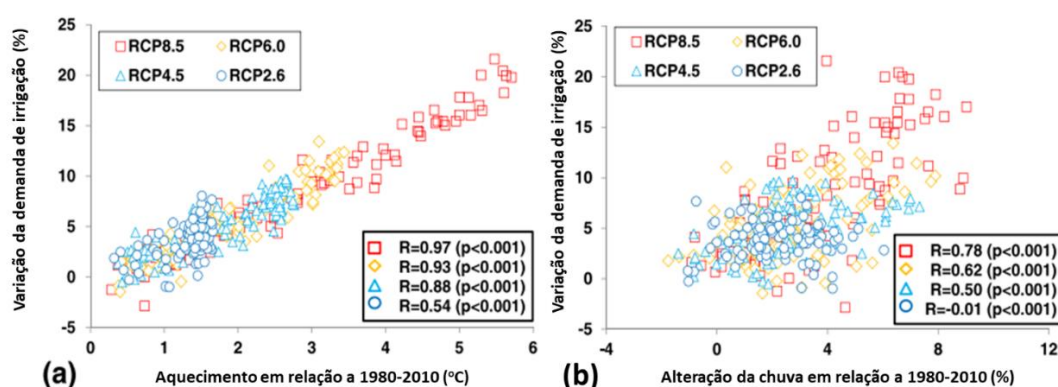


Figura 10. Mudança relativa da demanda de irrigação, a nível mundial, em função do aquecimento (a) e da alteração das chuvas (b), em relação às médias de 1980-2010, para os quatro cenários de emissões de gases de efeito estufa (RCP2.5, RCP4.5, RCP6.5 e RCP8.5). R é o coeficiente de correlação entre as variáveis, enquanto p representa o nível de significância dessas correlações (WADA *et al.*, 2013).

Os resultados apresentados acima mostram claramente que há uma alta probabilidade de que a necessidade de irrigação irá aumentar no futuro, em decorrência das mudanças climáticas, tanto em termos da expansão da área irrigada como da quantidade de água a ser aplicada nas culturas. Considerando-se o cenário futuro mais crítico (RCP8.5 para 2100), o uso de água para irrigação irá suplantar a disponibilidade de água para essa finalidade, o que irá exigir ações de adaptação que considerem, regionalmente, o ajuste do genótipo (maior tolerância a seca), construção de perfil de solo para maior aprofundamento das raízes e ações de manejo fisiológico de modo a tornar a cultura mais resiliente às altas temperaturas e à seca (RIEDIGER *et al.*, 2014).

11.5 Irrigação como estratégia de mitigação das mudanças climáticas

Entre as possíveis ações para se minimizar as perdas de produtividade das culturas agrícolas sob condições de variabilidade e mudanças climáticas, aquelas associadas ao manejo agrícola, como a adoção de cultivares tolerantes a seca e de ciclo mais tardio, uso da irrigação, alteração da época de semeadura e preparo profundo do solo e adubação, são as mais indicadas (BENDER, 2017), no entanto, o uso dessas práticas de forma isolada ou combinadas nas condições de clima futuro para as mais diversas culturas ainda é pouco estudado (BATTISTI, 2016). Para que estudos dessa natureza possam ser realizados deve-se lançar mão dos modelos de simulação de culturas, os quais permitem avaliar as produtividades em função das características do genótipo, do ambiente (clima e solo) e das ações de manejo. Desse modo, os modelos de simulação permitem, para um dado local e cultura, identificar as melhores ações de manejo (isoladas ou em conjunto) para mitigação dos riscos associados tanto à variabilidade quanto às mudanças climáticas, fornecendo informações detalhadas aos

agricultores, formadores de políticas públicas e tomadores de decisão, especialmente para a adaptação da agricultura às alterações do clima (RAUFF; BELLO, 2015).

Um exemplo de estudos dessa natureza foi realizado por Bender (2017) para a cultura do milho nas duas safras empregadas no Brasil. Nesse estudo, a autora empregou como ações de manejo para a mitigação das mudanças climáticas a alteração do genótipo (material mais tardio), a variação da época de semeadura, o aumento da adubação nitrogenada e o uso de irrigação com diferentes níveis de cobertura do *deficit* hídrico. Os resultados desse estudo mostraram que ganhos de produtividade para o milho de verão (Tabela 1) poderão ocorrer, em algumas localidades, nos cenários futuros, tanto na condição de sequeiro, quanto na irrigada, porém com variações, sendo que os maiores incrementos ocorrerão para a condição irrigada. Para a condição de sequeiro a otimização da época de semeadura, do ciclo do cultivar e da adubação nitrogenada levou a ganhos de produtividade apenas a curto e médio prazo e no cenário de emissão intermediário (RCP4.5) e a curto prazo no cenário de alta emissão (RCP8.5), com exceção para algumas poucas localidades e cenários de emissão que apresentaram incrementos de produtividade também a longo prazo. Para a condição irrigada, a otimização do manejo da cultura resultou em ganhos de produtividade na grande maioria dos cenários, exceto para algumas localidades no cenário de longo prazo (RCP8.5). Para o milho safrinha (Tabela 2), as ações de manejo geraram expressivos incrementos de produtividade em relação ao cenário atual, especialmente na condição irrigada. Os resultados apresentados neste estudo indicam que há possibilidade de que as ações de manejo agrícola revertam os impactos negativos das mudanças climáticas nas culturas, especialmente quando combinando-se diferentes estratégias, como também destacado por Altieri e Nicholls (2013).

Tabela 1. Alteração percentual da produtividade do milho de verão sob projeções de clima futuro, em cenários de emissão de GEE intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) para as condições de manejo atual e para as combinações de estratégias de manejo (época de semeadura, ciclo do cultivar, adubação), sem e com o uso de irrigação, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-Maize, para diferentes regiões brasileiras. Produtividade atingível se refere à produtividade obtida no cenário atual (BENDER, 2017).

Local	Produtividade atingível (kg ha ⁻¹)	RCP4.5			RCP8.5		
		2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
Cenários futuros sem estratégia de manejo							
RSCA	8732	-43	-47	-52	-45	-51	-66
MGPM	6997	-31	-34	-37	-32	-38	-46
MSIV	8668	-47	-54	-59	-51	-60	-75
MTDI	8185	-32	-42	-50	-35	-51	-71
PIBJ	6554	-53	-61	-66	-54	-68	-81
PASF	8614	-27	-38	-46	-28	-50	-68
Cenários futuros + combinação de manejo em sequeiro							
RSCA	8732	7	10	-13	17	-9	-3
MGPM	6997	44	38	35	39	33	5
MSIV	8668	23	3	-3	13	-4	-33
MTDI	8185	27	2	-11	21	-12	-48
PIBJ	6554	19	1	-11	13	-12	-41
PASF	8614	23	7	-6	22	-10	-43
Cenários futuros + combinação de manejo irrigado							
RSCA	8732	70	65	12	76	20	24
MGPM	6997	69	62	59	62	55	28
MSIV	8668	73	55	45	65	45	-3
MTDI	8185	49	19	5	43	2	-42
PIBJ	6554	65	46	31	60	31	-15
PASF	8614	35	20	5	33	1	-35

* RSCA - Cruz Alta, RS; MGPM - Patos de Minas, MG; MSIV - Ivinhema, MS; MTDI - Diamantino, MT; PIBJ - Bom Jesus do Piauí, PI; PASF – São Félix do Xingu, PA.

Apesar dos resultados desses estudos serem promissores, eles devem ser utilizados com cautela, já que tanto os cenários climáticos como os modelos de simulação das culturas apresentam incertezas. Nesse sentido, esses resultados devem ser encarados como exploratórios, servindo, a princípio, para orientar pesquisas sobre a integração de estratégias de manejo que visem a mitigação dos efeitos da variabilidade e das mudanças climáticas na produtividade agrícola. Além disso, outras ações, como o desenvolvimento de cultivares mais adaptados às condições de estresses térmicos e hídricos também deverão ser investigadas (ANGULO *et al.*, 2013; BATTISTI *et al.*, 2017), já que, segundo Elliott *et al.* (2014), a conversão das áreas de sequeiro em áreas irrigadas não será suficiente para compensar o efeito negativo das mudanças climáticas na produção agrícola mundial.

Tabela 2. Alteração percentual da produtividade do milho safrinha sob projeções de clima futuro, em cenários de emissão de GEE intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) para as condições de manejo atual e para as combinações de estratégias de manejo (época de semeadura, ciclo do cultivar, adubação), sem e com o uso de irrigação, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-Maize, para diferentes regiões brasileiras. Produtividade atingível se refere à produtividade obtida no cenário atual (BENDER, 2017).

Local	Produtividade atingível (kg ha ⁻¹)	RCP4.5			RCP8.5		
		2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
Cenários futuros sem estratégia de manejo							
RSCA	8732	-26	-22	-22	-24	-22	-28
MGPM	6997	-54	-55	-55	-54	-49	-58
MSIV	8668	-65	-70	-71	-66	-70	-78
MTDI	8185	-74	-78	-50	-74	-80	-70
PIBJ	6554	-54	-58	-60	-54	-61	-68
PASF	8614	-44	-52	-59	-45	-59	-73
Cenários futuros + combinação de manejo em sequeiro							
RSCA	8732	7	16	13	-3	7	1
MGPM	6997	158	143	137	152	137	101
MSIV	8668	6	6	-8	3	-4	-36
MTDI	8185	85	56	39	82	26	-16
PIBJ	6554	-14	-21	-26	-19	-28	-41
PASF	8614	42	25	5	37	8	-34
Cenários futuros + combinação de manejo irrigado							
RSCA	8732	38	51	54	15	31	12
MGPM	6997	123	126	130	120	131	105
MSIV	8668	73	62	35	69	42	-15
MTDI	8185	124	82	60	114	44	-11
PIBJ	6554	53	28	10	41	3	-35
PASF	8614	57	39	16	45	21	-29

* RSCA - Cruz Alta, RS; MGPM - Patos de Minas, MG; MSIV - Ivinhema, MS; MTDI - Diamantino, MT; PIBJ - Bom Jesus do Piauí, PI; PASF – São Félix do Xingu, PA.

11.6 Mudanças climáticas e a expansão da agricultura irrigada no Brasil

Considerando-se os cenários climáticos projetados para futuro e os impactos que esses deverão gerar na demanda por irrigação, a expectativa é de que haja uma expansão das áreas irrigadas no Brasil, de modo a atender a demanda crescente, tanto interna como externa, por produtos agrícolas. De acordo com o estudo de Borghetti *et al.* (2017), o Brasil apresenta possibilidade de expansão da área para a agricultura irrigada, como mostra o mapa da Figura 11, da ordem de 12,5 milhões de ha, sendo cerca de 1 milhão de ha na região Norte, 2,2 milhões de ha na região Nordeste, 4,7 milhões de ha na região Centro-Oeste, 2,5 milhões de ha na região Sudeste e 2,1 milhões de ha na região Sul. Este estudo levou em consideração

diversos critérios, incluindo aspectos de disponibilidade de água nas bacias, de relevo, de solo, de clima, entre outras, sendo, portanto, bem criterioso no que se refere à área disponível no país para a expansão da agricultura irrigada. No entanto, o estudo de Borghetti *et al.* (2017) não levou em consideração as possíveis alterações climáticas que deverão ocorrer nas próximas décadas, o que limita sua utilização para fins de planejamento das políticas públicas para incentivo à agricultura irrigada a médio e longo prazo.

De acordo com Rolim *et al.* (2012), devido às mudanças climáticas não é mais conveniente dimensionar sistemas de irrigação com base somente nos dados climáticos históricos e assumir que os resultados obtidos permanecerão inalterados ao longo dos próximos anos. Sendo assim, é importante que o dimensionamento de sistemas de irrigação, assim como a avaliação da área disponível para a expansão da agricultura irrigada, considere também informações relativas às alterações futuras do clima e seus impactos na demanda hídrica das culturas e na lâmina de irrigação.

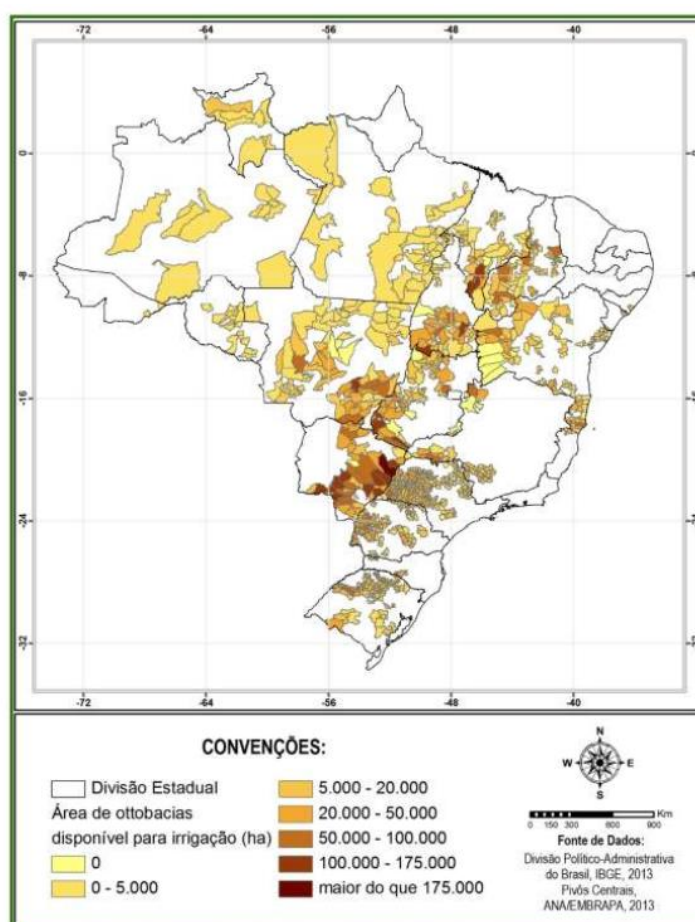


Figura 11. Área efetivamente disponível para expansão da irrigação no Brasil, já descontadas as áreas irrigadas por pivô central (BORGHETTI *et al.*, 2017).

Sendo assim, tomando-se por base as informações do estudo de Wada *et al.* (2013) (Figura 9), que mostra que para o cenário mais crítico de mudanças climáticas para 2100 (RCP8.5) a demanda por irrigação irá aumentar, em média, 25% no Brasil, com exceção para o extremo sul da região Sul, pode-se estimar, de forma aproximada, que a área disponível para expansão da agricultura irrigada no Brasil, considerando-se a estimativa de Borghetti *et al.* (2017), seria da ordem de 9,4 milhões de ha, ou seja, 25% menor do que a estimativa para a condição climática atual.

11.7 Considerações finais

A agricultura é uma atividade altamente dependente das condições meteorológicas, sendo que grande parte das variações observadas nas produtividades das culturas entre diferentes regiões e anos é decorrente da variabilidade climática. Sendo assim, entender como essa variabilidade do clima impacta as atividades agrícolas é fundamental para que se dimensione os riscos associados a elas. Quando esses riscos estão relacionados ao *deficit* hídrico que ocorre ao longo do ciclo das culturas, a irrigação passa a ser uma operação de grande importância para a estabilização das produtividades, fator decisivo para a segurança alimentar. Apesar da irrigação ser uma prática agrícola que tem por objetivo reduzir os impactos do *deficit* hídrico nas culturas, esta é também uma operação que depende das condições do clima e sua variabilidade, já que a vazão dos rios e córregos, os níveis dos reservatórios, a demanda hídrica das culturas e a disponibilidade de água no solo, são controlados pelas variáveis meteorológicas (balanço hídrico). Assim, qualquer variação das condições meteorológicas, seja de curto, médio ou longo prazo, irão impactar os sistemas irrigados, seja pela maior demanda hídrica das culturas, exigindo a aplicação de maiores lâminas de água, ou pela limitação dos recursos hídricos regionais, dificultando a captação de água para a irrigação. Nesse contexto, as mudanças climáticas projetadas para o futuro deverão impactar sobremaneira a agricultura de sequeiro e irrigada. No caso da cultura de sequeiro, a expectativa é de redução das produtividades, como consequência das maiores temperaturas e períodos com deficits hídricos mais prolongados e intensos. No caso da agricultura irrigada, a demanda hídrica irá aumentar, enquanto a disponibilidade de água nos mananciais deverá ser menor e mais concorrida com outros setores. Nesse sentido, é importante que estudos exploratórios sobre os impactos das mudanças climáticas na agricultura de sequeiro e irrigada sejam realizados em todo o mundo, de modo a auxiliar no entendimento do que possivelmente está por vir e, assim, possibilitar a definição de estratégias de mitigação e de políticas públicas que garantam a produção de alimentos, fibras e energia em quantidades suficientes para atender as demandas futuras, mas também garantir a preservação dos recursos hídricos.

Referências

- ALTIERI, M.A.; NICHOLLS, C.I. The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. **Climatic Change**, v.140, p.33-45, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0909-y>. Acesso em: 28 mar. 2021.
- AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.P.; MARENGO, J.A.; PISNITCHENCO, I.; NUNES, L.A.; FERNANDEZ, J.P.R. **Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI**: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório 3. Ministério do Meio Ambiente - MMA; Secretária de Biodiversidade e Florestas - SBF, Diretoria de Conservação e Biodiversidade - DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, p.73, 2007.
- ANGELOCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Variabilidade, anomalia e mudança climática**. Piracicaba: Departamento de Engenharia de Biosistemas, 8p., 2007.
- ANGULO, C.; RÖTTER, R.; LOCK, R.; ENDERS, A.; FRONZEK, S.; EWERT, F. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.170, p.32-46, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.017>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- ARAÚJO, L.F.; OLIVEIRA, N.P.S.; SILVA, R.M.E; BEZERRA, M.A.; ANGELOTTI, F. Influência do aumento do CO₂ no crescimento inicial e nas trocas gasosas do meloeiro amarelo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.8, p.439-453, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.0.p439-453>. Acesso em: 29 mar. 2021.

- BATTISTI, R. **Calibration, uncertainties and use of soybean crop simulation models for evaluating strategies to mitigate the effects of climate change in Southern Brazil**. 188p., 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 29p., 2020.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C.; BOOT, K.J.; CÂMARA, G.M.S.; FARIAS, J.R.B.; BASSO, C.J. Assessment of soybean yield with altered water-related genetic improvement traits under climate change in Southern Brazil. **European Journal of Agronomy**, v.83, p.1-14, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.004>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- BENDER, F.D. **Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade da cultura de milho e estratégias de manejo para minimização de perdas em diferentes regiões brasileiras**. 182p., 2017. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.
- BENDER, F.D.; SENTELHAS, P.C. Assessment of regional climate change impacts on Brazilian potato tuber yield. **International Journal of Plant Production**, v.14, p.647-661, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00111-7>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- BENLLOCH-GONZALEZ, M.; BOCHICCHIO, R.; BERGER, J.; BRAMLEY, H.; PALTA, J.A. High temperature reduces the positive effect of elevated CO₂ on wheat root system growth. **Field Crops Research**, v.165, p.71–79, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.008>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- BERKELEY EARTH - GLOBAL TEMPERATURE REPORT. Disponível em: <http://berkeleyearth.org/whats-new-new/?cat=temperature-updates>. Acesso em: 05 dez. 2020.
- BORGHETTI, J.R.; SILVA, W.L.C.; NOCKO, H.R.; LOYOLA, L.N.; CHIANCA, G.K. **Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias**. Brasília: Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), 226p., 2017.
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v.3, p.512-527, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- COSTA, L.C.; JUSTINO, F.; OLIVEIRA, L.J.C.; SEDIYAMA, G.C.; FERREIRA, W.P.M.; LEMOS, C.F. Potential forcing of CO₂, technology, and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in Southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, v.4, p.1-10, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/1/014013>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- CUNHA, D.A.; COELHO, A.B.; FÉRES, J.G.; BRAGA, M.J. Effects of climate change on irrigation adoption in Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.36, n.1, p.1-9, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v36i1.15375>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- DÖLL, P. Impact of Climate Change and Variability on Irrigation Requirements: A Global Perspective. **Climatic Change**, v.54, p.269–293, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1016124032231>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- ELLIOTT, J.; DERYNG, D.; MÜLLER, C.; FRIELER, K.; KONZMANN, M.; GERTEN, D.; GLOTTER, M.; FLÖRKE, M.; WADA, Y.; BEST, N.; EISNER, S.; FEKETE, B.M.; FOLBERTH, C.; FOSTER, I.; GOSLING, S.N.; HADDELAND, I.; KHABAROV, N.; LUDWIG, F.; MASAKI, Y.; OLIN, S.; ROSENZWEIG, C.; RUANE, A.C.; SATOH, Y.; SCHMID, E.; STACKE, T.; TANG, Q.; WISSER, D. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. **PNAS**, v.111, p.3239-3244, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1222474110>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY/NOAA - Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. ESRL/NOAA. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>. Acesso em: 05 dez. 2020.
- GRAY, S.B.; BRADY, S.M. Plant developmental responses to climate change. **Developmental Biology**, v.419, p.64–77, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023>. Acesso em: 29 mar. 2021.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL CLIMATE CHANGE. In: CLIMATE CHANGE 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 151 p., IPCC, 2014.

JALOTA, S.K.; RAY, S.S.; PANIGRAHY, S. Effects of elevated CO₂ and temperature on productivity of three main cropping systems in Punjab, state of India - A simulation analysis. In: WORKSHOP PROCEEDINGS: IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON AGRICULTURE, **Anais**, ISPRS Archives XXXVIII-8/W3, ii. Ahmedabad, 2009.

LEAKEY, A.D.B. Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel. **Proceedings of the Royal Society B**, v.276, p.2333-2343, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1517>. Acesso em: 29 mar. 2021.

MARENGO, J.A. Mudanças Climáticas: Detecção e Cenários Futuros para o Brasil até o Final do Século XXI. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.J.G.A.; SILVA DIAS, M.A.F. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, parte III - Variabilidade Climática, p.407-424, 2009.

MARTINEZ, C.A.; OLIVEIRA, E.A.D.; MELLO, T.R.P.; MARIN, A.L.A. Respostas das plantas ao incremento atmosférico de dióxido de carbono e da temperatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.8, p.635-650, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.0.p635-650>. Acesso em: 29 mar. 2021.

NECHIFOR, V.; WINNING, M. Global crop output and irrigation water requirements under a changing climate. **Heliyon**, v.5, e01266, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01266>. Acesso em: 29 mar. 2021.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia - Fundamentos e Aplicações Práticas**. Editora Agropecuária: Guaíra. 470p., 2002.

RAUFF, K.O.; BELLO, R. A review of crop growth simulation models as tools for agricultural meteorology. **Agricultural Sciences**, v.6, p.1098-1105, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/as.2015.69105>. Acesso em: 29 mar. 2021.

REBOITA, M.S.; ROCHA, R.P.; DIAS, C.G.; YNOUE, R.Y. Climate projections for South America: RegCM3 driven by HadCM3 and ECHAM5. **Advances in Meteorology**, v.2014, p.1-17, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2014/376738>. Acesso em: 29 mar. 2021.

RIEDIGER, J.; BRECKLING, B.; NUSKE, R.S.; ROLIM, W.S. Will climate change increase irrigation requirements in agriculture of Central Europe? A simulation study for Northern Germany. **Environmental Sciences Europe**, v.28, p.1-13, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12302-014-0018-1>. Acesso em: 29 mar. 2021.

ROLIM, J.; TEIXEIRA, J.; CATALÃO, J. Irrigation management of crops rotations in a changing climate. **Geophysical Research Abstracts**, v.14, p.14427, 2012.

SÁNCHEZ, E.; SOLMAN, S.; REMEDIO, A.R.C.; BERBERY, H.; SAMUELSSON, P.; ROCHA, R.P.; MOURÃO, C.; LI, L.; MARENGO, J.; DE CASTRO, M.; JACOB, D. Regional climate modelling in CLARIS-LPB: a concerted approach towards twenty first century projections of regional temperature and precipitation over South America. **Climate Dynamics**, v.45, p.2193-2212, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2466-0>. Acesso em: 29 mar. 2021.

SILVA, J.B.L.; FERREIRA, P.A.; PEREIRA, E.G.; COSTA, L.C.; MIRANDA, G.V. Development of experimental structure and influence of high CO₂ concentration in maize crop. **Engenharia Agrícola**, v.32, p.306-314, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000200010>. Acesso em: 29 mar. 2021.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v.35, p.730-740, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000300041>. Acesso em: 29 mar. 2021.

THOMAS, A. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China. **Global and Planetary Change**, v.60, p.306-326, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.03.009>. Acesso em: 29 mar. 2021.

- TORRES, R.R.; MARENGO, J.A. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v.112, p.253–272, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0718-7>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- TRIPATHY, R.; RAY, S.S.; SINGH, A.K. Analyzing the impact of rising temperature and CO₂ on growth and yield of major cereal crops using simulation model. In: WORKSHOP PROCEEDINGS: IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON AGRICULTURE, **Anais**, ISPRS Archives XXXVIII-8/W3. Ahmedabad, 2009.
- VANAJA, M.; MAHESWARI, M.; JYOTHI, N.L.; SATHISH, P.; YADAV, S.; SALINI, K.; VAGHEERA, P.; VIJAY, G.K.; RAZAK, A. Variability in growth and yield response of maize genotypes at elevated CO₂ concentration. **Advances in Plants & Agriculture Research**, v.2, p.2–5, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.15406/apar.2015.02.00042>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- VERHAGE, F.Y.F.; ANTEN, N.; SENTELHAS, P.C. Carbon dioxide fertilization offsets negative impacts of climate change on Arabica coffee yield in Brazil. **Climatic Change**, v.145, p.1-15, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2068-z>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- VIEIRA, J.S. **Impactos da variabilidade e das mudanças climáticas no balanço hídrico climatológico de Piracicaba, SP, no período de 1903 a 2019**. 29p., 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Gestão Ambiental) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 29p., 2020.
- WADA, Y.; WISSER, D.; EISNER, S.; FLÖRKE, M.; GERTEN, D.; HADDELAND, I.; HANASAKI, N.; MASAKI, Y.; PORTMANN, F.T.; STACKE, T.; TESSLER, Z.; SCHEWE J. Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change. **Geophysical Research Letters**, v.40, p.4626–4632, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/grl.50686>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- WALTER, L.C.; ROSA, H.T.; STRECK, N.A. Mecanismos de aclimação das plantas à elevada concentração de CO₂. **Ciência Rural**, v.45, p.1564–1571, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20140527>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- ZHANG, X.; CAI, X. Climate change impacts on global agricultural water deficit. **Geophysical Research Letters**, v.40, p.1111–1117, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/doi:10.1002/grl.50279>. Acesso em: 29 mar. 2021.

CAPÍTULO 12

12 MANEJO DA IRRIGAÇÃO NO BRASIL: APLICAÇÕES, DESAFIOS E TENDÊNCIAS PARA O FUTURO

Mirta Teresinha Petry, Reimar Carlesso e Juliano Dalcin Martins

Resumo

A principal questão atribuída à irrigação está relacionada a “quando” e “quanto” de água aplicar. A resposta a essa questão pode ser dada mediante uma adequada programação de irrigação, que requer o conhecimento das necessidades hídricas e a resposta das plantas à água. Uma boa programação de irrigação também deve considerar as restrições específicas de cada método e/ou equipamento de irrigação, as limitações relativas ao sistema de abastecimento de água e as implicações financeiras e econômicas da prática da irrigação. A programação das irrigações envolve uma série de processos e princípios, os quais podem ser baseados em medições da umidade do solo, das condições meteorológicas, do status hídrico da planta e/ou da combinação de um ou mais desses fatores. Quando a umidade do solo for adequada, as plantas transpiram em taxas potenciais, entretanto, à medida que a umidade do solo decresce, há uma redução na transpiração com conseqüente elevação da temperatura do dossel, caracterizando o início do stress hídrico. As plantas apresentam stress quando a umidade do solo é insuficiente para suprir o seu requerimento, em resposta a uma demanda evaporativa da atmosfera. Embora o conceito pareça fácil, a quantificação acurada dos parâmetros que indicam stress, a partir da umidade do solo ou do status hídrico, além dos fatores do sistema solo-planta-atmosfera que afetam o conteúdo de água no solo, são fundamentais para melhorar o manejo da irrigação. Assim, o objetivo desse capítulo é avaliar o estado da arte do manejo da irrigação no Brasil, as aproximações atualmente utilizadas e inovações em curso, como forma de melhorar o suporte à irrigação em nível de produtor.

12.1 Introdução

A agricultura é a maior consumidora de água no mundo, contabilizando em torno de 70% do total de água fresca anualmente retirada de rios, lagos ou águas subterrâneas (WORLD BANK, 2020), e uma parcela de uso ainda maior se considerarmos o chamado uso consuntivo, resultado da evapotranspiração das plantas. Altamente dependente da água e linearmente relacionada aos riscos representados pela ausência dessa, a agricultura tem como desafio unir o crescimento econômico, a saúde humana e a sustentabilidade ambiental, de forma a atender a demanda mundial por alimentos e fibras para uma população que cresce continuamente.

A relação entre irrigação e o aumento de produção de alimentos não é recente (PEREIRA, 2017). Para além da expansão e intensificação das áreas irrigadas, há a necessidade de melhorar a relação entre segurança alimentar e o uso de recursos hídricos, com foco na conservação da água e dos solos, adoção de variedades mais adaptadas às condições locais, redução do uso de energia e modernização dos sistemas de irrigação (HANJRA; QURESHI, 2010). De acordo com Rodrigues *et al.* (2013b), somente 19% das áreas cultivadas no mundo são irrigadas, porém, contribuem com 40% do fornecimento de alimentos, além dos ganhos econômicos associados a atividade. O manejo adequado dos recursos hídricos é fundamental para melhorar a eficiência do uso da água na agricultura irrigada (CARLESSO *et al.*, 2011). A irrigação em excesso, de forma deficiente ou no momento inadequado pode comprometer a produção e interferir negativamente na produtividade da terra e da água (RODRIGUES *et al.*, 2013a).

O aumento na competição pelo uso da água pelos diferentes setores de produção, aliado a uma crescente escassez de água, requer uma guinada substancial no sentido de aumentar a produtividade da água e da terra, demandando abordagens mais amplas, como uma calendarização da irrigação mais ajustada, visando aproveitar melhor a água das precipitações pluviais, uso de cultivares mais resistentes e de ciclo mais curto, sistemas de cultivo conservacionistas, etc. (RODRIGUES *et al.*, 2013a; PEREIRA, 2017). Entretanto, há muitas controvérsias sobre a premissa de que um aumento na eficiência da água em nível de produtor resulte em economia de água para outros setores (GRAFTON *et al.*, 2018). Assim, a mitigação dos efeitos da escassez de água em nível global deve ser acompanhada por melhorias nas estimativas do requerimento hídrico real da planta, de forma a permitir uma distribuição racional da água, no momento e na quantidade exata requerida pela vegetação. Quantificar o consumo de água de forma mais exata significa melhorar as metodologias existentes e procurar novas alternativas, que permitam avaliações mais precisas (CARLESSO *et al.*, 2009). A solução mais lógica para minimizar o uso de água e realizar uma gestão da irrigação mais ajustada, é ampliar o conhecimento a respeito da ET_c , o que implica necessariamente na obtenção de coeficientes de cultura (K_c) mais precisos. A demanda hídrica pode ser descrita como a quantidade de água que a cultura necessita para alcançar rendimentos ótimos ou potenciais. Assim, o uso da irrigação deve ser programado (frequência de irrigação e lâmina de água aplicada), através de conhecimento da exigência da cultura, das condições de solo e clima, de forma a evitar o estresse nas plantas, ao mesmo tempo em seja mantida a produção ideal.

12.2 Requerimento hídrico e o manejo da irrigação

Um dos aspectos chaves para melhorar o manejo da irrigação consiste em melhorar as estimativas do requerimento hídrico das culturas, que é representado pela evapotranspiração da cultura (ET_c) (PÔÇAS *et al.*, 2020). Uma forma prática e largamente aceitável para estimar a ET_c consiste na multiplicação da evapotranspiração de referência (ET_o) por um coeficiente de cultura (K_c), conhecido como o método FAO56 (ALLEN *et al.*, 1998). A partir do lançamento do Boletim 56 da FAO, o método padrão para a estimativa da ET_o é o Penman-Monteith, representando os efeitos dos fatores meteorológicos sobre uma superfície hipotética de referência, caracterizada por uma área gramada, de 12 cm de altura, cobrindo totalmente o solo, mantida em ótimas condições agronômicas e adequadamente irrigadas (ALLEN *et al.*, 1998; PEREIRA *et al.*, 2015). O coeficiente de cultura (K_c), por sua vez, representa as diferenças físicas e biofísicas entre uma cultura específica e a de referência (PEREIRA *et al.*, 2020; ALLEN *et al.*, 1998), podendo ser associado a ET_o na forma de K_c simples ou através da aproximação do K_c dual.

O consumo de água pelas culturas está associado a demanda evaporativa da atmosfera, à disponibilidade de água no solo e estágio de desenvolvimento. Em geral o consumo mais elevado de água coincide com o período em que a cultura apresenta maiores alturas e índice de área foliar (MARTINS *et al.*, 2013). O consumo hídrico da cultura, dentre outros fatores, depende das características da cultura, como a altura da cultura, a qual afeta a rugosidade e a resistência aerodinâmica; a resistência de superfície relativa ao binômio solo-planta, que é afetado pela área foliar (pela fração de cobertura do solo com vegetação, pela idade e condições das folhas, e pela umidade no perfil do solo; e pelo albedo da cultura-solo, que é influenciado pela fração de cobertura do solo, pela vegetação e pelo teor de água na superfície do solo, que influencia o saldo de radiação disponível, que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo de evapotranspiração.

O monitoramento e identificação do stress hídrico em plantas é fundamental para otimizar o rendimento das culturas, principalmente naquelas regiões onde a distribuição das chuvas é irregular e/ou a água para irrigação é restrita e cara. Para melhor lidar com as crescentes incertezas sobre a disponibilidade de água para fins de irrigação, o manejo da

irrigação, de acordo com DeJonge *et al.* (2015), ou a tomada de decisão sobre o momento de acionar os sistemas de irrigação tem recebido grande atenção por parte de pesquisadores, extensionistas e produtores. Uma adequada programação de irrigação garante o suprimento de água às plantas durante todo o ciclo de desenvolvimento das culturas (GOLDHAMER, 2011). A resposta da planta à irrigação é uma função do estado hídrico da planta, o qual é influenciado pelo conteúdo de água no solo e da habilidade do solo em fornecer água às plantas em resposta a uma demanda evaporativa da atmosfera a qual as plantas estão expostas. Portanto, os critérios usados para programar as irrigações envolvem medições da umidade do solo, das condições atmosféricas (evapotranspiração de referência) ou do status hídrico das plantas (WHITE; RAINE, 2008). Embora a medição do status hídrico da planta seja o critério mais eficaz para engatilhar as irrigações (FERNANDEZ; CUEVAS, 2010), seu uso em culturas anuais é limitado devido ao elevado valor dos instrumentos de medida, e ausência de limites críticos que definam o momento de irrigar (JONES, 2004). Assim, a programação da irrigação com base nas medições do conteúdo e/ou do potencial de água no solo ou parâmetros meteorológicos é muitas vezes utilizada (ALGHORY; YAZAR, 2019). Consequentemente, o gerenciamento da irrigação, no futuro, deve envolver uma melhor compreensão dos efeitos do conteúdo de água no solo no desenvolvimento das plantas, seja pela integração de um ou mais métodos de medição do requerimento hídrico das plantas, seja pela incorporação de modelos. E, sobretudo, independente das aproximações utilizadas para programar as irrigações, a informação deve chegar ao produtor de forma prática, eficiente e precisa.

12.3 Programação ou calendarização da irrigação

O manejo sustentável da água de irrigação em nível de produtor (ou da propriedade) inclui o uso de um adequado calendário ou programação de irrigação, ou seja, a definição de quando irrigar e quanta água aplicar (PEREIRA; PAREDES, 2018). Basicamente, a decisão de quando irrigar visa atender o requerimento hídrico das culturas, quando esse não é plenamente atendido pelas precipitações pluviais, levando em consideração as condições meteorológicas do local e características da cultura (tipo, estágio de desenvolvimento e fração de superfície coberta pelo dossel). A lâmina de água ou o quanto irrigar, por outro lado, deve considerar a capacidade de armazenamento e disponibilidade de água no solo e as características do equipamento de irrigação.

É senso comum que a decisão de quando e quanto irrigar, depende do estágio de desenvolvimento, da idade da planta, do solo e sua capacidade de armazenamento, da capacidade do solo em disponibilizar a água às plantas, da interação solo-planta, sobretudo o sistema radicular e das condições meteorológicas. Uma vez que o requerimento hídrico das culturas tenha sido determinado, utilizar uma programação de irrigação é vital para aumentar a eficiência de uso da água, uma vez que, irrigações abaixo do requerimento hídrico reduzem o rendimento. Irrigações em excesso levam a um incremento no requerimento de fertilizantes pela cultura, aumentam a ocorrência de doenças, o custo energético do bombeamento e das perdas de água por escoamento e percolação. Assim, as opções para um manejo mais preciso da irrigação devem ser amparadas em aproximações baseadas no monitoramento do solo, da planta, das condições meteorológicas, do sensoriamento remoto ou da combinação desses.

12.4 Manejo da irrigação baseado no status de água no solo: medida do conteúdo ou da tensão de água no solo

O status de água no solo é geralmente inerente a algum stress no sistema solo-planta-atmosfera. A medição do status de água no solo pode ser dividida em: (i) medição do seu conteúdo ou; (ii) medição da energia de retenção da água no solo (JONES, 2007). De acordo com Irmak *et al.* (2014), a medição do status de água no solo é essencial para estabelecer limites de umidade a partir dos quais a planta é sensibilizada pelo stress e auxiliar o produtor

na tomada de decisão de quando irrigar, além de possibilitar o desenvolvimento de novas rotinas de monitoramento em nível de propriedade. Em princípio, a medição da umidade na zona radicular não irá necessitar do cálculo da ETC, desde que os limites de umidade que engatilham a irrigação sejam corretamente escolhidos (JONES, 2007).

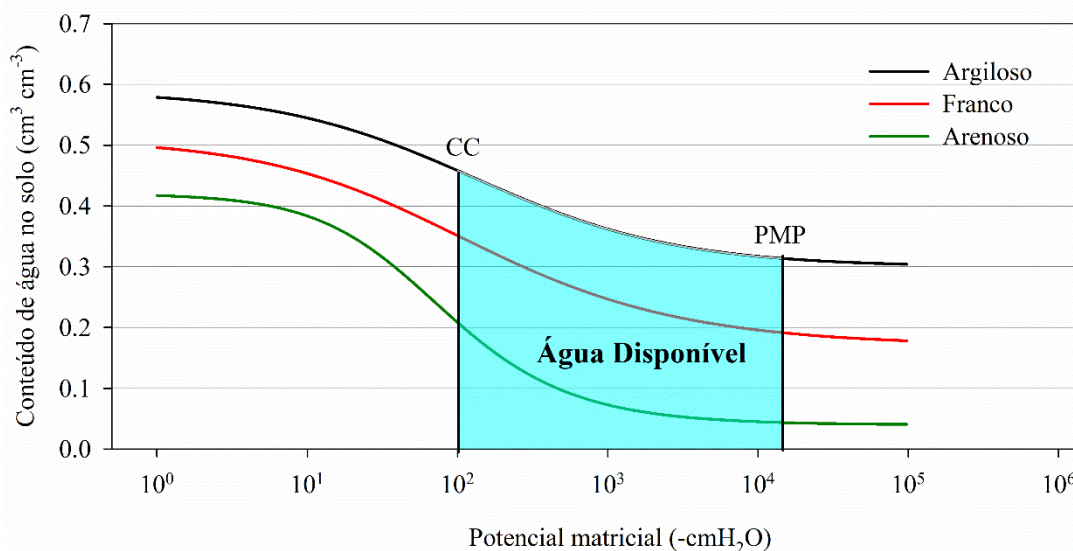


Figura 1. Curvas de retenção de água para solos de textura argilosa, franca e arenosa, da umidade de saturação ao ponto de murcha permanente. A umidade entre a capacidade de campo ($\theta_{100\text{ cm}}$) e o ponto de murcha permanente ($\theta_{15000\text{ cm}}$) corresponde a água disponível (área hachurada em azul claro), para as três classes de textura de solo.

Sensores de umidade do solo são inovações recentes na agricultura moderna, com capacidade de medição do conteúdo (θ) ou do potencial de água no solo (Ψ_m), em tempo real. Segundo Jones (2007), há uma extensa gama de sensores ou equipamentos que propiciam medidas diretas ou indiretas do conteúdo de água no solo, como a sonda de nêutrons, sensores capacitivos ou eletromagnéticos (reflectometria de domínio de tempo ou de frequência) ou de capacitância. Sensores de medida do potencial de água no solo são dotados de uma cápsula de gesso, a qual é inserida no solo nas profundidades desejadas. Os sensores tipo *Watermark*®, ora denominados de resistência elétrica, apresentam dois eletrodos inseridos na cápsula. O sensor detecta a variação da umidade ao redor do sensor, a qual é inversamente proporcional a resistência elétrica, ou seja, a resistência entre os dois eletrodos aumenta com a diminuição da umidade do solo. Embora sensivelmente mais baratos que os sensores capacitivos ou eletromagnéticos, esse tipo de sensor requer o conhecimento da curva de retenção de água no solo para que se possa facilmente associar o potencial medido com o conteúdo de água correspondente aquele potencial.

Na Figura 1 são apresentadas curvas de retenção características de três diferentes texturas de solo, desde a umidade de saturação, até a umidade no ponto de murcha permanente, destacando os limites de água disponível, a partir de um limite superior (θ_{CC}) e inferior de disponibilidade de água no solo (θ_{PMP}).

A principal questão a ser respondida quando se mede o status de água no solo na programação da irrigação é "quais são os limites de umidade que ocasionam o *stress* nas plantas"? As plantas podem apresentar stress em resposta a uma redução na umidade do solo, que acarreta uma redução no potencial de água nas folhas, devido a uma elevada demanda evaporativa da atmosfera ou à combinação de ambos. A maioria dos programas de balanço hídrico do solo (SWB) utilizam como indicadores o *deficit* de água no solo (ALLEN *et al.*, 1998),

onde os eventos de irrigação são programados quando a depleção de água na zona radicular das plantas excede a água facilmente disponível (RAW), no decurso de um dia (Equação 1). Essa aproximação exige que as constantes hídricas, como a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (θ_{PWP} , $m^3 m^{-3}$) sejam conhecidas.

$$RAW = p(\theta_{FC} - \theta_{PWP}) \cdot Z_r \quad (1)$$

em que p é a depleção permitida na zona radicular, ou seja, a fração do total de água disponível (TAW) que pode ser esgotada sem que ocorra stress nas plantas, θ_{FC} o conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{FC} , $m^3 m^{-3}$), e θ_{PWP} o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{PWP} , $m^3 m^{-3}$) e Z_r é a espessura da camada efetivamente ocupada pelas raízes.

Valores de p foram estabelecidos por Doorenbos e Kassam (1979) para milho, soja e algodão (0,6), quando a ET_c máxima diária for de 5 mm e de 0.7 quando a ET_c for de 4 mm dia^{-1} . Embora corroborados também pelo FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998), esses valores em geral não se aplicam satisfatoriamente às condições tropicais e subtropicais no Brasil, pois implicam que o perfil do solo seja homogêneo e sem restrições ao desenvolvimento radicular, o que não ocorre na grande maioria dos solos cultivados no Brasil. Battisti e Sentelhas (2017) simularam o rendimento da soja em diferentes cenários de produção e de profundidade da raiz, encontrando que, um sistema radicular mais profundo resulta em maiores ganhos no rendimento, sendo uma importante estratégia para mitigar os efeitos do *deficit* hídrico no solo. Tipicamente, o sistema radicular da soja é limitado a 60 cm (PIVETTA *et al.*, 2011), não raro estando confinado nos primeiros 30 cm do solo, devido a limitações químicas e físicas (MORAES *et al.*, 2019), ou, eventualmente, questões climáticas (ZANON *et al.*, 2016). Assim, o engatilhamento das irrigações a partir da medição do status de água no solo deve levar em consideração o solo, a cultura e local de produção. Os valores de p (ou da depleção permitida) deve ficar entre 0.25 e 0.4, sobretudo em solos que apresentam restrições ao desenvolvimento radicular e naquelas regiões com elevada demanda evaporativa da atmosfera.

Na Figura 2 (A e B) são apresentados exemplos de um manejo da irrigação usando sensores FDR, modelo CS616 (Campbell Sci, Inc., LOGAN, EUA.). Na Figura 2a, o conteúdo de água no solo foi mantido sempre acima de 90% do total de água disponível (TAW), com sensores colocados nas profundidades de 0,0-10; 10-25; 25-55 e 55-85 cm de profundidade; na Figura 2b, as irrigações eram engatilhadas quando o conteúdo de água no solo atingia valores inferiores a 75% do TAW, em experimentos realizados com a cultura do milho, em condições controladas (no interior de uma *rainout shelter*), na Universidade Federal de Santa Maria, RS. O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento, com gotejadores autocompensantes, espaçados em 0,5 m entrelinhas e 0.20 m entre gotejadores.

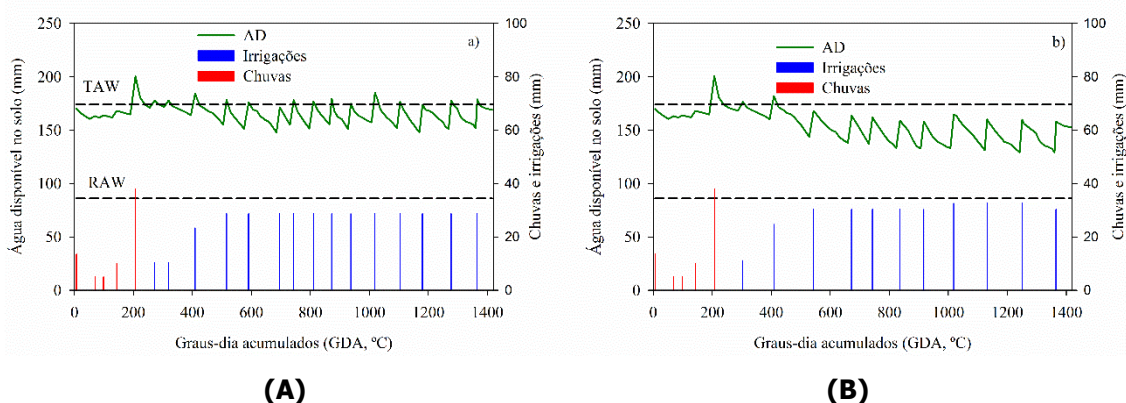


Figura 2. Medição do conteúdo de água no solo em tempo real, utilizando sensores capacitivos (FDR), mantendo a água disponível no solo em 90% do TAW (a) e 75% do TAW (b). Chuvas (barras em vermelho) e irrigações (azul) são apresentadas.

Na Figura 3 é apresentado um exemplo de monitoramento do potencial de água no solo, em área de pivô central, utilizando sensores de resistência elétrica, tipo *watermark* (modelo 200SS) (Irrometer Co., CA, EUA). Os sensores foram instalados a 10, 30 e 50 cm de profundidade. O engatilhamento das irrigações dependerá do tipo de solo, do valor da depleção utilizado, do tipo de cultura e sistema de irrigação. Shock e Wang (2011) apresentam limiares de tensões usadas para iniciar as irrigações, para uma gama de culturas e solos. Limiares entre 60 e 100 kPa são recomendados pela fabricante do sensor *watermark*.

É sabido que o recente avanço nas tecnologias, incluindo a facilidade de automação, dos mais variados sensores tem feito com que a medição do status de água no solo seja um verdadeiro estado da arte no manejo da irrigação. De acordo com Placidi *et al.* (2020), sensores são desenhados para medir e/ou coletar informações, enquanto os microcontroladores com capacidade de rede são programados para interpretar essas informações, para poderem ser incorporados em diversos outros processos. Embora de fundamental importância para melhorar o manejo da irrigação, os sensores de medição do status de água no solo muitas vezes não resultam em um bom manejo da irrigação, fato que pode ser atribuído às incertezas ainda remanescentes acerca da posição e/ou colocação dos sensores no campo, bem como o número de sensores que devem ser utilizados, tendo em vista a variabilidade espacial nas características da maioria dos solos agrícolas.

A posição do sensor, bem como a profundidade de instalação e disposição (na horizontal ou na vertical) depende de fatores como o solo, as características do sistema de irrigação, a profundidade e volume do sistema radicular, entre outros. Especificamente, uma má instalação do sensor resulta em pouca representatividade da medida da umidade do solo (SOULIS *et al.*, 2015), podendo indicar excesso ou deficiência de umidade de forma equivocada. Na Figura 4 é apresentado um esquema de como podem ser instalados os sensores atualmente mais utilizados no monitoramento da umidade do solo.

O posicionamento do sensor e a forma como essa pode afetar a eficiência da irrigação ainda é uma questão a ser respondida na programação da irrigação (SOULIS *et al.*, 2015), entretanto, quando bem instalados e calibrados podem representar significativa economia no uso da água de irrigação. Portanto, o conhecimento do perfil de umedecimento do solo pela chuva ou irrigação, assim como as características do sistema radicular e seu volume, são parâmetros que devem ser observados na instalação do sensor, para evitar tanto o *deficit* na zona radicular, como o excesso de irrigação.

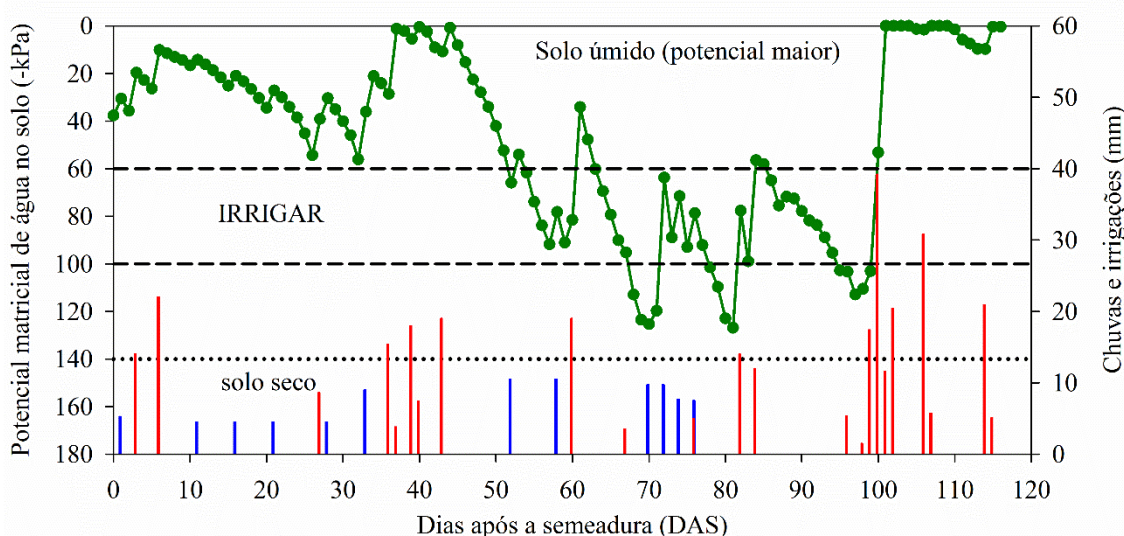


Figura 3. Flutuação do potencial matricial de água no solo (-kPa) durante uma estação de cultivo de milho, com sensores *Watermark* instalados a 10, 30 e 50 cm de profundidade, em área irrigada por pivô central. Barras em azul e vermelho representam as irrigações e precipitações pluviais. As linhas tracejadas (---), referem-se ao limite de potencial considerado como críticos para o início das irrigações, e (....) solo extremamente seco.

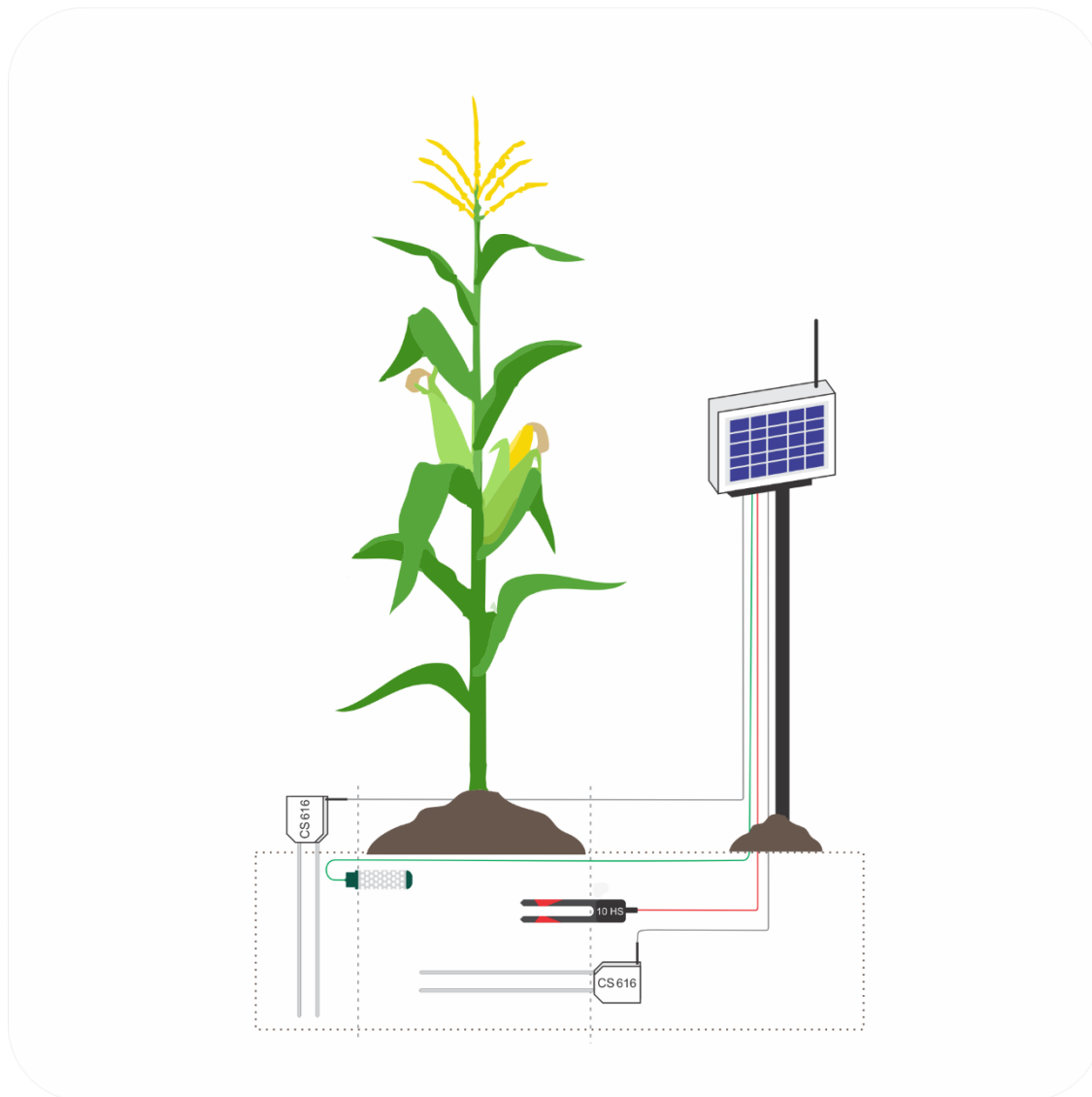


Figura 4. Diferentes tipos de sensores utilizados na medição do conteúdo e do potencial de água no solo e a posição do sensor, em manejo da irrigação de culturas anuais. Modelo CS616 (Campbel Sci., Inc) e 10 HS (Decagon) são sensores tipo FDR, e o *watermak* (verde) é um sensor de resistência elétrica (Irrrometer).

Os sensores CS616 caracteristicamente apresentem duas hastes inoxidáveis, de 30 cm de comprimento. Quando inseridos na vertical, permitem mapear a umidade no perfil do solo; entretanto, dado que a umidade do solo varia mais em profundidade, maiores variações entre diferentes sensores podem ocorrer. As leituras são mais estáveis quando inseridos na horizontal, porém, para conhecer a lâmina de água armazenada, é necessário associar a espessura da camada que cada sensor representa. Para Soulis *et al.* (2015), uma gama de opções de posicionamento dos sensores é possível, dependendo da acurácia do sensor, devendo-se atentar para a instalação dos sensores, porque a presença de “bolhas de ar” ou a presença de obstáculos (pedras, solo compactado, etc.) no momento da inserção do sensor, podem representar erros maiores que a posição ou o número de sensores utilizados.

12.5 Manejo da irrigação com base na planta: o *status* de água na planta

A resposta da planta à irrigação é uma função do estado hídrico da planta, o qual é influenciado pelo conteúdo de água no solo e da habilidade do solo em fornecer água às plantas em resposta ao ambiente ao qual as plantas estão expostas. Embora a medição do status hídrico da planta seja o critério mais eficaz para engatilhar as irrigações (FERNANDEZ; CUEVAS, 2010), seu uso muitas vezes é limitado devido ao elevado valor dos instrumentos de medida e ausência de limites críticos que definam o momento de irrigar (JONES, 2004). Assim, a programação da irrigação com base nas medições do conteúdo e/ou do potencial de água no solo ou parâmetros meteorológicos é muitas vezes utilizada (ALGHORY; YAZAR, 2019). Entretanto, Akkuzu *et al.* (2013) questionam a utilização desses parâmetros como indicadores da necessidade de água das plantas, pois isso dependeria da condição hídrica da planta.

Medições do potencial hídrico das folhas e caule, assim como a condutância estomática, são indicadores do *deficit* hídrico da planta (JONES, 2004). Entretanto, metodologias ligadas a medição do status hídrico da planta geralmente são trabalhosas e não automatizadas, além de serem destrutivas. Por exemplo, se usarmos o potenciômetro do ponto de orvalho, amostras devem ser coletadas e levadas ao laboratório durante o dia, desde o amanhecer até as horas mais quentes do dia, pois os dados podem ser equivocados se a única amostragem for nas horas mais quentes do dia. Equipamentos portáteis, como o porômetro e o analisador de gás, conhecido como IRGA (*Infra-Red Gas Analyser*) são utilizados para medir simultaneamente a condutância estomática e o potencial de água nas folhas.

Parece claro que a utilização da planta como indicador para o manejo da irrigação se aplica melhor àquelas que não cobrem completamente o solo, como as frutíferas. O potencial de água no caule apresenta ótima relação com o status de água em frutíferas, sendo utilizado para validar medidas automáticas da condutância estomatal, fluxo de seiva (LIVELLARA *et al.*, 2011), temperatura da folha (AKKUZU *et al.*, 2013) e pequenas flutuações no diâmetro de tronco. Todas essas medições requerem instrumentos sofisticados e em grande número, muitas vezes inviabilizando o seu uso (DEJONGE *et al.*, 2015).

A temperatura da folha ou do dossel tem sido reconhecido como um indicador da disponibilidade de água no solo (AKKUZU *et al.*, 2013). A temperatura do dossel aumenta à medida que a planta absorve a radiação solar, porém, é resfriada pelo processo da transpiração quando a umidade do solo atender a demanda da planta (DEJONGE *et al.*, 2015). A temperatura diária do dossel apresenta uma curvatura em resposta a ocorrência de radiação solar, com temperaturas menores nos extremos do dia. Uma planta estressada reduz a transpiração, elevando a temperatura do dossel, em resposta a uma redução no conteúdo de água no solo. Assim, a temperatura do dossel é reconhecida como um indicador de *deficit*; a temperatura da folha em plantas estressadas é entre 2-4°C acima da temperatura de uma planta não estressada.

Recentemente, metodologias como a termometria de infravermelho têm sido utilizadas para medir o stress de forma não destrutiva, com medições contínuas, podendo serem acoplados a um satélite ou a um veículo aéreo não tripulado (VANT) (ZARCO-TEJADA *et al.*, 2013), na parte aérea de um pivô (PETERS; EVETT, 2008) ou posicionados de forma a escanear uma linha de plantas (PÔÇAS *et al.*, 2015). A indicação de quando irrigar, quando se usa a medição da temperatura do dossel, é dada por um índice de stress (IS), que deve ser quantificado para cada cultura e tipo de solo. Todos os IS utilizam como base a temperatura do dossel (T_d); definido por Idso *et al.* (1981), o IS é calculado pela diferença entre a temperatura do dossel e do ar ($T_d - T_a$, °C), respectivamente, ou seja, como sendo uma função do *deficit* de pressão de vapor de água na atmosfera. A temperatura pode ser medida por termômetros infravermelhos portáteis, tipo "*handheld*", para leituras pontuais, ou então fixos dentro do dossel, para monitorar continuamente a temperatura do dossel, desde o amanhecer até o final do dia.

Além de serem utilizados para detectar stress e, conseqüentemente, na criação de calendários de irrigação, os índices de stress também têm sido utilizados para prever o rendimento em uma variedade de condições agroclimáticas (KUMAR *et al.*, 2020). A incerteza na metodologia da definição dos índices de stress está em determinar a temperatura de um dossel em condições de transpiração potencial (quando a umidade do solo estiver adequada) e a temperatura do dossel em condições de stress, ou seja, quando a planta fecha os estômatos em função de uma redução na umidade do solo. Ou seja, também é necessário ter medidas precisas do conteúdo de água no solo, de forma a calibrar adequadamente os índices de stress para diferentes condições de solo, clima e cultura.

O manejo da irrigação através da medição do status de água nas plantas exige que sejam feitos estudos prévios para identificar o momento crítico da aplicação de irrigação, sem ocorrência de redução no crescimento e desenvolvimento das plantas. Uma das principais dificuldades desse método é que existem diferenças varietais com relação à sensibilidade das plantas ao *deficit* hídrico. Além disso, plantas bem irrigadas podem apresentar sintomas de deficiência nas horas mais quentes do dia, por ocasião da ocorrência de altas temperaturas, fazendo com que ocorra uma interpretação equivocada de que esteja ocorrendo deficiência hídrica no solo. Além disso, esse método apresenta baixa precisão e, principalmente, não informa a lâmina de irrigação a ser aplicada, somente o momento de acionar o sistema. Esse método, portanto, não é recomendado para situações onde a obtenção de elevadas produtividades é o objetivo dos agricultores.

12.6 Manejo da irrigação baseado em parâmetros meteorológicos: método da ETc

O correto gerenciamento de irrigação visa prover adequada umidade no solo durante o ciclo desenvolvimento das culturas, no tempo e quantidade apropriada. Os critérios usados para programar as irrigações devem ser baseados em processos e princípios, envolvendo a estimativa da evapotranspiração das culturas (ETc), junto a um balanço hídrico do solo, baseado no status de água no solo, condições meteorológicas e o status hídrico da planta, através do uso do sensoriamento remoto ou mediante a combinação de um ou mais processos. Entretanto, as respostas das plantas ao fornecimento de água podem variar em função do estágio de desenvolvimento, da capacidade produtiva dos solos, da região de cultivo, bem como da eficiência dos métodos de irrigação empregados. À medida que a umidade do solo decresce, maior será o impacto das condições meteorológicas sobre o dossel vegetativo, podendo significar o início do stress hídrico nas plantas, quando a reposição de água for insuficiente ou aplicada sem a eficiência desejada.

Desde o surgimento do boletim FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998), o método largamente utilizado para estimar o consumo de água de plantas (ou ETc) é através da chamada metodologia de duas etapas (Kc-ETo) (PEREIRA *et al.*, 2015). Na aproximação Kc-ETo, a evapotranspiração de referência (ETo) representa o efeito primário das condições meteorológicas no consumo de água, enquanto o coeficiente de cultivo (Kc) faz o balanço da influência específica das culturas na ETc e sua variação ao longo do ciclo das culturas. Assim, valores padrão de Kc para cada uma das quatro principais etapas do ciclo das culturas (ALLEN *et al.*, 1998) foram providenciadas para um grande número de culturas e larga escala de usos (PEREIRA *et al.*, 2015), visando diminuir as super e subestimativas da ETc.

Segundo a aproximação Kc-ETo, a ETc de uma cultura pode ser estimada sob as mais variadas condições de manejo e desenvolvimento das culturas, considerando influências como as referenciadas por Pereira *et al.* (2015) e Pereira (2017): (i) o estágio de desenvolvimento, quantidade de vegetação e cultivar; (ii) a data de plantio e duração do ciclo; (iii) espaçamentos entre linhas e plantas, densidade de plantas, altura da cultura e arquitetura do dossel; (iv) a frequência de molhamento pela irrigação ou chuva e sua contribuição para a ETc total; (v) disponibilidade de água no solo e estresse hídrico associado; (vi) ocorrência de salinidade do

solo e na água; e (vii) práticas de cultivo não padronizadas e abaixo do ideal. Portanto, práticas de manejo que afetam o desenvolvimento da cultura, assim como a irrigação inadequada, afetam o Kc e, por consequência, a ETC.

Os parâmetros meteorológicos são fatores chaves na estimativa do requerimento hídrico das plantas. As variáveis meteorológicas são representativas de uma extensa área, podendo ser medidas por sensores simples (NAVARRO-HELLÍN *et al.*, 2016), ao passo que, as características de solo e planta variam espacialmente e exigem instrumentação mais rebuscada para a sua medição. Os dados meteorológicos usados para estimar a ETo (mm/dia) (radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e vento) são medidos em estações meteorológicas automáticas. O Brasil possui uma ampla rede pública de estações meteorológicas automáticas e convencionais, cujos dados são disponibilizados para download, de forma gratuita, pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). De acordo com Hunsacker *et al.* (2015), o manejo da irrigação baseado na ETC pode apresentar falhas, como menor reabastecimento de água no solo durante o ciclo de desenvolvimento, o que resulta em redução no rendimento. Assim, esse método é fortemente atrelado a quatro fatores, segundo Davies e Dukes (2010) e Pereira *et al.* (2015): (i) a acurácia na estimativa da ETo, (ii) um Kc (simples ou dual) calibrado para as condições regionais, (iii) das propriedades do solo, como a retenção e disponibilidade de água, e (iv) medição da chuva em nível de parcela ou área irrigada.

A metodologia FAO-56 Penman-Monteith é recomendada como método padrão de computação da ETo, devido à alta probabilidade de estimativa correta, em uma ampla gama de locais e climas. Assim, a ETo é multiplicada por um Kc para a estimativa diária da ETC (ALLEN *et al.*, 1998). Como a ETo representa aproximadamente todos os aspectos de clima, o Kc varia predominantemente em função das especificidades da cultura o que possibilita transferir valores e curvas de Kc para diferentes locais e climas (ALLEN *et al.*, 2005a). Assim, a ETC é facilmente calculada conforme a expressão:

$$ET_c = E_{To} \cdot K_c \quad (2)$$

em que ETC é a evapotranspiração da cultura crescendo em condições de ótima disponibilidade de água; ETo é a evapotranspiração da cultura de referência (mm dia⁻¹) e Kc é o coeficiente de cultura.

Valores padrão de Kc para quatro principais subperíodos do desenvolvimento de uma gama de culturas é apresentada no FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998), entretanto, calibrações regionais são necessárias, sobretudo dos parâmetros da duração das fases, da cobertura do solo pela vegetação, da altura e população do dossel, etc. As curvas de Kc podem ser melhoradas relacionando o ciclo de desenvolvimento à soma térmica (graus-dia acumulados), como apresentado na Figura 5, o que permite estabelecer a ocorrência da emergência, da máxima cobertura do solo pelo dossel e maturação fisiológica (PEREIRA *et al.*, 2015). Para as chamadas culturas esparsas, como pomares e vinhas, o Kc deve ser estimado a partir do diâmetro da copa, da fração de solo sombreada (que dependerá dos espaçamentos), da presença ou não de resíduos na superfície (ativa ou morta), a qual influenciará a evaporação do solo.

Recentemente, novas metodologias de estimativa da ETC têm sido propostas, visando estimar separadamente a evaporação do solo (Es) e a transpiração da cultura (Tc), uma vez que, a água transpirada através dos estômatos é diretamente relacionada à produção, enquanto a Es é considerada a parte da água perdida ou ineficiente. A estimativa separada dos componentes Es e Tc pode ser feita através de medidas diretas ou via modelos de simulação do balanço hídrico do solo, ambos significando um desafio à investigação para o futuro, como forma de melhorar as medidas da ETC e, conseqüente, da gestão da água de irrigação.

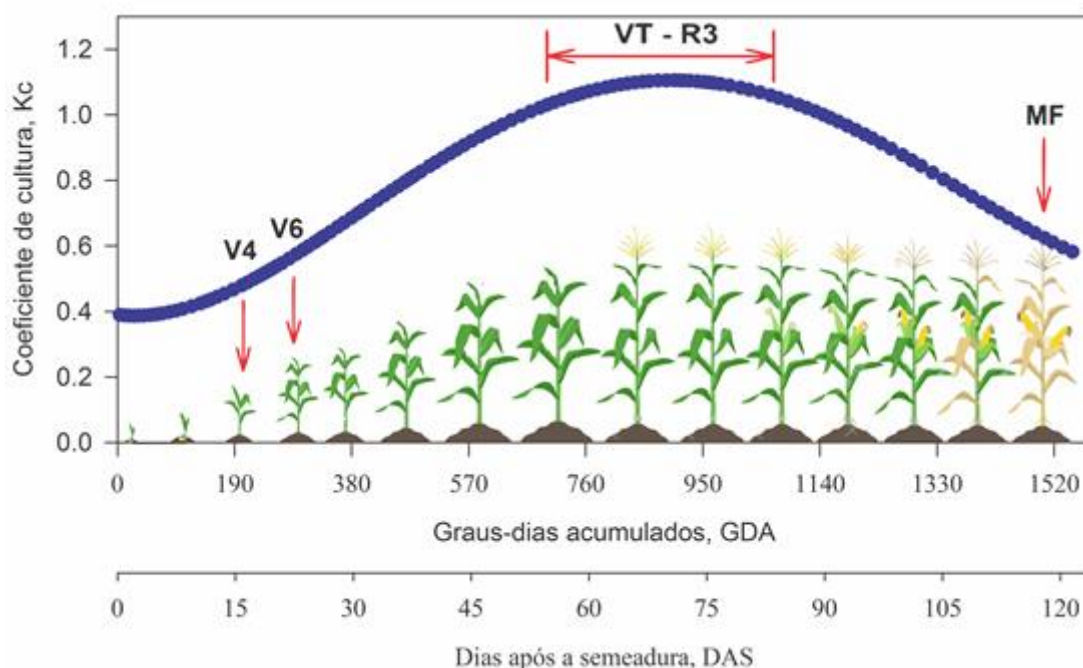


Figura 5. Dinâmica da curva de Kc da cultura do milho irrigado, derivada a partir dos graus-dia acumulados (GDA), através da associação entre o índice de área foliar (IAF), fração de cobertura (fc) e altura de plantas, durante o ciclo de desenvolvimento.

A computação da ET_c pelo método do Kc simples ainda é a forma mais usada em programas de manejo de irrigação, por incluir em um único coeficiente tanto a transpiração da cultura (T_c) como a evaporação do solo (E_s). Uma curva típica de Kc, quando não há estresse, envolve quatro fases distintas (ALLEN *et al.*, 1998), conforme apresentado na Figura 5: (i) uma fase inicial, compreendendo o período entre a semeadura e 10% do IAF; (ii) uma fase de desenvolvimento rápido, que vai desde os 10% de IAF até a completa cobertura do solo pelo dossel (IAF > 2.7); (iii) a fase intermediária, de consumo máximo e; (iv) a fase final, que compreende a fase da senescência e maturação fisiológica.

O manejo da irrigação baseado na ET_c pode ser considerado como um balanço hídrico simplificado, onde o principal componente, a ET_c , é estimada a partir da metodologia Kc- ET_o , conforme especificando anteriormente. Assim, segundo Pereira *et al.* (2015), as irrigações são engatilhadas a partir de uma lâmina de água que pode ser esgotada no solo sem que ocorra stress na cultura a ser irrigada, ou seja, levando-se em consideração a capacidade de armazenamento e disponibilidade de água no solo, o tipo de solo, a espécie cultivada, o sistema de irrigação, entre outros. O total de água disponível no solo (TAW) é obtido através da equação 3.

$$TAW = 1000(\theta_{FC} - \theta_{PWP}) \cdot Z_r \quad (3)$$

em que TAW é o total de água disponível no solo, θ_{FC} é o conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{FC} , $m^3 m^{-3}$) e θ_{PWP} é o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{PWP} , $m^3 m^{-3}$) e Z_r é a espessura da camada efetivamente ocupada pelas raízes.

Valores de θ_{FC} e θ_{PWP} para diferentes texturas de solo são apresentados na Tabela 3. A depleção permitida na zona radicular das plantas para que não ocorra stress (p), também chamada de RAW ou água facilmente disponível ($RAW = p \cdot TAW$), depende fortemente da capacidade das plantas em extrair do solo, do tipo de solo e das condições de cultivo, sendo afetada por parâmetros comentados na seção 3.1. Na figura 6 é apresentado um desenho esquemático do conteúdo de água na saturação, capacidade de campo e ponto de murcha

permanente, para um solo característico do Planalto do Rio Grande do Sul. Parece razoável assumir que θ_{FC} é o limite superior de disponibilidade de água e no solo e, em qualquer umidade abaixo dessa, o stress pode ocorrer. Um valor de p de 0.50 é assumido na maioria dos casos, porém, pode-se assumir valores entre 0.2 a 0.8 (ALLEN *et al.*, 1998).

Na Figura 7 é apresentado um exemplo do manejo de irrigação baseado na ET_c , na cultura do milho, semeado na segunda quinzena de outubro, no RS. O fator de depleção para evitar o *deficit* hídrico (p) foi mantido entre 0.4 e 0.30. Assim, irrigações foram engatilhadas quando a evapotranspiração acumulada ($ET_c Ac$) atingia o valor da água facilmente disponível (RAW) estabelecido. Uma das questões relacionadas ao manejo via ET_c é quanto irrigar, uma vez que, o recarregamento do solo até a umidade da capacidade de campo aumenta os riscos de perdas de água por percolação (GU *et al.* (2020), sobretudo em regiões onde a irrigação é adotada de forma suplementar. Assim, as lâminas a serem irrigadas deve ser de forma a elevar a umidade até 70 ou 80% da umidade na capacidade de campo.

Tabela 1. Teores de umidade de saturação (θ_{sat}), capacidade de campo ou limite superior de disponibilidade (θ_{FC}), ponto de murcha permanente ou limite inferior de disponibilidade de água (θ_{PWP}) e capacidade de armazenamento de água no solo disponível às plantas (TAW) (Banco de Dados do Sistema Irriga[®]).

Classe de textura	Conteúdo de água no solo			TAW
	θ_{sat} (m^3/m^3)	θ_{FC} (m^3/m^3)	θ_{PWP} (m^3/m^3)	$\theta_{FC}-\theta_{PWP}$ (mm/m)
Areia	0,35-0,42	0,12-0,20	0,02-0,06	100-140
Areia franca	0,33-0,47	0,14-0,24	0,04-0,08	100-160
Franco arenoso	0,34-0,51	0,17-0,29	0,04-0,14	130-150
Franco	0,40-0,52	0,23-0,32	0,14-0,19	90-130
Franco siltoso	0,31-0,54	0,22-0,35	0,10-0,19	120-150
Franco argilo arenoso	0,37-0,55	0,22-0,35	0,13-0,22	90-130
Franco argilo siltoso	0,46-0,56	0,28-0,41	0,15-0,21	130-200
Franco argiloso	0,44-0,55	0,26-0,39	0,14-0,20	120-190
Argilo arenoso	0,37-0,55	0,28-0,40	0,18-0,23	100-170
Argilo siltoso	0,47-0,55	0,29-0,43	0,18-0,29	110-140
Argila	0,49-0,59	0,30-0,50	0,22-0,32	80-180
Muito Argiloso	0,49-0,59	0,31-0,52	0,26-0,38	50-140

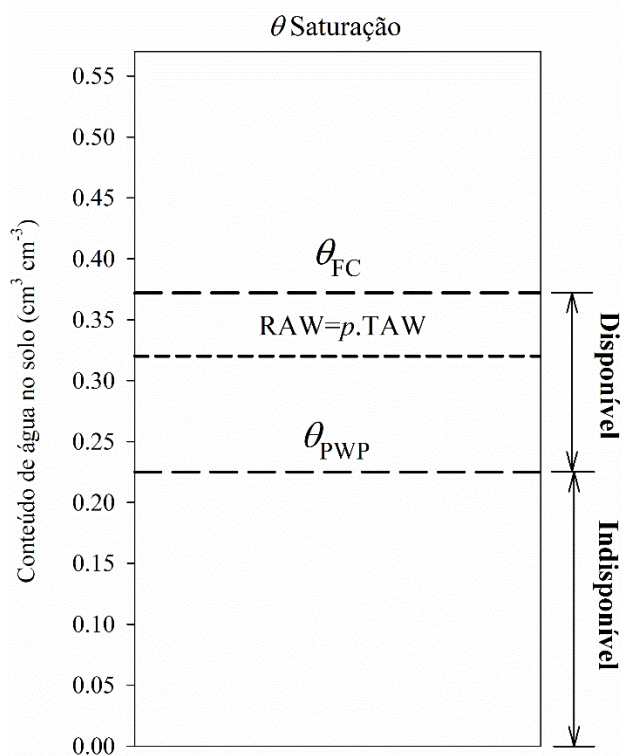


Figura 6. Desenho esquemático do total de água disponível em um perfil de solo, incluindo a umidade de saturação, a lâmina de água na capacidade de campo e ponto de murcha permanente (mm) e a depleção permitida para que não ocorra stress nas plantas, considerando um p de 0.35.

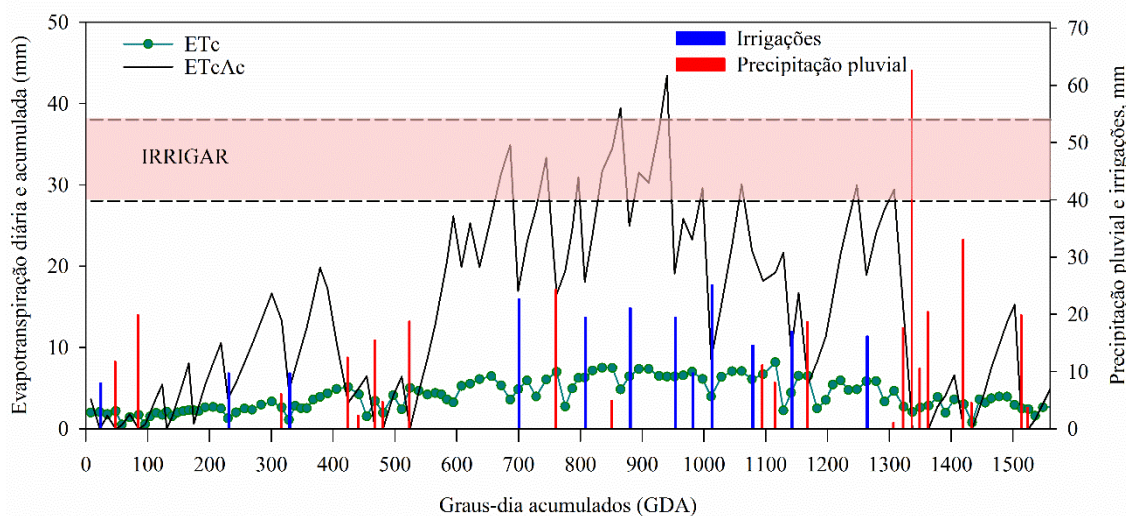


Figura 7. Necessidade de irrigação pelo balanço hídrico meteorológico (ETc), para a cultura do milho, em Santa Maria, RS, para o ano agrícola 2020/21.

12.7 Métodos combinados do manejo da irrigação

Existem diversas metodologias que podem ser utilizadas em nível de produtor para indicar de forma adequada quando e quanto irrigar, para evitar o *deficit* hídrico ou o desperdício de água, por escoamento e percolação. Os fatores que afetam a programação da irrigação incluem a cultura, o estágio de desenvolvimento, as propriedades do solo, as interfaces solo-água-planta e condições meteorológicas. O solo é o meio onde está armazenada a água que é extraída pelas plantas, tendo papel crucial na interação solo-planta-atmosfera. A evapotranspiração das culturas (ETc), por outro lado, é a medida da água extraída do solo pelas plantas, na forma de transpiração das culturas ou evaporada diretamente da superfície do solo, em resposta a uma demanda evaporativa da atmosfera. Consequentemente, a informação da ETc pode ser utilizada no balanço hídrico do solo para programar as irrigações. Assim, medições do conteúdo de água no solo (de forma contínua ou pontual), podem ser combinadas com a ETc de forma a melhorar a programação das irrigações (Figura 8).

O balanço hídrico combinado consiste em associar medidas do solo, da planta, da ETc, entre outros. Nesse capítulo iremos abordar a combinação de sensores de umidade do solo e dados meteorológicos para fazer o balanço hídrico do solo e programar as irrigações de forma mais precisa. Por esse método, alguns sensores de umidade do solo são utilizados e, concomitantemente, a evapotranspiração da cultura (ETc) é calculada a partir da associação da $ET_o \cdot K_c$. Assim, o balanço hídrico do solo é calculado levando em consideração o total de água disponível (TAW) e a água prontamente disponível (RAW) para cada solo. Posteriormente, calcula-se a ETc diária ($ET_c = ET_o \cdot K_c$) e, mediante um procedimento simples semelhante a uma conta bancária, faz-se o balanço da água que entra no sistema (chuva + irrigação) e das saídas (ETc), até que a RAW seja esgotada. Neste caso, os sensores de umidade servem como um parâmetro de checagem, visando acarrear se, na prática, a estimativa da ETc está refletindo o consumo de água pelas plantas, em cada estágio de desenvolvimento (Figura 8).

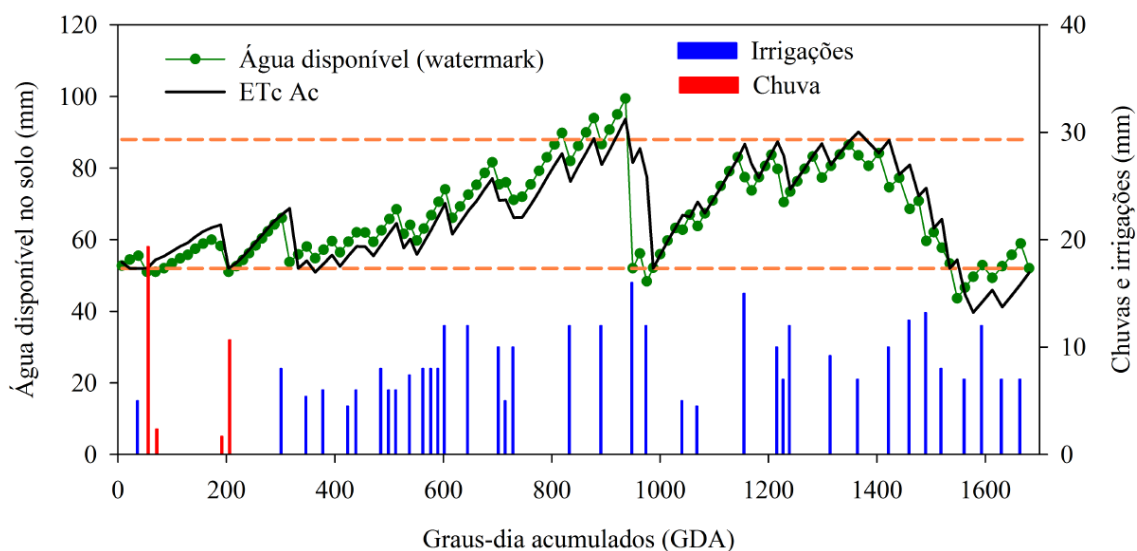


Figura 8. Balanço hídrico combinado (status de água no solo + ETc) para a determinação do momento de irrigar na cultura do milho A ETC (estimada através da metodologia ETo-Kc) e sensores de umidade tipo Watermark são combinados para melhorar a gestão da irrigação.

O balanço hídrico do solo, por sua vez, pode ser calculado por meio de modelos, como o Sistema Irriga® (CARLESSO *et al.*, 2009), ou modelos mais rebuscados, como o SIMDualKc (ROSA *et al.*, 2012), o AquaCrop (STEDUTO *et al.*, 2009), o FAO CROPWAT, o HYDRUS (ŠIMUNEK *et al.*, 2016), entre outros. O SIMDualKc utiliza a aproximação dos coeficientes de cultura duais, onde um coeficiente de cultura de base (Kcb) é ligado à transpiração da cultura e um coeficiente de evaporação (Ke), é utilizado para fracionar a transpiração e a evaporação do solo, tendo sido aplicado para as condições subtropicais do Sul do Brasil por Martins *et al.* (2013), Paredes *et al.* (2018) e Giménez *et al.* (2017), Petry *et al.* (2020) para o milho, tifton e soja, respectivamente.

Sensores de umidade do solo podem ser úteis para indicar o momento de irrigar, em tempo real ou próximo do real, entretanto, precisam ser acompanhados de um sistema de transmissão por telemetria ou chip GPRS (*General Packet Radio Service*), disponibilizados por operadores de telefonia celular, ou a rede LORA (Longe Range), para que o usuário possa acompanhar a situação da umidade no solo do perfil, em tempo real ou quase real.

12.8 Considerações finais

A irrigação é uma prática de manejo que consiste na aplicação artificial de água, visando atender o requerimento hídrico das plantas, de forma integral ou suplementar. A principal questão atribuída à irrigação está relacionada a “quando” e “quanto” de água aplicar em cada uma das áreas. A resposta a essa questão pode ser dada mediante uma adequada programação de irrigação, que requer o conhecimento das necessidades hídricas das plantas e a resposta das plantas à água. Uma boa programação de irrigação também deve envolver as restrições específicas de cada método e/ou equipamento de irrigação, as limitações relativas ao sistema de abastecimento de água e as implicações financeiras e econômicas da prática da irrigação.

Nas últimas décadas, houve uma grande evolução nas metodologias usadas para apropriadamente indicar quando irrigar e quanta água aplicar, sendo que, seu uso deve levar em consideração, os custos, a confiabilidade, o preparo do produtor e da propriedade para

gerenciar determinada metodologia, de forma a obter a máxima produtividade. Um bom sistema de manejo da irrigação é aquele que conjuga o melhor uso da água, com mínimo gasto de energia e máximo retorno líquido ao produtor. Assim, o momento de irrigar e a lâmina de água a irrigar pode ser baseado na evapotranspiração da cultura (ET_c), na medição da umidade do solo, na medição do status hídrico da planta e/ou, de forma mais confiável, na combinação da evapotranspiração com medidas de umidade do solo ou da planta, ou seja, na realização do balanço hídrico do solo, em escala diária.

As metodologias apresentadas para o manejo da irrigação são todas passíveis de aplicar em nível de propriedade quando bem operados. Afora isso, existem atualmente, vários programas de manejo de irrigação que podem auxiliar o produtor na tomada de decisão sobre o acionamento ou não do sistema de irrigação. Sensores inteligentes, usados para monitorar o status de água no solo ou na planta e automaticamente transmitir as informações para um controlador que irá acionar o sistema, necessitam de manutenção periódica, fato que muitas vezes foge ao controle do produtor. Assim, o melhor sistema sempre é aquele que seja fácil e prático de manejar, e que desonere o operador da obrigatoriedade de alimentar o sistema com uma gama de informações muitas vezes distantes do domínio do produtor irrigante.

Referências

- AKKUZU, E.; SHENG, Z.; MICHELSEN, A.; RODRIGUEZ, O.; KING, J. Diurnal variation of canopy temperature differences and leaf water potential of field-grown olive (*Olea europaea* L. cv. Memecik) trees. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.139, n.9, p.728-737, 2013. DOI 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000623.
- ALGHORY, A.; YAZAR, A. Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for deficit irrigation management of sprinkler-irrigated wheat. **Irrigation Science**, v.37, p.61-77, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00271-018-0603-y>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, n.56, FAO, Rome, 300 p., 1998.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGHT, J.L. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.131, p.2-13, 2005.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C. Improvement of Soybean Resilience to Drought through Deep Root System in Brazil. **Agronomy Journal**, v.109, p.1612-1622, 2017. DOI 10.2134/agronj2017.01.0023.
- CARLESSO, R.; SPOHR, R.B.; ELTZ, F.L.F.; FLORES, C.H. Runoff estimation in southern Brazil based on Smith's modified model and the curve number method. **Agricultural Water Management**, v.98, p.1020-1026, 2011. DOI 10.1016/j.agwat.2011.01.012.
- CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; TROIS, C. The use of a meteorological station network to provide crop water requirement information for irrigation management. IFIP **Advances in Information and Communication Technology**, v.293, p.19-27, 2009.
- DAVIS, S.; DUKES, M. Irrigation scheduling performance by evapotranspiration-based controllers. **Agriculture Water Management**, v.98, n.1, p.19-28, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.006>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- DEJONGE, K.C.; TAGHVAEIAN, S.; TROUT, T.J.; COMAS, L.H. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. **Agriculture Water Management**, v.156, p.51-62, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.023>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Yield response to water. In: FAO. **Irrigation and Drainage Paper**, n.33, Rome, Italy, 133p., 1979.
- FERNANDEZ, J.E.; CUEVAS, M.V. Irrigation scheduling from stem diameter variations: **A review - Agricultural and Forest Meteorology**, v.150, n.2, p.135-151, 2010.

- GIMÉNEZ, L.; PAREDES, P.; PEREIRA, L.S. Water use and yield of soybean under various irrigation regimes and severe water stress. Application of Aquacrop and Simdualkc models. **Water**, v.9, n.6 p.393-411, 2017. DOI 10.3390/w9060393.
- GOLDHAMER, D.A. **Tree water requirements and regulated deficit irrigation**, 2011. Disponível em: <http://fruitsandnuts.ucdavis.edu/files/73693.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- GRAFTON, R.Q.; WILLIAMS, J.; PERRY, C.J.; MOLLE, F.; RINGLER, C.; STEDUTO, P.; UDALL, B.; WHEELER, S.A.; WANG, Y.; GARRICK, D.; ALLEN, R.G. The paradox of irrigation efficiency. **Science**, v.361, n.6404, p.748-750, 2018. DOI 10.1126/science.aat9314.
- GU, Z.; QI, Z.; BURGHATE, R.; YUAN, S.; JIAO, X.; XU, J. Irrigation Scheduling Approaches and Applications: A Review. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.146, p.04020007, 2020. DOI 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001464.
- HANJRA, M.A.; QURESHI, M.E. Global water crisis and future food security in an era of climate change. **Food Policy**, v.35, p.365-377, 2010.
- HUNSAKER, D.; FRENCH, A.N.; WALLER, P.M.; BAUTISTA, E.; THORP, K.R.; BRONSON, K.F.; ANDRADE-SANCHEZ, P. Comparison of traditional and ET-based irrigation scheduling of surface-irrigated cotton in the arid southwestern USA. **Agricultural Water Management**, v.159, p.209-224, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.016>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- IDSO, S.; ACKSON, R.J.; PINTER, P.; REGINATO, R.; HATFIELD, J. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. **Agriculture Meteorology**, v.24, p. 45-55, 1981. DOI 10.1016/0002-1571(81)90032-7.
- IRMAK, S.; PAYERO, J.O.; VAN DE WALLE, B.; REES, J.; ZOUBECK, G; MARTINS, D.L.; KRANZ, W.L.; EISENHAUER, D.E.; LEININGER, D. Principles and operational characteristics of watermark granular matrix sensor to measure soil water status and its practical applications for irrigations management in various soil textures. University of Nebraska, **Extension Publications**. EC783., 2014.
- JABRO, J.D.; STEVENS, W.B.; IVERSEN, W.M.; ALLEN, B.L.; SAINJU, U.M. Irrigation Scheduling Based on Wireless Sensors Output and Soil-Water Characteristic Curve in Two Soils. **Sensors**, v.20, n.1338, p.1-11, 2020. DOI 10.3390/s20051336.
- JONES, H.G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. **Journal of Experimental Botany**, v.407, p.2427-2436, 2004.
- JONES, H.G. Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.2, p.119-130, 2007.
- KUMAR, N.; ADELOYE, A.J.; SHANKAR, V.; RUSTUM, R. Neural computing modelling of the crop water stress index. **Agricultural Water Management**, v.239, p.105259, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106259>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- LIVELLARA, N.; SAAVEDRA, F.; SALGADO, E. Plant based indicators for irrigation scheduling in young cherry trees. **Agriculture Water Management**, v.98, p.684-690, 2011. DOI 10.1016/j.agwat.2010.11.005.
- MARTINS, J.D.; RODRIGUES, G.C.; PAREDES, P.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z.B.; KNIES, A.E.; PETRY, M.T.; PEREIRA, L.S. Dual crop coefficients for full and deficit irrigated maize in southern Brazil: model calibration and validation for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Biosystem Engineering**, v.115, p.291-310, 2013. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2013.03.016.
- MORAES, M.T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; BONETTI, J.A.; LEVIEN, R.; SCHNEPF, A.; LEITNER, D. Mechanical and hydric stress effects on maize root system development at different soil compaction levels. **Frontiers in Plant Science**, v.10, 1358, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01358>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- NAVARRO-HELLÍN, H.; MARTÍNEZ-DEL-RINCÓN, J.; DOMINGO-MIGUEL, R.; TORRES-SÁNCHEZ, R.; SOTO-VALLES. A decision support system for managing irrigation in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.124, p.121-131, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.003>. Acesso em: 29 mar. 2021.

- PAREDES, P.; RODRIGUES, G.J.; PETRY, M.; SEVERO, P.O.; CARLESSO, R.; PEREIRA, L.S. Evapotranspiration Partition and Crop Coefficients of Tifton 85 Bermudagrass as Affected by the Frequency of Cuttings. Application of the FAO56 Dual Kc Model. **Water**, v.10, n.5 p.558-578, 2018. DOI 10.3390/w10050558.
- PEREIRA, L.S. Water, Agriculture and Food: Challenges and Issues. **Water Resource Management**, v.31, p.2985-2999, 2017. DOI: 10.1007/s11269-017-1664-z.
- PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future. **Agricultural Water Management**, v.147, p.4-20, 2015.
- PEREIRA, L.S.; PAREDES, P. Modelling water use on farms. In: OWEIS, T. Water management for sustainable agriculture. **Burleigh Dodds Science**, p.1-28, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.19103/AS.2017.0037.15>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- PEREIRA, L.S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, v.108, p.39-51, 2012. DOI 10.1016/j.agwat.2011.08.022.
- PEREIRA, L.S.; PAREDES, P., MELTON, F., JONHSON, L., WANG, T., LÓPEZ-URREA, R., CANCELA, J.J.; ALLEN, R. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height. Background and validation using ground and remote sensing data. **Agricultural Water Management**, v.241, p. 106197, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106197>. Acesso em: 15 mar. 2021.
- PETERS, R.T.; EVETT, S.R. Automation of a Center Pivot Using the Temperature-Time-Threshold Method of Irrigation Scheduling. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.134, P.286-291, 2008. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:3\(286\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:3(286)). Acesso em: 29 mar. 2021.
- PETRY, M.T.; BASSO, L.J.; CARLESSO, R.; ARMOA, M.S.; HENKES, J.R. Modeling yield, soil water balance, and economic return of soybean under different water deficit levels. **Engenharia Agrícola**, v.40, p.526-535, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n4p526-535/2020>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- PIVETTA, L.A.; CASTOLDI, G.; SANTOS, G.P.; ROSOLEM, C.A. Soybean root growth and activity as affected by the production system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1547-1554, 2011 DOI 10.1590/S0100-204X2011001100017.
- PLACIDI, P.; GASPERINI, L.; GRASSI, A.; CECCONI, M.; SCORZONI, A. Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. **Sensors**, v.20, 3585p., 2020. DOI 10.3390/s20123585.
- POÇAS, I.; RODRIGUES, A.; GONÇALVES, S.; COSTA, P.M.; GONÇALVES, I.; PEREIRA, L.S.; CUNHA, M. Predicting Grapevine Water Status Based on Hyperspectral Reflectance Vegetation Indices. **Remote Sensing**, v.7, p.16460-16479, 2015. DOI 10.3390/rs71215835.
- RODRIGUES, G.C.; MARTINS, J.D.; SILVA, F.G.; CARLESSO, R.; PEREIRA, L.S. Modelling economic impacts of deficit irrigated maize in Brazil with consideration of different rainfall regimes. **Biosystems Engineering**, v.116, p.97-110, 2013b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.07.001>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- RODRIGUES, G.C.; PAREDES, P.S.; GONÇALVES, J.M.; ALVES, I.; PEREIRA, L.S. Comparing sprinkler and drip irrigation irrigated systems for full and deficit maize using multicriteria analysis and simulation modelling: Ranking for water saving vs. farm economic returns. **Agricultural Water Management**, v.126, p.85-96, 2013a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.05.005>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- ROSA, R.D.; PAREDES, P.; RODRIGUES, G.C.; ALVES, I.; FERNANDO, R.M.; PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. **Agriculture Water Management**, v.10, n.3, p.8-24, 2012.
- SHOCK, C.; WANG, F.X. Soil Water Tension, a Powerful Measurement for Productivity and Stewardship. **Hortscience**, v.46, p.178-185, 2011.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T.H.; ŠEJNA, M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. **Vadose Zone Journal**, 2016. DOI 10.2136/vzj2016.04.0033.

SOULIS, K.X.; ELMOLOGLOU, S.; DERKAS, N. Investigation the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture-based drip irrigation scheduling systems. **Agricultural Water Management**, v.148, p.258-268, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.015>. Acesso em: 29 mar. 2021.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES, D. AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. **Agronomy Journal**, v.101; p.426-437, 2009. DOI 10.2134/agronj2008.0139s.

WHITE, S.; RAINE, S.R. A grower guide to plant-based sensing for irrigation scheduling. National Centre for Engineering in Agriculture Publication, 1001574/6, University of Southern Queensland, Toowoomba, QLD, Australia, 2008.

WORLD BANK. **Water in Agriculture**. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture>. Acesso em: 19 nov.2020.

ZANON, A.J.; STRECK, N.A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, v.108, p.1447-1454, 2016. DOI 10.2134/agronj2015.0535.

ZARCO-TEJADA, P.J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; WILLIAMS, L.E.; SUÁREZ, L.; BERNI, J.A.J.; GOLDHAMER, D.; FERERES, E. A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. **Remote Sensing of Environment**, v.138, p.38-50, 2013. DOI 10.1016/j.rse.2013.07.024.

CAPÍTULO 13

13 TECNOLOGIAS DIGITAIS PARA MONITORAMENTO DA IRRIGAÇÃO

Catariny Cabral Aleman, Fernando França da Cunha, Rubens Alves de Oliveira e Roberto Filgueiras

Resumo

Neste capítulo serão abordadas algumas ferramentas e aplicações da Irrigação Digital. Com o advento da Agricultura de Precisão, técnicas para aumentar a eficiência do uso da água em áreas irrigadas tem sido utilizada para garantir melhoria da gestão dos recursos hídricos, economia de energia, mão-de-obra e aumento da produtividade. Dessa forma, é possível auxiliar o irrigante a usar adequadamente água e energia durante a condução do manejo de irrigação. Diversas são as tecnologias que podem ser aplicadas na agricultura irrigada. Dentre elas serão apresentadas o sensoriamento remoto e inteligência artificial no suporte à decisão de irrigação. A partir das informações de imagens de plataformas orbitais, aéreas ou terrestres associadas a aplicação de linguagem de programação e algoritmos é possível automatizar sistemas de irrigação visando a aplicação de água em taxa variável. Isso permite atender a variabilidade espacial das áreas irrigadas com economia dos recursos hídricos, aumento de produtividade e viabilidade econômica do uso da irrigação.

13.1 Introdução

A irrigação digital, ou Irrigação 4.0 herdou este nome da Agricultura digital, e assim como a sua predecessora, reúne um conjunto de tecnologias que auxiliam os empresários rurais irrigantes na otimização das atividades do campo por meio de conectividade, sensoriamento remoto, entre outras ferramentas relativas à tecnologia da informação. Isso inclui programas computacionais e equipamentos que reúnem e analisam dados sobre os cultivos agrícolas, possibilitando a automação e suporte para decisões estratégicas.

A agricultura irrigada passou por diversas evoluções ao longo da sua história. No início, os instrumentos que auxiliavam o trabalho no campo eram rudimentares. As empresas de irrigação não possuíam ferramentas para produzir equipamentos de boa qualidade e o gargalo da agricultura irrigada estava na área de engenharia de irrigação. Com o passar dos anos, as empresas foram incorporando tecnologias em seus produtos e resolvendo, em parte, os problemas de engenharia de irrigação. Assim, o novo gargalo da agricultura irrigada passou a ser o manejo da água e muitas empresas especializadas em gestão de irrigação foram criadas para solucionar esse entrave tecnológico. E agora se apresenta um novo desafio, a irrigação digital.

Na irrigação, o uso de tecnologias 4.0 é a garantia de uma melhor gestão da água de irrigação, mão de obra, energia elétrica e insumos em geral, além de atender à necessidade primária dos agricultores, que seria aumentar a quantidade e melhorar a qualidade dos produtos colhidos. O aumento da produtividade e a melhoria na qualidade aparecem como os principais benefícios quando se adota tecnologias 4.0. É oportuno ressaltar que isto vai ao encontro dos desafios impostos pelo aumento da demanda de alimentos. Com a irrigação 4.0 ou agricultura digital, o empresário rural pode lançar mão de diversas tecnologias que auxiliam nas decisões estratégicas e nas questões operacionais do negócio. Assim, além dos benefícios de aumentar a qualidade e produtividade agrícola, os sistemas integrados de gestão agrícola podem modernizar, simplificar e otimizar a vida do empresário rural.

Com auxílio de tecnologias, o irrigante consegue medir e entender os erros. Assim, com a irrigação digital, é possível tomar decisões estratégicas capazes de reduzir os desperdícios de insumo. Por meio de equipamentos e sensores conectados, o irrigante consegue mensurar a eficiência operacional e, com isso, fazer modificações que possam otimizar os seus resultados. Sem um sistema informatizado, fica difícil para o irrigante conhecer os fatores causadores de redução de rendimento. Assim, percebe-se que a irrigação digital veio para corrigir problemas que antes eram invisíveis aos seus olhos.

O empresário rural, de maneira progressiva, está se conectando à tecnologia da informação e ao ambiente da agricultura 4.0, adicionando novos sistemas e modificando a forma de gerenciar suas atividades. Até as pequenas e médias propriedades rurais estão buscando a modernização na agricultura. Estas inovações estão trazendo benefícios que garantem melhores resultados e potencializando a rentabilidade das atividades agrícolas.

Nos próximos tópicos deste capítulo, a irrigação digital será apresentada considerando os diferentes usos na agricultura. Serão descritas as aplicações de sensoriamento remoto e inteligência artificial no suporte à decisão de irrigação, bem como sua interação, a fim de apresentar como os dados captados são transformados em informação e aplicados nos cultivos agrícolas. Informações a respeito de projeto de sistemas de irrigação serão contempladas nos assuntos referentes a automação de sistemas de irrigação e aplicação de água em taxa variável. Dessa forma, busca-se com este capítulo disponibilizar aos profissionais da área um material bibliográfico que contenha as peculiaridades da irrigação digital e, que simultaneamente, possua as mais recentes e relevantes tecnologias voltadas ao tema.

13.2 Sensoriamento remoto aplicado à irrigação

A espacialização das condições de cultivo, sobretudo de grandes áreas irrigadas, tem ganhado relevância, uma vez que se precisa aumentar a produtividade dos sistemas de cultivos para atender a demanda crescente de alimentos. O desenvolvimento de novas tecnologias derivadas da digitalização da agricultura, voltadas para o aprimoramento produtivo, tem auxiliado, visto que facilitam o tratamento diferenciado do talhão agrícola, no tempo e por unidade de área. Ademais, a agricultura irrigada faz uso expressivo de recursos hídricos cada vez mais escassos, tanto em termos quantitativos, quanto qualitativos. Logo, o monitoramento da agricultura irrigada é ponto chave na questão do aprimoramento do sistema produtivo e, nesse aspecto, as tecnologias de sensoriamento remoto (SR) se tornam indispensáveis.

O SR pode ser definido como a ciência que permite com que dados sejam adquiridos de uma superfície sem que haja contato direto entre o objeto que capta os dados (sensor) e o alvo, não sendo esses dados necessariamente imagens. Uma das classificações possíveis para a aquisição de dados através de SR é realizada de acordo com o nível em que os sensores estão localizados, ou seja, quanto ao nível de aquisição de dados. Nesse sentido, pode-se estratificar o SR em orbital, aéreo e proximal (terrestre) (Figura 1). O nível de aquisição de dados no sensoriamento remoto, quando os dados são em formato matricial, exerce forte influência no tamanho da área que será monitorada pelo sensor, na resolução espacial, resolução temporal e na escala das imagens captadas. Quanto mais alto estiver um sensor, maior será a superfície imageada e, conseqüentemente, maior será a resolução temporal desse sensor, ou seja, maior será a frequência do monitoramento sobre determinada superfície. Quando se diminui a altitude, menor será a área coberta, entretanto, maior será a riqueza de detalhes captados pelo sensor, isto é, maior resolução espacial (FLORENZANO, 2011).

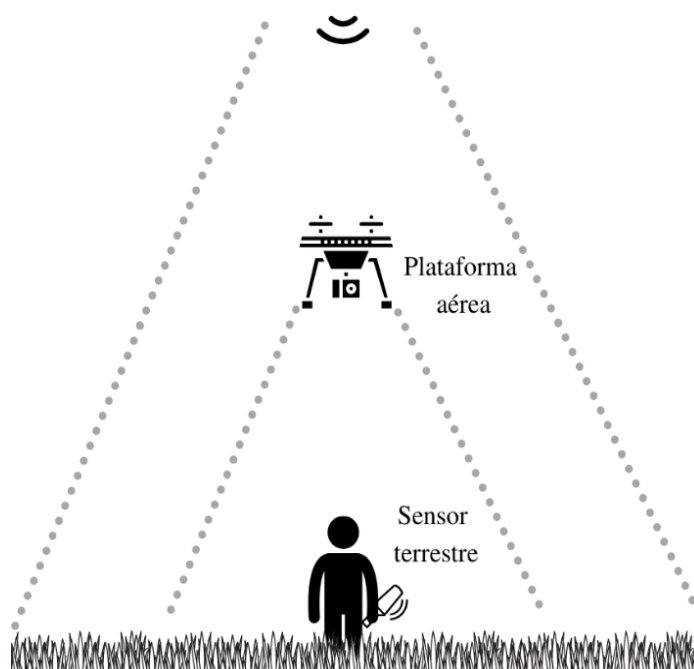


Figura 1. Níveis de obtenção de dados por sensoriamento remoto: orbital, representado pelo satélite; aéreo, representado pela aeronave remotamente pilotada (RPA); e terrestre, representado por um sensor de mão.

A seguir, serão apresentadas as contribuições do SR para a agricultura irrigada nos três níveis de aquisição de dados e, posteriormente, serão apresentados modelos e algoritmos para auxiliar na geração de informação e tomada de decisão.

13.3 Sensoriamento remoto orbital na agricultura irrigada

O sensoriamento remoto orbital concentra-se basicamente no uso de sensores que estão em plataformas orbitais, como satélites, muitos dos quais fornecem imagens gratuitas, sendo possível encontrar um enorme banco de dados históricos. Existem imagens com diferentes características de resoluções espaciais, espectrais, radiométricas e temporais, as quais tendem a complementar umas às outras nas diferentes aplicações voltadas para o setor agrícola, tais como análises temporais, análises espaciais, expansão das áreas irrigadas, zoneamento agroclimático, estimativa de produtividade, estimativa de evapotranspiração, entre outras.

Uma imagem de satélite tem um papel fundamental no monitoramento de áreas agrícolas, uma vez que o agricultor consegue ter uma percepção global de sua lavoura no que se refere à variabilidade da condição dos cultivos, antes mesmo de se ir ao campo. Essa visão geral traz uma maior efetividade para as inspeções de campo, uma vez que a ida ao talhão pode ser direcionada de acordo com o que foi interpretado na imagem de satélite. No entanto, não são apenas as imagens com resolução espacial a nível de talhão agrícola que auxiliam o agricultor no campo. Existem imagens satelitárias que possuem resolução espacial baixa, mas que fornecem informações importantes a uma resolução temporal elevada, fazendo com que seu uso possa ser adotado em modelos de previsões climáticas e predições de parâmetros como a evapotranspiração.

Os satélites apresentam-se como uma alternativa importante para o monitoramento rápido das lavouras, de maneira sistemática e de baixo custo, uma vez que se tem disponibilidade de imagens gratuitas. Dentre as imagens gratuitas disponíveis, destaca-se para uso na agricultura aquelas dos satélites provenientes da constelação *Landsat* (*Landsat-1*, *Landsat 2*, *Landsat 3*, *Landsat 4*, *Landsat-5*, *Landsat-7*, e *Landsat-8*) e *Sentinel 2* (*Sentinel 2A*

e 2B). Os satélites *Sentinel 2A* e *2B* foram lançados pela *European Space Agency* (ESA), nos dias 23 de junho de 2015 e sete de março de 2017, respectivamente. O sensor *MultiSpectral Imager* (MSI) está presente em ambas as plataformas (*Sentinel 2A* e *2B*), o qual possui uma resolução espacial de 10 metros, na faixa do espectro eletromagnético óptico.

Com intuito de evidenciar a importância do uso do sensoriamento remoto orbital na tomada de decisão em propriedades rurais, será apresentado, a título de exemplo, uma imagem da constelação *PlanetScope*. Portanto, na Figura 2, pode ser observado uma imagem do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) calculado com as bandas espectrais do vermelho e infravermelho próximo pertencente a um dos nano satélites da constelação *PlanetScope*. Observando essa imagem, percebe-se diferentes padrões de variabilidade do vigor vegetativo ao longo dos pivôs centrais (círculos), o que por si só, instiga uma inspeção direcionada nos locais onde os cultivos apresentam menor vigor vegetativo (menores valores de NDVI). A inspeção direcionada auxiliará na efetividade do monitoramento das áreas irrigadas, uma vez que o agricultor irá direto nas áreas que devem ser averiguadas, economizando tempo e evitando perdas econômicas.

Com a inspeção localizada, o agricultor buscará entender a real causa do baixo vigor das plantas no local, e buscará soluções para atenuar a possível perda de produtividade. Quando não for possível essa atenuação, o agricultor buscará formas de manejar o local para que se consiga aumentar a rentabilidade dessas áreas menos produtivas.

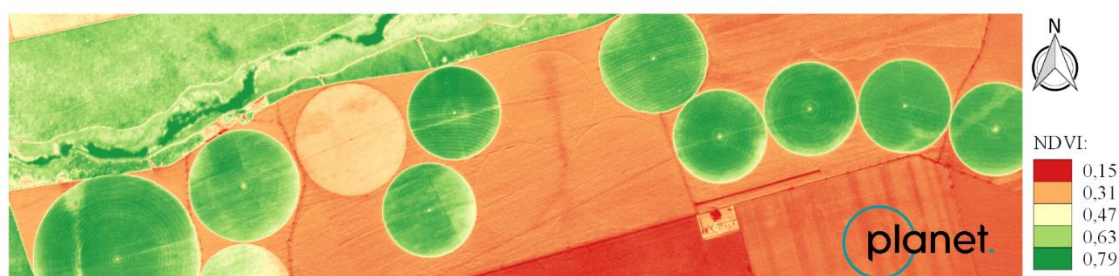


Figura 2. Imagem do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) calculado com nano satélites da constelação *PlanetLabs*, para uma região composta de pivôs centrais no oeste da Bahia, Brasil.

Apesar de ser difícil identificar a causa de um determinado estresse na cultura apenas observando as imagens, algumas vezes isso é possível. Na maioria das vezes, os padrões espaciais que permitem a identificação de problemas pelas imagens estão associados ao mal funcionamento do sistema de irrigação, uma vez que possuem padrões geométricos específicos. A identificação de problemas nos cultivos agrícolas, sobretudo os irrigados, é um dos potenciais que as imagens provenientes de satélites podem oferecer para auxiliar no monitoramento e no aumento da eficiência dos sistemas de produção irrigados. No entanto, essas tecnologias agregam muitos outros benefícios para o setor da irrigação digital e para a agricultura digital como um todo. O monitoramento com imagens, se bem utilizado no manejo das culturas, pode acarretar melhorias significativas de rentabilidade e produtividade para o setor agrícola. Ademais, aplicações mais complexas com a utilização de modelos preditivos ainda podem ser empregadas, como será destacado no tópico: 1.4 Modelos e algoritmos para análise de Imagens na agricultura irrigada.

13.4 Sensoriamento remoto aéreo na agricultura irrigada

A partir da segunda década do século XXI é que o sensoriamento remoto aéreo se tornou mais corriqueiro nas propriedades agrícolas, em decorrência da popularização das aeronaves remotamente pilotadas (RPAs). Com isso tornou-se mais comum o uso de câmeras a bordo dessas RPAs para fazer o monitoramento da agricultura, uma vez que as imagens

geradas por esses equipamentos não possuem problemas com a presença de nuvens, como ocorre com imagens de sensores orbitais. Essas câmeras são classificadas em dois tipos: modificadas e multiespectrais.

As câmeras modificadas são sensores convencionais (sensores RGB cor natural) alterados com a inserção de um filtro infravermelho, para captar a radiação eletromagnética referente ao comprimento de onda do infravermelho próximo (NIR). A substituição do filtro para a captação da radiação NIR causa interferência na captação de outros comprimentos de onda, o que torna questionável o resultado desses equipamentos. No entanto, as câmeras modificadas se tornaram populares devido ao baixo custo de aquisição quando comparadas com as multiespectrais.

As câmeras multiespectrais, por sua vez, possuem sensores independentes com filtros de alta qualidade para captarem a radiação na amplitude espectral programada em um intervalo estreito de comprimento de onda, tornando os dados adquiridos melhores do que os obtidos nas câmeras modificadas. O fator que mais limita o uso das câmeras multiespectrais ainda é o elevado preço de aquisição.

Existem muitos modelos de câmeras para a realização de monitoramentos agrícolas com RPAs. De modo geral, pode-se destacar as câmeras apresentadas na Tabela 1, por serem mais frequentemente utilizadas. No entanto, cabe destacar a importância que as câmeras que captam a radiação eletromagnética no comprimento de onda do termal possuem para o monitoramento da agricultura irrigada, pois elas permitem estimar a demanda hídrica das culturas com maior precisão e monitorar plantas com estresse hídrico. O dado termal, portanto, fornece informação de grande valia para se proceder com o manejo da agricultura irrigada.

Com o propósito de mostrar o grau de informação espacial que pode ser extraído de imagens captadas de uma RPA, na Figura 3 está apresentado o monitoramento espacial realizado em uma área cultivada com milho, de 2.650 m², até 59 dias após a emergência (DAE). O equipamento utilizado foi uma RPA modelo *Phantom 4*, da empresa *DJI Innovations*. As imagens, em composição RGB (*Red*, *Green* e *Blue*) cor natural e detalhamento espacial (*Ground Sample Distance*) de 0,025 m, foram adquiridas com o equipamento operando em uma altura de 50 m. Esse nível de detalhamento é relevante quando se busca obter maiores informações da superfície como, por exemplo, verificar problemas que podem estar associados à distribuição de água em talhões irrigados ou, até mesmo, a obstrução de emissores do sistema de irrigação. No caso da Figura 3, as imagens permitem identificar variabilidades na emergência da cultura do milho, presença de plantas daninhas e falhas de plantio.

Tabela 1. Câmeras para monitoramento agrícola utilizando aeronaves remotamente pilotadas.

Câmera	Empresa fabricante	Banda Termal	Classificação
Survey-3	MAPIR	Não	Modificada
Kernel	MAPIR	Não	Multiespectral
Parrot-Sequoia	Parrot	Não	Multiespectral
RedEdge-MX	MicaSense	Não	Multiespectral
Altum	MicaSense	Sim	Multiespectral

A área monitorada é de um experimento agrícola realizado na Universidade Federal de Viçosa (UFV), no qual teve-se como objetivo principal estimar a evapotranspiração real e a biomassa da cultura do milho, utilizando uma câmera RGB modificada, modelo *Survey 3*,

fabricada pela empresa Mapir. Essa câmera foi denominada na pesquisa de sensor RGNIR, por fazer referência aos espectros do vermelho (*Red*), verde (*Green*) e infravermelho próximo (NIR) que ela passou a captar com a modificação realizada pelo fabricante. Os resultados alcançados em parte dessa pesquisa indicam que é possível realizar o manejo espacial da água e o monitoramento da demanda hídrica na agricultura por meio de sensores RGNIR a bordo de RPAs, sendo cada vez mais factível para pequenas áreas irrigadas. Para detalhamentos referentes a essa pesquisa, sugere-se a publicação de Santos *et al.* (2020). Cabe ressaltar que a evolução de sensores e equipamentos, juntamente com as pesquisas científicas, estão aos poucos inserindo o manejo da irrigação às premissas da agricultura de precisão.



Figura 3. Acompanhamento espacial de parte do estágio vegetativo da cultura do milho com a utilização de aeronave remotamente pilotada.

13.5 Sensoriamento remoto proximal na agricultura irrigada

O sensoriamento remoto relativo ao comprimento de onda do infravermelho médio e termal pode auxiliar no entendimento da necessidade de água para as plantas. No que se refere ao infravermelho médio, isso se deve ao fato de a água ser um excelente absorvedor da radiação eletromagnética nesse comprimento de onda e as plantas possuírem flutuações na quantidade de água no limbo foliar de acordo com a disponibilidade hídrica no solo. As plantas absorvem água pelo sistema radicular e a conduzem até as células foliares, onde fica armazenada, em grande parte, no mesófilo lacunoso. Logo, se as plantas estão com suprimento adequado de água, seja por chuva ou irrigação, existirá grande quantidade de água no mesófilo lacunoso, o que deixará as folhas túrgidas. O contrário também é verdadeiro, ou seja, caso a planta venha sofrer estresse hídrico, a região do limbo foliar terá uma quantidade de água menor do que a sua capacidade máxima de armazenamento e, por isso, se diz que a planta está em turgidez relativa. Portanto, se a planta está com as folhas túrgidas, haverá maior absorção de radiação referente ao infravermelho médio, ao passo que plantas com estresse hídrico tenderão a refletir mais energia nesse mesmo comprimento de onda, visto que terão menos água no interior da folha (JENSEN; EPIPHANIO, 2011).

A importância do comprimento de onda relativo ao termal para a agricultura irrigada deve-se ao fato que grande parte da água é perdida por transpiração em forma de vapor nos estômatos. Essa perda tem como um dos propósitos, o de promover o resfriamento no interior do limbo foliar. Logo, quando se tem elevada disponibilidade de água nas folhas, essas tendem a transpirar no seu potencial e por conseguinte, apresentarem temperaturas foliares mais amenas. Na situação em que a planta possui pouca disponibilidade hídrica, ocorre o inverso, uma vez que a planta fecha seus estômatos com o propósito de não perder água para o meio, e em consequência, elas elevam a temperatura foliar. Dessa forma, plantas com suprimento hídrico adequado, tendem a apresentar temperaturas foliares mais amenas do que plantas em estresse hídrico, o que refletirá na resposta de instrumentos que captam o comprimento de onda termal (JENSEN; EPIPHANIO, 2011).

Com o conhecimento de que os comprimentos de onda do infravermelho médio e do termal se relacionam com a condição hídrica das plantas, estudos relacionados à necessidade hídrica de plantas com sensoriamento remoto proximal tendem a utilizar dois tipos de sensores, os hiperespectrais e os termais. Os hiperespectrais são utilizados por captarem de forma detalhada informações no infravermelho médio, sendo possível observar os picos de absorção relativos à água no interior das folhas. Apesar do infravermelho médio e termal serem os comprimentos de ondas mais recomendáveis quando o objetivo é avaliar a necessidade hídrica de plantas, existem estudos no meio científico que trazem diferentes combinações de comprimentos de onda e índices de vegetação em investigações que buscam relação com a demanda hídrica das plantas.

Os sensores que captam dados próximos à superfície podem ser montados em dispositivos portáteis, em plataformas terrestres e em maquinário agrícola. Os sensores hiperespectrais mais utilizados no campo, no âmbito de pesquisa, são os espectrorradiômetros da fabricante ASD Inc. (atual Panalytical). Em relação aos sensores termais, as câmeras da fabricante FLIR *systems* têm sido bastante utilizadas.

13.6 Modelos e algoritmos para análise de imagens na agricultura irrigada

O uso de sensores na agricultura permite a coleta de grande número de dados que são usados na modelagem de parâmetros que auxiliam no manejo dos cultivos agrícolas. Assim, técnicas de sensoriamento remoto têm sido aplicadas para fornecer informações usadas na tomada de decisão no manejo da irrigação, especialmente em grandes áreas.

Existe grande potencial de estimar os coeficientes de cultivo e a demanda hídrica das culturas por meio do uso de imagens obtidas de sensores embarcados em plataformas orbitais e em RPAs. Nesse sentido, é indispensável considerar a espacialização dos dados para se entender cada local específico do cultivo agrícola. Esse fato faz com que as imagens provenientes de sensoriamento remoto sejam de fundamental importância para a entrada de dados em modelos preditivos. Logo, quando o intuito é gerar informação para a agricultura irrigada, é essencial a representação espacial de parâmetros relacionados ao uso da água na agricultura como, por exemplo, a evapotranspiração real.

A evapotranspiração real das culturas pode ser modelada de modo espacial utilizando imagens de satélites e dados meteorológicos. Existem diversas abordagens para a estimativa desse parâmetro na literatura, sendo comum o uso de modelos baseados na equação residual do balanço de energia e modelos baseados em coeficientes de cultura. Pesquisadores desenvolveram ao longo do tempo, diversos algoritmos e metodologias para obter esse parâmetro por meio de imagens de satélites. Entre os modelos desenvolvidos pode-se citar o *Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)*, *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution and Internalized Calibration (METRIC)*, *Simplified Surface Energy Balance (SSEBop)*, *Two-Source Energy Balance model (TSEB)*, *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving (SAFER)*.

Os modelos baseados nos conceitos do balanço de energia estimam o saldo de radiação, o fluxo de calor no solo e o fluxo de calor sensível. As imagens da constelação Landsat são comumente utilizadas para a estimativa da evapotranspiração por esses modelos; no entanto, outras constelações que possuem a banda termal podem ser utilizadas. De maneira geral, a maioria desses algoritmos leva em consideração as equações do balanço de energia para estimar a evapotranspiração por meio de imagens de satélites.

A grande vantagem da utilização das imagens orbitais é a possibilidade de estimar a evapotranspiração para grandes áreas de modo sistemático ao longo do tempo. Na Figura 4 está apresentada a evapotranspiração real (E_{Tr}) estimada pelo algoritmo SAFER, utilizando

uma imagem do *Landsat-8*, do dia 28/07/2015, em uma área de agricultura irrigada localizada no oeste da Bahia, Brasil.

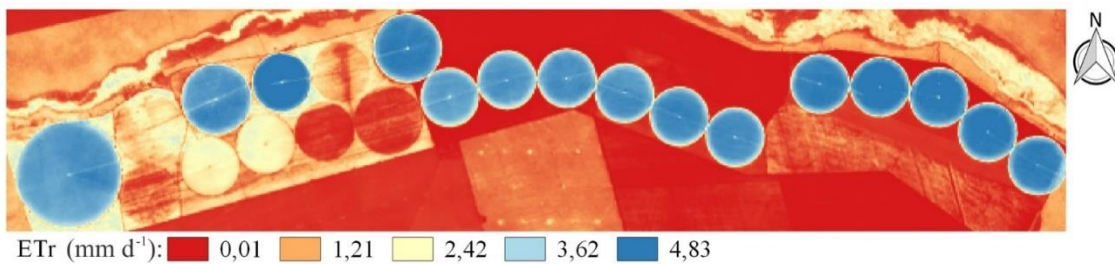


Figura 4. Evapotranspiração real estimada pelo algoritmo SAFER com imagens do satélite Landsat-8.

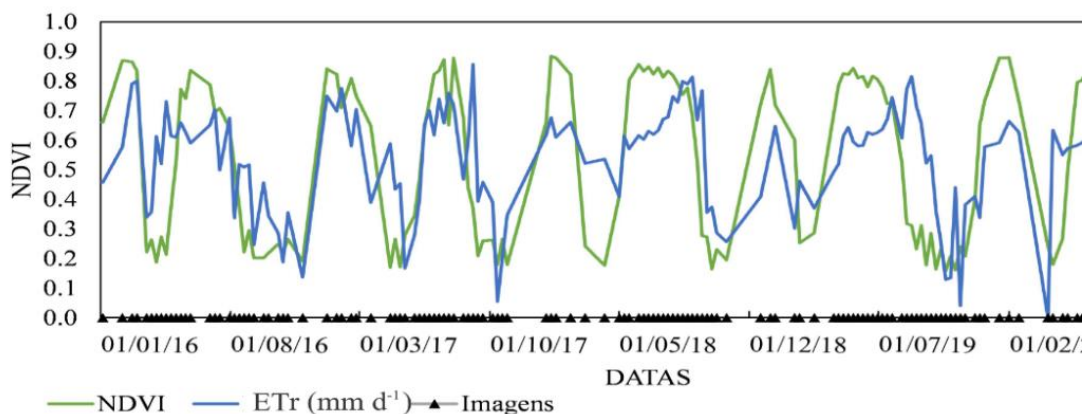


Figura 5. Monitoramento de área irrigada utilizando o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e evapotranspiração real (ETr), adquiridos na plataforma SSEBOP-BR.

Esforços têm sido realizados para haver uma disponibilização de dados, prontos para uso, para o monitoramento e gerenciamento de culturas irrigadas utilizando imagens provenientes da constelação *Landsat*. Um exemplo desse esforço é a plataforma SSEBOP-BR, desenvolvida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), em parceria com *United States Geological Services* (USGS) e a empresa Agrosatélite. A partir dessa plataforma, realizou-se uma análise temporal de janeiro de 2016 a setembro de 2020 para o pivô central delimitado por um círculo preto na Figura 4. Essa análise pode ser observada na Figura 5. Para ter acesso aos dados da plataforma, basta acessar o seguinte endereço eletrônico: <https://ssebop.users.earthengine.app/view/ssebop-br>.

Com a evolução digital, modelos empíricos denominados de *Machine Learning* também estão se tornando comuns e sendo utilizados para predições com imagens de RPAs e satélites. Essa técnica será abordada no próximo tópico.

13.7 Inteligência artificial aplicada ao manejo de irrigação

O uso de tecnologias de suporte à decisão de irrigação possibilita gerir de maneira inteligente o uso dos recursos hídricos e resulta em aumento da produtividade e do valor econômico das culturas agrícolas.

A irrigação de precisão auxilia no manejo e gestão inteligente da água através de tecnologias de informação e comunicação, desenvolvidas para agregar mais eficiência a processos como a detecção de características edafoclimáticas de uma área agrícola. Inovações em sensores e rede de comunicação de dados sem fio, em conjunto com o avanço de sistemas

computacionais e aplicativos móveis, oportunizam o desenvolvimento de ferramentas para o suporte à decisão de irrigação para melhorar o setor produtivo.

Combinar variáveis relacionadas ao solo, ao clima e à planta tem potencial para o manejo adequado e eficiente da irrigação em comparação com práticas tradicionais. O grande desafio na interação entre essas informações está no fluxo de dados, análise e criação de modelos que auxiliem na tomada de decisão. As áreas agrícolas apresentam variabilidade espacial, complexidade nas espécies cultivadas e variações climáticas que devem ser consideradas para a realização da irrigação. Dessa forma, é fundamental a utilização de tecnologias eficientes para auxiliar na gestão hídrica adequada em condições de campo.

A inteligência artificial (AI) é um campo da ciência da computação que agrega aprendizado a máquinas para maximizar a taxa de sucesso ao realizar determinada atividade (JHA *et al.*, 2019). Técnicas de "*Internet of Things*" e *Machine Learning*, como a Lógica Fuzzy e Redes Neurais permitem o aprendizado na AI e auxiliam no desenvolvimento de tecnologias avançadas para o manejo de irrigação. AI relaciona estudos, pesquisa e desenvolvimentos de mecanismos que são semelhantes ao raciocínio humano para perceber um ambiente e aplicar ações com maximização de sucesso.

O *Machine Learning* é a principal forma adotada para implementação da AI. O objetivo é alimentar a máquina com dados de experiências anteriores e estatísticas para executar tarefas para solucionar um problema específico. Ketchum *et al.* (2020) aplicaram o *Machine learning* para identificar áreas irrigadas, de sequeiro, sem cultivos agrícolas e zonas úmidas através de imagens de satélite no Oeste dos Estados Unidos. Esse tipo de sistema permite identificar áreas aptas e inaptas para irrigação, além de permitir o acompanhamento da evolução das áreas irrigadas ao longo do tempo.

O aprendizado de máquina utiliza algoritmos matemáticos atrelados ao domínio do Big Data, possibilitando desenvolver e validar modelos para classificar e analisar áreas para tomadas de decisão. A aplicação dessa técnica permite substituir modelos manuais de gestão da irrigação e viabilizar sistemas automáticos de apoio à irrigação. Técnicas de aprendizado de máquina podem ser utilizadas para relacionar informações de sensores de solo e estações meteorológicas para prever e recomendar irrigações.

A lógica Fuzzy é um método que auxilia a resolver problemas dentro de um processo. Trata-se de uma técnica que foi desenvolvida para explicar a inteligência humana e o comportamento decisório. Conceitos linguísticos são transformados em conceitos matemáticos e estruturas computacionais permitindo determinar a demanda hídrica de uma cultura, por exemplo. O sistema Fuzzy é baseado em regras base, banco de dados associado a funções que determinam o grau de adesão a uma variável de entrada para o conjunto Fuzzy e, ao final, a combinação de regras produz o resultado do sistema de inferência (Figura 6).

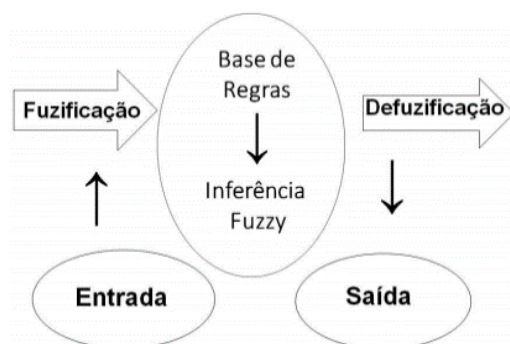


Figura 6. Esquema baseado nas regras Fuzzy (MESQUITA *et al.*, 2016).

Entre as diferentes aplicações da lógica Fuzzy na irrigação, é possível citar a associação de sensores de solo e estações meteorológicas para tomada de decisão durante o processo de manejo da água e o uso em sistemas de irrigação para aplicação em taxa variável em pivô central, utilizando dados do sensoriamento remoto para realização inteligente da irrigação.

O uso inteligente dessa técnica permite a aplicação da lâmina de água de maneira precisa e eficiente através da automação de sistemas de irrigação conectados a sensores que determinam variáveis edafoclimáticas. Informações de sensores de temperatura, umidade e radiação podem ser adotadas como dados de entrada do sistema Fuzzy, tendo como saída o acionamento do sistema de bombeamento de água. Portanto, a lógica Fuzzy correlaciona os dados obtidos nos sensores e gera uma informação que resulta no acionamento do conjunto motobomba do sistema de irrigação.

O uso de rede neurais tem sido incorporado à irrigação para auxiliar na predição e previsão de informações com base no raciocínio paralelo. Basicamente trata-se de modelos matemáticos e computacionais interconectados que funcionam como neurônios humanos. Através de algoritmos é possível correlacionar dados brutos, agrupá-los e classificá-los em *layers* permitindo o reconhecimento de padrões (Figura 7). O número de parâmetros adicionado à rede neural pode ser infinito; entretanto, quanto maior o número de informações, mais complexos são os modelos, maior o tempo de treinamento da rede e maior a tendência de ajustes.

Na rede neural artificial, de forma sintética, é constituída por sinais apresentados na entrada (informações de um sensor). Cada sinal é multiplicado por um peso que indica a influência na saída (variações das leituras do sensor em um intervalo de tempo). É realizada a soma ponderada que fornece um nível de atividade (interferência das informações em um ambiente). Se o nível gerado exceder o limite (*threshold*), determinada resposta é emitida.

O método de redes neurais apresenta elevada habilidade de aprendizado devido à relação não linear entre dados de entrada e de saída do sistema. Entre as aplicações na irrigação e no manejo de recursos hídricos pode-se citar a predição do conteúdo de água no solo, a demanda de água para irrigação, a modelagem do escoamento superficial e de águas subterrâneas, além da previsão de produtividade das culturas. Essas aplicações permitem que seja estabelecido o suporte à análise de decisão de irrigação de maneira automática ou por meio do técnico responsável pela área irrigada.

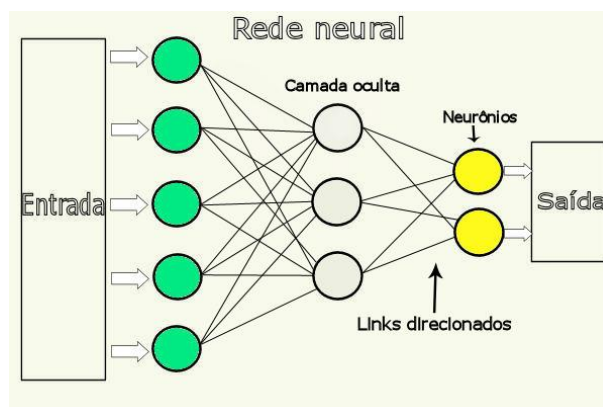


Figura 7. Estrutura de redes neurais (OLIVEIRA, 2011).

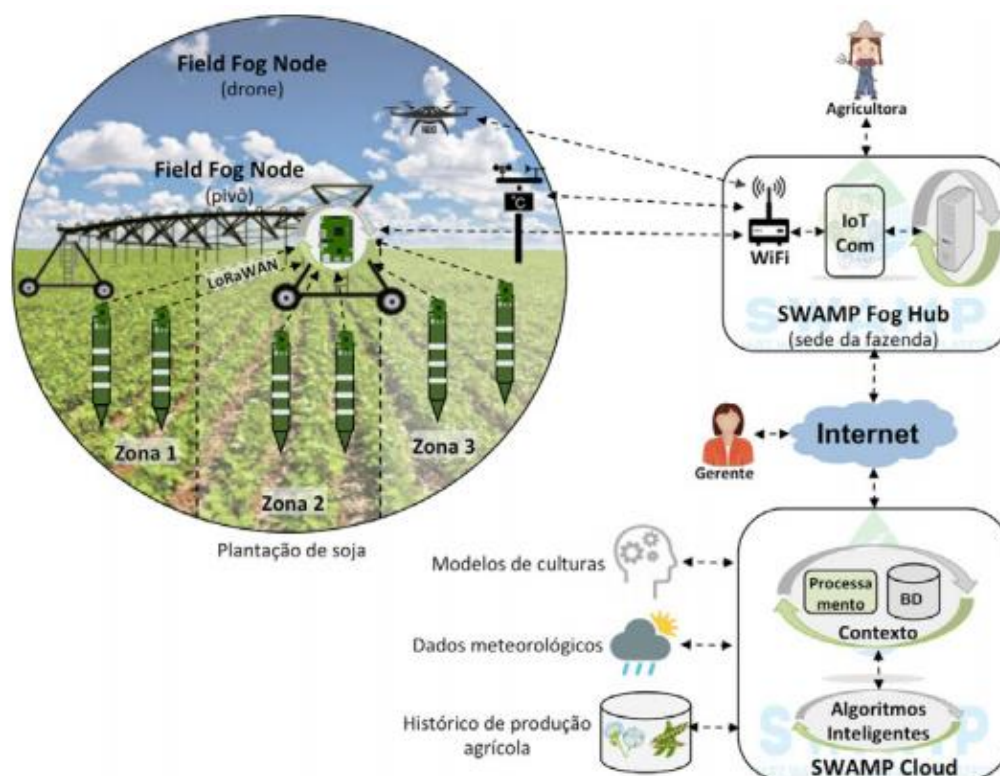


Figura 8. Esquema de funcionamento do SWAMP na gestão inteligente da água para irrigação (KAMIENSKI *et al.*, 2019).

O uso de tecnologias para irrigação de precisão não se restringe ao *Machine Learning*. Diferentes tecnologias de informação e comunicação podem ser utilizadas, entre elas a "Internet of Things" ou "Internet das Coisas" (IoTs). Essa tecnologia inclui uma grande quantidade de sensores, drones, computação em nuvem e *Big Data* interconectados. O objetivo principal é integrar, utilizando algoritmos, todas as ferramentas e dados disponíveis em plataformas de softwares que permitam a comunicação e adaptação a diferentes cenários.

Existe um grande projeto colaborativo que envolve pesquisadores do Brasil, Espanha e Itália, voltado para desenvolvimento e avaliação de uma plataforma que integra o uso da "Internet of Things". O SWAMP (*Smart Water Management Platform*) é uma plataforma para o manejo inteligente da água que agrega informações em nuvem, tecnologias da informação e algoritmos inteligentes que permitem prever algumas tomadas de decisões em nível local (Figura 8). A plataforma é composta por cinco camadas entre as quais estão serviços de IoTs para o monitoramento da planta, solo e clima, armazenamento virtual, análise de dados,

gerenciamento dos dados de água e serviços de aplicação para gerar informação (KAMIENSKI *et al.*, 2019).

O uso de IoT em sistemas e no manejo de irrigação pode aumentar a eficiência e economia de água em projetos, facilitar a integração de atividades como a fertirrigação e otimizar processos de automação. Os sistemas de irrigação inteligentes baseados em IoTs podem conectar informações de disponibilidade hídrica no solo ao acionamento de sistemas de irrigação.

13.8 Automação de sistemas de irrigação

O mercado mundial de irrigação automatizada crescerá cerca de 18,5% ao ano e deve atingir US\$ 6,7 bilhões até 2025 (MARKET AND MARKET, 2020). Isso mostra a conscientização dos irrigantes quanto aos benefícios das tecnologias inteligentes. A automação da irrigação necessita de componentes como controladores, válvulas, sensores, emissores, manômetros, dispositivos de monitoramento e medição de vazão, entre outros. Entretanto, estes componentes necessitam estar integrados em sistemas que combinam tecnologias por meio de conectividade, sensoriamento remoto, entre outras ferramentas relacionadas à tecnologia da informação (TI).

Todos os recursos de TI utilizados na propriedade agrícola possuem a função de coletar e analisar dados sobre solo, planta, atmosfera, relevo, equipamento de irrigação, entre outros. Munido dessas informações, é possível entender as variabilidades existentes dentro das áreas cultivadas e, assim, propor as melhores soluções como aplicação de água em taxa variada, quimigação, entre outras.

Apesar dos produtores rurais estarem aderindo à TI, ainda existem muitos desafios a serem superados, como problemas da conectividade nos países em desenvolvimento. As ferramentas da irrigação digital precisam, em sua maioria, de uma conexão com a internet, recurso escasso em muitas propriedades agrícolas brasileiras. Assim, nota-se uma necessidade de investimento nas operadoras de telefonia móvel para adoção de tecnologias nas fazendas. Para superar esse problema, algumas empresas conectam as máquinas por sinal de rádio emitido a partir de um ponto da propriedade rural. Este ponto está conectado à internet e troca dados móveis via rádio com outros locais da fazenda.

A irrigação digital necessita de tecnologias que agregam funcionalidades para otimizar a produção. O sistema de georreferenciamento associado a outros instrumentos gera muitas possibilidades de aplicação. Como exemplo, o GPS auxilia no sistema de irrigação por pivô central equipado com braço articulado (*corner*). Todo o sistema tecnológico embarcado é programado e controlado por intermédio de um GPS RTK com precisão milimétrica. Isso propicia uma perfeita simetria de abertura e fechamento do braço articulado e dos emissores, conferindo ao *corner* a mesma uniformidade de aplicação de água que o restante do equipamento. O GPS também é utilizado para saber, de forma remota, em que posição a linha lateral do pivô central se encontra e em qual posição se deseja pará-lo.

Também deve-se considerar que, por meio de uma análise apurada de um número grande de dados (*Big Data*), é possível prever cenários em relação à produção agrícola. Tendo por base casos já observados, diferentes variáveis são utilizadas para prever falhas ou propor alternativas para obter os melhores resultados. O *Big Data* possibilita ainda a coleta e o armazenamento de várias informações dos cultivos agrícolas. Isto viabiliza a criação de um histórico da área que vai garantir a tomada de decisões mais precisas no futuro.

O *Big Data* se relaciona fortemente com o conceito de "Internet das Coisas", que é o uso de dispositivos e máquinas agrícolas interconectados. Assim, como exemplo, é possível integrar uma rede de sensores sem fio que coletam dados agrônômicos e de umidade do solo, em diferentes subáreas e profundidades, e avaliar a necessidade de irrigação das culturas

agrícolas. As informações coletadas são enviadas para uma nuvem computacional, onde são armazenadas e processadas, com o objetivo de otimizar o processo de irrigação e o uso da água na agricultura.

A gestão e o monitoramento remoto da colheita, por telemetria, estão entre as aplicações do *Big Data*. A telemetria refere-se à coleta, ao compartilhamento e à gestão dos dados acerca dos equipamentos e veículos que estão atuando na fazenda, tudo feito de forma remota por meio de ondas de rádio ou sinais de satélite. A conexão envolve um software executado em um computador ou um aplicativo instalado no tablet ou smartphone. Dessa maneira, o usuário visualiza mapa com informações de produtividade agrícola espacializada e tem condições de avaliar os locais que necessitam de melhoria. Por exemplo, pode ocorrer menor produtividade em locais que apresentam solo compactado. Nesses locais, a capacidade de infiltração pode ser reduzida até determinado valor suficiente para provocar escoamento superficial durante um evento de irrigação ou chuva, resultando na infiltração de uma lâmina de água insuficiente para reposição hídrica no solo. Assim, o uso desses mapas possibilita intervenções no campo com o objetivo de evitar problemas no cultivo seguinte.

As informações também podem ser associadas com dados coletados via sensoriamento remoto. Com o monitoramento remoto, o produtor consegue tomar decisões antecipadas, ou seja, identificar o problema a tempo de evitar prejuízo na área cultivada. No exemplo anterior, possivelmente, o vigor vegetativo já estaria comprometido e, por meio de índices de vegetação, o problema já poderia ter sido identificado previamente. Por meio de índices de vegetação, também é possível avaliar a qualidade da irrigação no que se refere à uniformidade de distribuição de água na área cultivada. Assim, após a constatação de variabilidade do índice de vegetação, o irrigante poderá identificar problemas no sistema de irrigação. Isso pode gerar economia de mão de obra e redução nos custos associados a avaliação de sistemas de irrigação.

O sensoriamento remoto também é utilizado para auxiliar na irrigação digital. Com essa técnica pode-se monitorar o status hídrico da área cultivada e decidir o momento de irrigar e a lâmina a ser aplicada em cada subárea. Com estas informações realizam-se irrigações somente em locais específicos e na quantidade correta, e isso pode representar um impacto significativo na economia de água e energia.

13.9 Aplicação de água em taxa variável

O pivô central e o sistema linear são equipamentos versáteis, de fácil operação, que demandam pouca mão de obra para operação e manutenção, além de apresentarem satisfatórias eficiências de aplicação e de distribuição da água de irrigação. Esses equipamentos são tradicionalmente dimensionados para aplicar a mesma lâmina de água na área irrigada. Assim, não é possível manejar a irrigação com aplicação de lâminas diferentes ao longo do comprimento da linha lateral desses sistemas mecanizados de irrigação. Já no sentido perimetral (pivô central) ou longitudinal (sistema linear), transversal ao percurso da linha lateral, a lâmina de irrigação pode ser variada por meio do controle da velocidade de deslocamento do equipamento. Assim, é possível realizar alguns controles básicos nesses sistemas mecanizados como, por exemplo, aplicar lâminas diferentes em duas metades da área irrigada por um sistema pivô central com distintos cultivos agrícolas.

Diante da necessidade de fornecimento preciso de água de irrigação para os cultivos, foram desenvolvidos pivôs centrais e sistemas lineares com a tecnologia de aplicação de água à taxa variada, conhecida como VRI (*variable rate irrigation*). Por meio de uma combinação de hardware e software, esses sistemas mecanizados de irrigação equipados com VRI individualizam a aplicação de água de irrigação com base em informações espacializadas de chuva, solo, cultura e relevo, entre outras definidas pelo irrigante. A tecnologia VRI permite

aplicar a quantidade adequada de água no lugar certo, suspendendo a irrigação em áreas desnecessárias, como em canais, estradas, valas, construções e áreas alagadas.

Além dos benefícios supracitados, os sistemas mecanizados de irrigação equipados com VRI apresentam outras vantagens, podendo-se destacar as seguintes: (i) aumentam a qualidade e produtividade agrícola com menor impacto ambiental, (ii) aplicam irrigação de precisão, reduzindo o consumo de água e energia elétrica, (iii) aumentam a eficiência da aplicação de água e produtos químicos, reduzindo o excesso de irrigação, escoamento superficial, lixiviação de nutrientes e contaminação de cursos de água, e (iv) necessitam de menos manutenções em trilhas e estradas.

No mercado de equipamentos de sistemas de irrigação por pivô central são comercializados dois tipos de VRI. Um é baseado no controle do percentímetro, ou seja, controlando a velocidade de deslocamento do pivô ao longo da sua trajetória radial. Dessa forma, é possível aplicar uma maior ou menor lâmina de irrigação por meio da redução ou aumento da velocidade destes equipamentos, respectivamente. Este VRI é normalmente chamado de VRI controle de velocidade ou VRI setorial. O outro tipo é baseado na variação da vazão dos emissores que equipam o sistema de irrigação. Na literatura são relatadas duas formas principais de irrigar em taxa variada: por meio de emissores pré-configurados para aplicação de determinadas vazões e por pulsos de funcionamento dos emissores, os quais alternam entre um período de tempo em funcionamento ou desligado. Assim, a variação da lâmina bruta de irrigação permite valores contínuos. Independente da forma que a vazão do emissor é variada, o equipamento é chamado de VRI zona.

Como esperado, o VRI zona apresenta maior flexibilidade de variação da lâmina de água na área irrigada, podendo-se dividir a área em um grande número de zonas de irrigação independentes. No caso do VRI zona com controle individual de cada emissor, o detalhamento é ainda maior que o alcançado quando se controla grupos de emissores. Por outro lado, o VRI controle de velocidade permite apenas a variação das lâminas em áreas em formato de fatia de pizza, no caso do pivô central. O padrão de distribuição de irrigação dos dois tipos de VRI são ilustrados na Figura 9.



Figura 9. Áreas irrigadas por equipamentos pivô central dotados de tecnologia de aplicação de água em taxa variada (VRI) (VALLEY IRRIGATION, 2017).

13.10 Considerações finais

As tecnologias digitais, associadas à conectividade no campo, estão modernizando o setor agrário brasileiro e a tendência é que estejam cada vez mais presentes para aperfeiçoar os processos agrícolas, notadamente o manejo da água de irrigação.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Educação e Pesquisa da Planet Inc. Por fornecer as imagens PlanetScope (PLANET TEAM, 2017).

Referências

- FLORENZANO, T.G. Iniciação em Sensoriamento Remoto. 3. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 128p., 2011.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Aquastat**: water uses. 2016. Disponível em: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use. Acesso em: 25 nov. 2020.
- JENSEN, J.R.; EPIPHANIO, J.C.N. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, SP. **Parêntese**, 2011.
- JHA, K.; DOSHI, A.; PATEL, P.; SHAH, M. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. **Artificial Intelligence in Agriculture**, n.2, p.1-12, 2019.
- KAMIENSKI, C.; SOININEN, J.; TAUMBERGER, M.; DANTAS, R.; TOSCANO, A.; CINOTTI, T.; MAIA, R.F.; NETO, A.T. Smart water management platform: IoT-Based Precision Irrigation for Agriculture. **Sensors**, v.19, n.276, 2019.
- KETCHUM, D.; JENCOSO, K.; PANETA, M.P.; MELTON, F.; JONES, F.O.; HUNTINGTON, J. IrrMapper: a machine learning approach for high resolution mapping of irrigated agriculture across the Western U.S. **Remote Sensing**, v.12, p.1-23, 2020.
- MARKET AND MARKET. Irrigation Automation Market by System (Automatic, Semi-automatic), Irrigation Type (Sprinkler, Drip, Surface), Automation Type, Component, End-Use (Agricultural, Non-agricultural), and Region - Global Forecast to 2025. 2020. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/>. Acesso em: 28 nov. 2020.
- MESQUITA, M.E.R.V.; DIMURO, G.P.; SANTIAGO, R.H.N.; LAUREANO, E.E. Quarto Congresso Brasileiro de Sistemas Fuzzy. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, 160p., 2016.
- OLIVEIRA, J. **Redes Neurais Artificiais**. 2011. Disponível em: www.dsc.ufcg.edu.br/~pet/jornal/setembro2011/materias/informatica. Acesso em: 20 nov. 2020.
- PLANET TEAM. **Planet Application Program Interface**: In Space for Life on Earth. San Francisco, CA. 2017. Disponível em: api.planet.com. Acesso em: 01 dez. 2020.
- SANTOS, R.A.; MANTOVANI, E.C.; FILGUEIRAS, R.; FERNANDES-FILHO, E.I.; SILVA, A.C.B.; VENANCIO, L.P. Actual Evapotranspiration and Biomass of Maize from a Red-Green-Near-Infrared (RG NIR) Sensor on Board an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). **Water**, v.12, n.9, p.2359, 2020.
- VALLEY IRRIGATION -VRI-iS. Pivot Prescription Software. **User Guide**, 2017. Disponível em: www.valleyirrigation.com. Acesso em: 26 nov. 2020.

CAPÍTULO 14

14 OS TRANSIENTES HIDRÁULICOS E A AGRICULTURA IRRIGADA

Rodrigo Ribeiro Franco Vieira

Resumo

Por infeliz tradição, dentre outros motivos, a Agricultura Irrigada nunca se preocupou com a correta análise dos transientes, fenômeno que deve ser a base de todo e qualquer projeto hidráulico, e não o regime permanente, como se imaginava e se faz equivocadamente até hoje. Contudo, graças ao desenvolvimento de softwares específicos, este problema agora poderá e deverá pertencer ao passado, cabendo à Academia a sua correta adoção, doravante independente do tempo necessário e dos custos envolvidos pois afinal, corroborando com o saudoso Engenheiro Mecânico Francisco Pachorelli Veiga (1962-2020), “quem considera que o conhecimento é custo, desconhece o preço da ignorância”. O conhecimento dos transientes hidráulicos, portanto, guindará a agricultura irrigada para outro patamar.

14.1 Introdução

Nas atividades mais simples e corriqueiras do dia a dia sem percebermos estamos sujeitos à dinâmica dos fluidos, a começar pelos nossos sistemas circulatório e respiratório. Isto não se limita às questões biológica, mas também nas atividades cotidianas, desde o despertar até o adormecer, nas quais geramos transientes hidráulicos várias vezes ao longo dia.

Ao nos levantarmos ainda sonolentos, pela manhã, durante a prática das abluções, quando prepararmos o café da manhã, almoço, jantar, ao abrirmos e fecharmos torneiras, chuveiros, e similares, estamos involuntariamente gerando transientes hidráulicos, que ocorrem quando o fluxo é alterado de alguma forma. Contudo, são sistemas tão diminutos e sua magnitude tão irrisória que sequer percebemos algum efeito prático.

A Agricultura Irrigada e a Engenharia de Irrigação são, por definição mais vinculadas à “Área 02” ou às Ciências Biológicas - ou no máximo, à Engenharia Agrícola -, e os cálculos de sistemas de irrigação e adutoras se ativeram sempre ao denominado Regime Permanente, no qual se simula e prevê as vazões e pressões em funcionamento, de modo uniforme, sem maiores interferências no fluxo. No entanto, a não observância, desconhecimento e desprezo ao Regime Transitório podem trazer resultados indesejáveis, tanto na forma de prejuízos materiais, ambientais como até injúrias físicas, fatais inclusive.

Sendo este um tema complexo da hidráulica, cujo estudo, compreensão e soluções requerem um nível elevado de conhecimentos básicos, este capítulo não tem a pretensão esgotar o tema ou o fenômeno que requer cálculos complexos, mas apenas apresentar algumas das principais definições e casos reais da importância de sua consideração, da sua previsão e da adoção das soluções em todos os sistemas hidráulicos projetados. Assim, pretende-se chamar atenção da importância (e ilustrar com exemplos) para a necessidade da consideração e também do aprendizado da análise de transientes, principalmente na agricultura irrigada, onde a sua incidência é de maior magnitude que em outros sistemas hidráulicos. A importância do mesmo não pode deixar que a complexidade cause limitação ao seu uso por parte dos profissionais de Ciências Agrárias os quais, doravante, deverão passar a prever esta variável em seus projetos ou na operação e solução de problemas ocorrentes nos sistemas hidráulicos sob sua responsabilidade.

14.2 Definição

Regime transitório (ou transiente hidráulico) ocorre quando há qualquer alteração no regime permanente, como por exemplo o fechamento e abertura parcial de registros e válvulas, mudança de diâmetros de redes e adutoras, passagem de fluxo por orifícios dissipadores, partidas e desligamento de bombas, mudanças de nível de reservatórios, ou seja, de tudo aquilo que possa causar alteração no escoamento da tubulação, transformando-o de regime permanente para regime transitório, até atingir outro regime permanente.

Segundo Santos e Castro (2002) "durante o transitório hidráulico as oscilações de pressão ao longo da canalização ocorrem de maneira brusca, provocando ruídos que se assemelham a pancadas. Por isto, o transitório hidráulico também é comumente conhecido como Golpe de Aríete". Assim, qualquer alteração do fluxo gera um transiente hidráulico.

São ondas de pressão que se movem rapidamente ao longo de uma tubulação, causando elevações ou quedas de pressão, podendo ser de grande ou pequena magnitude. Em relação as de pequena magnitude, na maioria dos casos as variações de pressão podem ser desconsideradas, porém vale ressaltar que em determinadas situações sua influência é muito significativa, podendo gerar consequências desastrosas, inclusive pondo em risco vidas humanas" (SANTOS; CASTRO, 2002).

Quando tais variações de pressão possuem grande magnitude (sobre pressões), ocorrem problemas diversos que podem ter caráter imediato ou não, ocorrendo o rompimento após anos de sucessivos golpes que fragilizam as paredes da tubulação. No que tange às subpressões, os valores de tensão (ou "pressão negativa") são inferiores à pressão atmosférica (10,33 m ao nível do mar), pode ocorrer o colapso ou achatamento das canalizações, mesmo as de materiais supostamente resistentes.

Assim, o que caracteriza os transientes hidráulicos é a formação de ondas de sobre e subpressões, distintas daquelas representadas no regime permanente pela conhecida "linha piezométrica". Supondo distintos materiais de tubulações, porém considerando os mesmos diâmetros, vazões e espessuras de parede, tais ondas possuem velocidades relativas a aquelas propagadas pelo som na água (1.498 m s^{-1}), denominadas de celeridade. Em tubulações de ferro fundido e aço (metálicas), esta atinge valores da ordem de 1.100 a 1.450 m s^{-1} ; nas tubulações de PVC, a velocidade é da ordem de 400 a 500 m s^{-1} ; em tubos de PEAD e polipropileno, 170 m s^{-1} ; PEBD, 81 m s^{-1} . Pode-se afirmar, portanto, que quanto maior o módulo de elasticidade do material, menor a celeridade o que, de forma indireta, pode ser um critério para análise e solução dos transitórios incidentes.

Deve-se ater que tal velocidade é distinta daquela do fluido na tubulação, calculada pela equação da continuidade.

A Equação (1) expressa o cálculo de celeridade ou "velocidade com que a onda de pressão se desloca em uma tubulação" (SOARES, 2012):

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k \frac{D}{e}}} \quad (1)$$

em que c se refere à celeridade (m s^{-1}), D ao diâmetro da tubulação (m), e à espessura de parede da tubulação (m) e k ao coeficiente de elasticidade do material.

A Tabela 1 a seguir apresenta valores de "k" para diversos materiais em redes adutoras.

Tabela 1. Valores dos coeficientes de elasticidade para diferentes materiais

Material	Valor de "k"	Material	Valor de "k"
Aço	0,5	PEAD	111
Cobre	0,8	PEDB	500
Concreto armado	5	Polipropileno	125
FF	1	PVC	18

Na hidráulica básica, além das variáveis perda de carga, vazão, pressão (piezométrica), celeridade, incluem-se outros itens os quais são largamente utilizados, principalmente na área da agricultura irrigada como se fora o estudo de transientes, pois são princípios aplicados através do método de Allievi, que se restringem ao fechamento abrupto de válvulas e registros e que não podem ser considerados como tal, mesmo que possa haver alguma interação. Há autores que o chamam de "Método Simplificado de Análise".

Segundo Francisco Paschoarelli Veiga:

Métodos Simplificados de Análise consistem em determinar a fase ou período da tubulação, que é o tempo de deflexão das ondas de choque, e a partir disso definem-se as manobras rápidas ou lentas com os dispositivos na tubulação. Manobras rápidas são aquelas que ocorrem em tempo menor que a fase da tubulação e manobras lentas as que ocorrem em tempo maior. Tendo feito isto, utiliza-se a equação de Allievi e de Michaud para as manobras rápidas e lentas, respectivamente, que são utilizadas para o cálculo da máxima sobrepressão. A análise e a medição dos transientes são essenciais para o projeto e operação dos sistemas, a complexidade dela reside na necessidade de, em cada instante do regime transitório, ter em consideração a interação das ondas elásticas de pressão com todos os componentes ou elementos da instalação (VEIGA, *apud* LEGNER, 2017, p.5).

- Período da canalização (t) – Tempo que uma onda leva para ir de uma extremidade à outra de determinada canalização;
- Tipos de manobras – Manobras lenta e rápida, quando são menores ou maiores que o período, respectivamente; e,
- Cálculo da sobrepressão – Pressão adicional a mais ou a menos somada à pressão estática, em função do tipo de manobra.

As Equações (2), (3) e (4) representam tais elementos, restritos ao fechamento (manobra) de redes, jamais para estudo de transientes.

$$\text{Período (s)} - \zeta = \frac{2L}{c} \quad (2)$$

em que L se refere ao comprimento da tubulação (m), c à celeridade (m s^{-1}).

Sobrepressão (mca) - Manobra Rápida – ($t < \zeta$):

$$ha = \frac{cV}{g} \quad (3)$$

em que c se refere à celeridade (m s^{-1}), V à velocidade média do escoamento (m s^{-1}), e g à aceleração da gravidade (m s^{-2}).

Sobrepressão (mca) - Manobra Lenta – ($t > \zeta$):

$$ha = \frac{2LV}{gt} \quad (4)$$

em que c se refere à celeridade (m s^{-1}), V à velocidade média do escoamento (m s^{-1}), e g à aceleração da gravidade (m s^{-2}).

A análise, quantificação e solução dos efeitos transitórios, contudo, vai muito além da simples determinação da celeridade, período, manobras e sobre-pressões.

Projetos de adutoras, seja para a Agricultura Irrigada ou sistemas de abastecimento devem ser previstos para suportar as condições normais de escoamento e, principalmente, prever os efeitos transitórios e buscar as soluções para arrefecer as pressões excessivas e reduzidas daí advindas, o que exige a correta análise deste fenômeno.

Alguns dos métodos existentes para a análise dos transientes são: (i) método Aritmético: o mais simples dos métodos de análise, que não considera, por exemplo as perdas de carga. Trabalha com aproximações; (ii) método gráfico: sua utilização exige algumas simplificações, e pode ter sua precisão afetada; (iii) método das características: bastante utilizado e matematicamente mais adequado e preciso, e exige softwares sofisticados para o seu emprego. É o método mais recomendado pelos grandes nomes da matéria; e (iv) método algébrico: analisa as ondas de pressão nos sentidos positivo e negativo da tubulação. Pode resolver problemas simples com meras calculadoras manuais.

Há ainda os métodos da Análise Linear, Implícito e os já citados métodos simplificados.

Segundo Santos e Castro (2002, p.2):

A análise do Golpe de Aríete nos sistemas hidráulicos é baseada na equação da continuidade e na equação da quantidade de movimento. Essas duas equações formam um sistema de equações diferenciais cuja solução exata não está disponível, sendo necessário utilizar técnicas específicas para se determinar uma solução aproximada do problema. Desse modo, foram criados diferentes métodos gráficos e analíticos, baseados em diferentes suposições restritivas. Esses métodos, até pouco tempo os únicos disponíveis, são pouco precisos e difíceis de serem aplicados a sistemas complexos. Apesar dos fenômenos transitórios serem conhecidos desde o início do século, foi somente recentemente, com o surgimento e aperfeiçoamento dos computadores digitais, que estes fenômenos puderam ser estudados mais detalhadamente, sem a necessidade de simplificações grosseiras, sendo estes, hoje em dia, ferramentas indispensáveis no dimensionamento de sistemas hidráulicos. estudo do Golpe de Aríete requer o conhecimento das condições iniciais do regime permanente e das condições de contorno da instalação, que são os pontos onde ocorrem descontinuidades das grandezas físicas, como pressão e velocidade de escoamento. Como é um fenômeno complexo, geralmente é muito pouco discutido nos cursos de graduação, principalmente devido à falta de divulgação e ensino da metodologia numérica apropriada.

As Equações de Quantidade de Movimento (5) e Conservação de Massa (6) representam as bases do cálculo dos transientes, através do método das características, o mais adequado e adotado em todo o planeta até o momento.

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q}{A^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{f Q |Q|}{2 g D A^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{a^2}{g A} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

em que H se refere à carga piezométrica (mca); Δx à distância entre duas seções da tubulação (m), Q à Vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); Δt ao intervalo de tempo (s); g à aceleração da Gravidade (m s^{-2}), A à área da tubulação (m^2); f ao coeficiente de atrito (Colebrook) e a à Celeridade (m s^{-1}).

De uma forma bastante simplificada, haja vista que este capítulo visa apenas alertar para a importância e necessidade de se verificar o fenômeno inclusive na agricultura irrigada, pode-se dizer que

o transiente é calculado em um plano $x-t$, onde x (abscissa) é o comprimento da tubulação e t o tempo. O método das características realiza a integração dessas duas equações diferenciais parciais não lineares ao longo de todo eixo x para cada passo de tempo (Δt). São conhecidos os valores das variáveis no instante inicial ($t=0$, regime permanente) em todas as seções da tubulação. Em $t=1$ são conhecidos Q e H nas seções de extremidade da tubulação e o método calcula essas variáveis para as seções interiores para esse tempo $t=1$. (informação pessoal¹).

Muitas vezes a análise dos transientes para o engenheiro é mais importante do que as condições relativas ao regime permanente, pois não raro há manobras bruscas de registros, falta de energia no sistema de bombeamento, alterando a taxa de variação da vazão rapidamente. Tais distúrbios podem criar ondas de pressão que se deslocam com grande magnitude (celeridade). As tubulações devem ser dimensionadas para resistir a estas cargas adicionais (sobre e subpressões) baseados nas suas classes de pressão ("*pressure ratings*"), que definem a resistência mecânica destes, influenciando deveras nos custos dos investimentos.

Percebe-se, portanto, a complexidade do tema, ficando o seu pleno conhecimento e sua resolução restrita a poucos profissionais, após cursos específicos e de grande carga horária, não obstante os programas existentes facilitarem o seu entendimento e a solução de problemas em casos menos complexos. Para grandes sistemas, ou naqueles que não podem sofrer descontinuidade, é necessária a contratação de profissional qualificado.

14.3 Ondas de pressão

A Figura 1 se refere a uma representação gráfica de uma onda de pressão clássica.

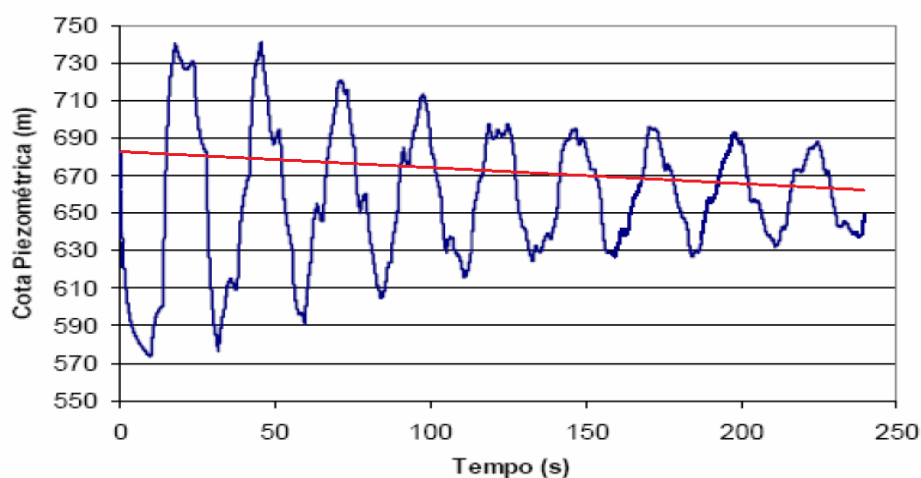


Figura 1. Representação Gráfica de Onda de Pressão (HIDRO-AMBIENTAL, s.d.)

¹ Eng. Marcelo Cardim de Carvalho. Mensagem por whatsapp.

A Figura 1 representa uma onda de pressão com seus picos superiores e inferiores, que nos estudos de transientes formam as envoltórias de máxima e mínima, respectivamente. Estas são relativas à linha piezométrica, representada em vermelho (ilustrativamente), e pertinente ao regime permanente.

Assim, a linha em vermelho representa as pressões na rede quando em operação, ao passo a linha em azul representa as envoltórias geradas pelo golpe de aríete ou transientes hidráulicos, advindos de manobras inadequadas ou falta de energia na elevatória em um único e determinado ponto da rede ao longo do tempo.

A Figura 2 exemplifica os danos causados por transientes hidráulicos em redes e equipamentos.

O mais recente evento provavelmente advindo de efeito transitório, ainda em fase de investigação (outubro/2020), foi o da adutora da hidroelétrica da Barragem do Jati, Ceará, pertencente ao complexo do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF), que trata da transposição de bacias com água advinda daquele manancial. Neste, uma manobra inadequada de um registro poderia ter gerado uma sobrepressão a qual levou ao seu rompimento, por sorte sem maiores consequências físicas, mas acarretando prejuízos financeiros de grande monta, como mostram as imagens da Figura 3.

Além de danos materiais, a desintegração de equipamentos e rompimento de vias pode causar fatalidades, pelas quais os engenheiros responsáveis podem, além de civilmente, criminalmente acusados, na forma da Lei, haja vista que os Conselhos Profissionais, associações e sindicatos de modo geral são muito eficientes nas cobranças, mas pífios para auxiliar e socorrer os profissionais em suas aflições.

Caso o relatório oficial conclua que foi devido a efeitos transitórios, as opções para a sua correção estão facilmente disponíveis, e dependerão de estudos específicos.

Todas as ondas relativas aos transientes ocorrem gerando sobre e subpressões, porém o seu comportamento inicial irá depender da topografia e do acionamento da rede.

O caso mais comum, inclusive na Agricultura Irrigada é quando de um manancial qualquer a água é pressurizada, ou recalçada, para cotas mais altas e/ou à distância, exigindo a aplicação de bombas hidráulicas. Quando do fechamento brusco do registro ou falta de energia, desligando a bomba de súbito, o comportamento da onda é expresso na Figura 4, com as devidas explicações por etapas, para facilitar a sua compreensão.



Figura 2. Distintos problemas em tubulações adutoras em função de problemas relacionados aos transientes hidráulicos.



Figura 3. Detalhes do rompimento da adutora da hidroelétrica da Barragem do Jati, Ceará, Projeto de Integração do Rio São Francisco

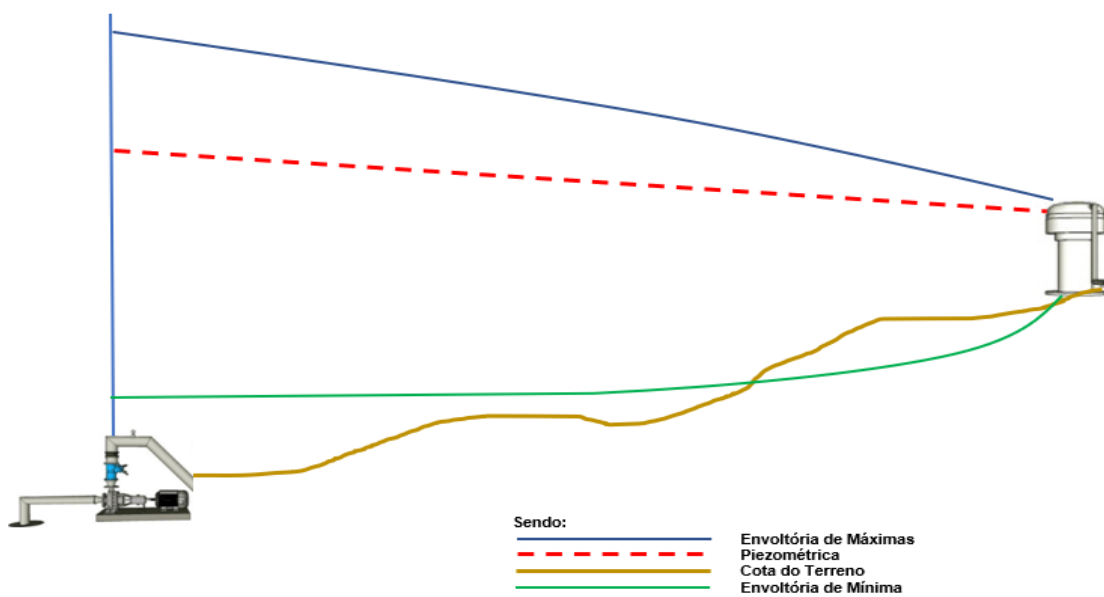


Figura 4. Representação gráfica clássica de onda de pressão: (i) elevatória (EB) em operação normal, com a pressão nos pontos representada pela linha piezométrica (vermelha tracejada); (ii) após parada súbita da EB, o líquido continua a fluir por determinado tempo, causando em primeiro lugar uma onda de sub-pressão (ou depressão, abaixo do valor da piezométrica naquele ponto); e (iii) após a onda de sub-pressão, ocorre outra de sobrepressão, e assim sucessivamente até a parada total do sistema.

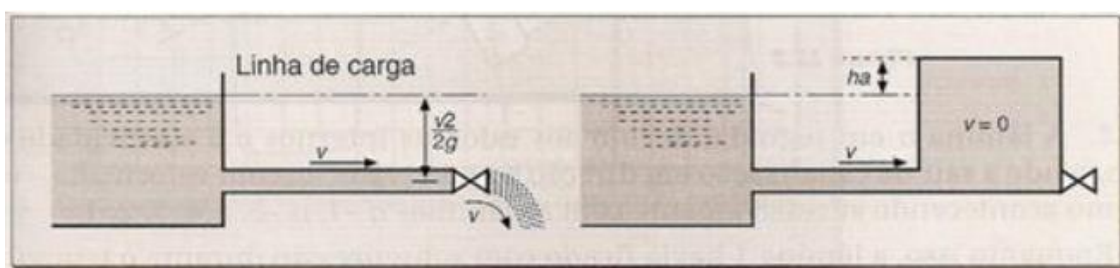


Figura 5. Representação Gráfica de Sobrepressão devido ao fechamento brusco a jusante (SOARES, 2012).

Importante ainda citar um caso bastante comum, que é quando a onda é gerada pelo fechamento brusco de uma válvula a jusante e, portanto, há inicialmente a geração de uma onda de sobrepressão, ao contrário da situação anterior, expressa pela Figura 3. No supracitado caso da barragem do Jati-CE, uma das possibilidades poderá ser justamente esta,

de fechamento brusco gerando uma sobrepressão e o rompimento no ponto mais frágil, porém isto é mera ilação até o presente momento (novembro/2020), devendo ser aguardado o laudo pericial.

Ressalta-se mais uma vez que a velocidade da onda é de padrão sônico, ou seja, não se trata da velocidade do fluxo no regime permanente e, portanto, exige medidas especiais de proteção.

14.4 Entendendo as soluções

Ainda considerando a Figura 4, quando a sobrepressão é superior à classe de pressão da rede, ocorrerá a ruptura dos tubos, equipamentos e possível lançamento de dispositivos associados (ventosas, válvulas, barriletes), podendo resultando em danos financeiros e, o pior, danos físicos a transeuntes e operadores, inclusive com risco de vidas. Quando a onda de sub-pressão "corta" a linha do terreno, gerando valores negativos, na prática significa que há vácuo, que é o pior dos casos de resolução dos transientes, sendo este valor limitado a -10,33 mca ao nível do mar, mesmo que em softwares sejam dispostos valores ainda menores, o que é na prática uma impossibilidade, mas que, porém, indicam a magnitude do problema.

Há diversos tipos de proteção destinados aos transientes hidráulicos, as quais atuam na sobrepressão, sub-pressão ou em ambos os casos, sendo as principais: (i) chaminé de equilíbrio (*Stand pipe*); (ii) tanque de ação unidirecional (TAU) (*One Way Tank*); (iii) reservatório hidropneumático (RHO ou RHP); (iv) volante de inércia; (v) válvula antecipadora de ondas; e (vi) ventosas de duplo, tríplice efeito ou válvulas quebra vácuo.

Há casos nos quais as soluções podem ser isoladas, ou conjugadas, a depender das características das envoltórias.

As Figuras 6 a 17 ilustram a sua atuação e em todas elas há o comparativo dos efeitos transitórios com e sem os supracitados dispositivos.

14.4.1 Chaminé de equilíbrio (Stand Pipe)

Este dispositivo atua em ambos os sentidos (sobre e sub-pressões). Trata-se de uma chaminé, aberta em ambos os lados (em cima e em baixo), de modo que quando atua a sobrepressão, esta alivia para a atmosfera evitando o rompimento do tubo e, no caso contrário, injeta a água armazenada durante a operação e não permite o fenômeno do "descolamento de coluna", que leva ao colapso (achatamento) das tubulações. A tradução de sua denominação em inglês é literalmente "tubo em pé", definição bem simples.

Trata-se, de modo geral, da mais cara das soluções, pois exige obras civis de grande monta.

Observa-se na imagem que as envoltórias de máxima (vermelha) e de mínima (magenta) são transportadas para a chaminé, evitando tanto o rompimento quanto o colapso da rede.

A Tabela 2 demonstra as vantagens e desvantagens da chaminé de equilíbrio.

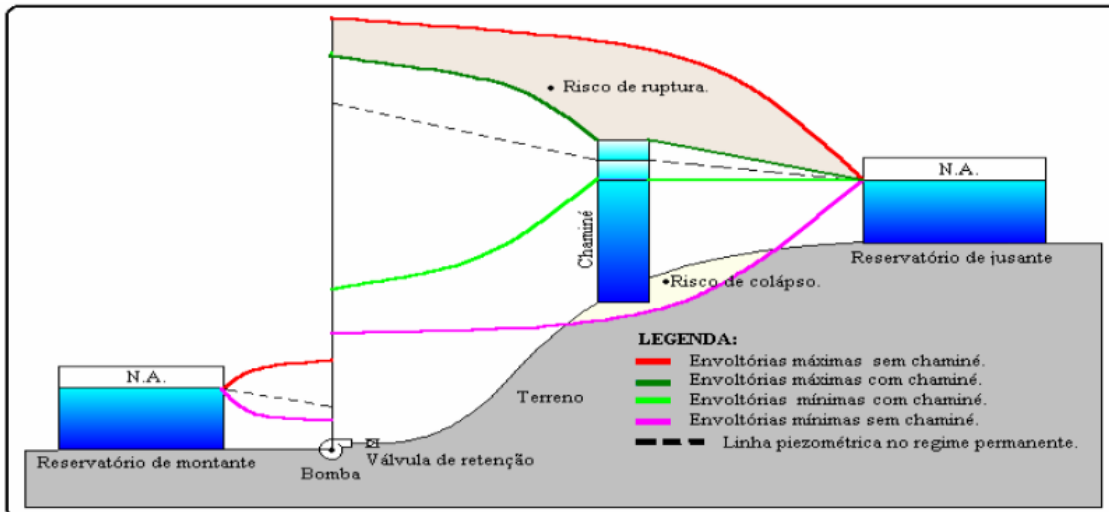


Figura 6. Representação Gráfica da Atuação da Chaminé de Equilíbrio (JUNIOR, 2018).

Tabela 2. Vantagens e Desvantagens - Chaminé de Equilíbrio (*Stand Pipe*).

Vantagens	Desvantagens
Atua nas envoltórias de máxima e mínima	Custo inicial elevado
Não há consumo de energia elétrica	
Baixo custo de manutenção	

14.4.2 Tanque de ação unidirecional (TAU) (*One Way Tank*)

Como o nome diz, este dispositivo atua apenas em um sentido, na sub-pressão, e se trata de um reservatório, aberto na parte superior, alimentado por uma tubulação e com saída na parte de baixo, na qual há uma válvula de retenção que não permite o seu transbordamento quando da operação da rede, mas que, porém, se abre quando há necessidade de injeção de água para evitar o seu colapso, após paralisação inadequada.

Trata-se de um dispositivo bastante seguro e largamente empregado, porém também a sua aplicação exige uma análise de custos. Segundo o Engenheiro Civil Marcelo Cardim, "caso o sistema necessite de mais de 03 TAUs, deve-se buscar outra solução mais barata".

No TAU, pode-se observar que a envoltória de mínima sem a proteção (magenta), de valor negativo (corta o terreno) é deslocada para um valor > 0 (zero), representado pela linha azul clara. No caso da ilustração, foi eliminado qualquer risco de colapso da rede.

A Tabela 3 demonstra as vantagens e desvantagens do TAU (*One Way Tank*).

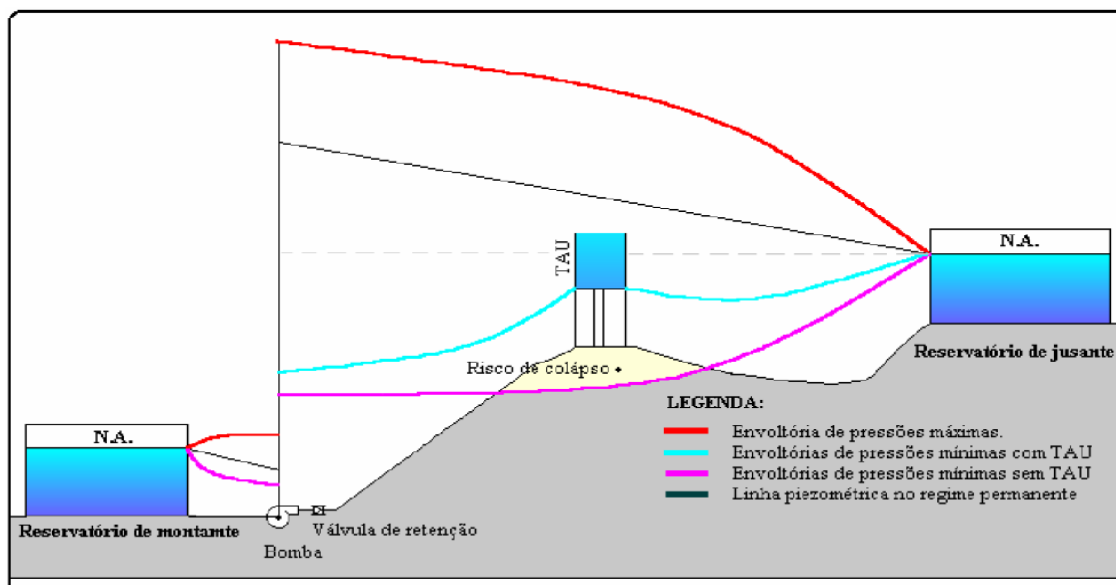


Figura 7. Representação gráfica da atuação do tanque de ação unidirecional (TAU) (JUNIOR, 2018).

Tabela 3. Vantagens e desvantagens do tanque de ação unidirecional (TAU) (*One Way Tank*).

Vantagens	Desvantagens
Anula as subpressões, evitando o colapso (achatamento) da rede	Alto custo de implantação
Não exige consumo de energia elétrica	Não protege contra sobrepensões
	Protege trechos específicos da rede
	Exige manutenção constante

14.4.3 Reservatório hidropneumático (RHO ou RHP)

Dentre as diversas alternativas para arrefecimento de efeitos transitórios, o RHO é uma excelente opção, não apenas pelo fato de atuar em ambas as envoltórias (mínima e máxima) como pela simplicidade de instalação, operação e manutenção.

O RHO é um tanque de aço ou concreto que possui água e ar comprimido, o qual pode ser através de bexiga de poliuretano (melhor opção) ou com a ajuda de compressor de ar, opção última que requer fonte de energia externa para a sua operação. Em qualquer um dos modelos, o ar mantém o seu interior com pressão igual à da rede hidráulica em regime permanente, fornecido pela elevatória quando esta estiver acionada.

Quando ocorre o transiente, o dispositivo transforma a sua velocidade de rápida para lenta, reduzindo os riscos de colapso e/ou rompimentos. Na verdade, o RHO absorve as ondas, e em seu interior que ocorre as variações em grande velocidade, transferindo para este os efeitos que incidiriam na rede e sobre seus acessórios. Devem ser instalados sempre a montante da válvula de retenção.

A Figura 8 explicita os componentes básicos do RHO, marca HYDRAMER.

1. Reservatório
2. Bexiga de poliuretano
3. Válvula de enchimento de ar
4. Manômetro
5. Indicador de nível
6. Purga de ar
7. Ligação com a rede
(fornecimento opcional)

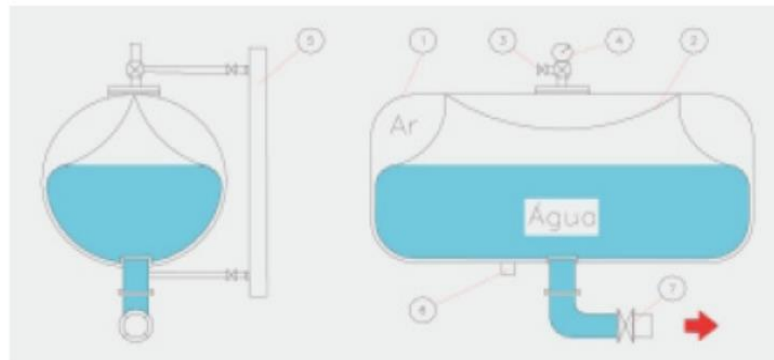
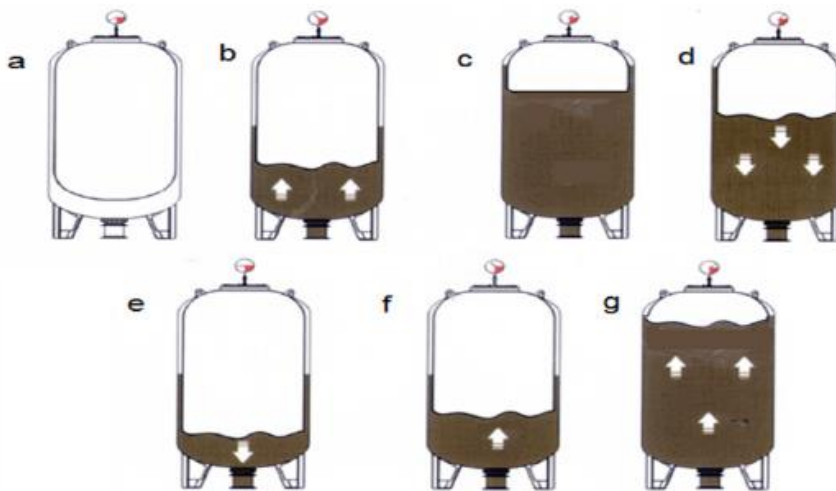


Figura 8. Componentes gerais do RHO (HIDROSTEC, s.d.).

A Figura 9 detalha a operação do RHO.



- a) Bexiga com a pré-carga de gás estabelecida em projeto. Sistema em repouso. Bexiga em repouso e RHO vazio;
- b) Estando a rede desligada, porém já preenchida com água (carga estática incidente), abre-se a válvula de isolamento e a água ocupa parcialmente o RHO, sendo a pressão estática sempre maior do que a pré-carregada com gás na bexiga;
- c) Uma vez ligada a bomba, a pressão da rede comprimirá a bexiga mais ainda, injetando mais água no RHO, até atingir o equilíbrio dinâmico pressão da rede *versus* compressão da bexiga;
- d) Após falta de energia na elevatória ou desligamento involuntário do sistema, a queda de pressão (sub-pressão) imediatamente leva à expansão do ar da bexiga, evitando a formação de vapor d'água;
- e) Atinge-se a maior expansão da bexiga;
- f) O retorno da onda de pressão (sobrepessão) desta feita leva ao enchimento do RHO, comprimindo novamente o ar da bexiga;
- g) Compressão máxima da bexiga.

Figura 9. Detalhamento da atuação do RHO (SCHIMDT, 2016).

Após várias oscilações do gênero, atinge-se o estado de equilíbrio demonstrado em "d".

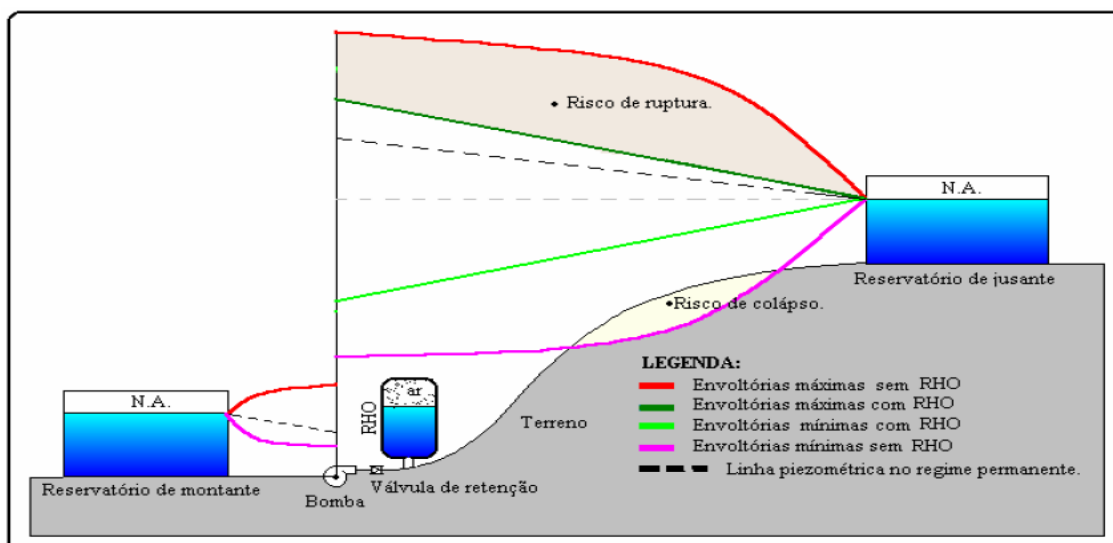


Figura 10. Representação Gráfica da Atuação do RHO (JUNIOR, 2018).

Tabela 4. Vantagens e desvantagens do reservatório hidropneumático (RHO).

Vantagens	Desvantagens
Controla as envoltórias de máxima e mínima	Custo relativamente elevado, a depender das dimensões
Não depende da topografia	Aqueles com compressor consomem energia
Os de bexiga de poliuretano não exigem compressores para a atuação	
Para de bexiga de poliuretano basta verificar o manômetro instalado para observar a necessidade de manutenção	Aqueles com compressor exigem manutenção do compressor e equipamentos elétricos
Os de bexiga de poliuretano não necessitam de energia para operação	

14.4.4 Volante de inércia

São dispositivos instalados entre as bombas com mancal e os motores, através de acoplamentos elásticos. São dimensionados para aumentar o momento de inércia (ou parada) do conjunto girante, reduzindo sobretudo a velocidade da onda de sub-pressão, quando da falta de energia ou desligamento acidental do sistema.

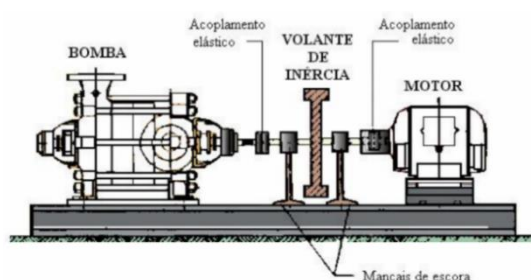


Figura 11. Volante de Inércia (GUAZZELLI, 2015).

De igual forma que retarda a parada (ou inércia) dos conjuntos, este dispositivo também retarda o seu acionamento até que se atinja a rotação devida. Muito adequado para limitar as sub-pressões nos pontos altos das adutoras, protegendo-as dos colapsos decorrentes do “descolamento de coluna”. Como o volante de inércia atua através de seu próprio peso, de modo que não atinja dimensões exageradas, deve-se analisar o tamanho máximo da elevatória para a sua aplicação.

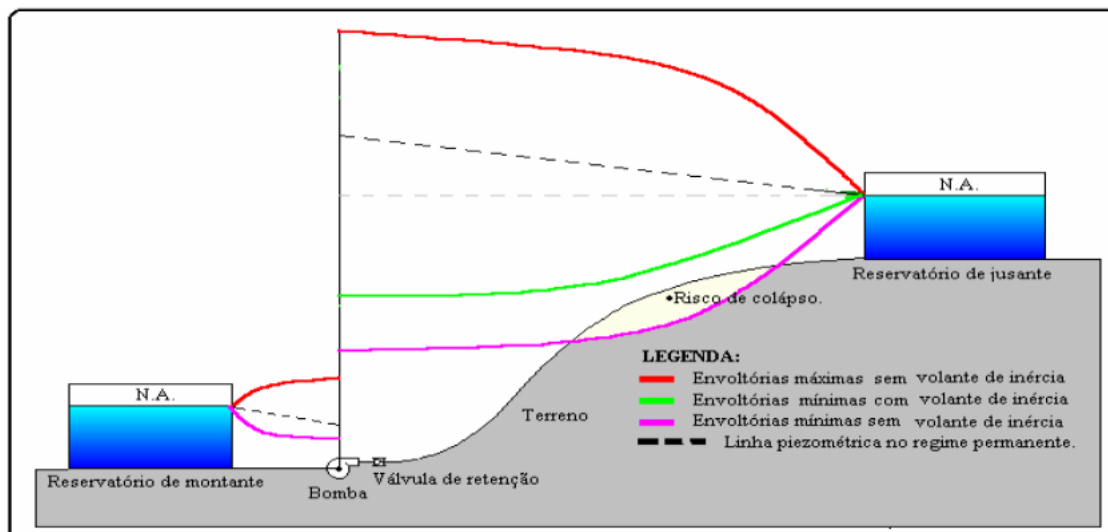


Figura 12. Representação gráfica da atuação do volante de inércia (JUNIOR, 2018).

Observa-se o pouco efeito do volante de inércia no que tange as sobre-pressões, tanto que sequer consta na Figura 12. Assim, caso estas ocorram em magnitude comprometedoras, é o caso típico de associar outro dispositivo, como uma válvula antecipadora de ondas, por exemplo.

É de bom alvitre que o volante de inércia seja calculado e fornecido pelo fabricante.

Tabela 5. Vantagens e desvantagens do volante de inércia.

Vantagens	Desvantagens
Controle apropriado das sub-pressões	Não controla de modo suficiente as sobre-pressões
Baixo custo	Consome mais energia elétrica do que um conjunto sem volante

14.4.5 Válvula antecipadora de ondas

Trata-se de dispositivo de baixo custo e de fácil instalação, é largamente utilizado em todo o Planeta, garantindo a integridade das redes e, em alguns casos, das pessoas.

As válvulas hidráulicamente operadas são equipamentos muito utilizados nas redes em geral e aplicáveis a quase todos os fluidos. O funcionamento dessas válvulas, mais especificamente as funções de abertura e fechamento, se dá por meio do desequilíbrio das forças atuantes.

A função Antecipadora de Ondas (RE ou SA) é obtida através da colocação de elementos chamados de pilotos, os quais transformam as válvulas em “entes inteligentes”. Existem pilotos de 02 ou 03 vias, porém para funções de proteção e que exigem atuação rápida, com Alívio (PS/R), Alívio Rápido (QR) e antecipadoras de ondas, é majoritária a

utilização de pilotos de 02 vias (02W), de resposta mais rápida, porém há também com circuitos de 03 vias, a depender do modelo destes.

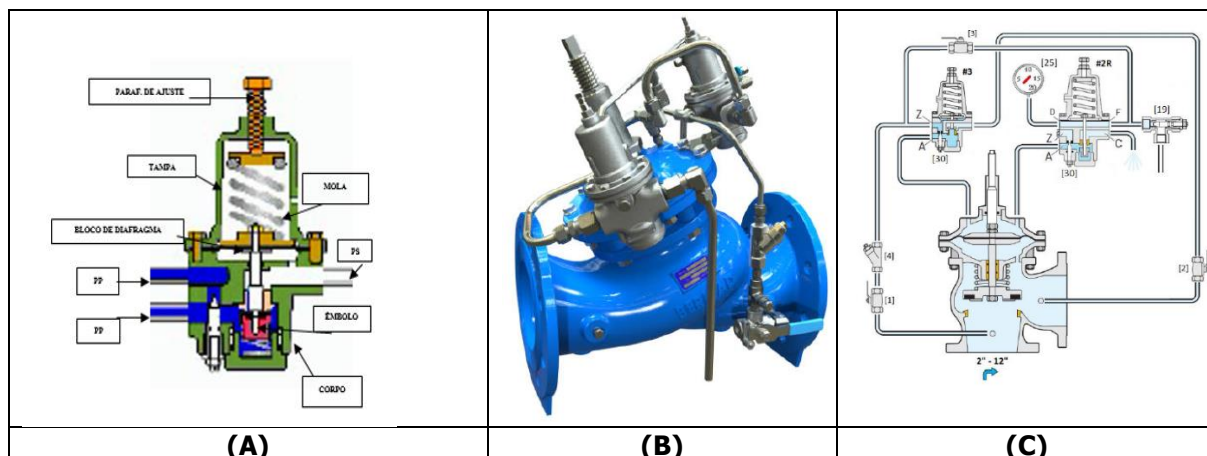


Figura 13. Pilotos de válvulas antecipador (A) Corte de um piloto de 2 vias; (B) Válvula antecipadora completa modelo IOM 735 - M; (C) esquema gráfico do circuito da válvula modelo IOM IR 735 - M (CATÁLOGO BERMAD).

Segundo Vieira (2019) o piloto de 2 vias mantém uma ligação direta entre os lados de montante e jusante da válvula, o que significa que, durante todo o tempo, parte da água fica circulando por seu circuito, o que obriga a utilização do cobre como material construtivo, de maior resistência aos efeitos de cavitação. Há autores que os denominam de piloto por controle flutuante (Dvir). Possuem uma reação imediata, sendo, por esse motivo, recomendados para as funções de proteção de sistemas contra os efeitos quase sempre danosos dos transientes (alívio, alívio rápido, antecipadora de ondas).

Esse tipo jamais esgota a câmara por completo, o que faz com que a válvula por ele operada – considerando-se o mesmo modelo, diâmetro e vazão – possua uma maior perda de carga do que aquela dotada de um piloto de 03 vias.

A montagem da Válvula RE (ou SA) é feita com 02 pilotos, sendo 01 redutor de pressão (“de baixa”) e outro sustentador de pressão (“de alta”), regulados para abrirem a válvula em “set points” distintos.

Este modelo deve ser aplicado quando há uma carga estática significativa sobre a EB, e é isto que a difere do modelo Alívio (PS/R) e Alívio Rápido (QR). Ele atua apenas no controle da envoltória de máximas, protegendo as redes de rompimento. Assim, aplica-se apenas nas sobre-pressões.

Remetendo-se à Imagem 15, a 1ª onda de pressão é descendente (envoltória de mínima), de valor reduzido, seguida pela ascendente (envoltória de máxima), e assim sucessivamente. A Válvula RE atua quando da queda de pressão (não confundir com tensão), abrindo em um ponto determinado, inferior à carga estática, e também em pressão superior à piezométrica, em outro ponto pré-determinado. Assim, ambos os pilotos atuam em conjunto, sendo um denominado de “Baixa Pressão”, e o outro “Alta Pressão”.

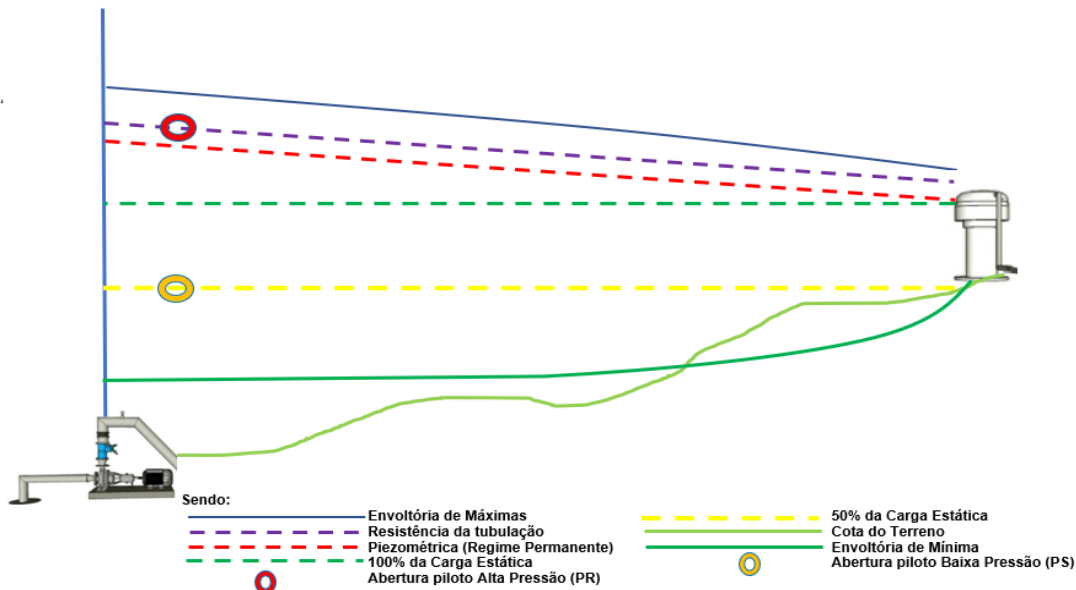


Figura 14. Atuação da Válvula Antecipadora de Ondas (VIEIRA, 2019).

Adotando-se as "Thumb Roles" (Engenheiro Mecânico Francisco Veiga - Informação pessoal) usualmente utilizadas, a válvula RE (ou SA) deve ser regulada para que o piloto de baixa pressão abra a válvula quando a pressão transitória atingir 50% da pressão estática, e o piloto de alta para atuar quando este valor for 10% acima da classe de pressão do tubo. Há ainda outra regra geral que é de se regular o piloto "de alta" (PS) 1 bar acima da AMT da bomba (Engenheiro Agrônomo Danilo Pinto – Informação pessoal, BERMAD).

Ressalta-se que a válvula deve ficar montada em "TÊ", logo após a válvula de retenção. "Uma dica importante é que a tomada de pressão dos pilotos não seja feita no corpo da válvula, mas sim em colar de tomada em separado porque, uma vez aberta, os efeitos da onda e sua magnitude são "mascarados" pela descarga livre" (Técnico em Mecânica Robson Amorim – Informação pessoal). Na Figura 15, observam-se os pilotos de baixa e de alta, representados por "#2" e "#3", respectivamente.

Como esta válvula atua somente para as sobre-pressões, os estudos de transientes podem apontar para soluções conjugadas, como ventosas, TAUS e até chaminés de equilíbrio.

A Figura 15 demonstra graficamente a representação gráfica dos pilotos da Válvula Antecipadora de Ondas, e a Figura 16 a da sua atuação propriamente dita.

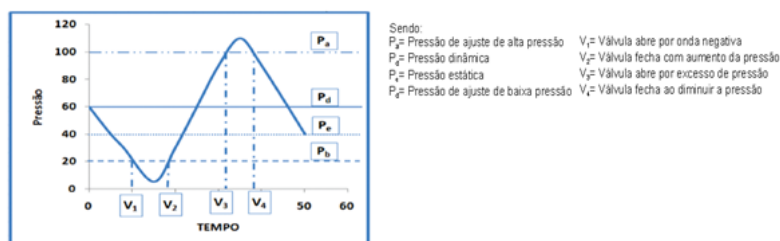


Figura 15. Representação gráfica dos pilotos da válvula antecipadora de ondas (VIEIRA, 2019).

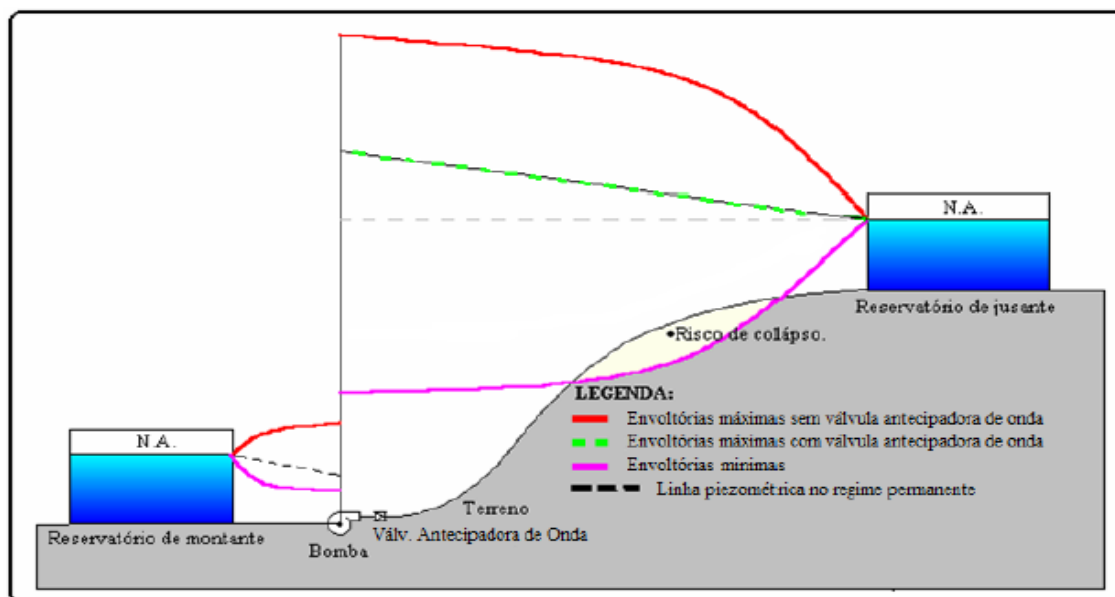


Figura 16. Representação gráfica da atuação da válvula antecipadora de ondas (RODRIGUES JUNIOR, 2018).

Tabela 6. Vantagens e desvantagens - válvula antecipadora de ondas.

Vantagens	Desvantagens
Controle das envoltórias de máxima.	Não controla sub-pressões.
Baixo custo de implantação e manutenção.	Pode ser necessário ser associada às ventosas.
Normalmente não utiliza energia extra (elétrica), apenas a do sistema.	Em alguns casos pode ser necessário associar a dispositivos para facilitar o fechamento após a sua atuação.

14.4.6 Ventosas de duplo e tríplice efeito e válvulas quebra vácuo

Dentre os fenômenos transitórios, aquele de mais perigoso e de difícil solução é justamente a sub-pressão, posto que, na pior das hipóteses, problemas de sobrepressão podem ser resolvidos apenas alterando-se a classe de pressão da rede.

Ventosas de duplo e tríplice efeito são dispositivos que expurgam e inserem o ar na tubulação quando do seu enchimento e esvaziamento, respectivamente. Já as denominadas de "quebra vácuo" apenas inserem enormes quantidades de ar quando do descolamento de coluna, e podem ser uma das alternativas.

As tubulações possuem uma resistência máxima á efeitos da sub-pressão, sendo considerados valores entre -1 e -2 mca para tubos plásticos, e de até -7 mca para ferro fundido, a depender do autor / profissional. Alguns deles, inclusive e visando a máxima segurança, não aceitam valores negativos, por menores que sejam. Há um equívoco comum, propagado no meio técnico na forma de "efeito manada", de que basta a colocação de ventosas para que sejam resolvidos todos os problemas das envoltórias de mínima. Este mito leva muitos profissionais à uma espécie de "Síndrome de Panúrgio", que pode resultar, a exemplo da lenda, em "afogamento" profissional e vários problemas desconfortáveis. Analogias e Mitologia à parte, as ventosas são itens que podem ou não resolver totalmente a questão, assim como também, em muitos casos, são itens complementares de outras soluções.

Quando da elaboração de simulação de transientes em softwares como o UFC, os efeitos transitórios são analisados apenas com aquelas ventosas localizadas para tal destinação, ressaltando-se que as demais, a serem colocadas nas redes nas situações clássicas, serão mantidas à parte da análise de transientes. Assim, no software constam apenas as ventosas para arrefecer a sub-pressão, porém as demais, destinadas ao regime permanente, são mantidas, mas não entram nos cálculos.

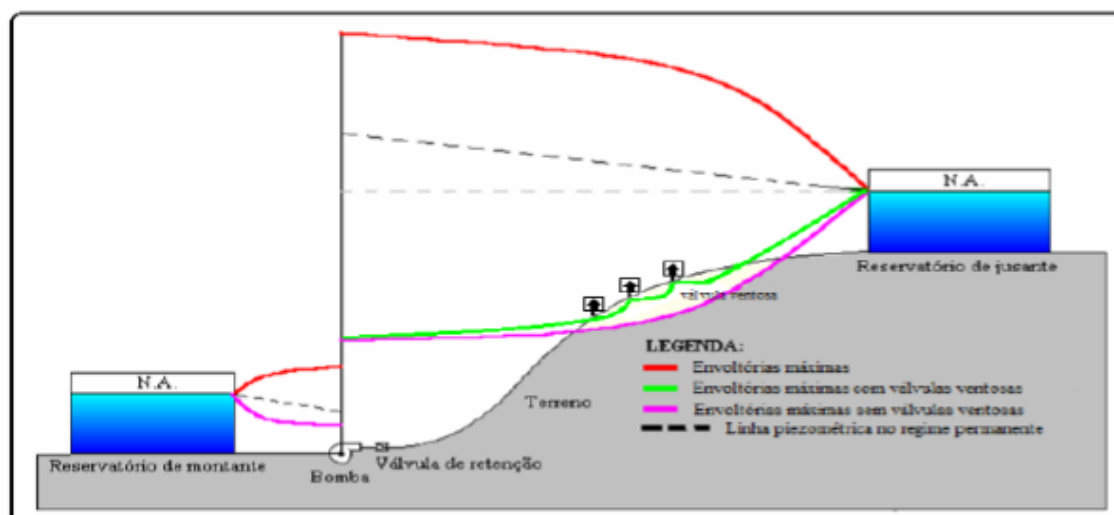


Figura 17. Representação gráfica da atuação das ventosas (JUNIOR, 2016).

Tabela 7. Vantagens e desvantagens das ventosas e quebra vácuo.

Vantagens	Desvantagens
Pode resolver problemas de sub-pressão	Não atua em sobre-pressões
Baixo custo de aquisição	Uma eventual falha pode afetar com gravidade o sistema
Baixo custo de operação e manutenção	
Fundamental para enchimento e esvaziamento de redes	Pode não ser solução única, mas associada a outras
Simplicidade de aplicação	

14.5 Estudos de casos - exemplos reais

Neste item serão apresentadas situações reais, nas quais, caso não fossem adotadas as soluções contra os transientes obtidas a através do software UFC, poderia haver graves consequências materiais e até físicas. Como o tema transientes hidráulicos ainda é praticamente desconhecido na área da Agricultura Irrigada, e não é comum e nem adotado em larga escala como deveria, de modo a respeitar e proteger os colegas projetistas alguns dos casos não serão identificados.

14.5.1 Exemplo 1 - Adutora Caiçaras - trecho Campos Novos - Olho D'água

Projeto: Codevasf - Rodrigo Franco Vieira;
 Material: FF nodular K7 -100mm;
 Distância: 6.800m;
 Desnível: 80m;
 Vazão: 19.20 m³ h⁻¹;
 AMT: 130 mca;

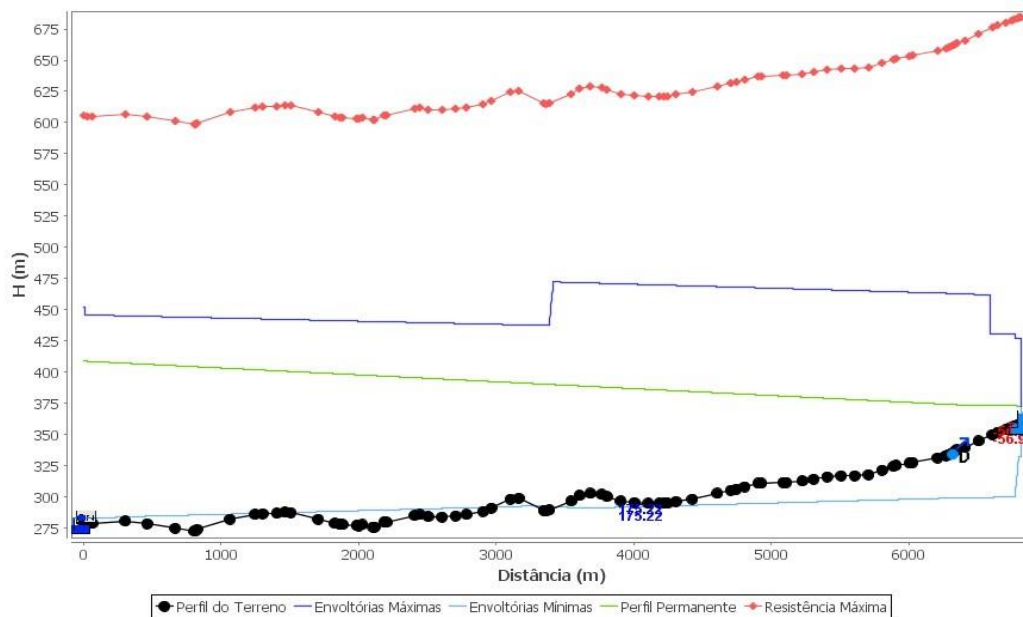


Figura 18. Análise inicial de transientes sem proteção (Exemplo 1).

Sobre-pressão máxima: 175.22 mca;
 Sub-pressão teórica: -56.90 mca; -10.33 mca na prática;
 Diagnóstico: risco de colapso pela sub-pressão;

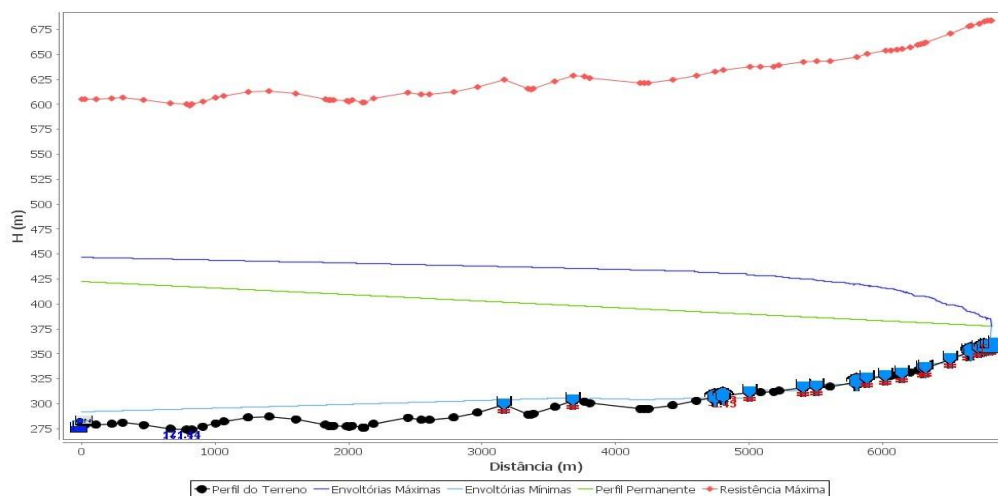


Figura 19. Solução 1 - 8 TAUs + 8 Ventosas.

Resultados 1:

Sobre-pressão máxima: 171.44 mca;
 Sub-pressão teórica: -2.43 mca;
 Diagnóstico: problema resolvido.

Contudo, Cada TAU foi orçado à época (agosto/2020) em R\$ 90.000,00, perfazendo um valor exorbitante (R\$ 720.000,00), buscando-se outra solução.

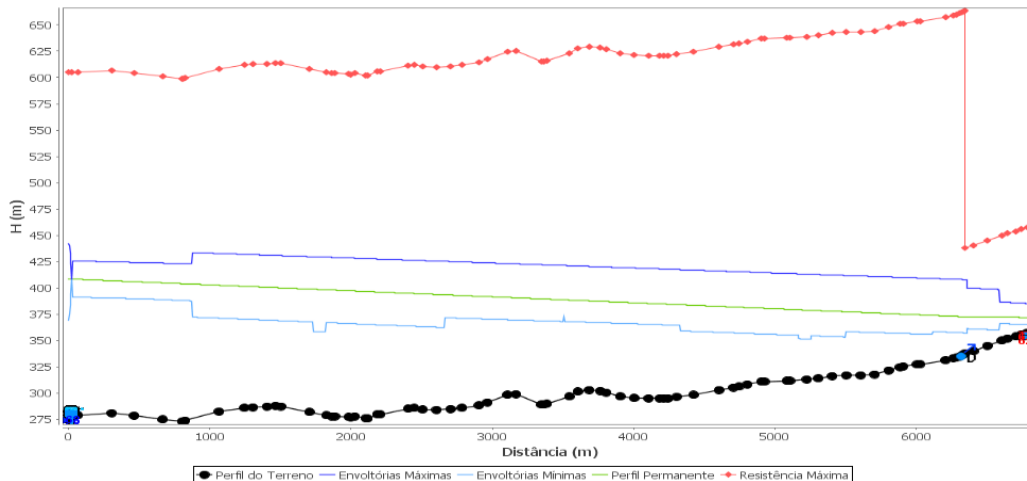


Figura 20. Solução 2 - 01 RHO.

Resultados 2:

Sobre-pressão Máxima: 150.00mca;
 Pressão mínima: 6.80mca;
 Diagnóstico: problema resolvido;
 Custo do RHO: R\$ 90.000,00.

Neste 1º exemplo ficou evidenciado como a correta análise dos transitórios evitou acidentes e prejuízos financeiros.

14.5.2 Exemplo 2 – Adutora principal Projeto Gavião - São José da Tapera – Alagoas

Projeto: Rodrigo Franco Vieira / Metal Engº;
 Material: PVC DEFOFO IRRIGA LF 500mm a 100mm / PN 60 a PN 125;
 Distância: 3.500m;
 Desnível Total: 80m;
 Vazão: 675 m³ h⁻¹;
 AMT: 20 mca;

Aplicando-se apenas a teoria de Allievi quando da elaboração dos cálculos, a qual é inadequada para a determinação de efeitos transitórios, porém com a devida preocupação com o Regime Permanente, obteve-se os efeitos transitórios expressos na Figura 20, sendo os seus resultados numéricos.

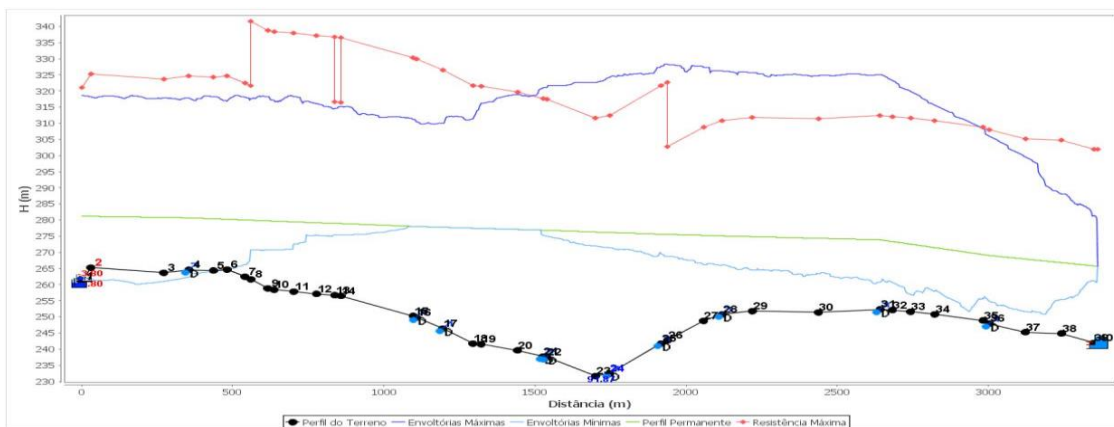


Figura 21. Análise inicial de transientes sem proteção (Exemplo 2).

Sobre-pressão Máxima: 98.00mca;
 Sub-pressão teórica: -3,8mca, inadequada para PVC;
 Diagnóstico: risco de colapso por sobre e sub-pressões;
 Risco grave de rompimento (Sobre-pressão) até os 1.500 m de rede e após os 3.000 m;
 m;
 Risco de colapso (Sub-pressão) até os 400 m de rede.

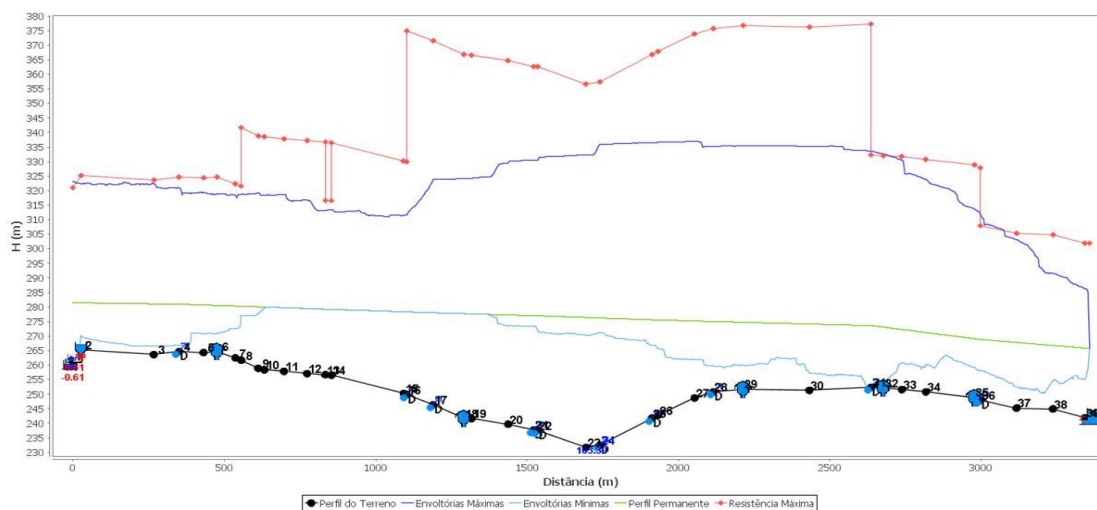


Figura 22. Solução única. Troca de tubos (Classes de Pressão) + 1 TAU + 5 Ventosas.

Resultados (Exemplo 2):

Sobre-pressão Máxima: 97.00mca;
 Sub-pressão: -0.61mca;
 Diagnóstico: problema resolvido.

14.5.3 Exemplo 3 - Projeto de adutora para área irrigada - SP

Projeto: Não Identificado;
 Material: PVC IRRIGA LF PBS / PN 60 a PN 125;
 Distância: 1.150m;
 Desnível: 85m;
 Vazão: $13 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$;
 AMT: 133.75mca;

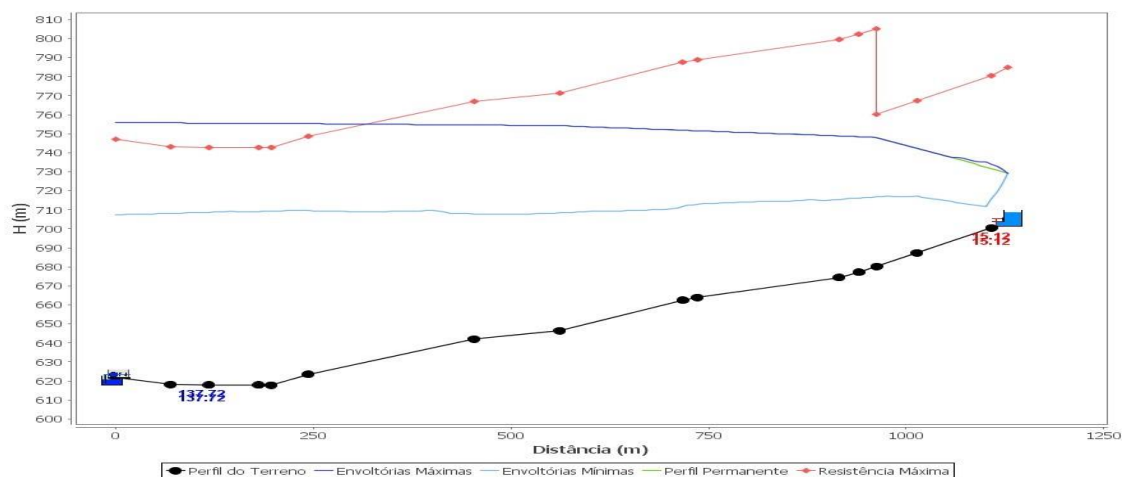


Figura 23. Análise Inicial de Transientes sem Proteção - Exemplo 3.

Sobre-pressão máxima: 137.72mca;
 Pressão mínima: 15.12mca;
 Diagnóstico: risco de ruptura pela sobre-pressão até os 350m;

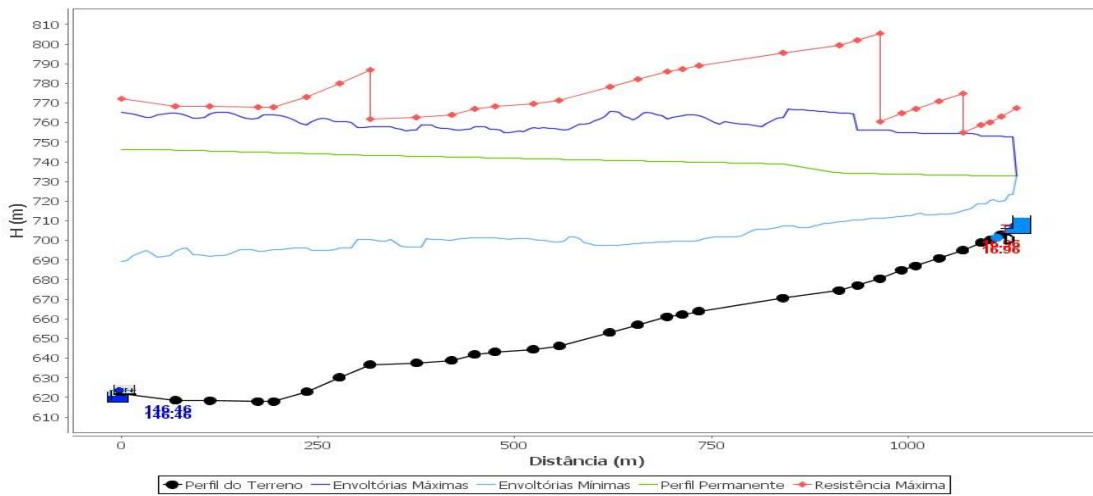


Figura 24. Solução Única - Troca de Tubos (Classes de Pressão PN 150).

Resultados Exemplo 3:

Sobre-pressão máxima: 146.00mca;
 Pressão mínima: 17 mca;
 Diagnóstico: problema resolvido, em fase de projeto.

14.5.4 Exemplo 4 - Projeto de adutora para área irrigada - MG

Projeto: Não Identificado, mas já implantado, com rompimentos diários;
 Material: PVC DEFOFO IRRIGA LF / PN 60 e PN 80;
 Distância: 567m;
 Desnível: 35m
 Vazão: 90 m³ h⁻¹;
 AMT: 72mca;

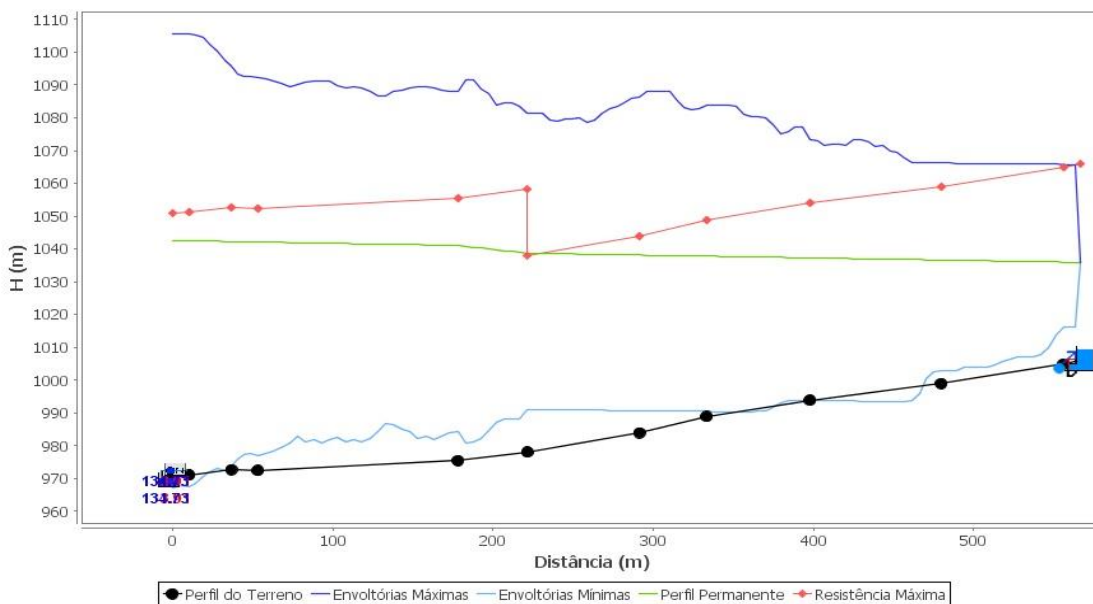


Figura 25. Análise dos Transientes - Situação Atual - Exemplo 4.

Resultados Exemplo 4:

Sobre-pressão máxima: 134.00mca, sendo o tubo PN 80;

Sub-pressão: -3.91 mca;

Diagnóstico: Rompimentos serão cada vez mais constantes.

No Exemplo 1, o fato da rede ser de ferro fundido - sobre o qual há um jargão na engenharia hidráulica de que este "aguenta desaforo" -, pode dar para muitos a impressão de ser incólume, o que não é verdade. Além disso, a avaliação econômica também deve ser observada pois, segundo Dr. Marco Aurélio de Castro, "mais cara é uma avaria e suas consequências" (informação pessoal²) No caso específico, a rede já estava implantada e a paralisação da obra por anos permitiu a correção adequada.

No Exemplo 2, observando-se a Figura 20, o método inadequado indicou que a rede suportaria as pressões do regime permanente (linha vermelha *versus* linha verde), porém a aplicação do software UFC demonstrou que a rede iria entrar em colapso no início devido a sub-pressão, bem como se romper devido a sobre-pressão entre 1.500 e 3.000 m da rede. A análise adequada apontou para uma solução conjugada (TAU + ventosas + troca de tubos). Por sorte, o problema foi corrigido ainda na fase de projeto.

Ao nos remetermos ao Exemplo 3, o diagnóstico e a análise dos efeitos transitórios vieram a calhar, posto que a rede ainda não tinha sido implantada e, portanto, a troca dos tubos PN 125 por PN 150 salvou o projeto de todo e qualquer rompimento, além de que não se verifica sub-pressão e, portanto, não haverá colapsos também. Por coincidência, no dia 12 de novembro de 2020, fomos notificados que testes de desligamento brusco realizados na adutora confirmaram que a solução analisada através do UFC foi adequada e correta.

Na Figura 25, ou Exemplo 4, trata-se de um projeto antigo e que, após 12 anos de operação, passou a ser necessário o reparo da rede quase todos os dias, com luvas de FF, de alto custo. Este caso corrobora com a assertiva de que grandes projetistas da área de irrigação não são preocupados e/ou não têm acesso aos métodos de análise de transientes, o que em algum momento poderá se revelar da pior forma (rompimentos).

Ao observarmos as linhas vermelha (resistência máxima da rede) e verde (perfil permanente ou linha piezométrica), nota-se que os projetistas foram precisos e cirúrgicos, e ninguém provavelmente faria melhor, considerando as condições existentes. No entanto, a linha azul (envoltória de máxima ou sobre-pressão), advinda da aplicação do software UFC, demonstra que TODA a rede está sujeita a rompimentos, além de que em seu trecho inicial a sub-pressão (-391mca) é mais intensa do que o recomendado para tubos de PVC.

Como a troca de toda a rede é bastante onerosa, mesmo em se tratando de projeto de cafés especiais, e só deverá ser feita paulatinamente em função da vida útil da rede, a solução imediata proposta (e paliativa) foi a da colocação de válvula antecipadora de ondas, regulada para abrir em $(35 \text{ m} \div 2 =) 17 \text{ mca}$ (piloto de baixa) e em 80 mca (piloto de alta).

Ressalta-se, ainda para o Exemplo 4, que a recomendação inicial foi o aproveitamento de uma válvula metálica existente (50 mm) na fazenda, de diâmetro adequado, o que exigiria apenas a colocação de mais 1 piloto e o ajuste no circuito. No entanto, o proprietário preferiu adquirir uma nova válvula de diâmetro superior (75 mm), também metálica, e procedeu com a sua instalação. De igual modo que no exemplo anterior, já há a informação também de que os rompimentos acabaram, pois a válvula atua a cada desligamento, protegendo a rede (solução paliativa recomendada).

² Informação recebida por Dr. Marco Aurélio de Castro durante curso ministrado sobre o programa UFC – Juazeiro, Bahia, 2020.

Como as válvulas plásticas resistem mais à cavitação do que as metálicas, e como a antecipadora está regulada para a pressão máxima da rede (80 mca), foi adquirido o dispositivo mais caro, sem que houvesse necessidade, pois, ao abrir na pressão citada, esta cairá imediatamente e nunca será danosa à válvula plástica, que resiste a até 100 mca de pressão.

Não foi adotada a *Thumb Rule* dos 10% acima da classe de pressão da rede posto que esta já se encontra bastante fatigada e fragilizada.

14.6 Considerações finais

Além do fundamento teórico, apresentado de modo superficial neste capítulo - porém necessário para a compreensão de tema tão complexo - da apresentação de diversas formas de arrefecimento dos efeitos transitórios, é também importante se observar os exemplos dispostos, os quais bem ilustram a pouca afeição e preocupação de grande parte dos profissionais de ciências agrárias, por vários motivos, inclusive por não terem acesso às ferramentas adequadas para o entendimento do fenômeno e aplicação das soluções.

"A Agricultura Irrigada é bem mais do que a aplicação de água com mentalidade de sequeiro" (informação pessoal³), segundo o Prof. Dr. Fernando Bráz Tangerino, e com igual espírito, entende-se que a preocupação e busca pela compreensão e soluções contra os transientes hidráulicos deverá ser cada vez mais popularizada, elevando a qualidade da Agricultura Irrigada e do Agronegócio, eterna "tábua de salvação" do país, em todos os momentos.

Referências

BERMAD VALVES, **Catálogo BERMAD IRRIGATION IOM IR-735-M**. 2021.

CORDEIRO, M.; ALMEIDA, V. **2 mil pessoas são retiradas de casa no entorno da barragem de Jati, no Ceará, após rompimento de tubulação**. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2020/08/22/duas-mil-pessoas-sao-evacuadas-do-entorno-da-barragem-de-jati-no-ceara-apos-rompimento-de-tubulacao.ghtml>. Acesso em: 9 abr. 2021.

COSTA, R.N.T. **Golpe de aríete - transiente hidráulico** - Hidráulica Aplicada - AD 0195- UFC. Disponível em: <http://www.gpeas.ufc.br/disc/hidr/aula05.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2021.

Detalhes do rompimento da adutora da hidroelétrica da Barragem do Jati, Ceará, Projeto de Integração do Rio São Francisco. Disponível em: https://www.google.com/search?q=IMAGENS+JATI&tbm=isch&ved=2ahUKEwiziqOi85TwAhVXBLkGHR-VCB0Q2-cCegQIABAA&oeq=IMAGENS+JATI&gs_lcp=CgNpbWcQAZIGCAAQCBAeMgYIABAIEB4yBggAEAgQHjIGCAAQCBAeOgYIABAHEB46CAgAEAgQBxAeUO6fA1iLsANg2LEDaABwAHgAgAGNAYgBwgeSAQMwLjiYAQCgAQGqAQtn3Mtd216LWltZ8ABAQ&scient=img&ei=FAWDYLOWMdeI5OUPn6qi6AE&bih=722&biw=1536&hl=pt-pt

GUAZZELLI, M. **Reunião Técnica para Análises de Adutoras de Irrigação e Fertirrigação**. Itumbiara - GO. 2015. Acesso em: <http://www.gifc.com.br/wp-content/uploads/2017/02/Hidroambiental-GIFC.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2021.

HIDRO-AMBIENTAL. **Sistemas de proteção e controle hidráulico**, s.d. Disponível em http://www.hidroambiental.com.br/downloads/institucional/hidro_catalogo_protecao.pdf. Acesso em: 9 abr. 2021.

HYDROSTEC. **Catálogo circuitos pressurizados**, s.d. Disponível em: https://www.hydrostec.com.br/?page_id=15. Acesso em: 9 abr. 2021.

³ (Informação recebida por Dr. Fernando Bráz Tangerino durante palestra no XXVII CONIRD / V INOVAGRI MEETING, FORTALEZA, CEARÁ, 2019).

RODRIGUES JUNIOR, A. **Golpe de Aríete e Controle Hidráulico em Adutoras de Irrigação e Fertirrigação**, Palestra para Eventostab, Ribeirão Preto, 2018.

LEGNER, C. **A Importância de cálculos de transiente hidráulico em tubulações**. 36. ed., ANO 6. 2017. Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/4/a-importancia-de-calculos-de-transiente-hidraulico-em-tubulacoes#:~:text=Para%20o%20projeto%20de%20sistemas,de%20opera%C3%A7%C3%A3o%20dos%20equipamentos%20>. Acesso em: 9 abr. 2021.

NEIVA, R.M.; CASTRO, M.A.H. Modelagem Computacional de Transientes Hidráulicos em Sistemas de Recalque. In: SEMINÁRIO PLANEJAMENTO, PROJETO E OPERAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: o estado da arte e questões avançadas. **Anais do Semiárido**. João Pessoa-PB, 2002. Disponível em: http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/trabalhos/A19_33.pdf. Acesso em: 9 abr. 2021.

RODRIGUES JUNIOR, A. **Golpe de Aríete e Controle Hidráulico em Adutoras de Irrigação e Fertirrigação**. Hidroambiental, Ribeirão Preto, 2018. Disponível em: http://www.stab.org.br/palestras_irrigacao_2018/aranisio_hidro-ambiental.pdf. Acesso em: 9 abr. 2021.

SANTOS; CASTRO. **Modelagem computacional de transientes hidráulicos em sistemas de recalque**, 2002.

SCHIMIDT, M.J.A. **Simulação de transiente hidráulico e combinação econômica da adutora para abastecimento público do município de Torrinha - SP**, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/140131>. Acesso em: 9 abr. 2021.

SOARES, H. **Hidráulica Geral**. Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, ESA Prof. Homero Soares, 2012.

VIEIRA, R.R.F. Codevasf. **Manual de válvulas hidráulicas**, 2019.

CAPÍTULO 15

15 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA NA AGRICULTURA IRRIGADA

José Antônio Frizzone e Verônica Gaspar Martins Leite de Melo

Resumo

A formulação de muitas das críticas populares à irrigação é simplista e enganosa. Distinguir entre usos consuntivos e não consuntivos, consumo benéfico e não benéfico e identificar até que ponto a água que não é consumida pode ser recuperada para uso produtivo em outro lugar é fundamental para uma análise racional do desempenho dos sistemas de irrigação e a oportunidade para melhorias. Compreender as opções para lidar com a escassez de água é um assunto complexo. Em relação à disposição física da água, a terminologia e as análises para a concepção de projetos individuais de manejo da água nas fazendas, geralmente não fornecem informações adequadas quando há competição por água em escalas maiores e sem considerar que "perdas" de um local são "fontes" para outro. Em particular, os termos de "eficiência" carregados de valor podem enganar o leitor desinformado. As questões relacionadas à gestão da água e às intervenções para sua melhoria perpassa vários setores. Diferentes usuários e beneficiários da água têm interesses legítimos em como a água é alocada e usada em seus próprios setores, bem como em setores concorrentes. A linguagem e a terminologia do debate são importantes para o valor que a análise pode agregar ao conhecimento. Mesmo as discussões de especialistas podem ser confundidas por terminologias ambíguas, enquanto os setores dependentes de água não têm uma terminologia consistente para distinguir entre usos consuntivos e não consuntivos, ou fluxos de retorno recuperáveis e não recuperáveis. Este capítulo fornece uma visão geral dos conceitos de produtividade da água na agricultura irrigada e seus predecessores, como eficiência da irrigação e eficiência de uso de água, com foco na produtividade física da água, para um melhor planejamento da irrigação e uso eficiente da água no setor agrícola.

15.1 Introdução

Globalmente, a água doce é o recurso mais precioso; no entanto, as ameaças à segurança hídrica continuam afetando a saúde dos recursos hídricos. O ciclo global da água está sendo significativamente alterado pelo desenvolvimento humano e pelos efeitos resultantes dos processos de desmatamento, evapotranspiração e recarga de águas subterrâneas. Nas áreas urbanas e outras áreas em desenvolvimento, o crescimento da população reduz a disponibilidade de água doce, e a urbanização diminui a recarga das águas subterrâneas e aumenta o escoamento das águas pluviais. A urbanização também afeta a qualidade da água, pois o alto volume de escoamento de águas pluviais transporta contaminantes das áreas urbanas para as águas subterrâneas e para os corpos d'água da superfície.

A conversão da vegetação natural em terra agrícola resulta na extração excessiva de água para dar suporte à produção agrícola (SIEBERT; DÖLL, 2010), diminuindo a disponibilidade de água doce. Além disso, os agroquímicos, incluindo fertilizantes e pesticidas, têm sido utilizados indiscriminadamente para promover incrementos na produção de alimentos, resultando em violações dos padrões de qualidade da água. As mudanças climáticas também ameaçam a segurança hídrica global. Alterações na frequência, padrão e volume dos eventos de precipitação afetam a qualidade e a disponibilidade da água, bem como a capacidade da infraestrutura atual de responder aos riscos climáticos extremos (MCNEILL *et al.*, 2017). O aumento da temperatura ameaça a disponibilidade e a qualidade dos recursos

de água doce. Enfrentar com êxito o desafio da segurança hídrica exigirá uma abordagem holística e interdisciplinar que incorpore todos os fatores que influenciam a disponibilidade, acessibilidade e sustentabilidade dos recursos hídricos.

O suprimento suficiente de água é vital para garantir o crescimento e produção das culturas e a sobrevivência dos animais. A agricultura irrigada é a atividade que mais demanda recursos hídricos, representando aproximadamente 70% de toda extração de água doce dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos (DEHGHANIPOU *et al.*, 2020). Práticas inadequadas de gestão da água na agricultura podem promover escoamento superficial excessivo, percolação profunda, contaminação da fonte hídrica por excesso de nutrientes ou de outros produtos químicos e baixa produtividade da água. Como consequência, nenhuma segurança alimentar ou hídrica pode ser alcançada em escala global, se consideradas independentemente (MCNEILL *et al.*, 2017). Portanto, é importante considerar as seguranças hídrica e alimentar por uma perspectiva interdisciplinar na busca da segurança global.

A grande demanda de água na agricultura compete com outras demandas, em particular as necessidades de fluxo ambiental para sustentar os ecossistemas naturais (JÄGERMEYR *et al.*, 2017; MALANO; DAVIDSON, 2009; PANG *et al.*, 2014; XUE *et al.*, 2017). A necessidade de fluxo ambiental é definida como o fluxo do rio necessário para manter de maneira sustentável a saúde ecológica dos ecossistemas naturais, como áreas úmidas e lagos (ARTHINGTON *et al.*, 2018; SMAKHTIN *et al.*, 2006; YASI; ASHORI, 2017). Em muitas partes do mundo, o aumento do consumo de água para irrigação levou à crescente pressão sobre os recursos hídricos disponíveis para atender aos requisitos de fluxo ambiental e resultou crescentes conflitos entre a demanda de água na agricultura e ambiental (DUNN *et al.*, 2003; XUE *et al.*, 2017). Esses conflitos são exacerbados pelas mudanças climáticas, secas e má gestão da água, especialmente em regiões áridas e semiáridas (MANCOSU *et al.*, 2015; VALIPOUR *et al.*, 2015). Efeitos adversos da redução do fluxo de água ambiental levaram à degradação de corpos aquáticos naturais, como lagos, zonas húmidas e oásis (SISTO, 2009).

Aumentar a eficiência do uso da água na agricultura requer decisões sábias sobre o sistema de irrigação, a estratégia e o método para programar a irrigação, entre outros fatores relacionados à gestão da água. Desde o início do ano 2000, a abordagem da produtividade da água tem sido amplamente sugerida para resolver esses problemas. Essa abordagem fornece indicadores úteis para o manejo e o desempenho econômico da irrigação. A análise da literatura, entretanto, mostra confusão no uso dos termos e falta de acordo nas equações (HEYDARI, 2004). Este texto é focado no uso racional da abordagem da produtividade para o irrigante melhorar a produtividade física e econômica da água de irrigação na escala de campo.

15.2 Eficiência da irrigação

O termo eficiência de irrigação (EI) é utilizado para se referir a indicadores que, através de uma razão entre quantidades de água envolvidas no processo de irrigação, expressam um balanço entre os seguintes volumes de água, em relação ao volume aplicado: (i) derivado da fonte de suprimento; (ii) aplicado à parcela; (iii) armazenado no solo à profundidade efetiva das raízes para contribuir com o objetivo desejado, (iv) evaporado e derivado pelo vento, (v) percolado e escoado superficialmente para fora dos limites da área cultivada, e (vi) benéficamente ou razoavelmente usado na área cultivada.

Jensen (2007) destaca que o tradicional termo eficiência da irrigação (razão entre água consumida pelo processo de evapotranspiração da cultura e água derivada de um rio ou de outra fonte natural), conforme definido por Israelsen (1950), é parcialmente aplicável ao considerar a água consumida (evapotranspiração - ET) na produção do efeito desejado (produção da cultura). É um termo inapropriado ao considerar como desperdício a água que não foi consumida pelo processo de ET. Conforme salienta Perry *et al.* (2009) "perdas" na escala de campo ou de projeto de irrigação não são necessariamente "perdas" no sentido hidrológico,

porque, de acordo com a lei da conservação das massas, a água “perdida” pode estar disponível para uso em algum outro ponto da bacia, ou em um aquífero.

Na escala de campo, ou de fazenda, a EI é a razão entre o volume de água de irrigação usada de forma benéfica (predominantemente, para ET das culturas e para remoção de sais para manter a produtividade do solo) e o volume total de água de irrigação aplicada (ajustada para as variações no armazenado de água de irrigação no solo) (BURT *et al.*, 1997). Anualmente, os governos gastam bilhões de dólares subsidiando tecnologias avançadas de irrigação, como sistemas de aspersão ou de gotejamento com o objetivo de aumentar a EI, entendendo que isso permitirá que a água seja realocada da irrigação para as cidades, indústrias ou ambiente, mantendo ou mesmo aumentando a produção agrícola. Entretanto, Grafton *et al.* (2018) apontam que aumentos na EI para campos cultivados raramente estão associados a aumentos da disponibilidade de água em maior escala, e que apenas um aumento na EI que reduz extrações de água pode ter um efeito insignificativo no consumo de água. Esse paradoxo, de que um aumento na IE em escala de campo não aumenta a disponibilidade de água em escala de bacia, é explicado pelo fato de que “perdas” de água não consumida em escala agrícola (por exemplo, escoamento superficial) são frequentemente recuperadas e reutilizadas em escala de bacia hidrográfica.

15.3 Produtividade da água na agricultura

O termo produtividade refere-se à razão entre o produto obtido e o insumo utilizado (HEYDARI, 2014) e, ao contrário da eficiência, as unidades do numerador são diferentes das do denominador. Isso está de acordo com o conceito de produtividade física da água do cultivo (WFP) introduzido por Molden (1997), que ganhou ampla aceitação (KIJNE *et al.*, 2003). Há consenso sobre o numerador de WFP ser o rendimento comercial, mas a definição e os componentes do denominador diferem entre os autores. Alguns consideram apenas a água transpirada pela cultura (BOUMAN, 2007), mas a maioria dos autores inclui tanto a água evaporada do solo quanto a transpirada pela cultura, ou seja, a evapotranspiração (ET) (KIJNE *et al.*, 2003; SINCİK *et al.*, 2008; BLATCHFORD *et al.*, 2018). Pereira *et al.* (2012) sugerem o uso da água total envolvida na produção em vez de ET no denominador.

A produtividade física da água da cultura (WFP), é definida com a quantidade de produto no numerador. Mas, normalmente, os agricultores são motivados pelo aumento da lucratividade da agricultura e das receitas agrícolas pela gestão dos insumos. Portanto, o conceito de produtividade da água pode também se referir ao valor econômico da produção, conforme descrito por Rodrigues e Pereira (2009). Um termo adequado para o último é produtividade econômica da água (WEP), que se refere à razão entre produtos e insumos em termos monetários.

A escassez de recursos hídricos e a crescente competição por água, em muitos setores reduzem sua disponibilidade para irrigação. O manejo racional da água para a produção agrícola em condições de água escassa requer abordagens eficientes. Aumentar a WFP na lavoura e a tolerância à seca por meio do melhoramento genético das plantas e da regulação fisiológica podem ser os meios para alcançar o uso eficiente da água. Mas apenas altos valores de WFP possuem pouco ou nenhum interesse se não estiverem associados a rendimentos altos ou aceitáveis (GRAFTON *et al.*, 2018). A associação de valores altos (ou moderados) de produtividade da água com rendimentos altos (ou moderados) tem implicações importantes no uso efetivo da água.

Neste texto, são discutidos os fatores que afetam a produtividade da água e as possíveis técnicas para sua melhoria. Uma única abordagem não seria capaz de enfrentar o desafio de produzir mais alimentos e fibras com água disponível limitada. Combinando medidas biológicas de economia de água com soluções de engenharia (método de irrigação para economia de água, irrigação com *deficit*, sequenciamento adequado de deficits, modernização

do sistema de irrigação, etc.), práticas agronômicas e de manejo do solo (preparação das sementes, manipulação da idade das mudas, semeadura direta, adequada seleção de culturas, integração da agricultura e da aquicultura, aumento da fertilidade do solo, adição de matéria orgânica, preparo do solo e cobertura do solo, etc.) podem resolver o problema até certo ponto. Novas informações científicas são necessárias para melhorar os ganhos econômicos da produtividade da água, porque as futuras melhorias neste indicador parecem ser limitadas por fatores econômicos, mais que por falta de meios tecnológicos (GRAFTON *et al.*, 2018).

15.4 Eficiência da irrigação

15.4.1 Economia de água

Avaliar a economia de água na agricultura requer a análise do destino da água aplicada à colheita. Perry (2011) descreveram diferentes frações de água a serem consideradas. Parte da água aplicada é consumida no processo de evapotranspiração (ET), enquanto o restante, a fração não consumida, principalmente escoamento e drenagem, é devolvida com sua qualidade preservada ou degradada. Parte da fração consumida é benéfica (água consumida para atingir a meta de produção) e parte não benéfica (água consumida com impacto irrelevante na meta de produção). Dentro da fração não consumida, a quantidade de água desviada para as águas superficiais e subterrâneas com qualidade aceitável são reutilizáveis. É o caso da fração de lixiviação quando sua qualidade, apesar de ser degradada, é aceitável para reutilização. Neste caso, temos um uso benéfico de água (a remoção do excesso de sal do solo) e possivelmente um resíduo não benéfico (o excesso da fração de lixiviação), mas a água ainda é disponível para reutilização.

A economia de água é relativamente fácil de avaliar quando a melhoria na irrigação afeta apenas o uso consuntivo da água (ET) e a água incorporada no produto. Mas na maioria das vezes afeta o uso de água não consuntivo, ou seja, escoamento e drenagem. Nestes casos, a avaliação precisa da economia real de água requer a quantificação das frações reutilizáveis e não reutilizáveis dos componentes envolvidos (RODRIGUES; PEREIRA, 2009; PEREIRA *et al.*, 2012). Isso não é fácil devido às incertezas na avaliação da fração reutilizável. Esta pode ser utilizada novamente e, portanto, não pode ser considerada uma perda. As questões de produtividade e economia de água tornam-se cada vez mais complexas ao aumentar a escala, do campo cultivado à bacia (KOECH; LANGAT, 2018). Perry (2011) destaca que o contexto hidrológico local deve ser considerado para afirmar se qualquer redução no uso de água na fazenda economiza água. Essa questão foi abordada em um artigo recente de Grafton *et al.* (2018). Eles reconhecem que as tecnologias de irrigação avançadas podem aumentar a eficiência da irrigação no campo, definida como a proporção entre o volume de água de irrigação usada de forma benéfica no campo (predominantemente, ET dos cultivos e remoção de sal do solo) e o volume total de irrigação aplicado (ajustado para variações de armazenamento no solo). Mas eles também afirmaram que a água economizada em escala de fazenda normalmente não reduz o consumo de água em escala de bacia hidrográfica, pois, a água economizada na parcela pode não retornar para a bacia.

15.4.2 Partição da água de irrigação

Quanto à possibilidade de recuperação, a água usada na agricultura é classificada da seguinte forma (BURT *et al.*, 1997):

(i) Uso consuntivo - é a quantidade total de água absorvida pelas plantas para transpiração e constituição dos tecidos, mais a evaporação da água do solo e da água interceptada pela vegetação. Toda água em trânsito para a atmosfera, pelos processos de evaporação e transpiração (ET) ou que permanece nos tecidos das plantas e nos produtos colhidos (água

de constituição) é irrecuperável e se denomina uso consuntivo. Exemplos de usos consuntivos são: evapotranspiração das culturas; evapotranspiração das plantas daninhas; evaporação da água aspergida por aspersores; evaporação de reservatórios, evaporação do solo úmido; água exportada com o produto colhido, etc.

(ii) Uso não consuntivo - é a água que, de alguma forma, transita para fora da área de cultivo, mas não se perde para a atmosfera na forma de vapor. A água de uso não consuntivo pode ser reutilizada na própria área, ou em outra área de jusante na bacia hidrográfica ou retornar à fonte. Está relacionada com a água que drena abaixo da zona radicular, a água que escoam superficialmente e a que infiltra nos canais. Exemplos de usos não consuntivos são: água para lixiviação de sais no perfil do solo; percolação profunda em excesso; escoamento superficial; infiltração em canais e vazamento em tubulações, etc.

Quanto aos benefícios agrônômicos, o uso de água na agricultura recebe a seguinte classificação (BURT *et al.*, 1997):

(i) Usos benéficos - uso benéfico de água na agricultura, pressupõe a água consumida para a produção das culturas. Assim, a água consumida para atingir um determinado objetivo agrônômico é considerada água benéfica. São exemplos: água consumida no processo de evapotranspiração das culturas, evapotranspiração de plantas benéficas (quebra-ventos, cobertura e proteção do solo, habitat para insetos benéficos); água utilizada para lixiviar o excesso de sais do solo, controle climático, preparação do leito de semeadura, para germinação das sementes, umedecimento do solo com o objetivo de quebrar a crosta superficial e facilitar a emergência das plântulas, água utilizada para aplicação de pesticidas e fertilizantes, etc.

A água armazenada no solo, na zona radicular, após a colheita, não é considerada para uso benéfico, a menos que esteja disponível para culturas subsequentes. Esta água deve ser considerada neutra até que ela deixe a área objeto e siga outro destino. O intervalo de tempo selecionado para a partição da água influencia a magnitude da fração considerada para os vários destinos. Também, o uso da água proveniente da precipitação não é considerado como um uso benéfico da água de irrigação.

(ii) Usos não benéficos - uso não benéfico refere-se à fração da água aplicada que não tem objetivo agrônômico. São exemplos: excesso de percolação profunda em relação à necessária para remoção de sais; excesso de escoamento superficial, evapotranspiração de plantas daninhas, evaporação desnecessária da água na superfície de solo úmido de áreas vizinhas à área irrigada, deriva pelo vento além dos limites da área cultivada. A aplicação de água não é perfeitamente uniforme, e por isso em alguma fração da área irrigada ocorre excesso de água e percolação; todo excesso além da necessidade de irrigação é considerado uso não benéfico.

Os usos não benéficos podem ser considerados razoáveis e não razoáveis. Os usos não benéficos razoáveis são aqueles que podem ser justificados em condições, lugares e momentos particulares. Exemplos são: evaporação de reservatórios, evaporação do solo úmido dentro da área irrigada, alguma evaporação da água aplicada por aspersores, água de lavagem de filtros, alguma percolação decorrente da não uniformidade de aplicação de água pelo sistema de irrigação e por incertezas no manejo da irrigação, água para satisfazer algum propósito ambiental, água necessária para manter o padrão de qualidade de drenos, perdas que podem ser antieconômicas de serem evitadas, etc. Já os usos não benéficos não razoáveis são aqueles que não podem ser justificados. São exemplos: percolação profunda excessiva; deflúvio superficial excessivo; evaporação de solo úmido irrigado fora dos limites da área cultivada; vazamentos em tubulações; vazamentos e infiltração em canais.

15.4.3 Indicadores de eficiência da irrigação

A partição da água aplicada por irrigação é a base para a definição de certos parâmetros de desempenho, especialmente os indicadores de eficiência. Os diferentes indicadores têm diferentes propósitos e devem ser cuidadosamente analisados. Expressos como porcentagens, eles representam frações do volume de irrigação aplicado destinados a certas funções. É impossível definir alguns indicadores sem especificar o período de tempo e os limites da região analisada. Já outros, pelos seus pressupostos, podem evitar esses problemas.

(i) Eficiência de irrigação

O conceito de eficiência de irrigação foi inicialmente dado por Israelsen (1950). O.W. Israelsen, pioneiro em tecnologia de irrigação, preocupava-se com a quantidade de água aplicada em terras irrigadas nos EUA e desenvolveu diversos parâmetros para caracterizar o desempenho da irrigação e afirmou: com uma determinada quantidade de água desviada de um rio, quanto maior a proporção que é armazenada no solo da zona radicular dos cultivos nas fazendas irrigadas e mantida lá até ser absorvida e transpirada pelas plantas, maior será o rendimento total da safra. Ele então definiu a eficiência da irrigação (EI) como a proporção da água de irrigação consumida pelas plantações de uma fazenda irrigada, ou de um projeto, para a água desviada de um rio ou outra fonte de água natural para o canal, ou canais, do projeto na fazenda. Na forma de equação, ele definiu a eficiência da irrigação como a razão entre a água de irrigação consumida pelas plantações (ET) e desviada de um rio ou outra fonte natural.

A definição de Israelsen permaneceu fundamentalmente inalterada por mais de 40 anos, até que a partir da década de 1970 foi gradativamente modificado e substituído, tanto na literatura quanto na prática. Burt *et al.* (1997) redefiniram EI como sendo a razão entre o volume de irrigação que é benéficamente usado, que deixa os limites da área irrigada na forma de vapor, e o volume total de irrigação aplicado (uso benéfico mais uso não benéfico) [Eq. (1)]:

$$EI = \frac{V_b}{V_a - \Delta S} \times 100 \quad (1)$$

em que, V_b - volume de água de irrigação benéficamente usado; V_a - volume total de irrigação aplicado; ΔS - variação de armazenamento da água de irrigação no solo.

O numerador da Eq. (1) representa os usos benéficos da água de irrigação para múltiplos propósitos, incluindo água para ET, lixiviação de sais, proteção contra geadas, controle de temperatura ambiente, aplicação de fertilizantes e pesticidas, preparação do solo, quebra da crosta superficial do solo para facilitar a emergência, etc. A água que se destina à percolação profunda excessiva, ao escoamento superficial, à deriva pelo vento, à evaporação após ser aspergida no ar e usada pelas plantas daninhas são usos não benéficos e que tendem a reduzir a eficiência de irrigação.

O denominador da Eq. (1) corresponde ao volume total de água de irrigação (usos benéficos + usos não benéficos) que foi aplicado e deixou os limites do campo em um intervalo de tempo especificado (por exemplo, intervalo imediatamente antes de uma irrigação até imediatamente antes da próxima irrigação; ou durante uma estação de cultivo). Se, ao final do período, o volume de água armazenado no solo é o mesmo do início, então a variação de armazenamento da água de irrigação (ΔS) é zero e toda água aplicada deixou o campo por ET, escoamento superficial e subsuperficial, percolação profunda, etc. Dessa forma, a água armazenada temporariamente na zona radicular para uso fora do intervalo de tempo especificado não é contabilizada - nem adicionada ao uso benéfico nem subtraída dele. Ao final de uma safra ΔS na camada que contém o sistema radicular, é, frequentemente, muito pequena, então, para fins de avaliação pode-se considerar igual a zero (JENSEN, 2007).

A EI é definida entre duas datas, geralmente compreendendo o ciclo completo da cultura. É determinada somente a *posteriore* e não pressupõe usos benéficos futuros. Para o intervalo de tempo definido, exige uma avaliação acurada da fração da água de irrigação que foi benéficamente usada. Não exige que o requerimento de água pelas plantas e o uso sejam uniformes em toda a área. Os valores dependem da escolha do intervalo de tempo. O termo "água de irrigação" exclui a água aplicada naturalmente à cultura por precipitação ou ascensão do lençol freático. Também, é possível, sem perda de generalidade, utilizar lâmina de água de irrigação no numerador e no denominador da Eq. (1), entendendo que volume é simplesmente o produto entre lâmina e área (da parcela, do campo ou do projeto). A relação entre EI e usos benéficos e não benéficos de água de irrigação, pode ser feita da seguinte forma: Usos Benéficos + Usos não Benéficos = 100% e Usos não Benéficos = 100 - EI%.

A EI é um indicador de desempenho que tem sido utilizado para quantificar o uso benéfico da água de irrigação e comparar com usos não benéficos. A água é usada benéficamente quando contribui diretamente para a produção agrônômica da cultura. No entanto, devido a restrições físicas, econômicas ou administrativas, e várias demandas ambientais, certo grau de uso não benéfico é geralmente razoável. Outros benefícios para a sociedade podem advir da água de irrigação, como por exemplo, uma fração não usada pelas plantas pode ser usada para a dessedentação da população do campo.

Também, pode ser prudente para um irrigante aplicar alguma quantidade adicional de água que não é diretamente usada pelas culturas. Portanto, é necessário um indicador adicional que incorpora os usos não benéficos razoáveis: os usos que podem não contribuir para a produção agrônômica, mas podem ser justificados em circunstâncias particulares. Solomon e Burt (1999) propuseram um índice de desempenho da irrigação que contempla usos de água benéficos e não benéficos razoáveis, nomeando-o de sagacidade da irrigação. O termo sagacidade foi empregado no sentido de prudência. O índice de sagacidade IS é definido pela Eq. (2). Não se sugere que IS substitua EI. Com objetivos bem definidos, ambos podem oferecer informações úteis.

$$IS = \frac{V_{br}}{V_a + \Delta S} \times 100 \quad (2)$$

em que, V_{br} é o volume de água de irrigação benéficamente usado mais o volume não benéfico razoavelmente usado.

A eficiência de irrigação, como conceito, tem sido frequentemente mal aplicada ou mal interpretada por falhas na diferenciação entre uso consuntivo e uso benéfico. É falso entender que $(100 - EI) \%$ da água aplicada por irrigação representa a quantidade que é desperdiçada e, portanto, o potencial para conservação ou realocação. Uma $EI = 75\%$ não significa que 25% da água de irrigação aplicada poderia ser conservada e redirecionada para qualquer outra parte ou fim. Como destacam Solomon e Burt (1999), algum grau de uso não benéfico é geralmente razoável, de forma que o potencial para conservação e realocação consiste somente dos usos não benéficos não razoáveis. O parâmetro IS incorpora os usos benéficos e não benéficos razoáveis e permite definir o potencial para conservação e realocação, limitando-o a $(100 - IS) \%$ da água aplicada.

Como se tem destacado, usos não benéficos razoáveis são aqueles que, embora não beneficiam diretamente a produção agrônômica, podem ser justificados sob algumas condições físicas e econômicas. Por exemplo, pequena perda de água em canais que não justifica economicamente o investimento para ser evitada constitui um uso razoável, embora não benéfico. Alguma percolação profunda que decorre da não uniformidade de aplicação de água é inevitável e razoável, embora não benéfica. Da mesma forma, podem ser citadas as perdas de água por evaporação no ar durante a irrigação por aspersão, a água usada para lavagem de filtros em irrigação localizada, etc. O IS pode ser aplicado nas escalas de campo,

de fazenda, de distrito, de projeto ou de bacia hidrográfica, em um intervalo de tempo definido, incluindo os conceitos de usos benéficos e usos não benéficos razoáveis.

(ii) Coeficiente de uso consuntivo da irrigação

A definição de EI segundo Israelsen (1950) refere-se claramente à proporção entre água "consumida ou evapotranspirada" e água desviada de uma fonte ou aplicada. Jensen (1993) sugeriu alteração do nome desta razão para coeficiente de uso de consuntivo (ICUC). O ICUC representa a fração da água desviada ou aplicada a um campo, fazenda ou projeto que é convertida em vapor ou consumida. Burt *et al.* (1997) propõe quantificar ICUC pela razão entre o volume de água de irrigação consuntivamente usado e o volume de água de irrigação que deixou o campo, ambos em um intervalo de tempo específico (Eq. 3):

$$ICUC = \frac{V_c}{V_a - \Delta S} \times 100 \quad (3)$$

em que, V_c é o volume de água de irrigação consuntivamente usado (não recuperado).

Da mesma forma que EI, ICUC pode ser usado na escala de campo, de fazenda, de projeto, de distrito de irrigação ou de bacia hidrográfica. Na escala de projeto, por exemplo, a saída total de água de irrigação da área do projeto na forma líquida (por drenagem e escoamento), em um período de tempo especificado, é $100 - ICUC\%$ da água de irrigação suprida ao projeto menos a variação de armazenamento da água de irrigação no solo. O ICUC quantifica a água de irrigação não recuperada (consumida) e $100 - ICUC\%$ quantifica a água não consumida.

15.5 Produtividade da água

15.5.1 Visão geral

Os irrigantes estão sob pressão crescente para garantir a segurança alimentar, bem como a sustentabilidade ambiental e econômica de longo prazo (KOECH; LANGAT, 2018), dois alvos cada vez mais ameaçados pelas mudanças climáticas e pelo aumento da população. O desafio atual é garantir que a gestão da água na agricultura permita lucros razoáveis para o produtor, produção de alimentos, fibras e biocombustíveis suficientes para atender à demanda da população em crescimento, enquanto custos ambientais insustentáveis devem ser evitados (COSGROVE; LOUCKS, 2015; ROCKSTRÖM *et al.*, 2017). Neste contexto, o irrigante é obrigado a tomar decisões eficazes sobre o método e o sistema de irrigação associado, a estratégia de irrigação e o método para programar a irrigação, entre outros fatores relacionados à gestão da água na fazenda. A dificuldade de escolher com sabedoria aumenta quando se valoriza a qualidade da produção, além da quantidade, e no caso de sistemas de cultivo com alta densidade de plantas em que o crescimento excessivo deve ser evitado (FERNÁNDEZ *et al.*, 2020). Como consequência, o irrigante deve avaliar o impacto das diferentes opções na produtividade da água e no lucro da fazenda. Para esta tarefa, são necessários indicadores de produtividade da água e do desempenho econômico da irrigação (PEREIRA *et al.*, 2012; LEVIDOW *et al.*, 2014).

Entretanto, não há consenso sobre a definição e adequação de diferentes indicadores e como eles devem ser usados. Em primeiro lugar, irrigantes, ambientalistas e formuladores de políticas geralmente têm visões diferentes sobre o que é um uso eficiente da água na agricultura, e como deve ser melhorado (FERNÁNDEZ *et al.*, 2020). Enquanto os irrigantes tentam obter a maior lucratividade possível da fazenda, os ambientalistas enfocam a importância de preservar os recursos hídricos atuais e os formuladores de políticas trabalham para regular a demanda de diferentes setores de consumo de água. Em segundo lugar, a interpretação das conclusões sobre a eficiência do uso da água e produtividade da água,

depende da experiência do analista e da escala de análise (MOLDEN *et al.*, 2003). Assim, um agricultor ou agrônomo geralmente considera a drenagem como uma perda, enquanto um hidrólogo trabalhando na escala de bacia pode quantificá-la como um fluxo de água dentro do mesmo sistema, com um impacto desprezível no balanço hídrico da bacia (PERRY, 2011). Em terceiro lugar, a literatura mostra falta de acordo sobre termos e conceitos, o que muitas vezes leva a um uso deficiente dos resultados publicados (PEREIRA *et al.*, 2012; KNOX *et al.*, 2012). Na visão de Perry (2011) tudo isso cria confusão na interpretação dos dados sobre o uso da água na agricultura e restringe a comparação entre diferentes estudos.

Também se tem encontrado falta de consenso quando se trata da produtividade econômica da água. Por exemplo, admite-se que a receita seja dada pelo valor do rendimento, mas não há consenso sobre como definir e calcular os custos necessários para calcular os benefícios. Alguns autores consideram apenas os custos variáveis, enquanto outros também consideram os custos fixos associados ao investimento (MESA-JURADO *et al.*, 2010; HELLEGERS *et al.*, 2010; EXPÓSITO; BERBEL, 2016) e outros recomendam incluir os custos de oportunidade (FERNÁNDEZ *et al.*, 2020), que são especialmente relevantes ao avaliar a lucratividade de pomares de árvores frutíferas e outras culturas perenes. O uso de funções de produção para avaliar a produtividade econômica da água fornece uma visão mais ampla do que apenas um conjunto de indicadores de uso da água (ENGLISH, 1990; FRIZZONE, 2004). Tanto os custos de oportunidade quanto as funções de produção, são desconsiderados em muitas análises econômicas sobre o impacto da irrigação. Como resultado, as estimativas dos benefícios de diferentes estudos são dificilmente comparáveis.

As estatísticas de irrigação demonstram o importante papel da agricultura irrigada no mundo e a necessidade de aumentar a eficiência de uso da água na atividade agrícola. Embora a espécie cultivada, o genótipo, as condições de solo e os fatores climáticos são de vital importância para a eficiência de uso da água (MBAVA *et al.*, 2020), a disponibilidade de água é frequentemente o elemento crítico mais importante na agricultura. Aumentar a eficiência do uso da água na fazenda requer decisões sábias sobre o sistema de irrigação, estratégias de irrigação e método para programar a irrigação, entre outros fatores relacionados ao gerenciamento da água. Desde o início dos anos 2000, a abordagem da produtividade física da água (WFP) tem sido amplamente usada para resolver esse problema. Nos sistemas de produção agrícola a WFP é usada para definir a relação entre produção comercial das culturas e a quantidade de água consumida nesta produção (ET), e tem servido como um indicador para quantificar o impacto dos calendários de irrigação com relação ao manejo da água e o desempenho econômico da irrigação.

15.5.2 Indicadores de produtividade da água

Os fisiologistas de plantas definem a eficiência de uso da água (WUE) na escala de planta como a razão entre a taxa de produção de biomassa obtida e a taxa de transpiração (VIETS, 1962). Os agrônomos costumam usar definição semelhante, com a diferença de considerar a produção comercial, em vez taxa de produção de biomassa no numerador, e a água aplicada no denominador em vez da taxa de transpiração. O termo é impróprio porque não é estritamente uma eficiência, mas uma medida da quantidade de carbono fixada pelas plantas por unidade de água transpirada. Esta proporção, no entanto, está mais relacionada à produtividade da água do que com a eficiência. O termo produtividade, refere-se à razão entre o produto obtido e o insumo utilizado (HEYDARI, 2014) e, ao contrário da eficiência, as unidades do numerador são diferentes das do denominador. Isso está de acordo com o conceito de produtividade da água da cultura (WFP) introduzido por Molden (1997), que ganhou ampla aceitação. Há um consenso sobre o numerador de WFP ser o rendimento comercial, mas a definição e os componentes do denominador diferem entre os autores. Alguns consideram apenas a água transpirada pela cultura (BOUMAN, 2007), mas a maioria

dos autores inclui tanto a água evaporada do solo quanto a transpirada pela cultura, ou seja, ET (SINCIK *et al.*, 2008; BLATCHFORD *et al.*, 2018).

Considerando que a produção de matéria seca (fotossíntese) e transpiração estão relacionadas aos processos de difusão de CO₂ e de água, Viets (1962) definiu WUE pela Eq. (4):

$$WUE = \frac{\text{Taxa de produção de matéria seca}}{\text{Taxa de transpiração}} \rightarrow \frac{y \text{ (kg ha}^{-1}\text{d}^{-1}\text{)}}{t \text{ (mm dia}^{-1}\text{)}} \quad (4)$$

Howell *et al.* (1992) derivaram uma expressão para WUE para ser utilizada em escala de campo [Eq. (5)]. Embora o intento tenha sido sua utilização em escala de campo, seu uso é complexo, mas é capaz de ilustrar os problemas comuns encontrados na avaliação acurada de WUE a partir de medidas de campo. A Eq. (5) representa todos os mecanismos agrônômicos e de engenharia para aumentar WUE (WALLACE; BATCHELOR, 1997). Estes são: (i) aumentar o índice de colheita através do melhoramento genético da cultura ou do manejo; (ii) reduzir a taxa de transpiração pela seleção de espécies melhoradas, seleção de variedades, ou melhoramento de plantas; (iii) maximizar a produção de matéria seca pela melhoria da fertilidade do solo, controle de doenças e pragas e otimização de plantio; (iv) aumentar o componente T (transpiração) do balanço hídrico à custa da redução de outros componentes. O componente (iv) significa aumentar T pela redução de E, através do uso de resíduos na superfície do solo, cultivo mínimo do solo, cobertura superficial da superfície do solo, irrigação por sulcos alternados nas entrelinhas de plantio ou utilizar irrigação localizada; reduzir D, evitando o molhamento excessivo da zona das raízes e minimizando a necessidade de lixiviação para o controle da salinidade; reduzir o escoamento superficial utilizando resíduos de colheita e técnicas de conservação do solo e evitar a compactação do solo e a formação de crostas superficiais; impor gradualmente deficits hídricos no solo; utilizar variedades com sistemas radiculares mais profundos. Embora ambos os elementos (i) e (ii) são biologicamente controlados e de difícil manipulação, podem existir no campo algumas variabilidades que podem ser controladas. O elemento (iii) é o foco da pesquisa atual de agricultura de precisão para melhorar os rendimentos relativos dos insumos, aplicando-os no tempo e no local necessário. O elemento (iv) é a base de quase todas as tecnologias de conservação de água, para melhorar a captação das chuvas e as tecnologias de irrigação para evitar ou minimizar as perdas na aplicação.

$$WUE = \frac{(HI \cdot DM)}{\left\{ T(1 + WC) \left[1 + \frac{E}{(PE + IR + \Delta S - D - R - E)} \right] \right\}} \quad (5)$$

em que: HI - índice de colheita (kg de produção econômica seca por kg de matéria seca); DM - massa de matéria seca na parte aérea ou total, incluindo raízes, por unidade de área (deve ser a mesma utilizada para calcular HI), kg ha⁻¹; T - transpiração, mm; WC - conteúdo de água padrão contido no produto, usado para expressar a produção econômica (uma fração à base de massa úmida - 0,13 a 0,14 para cereais); PE - precipitação efetiva, mm; IR - quantidade de irrigação, mm; ΔS - depleção de água no solo (é negativo se houver acréscimo de água no solo), mm; D - drenagem abaixo da zona radicular (é negativo para ascensão capilar), mm; R - escoamento superficial (é negativo quando representar entrada na área), mm; E - evaporação, mm.

A Eq. (5) ilustra os problemas comuns encontrados para avaliar WUE com exatidão a partir de medições de campo. PE e IR podem contribuir com o escoamento superficial (R); estimativas de precipitação efetiva (PE) são difíceis em alguns casos. Da mesma forma, PE e IR podem contribuir com a percolação além da zona das raízes, resultando dificuldades na caracterização de D. A depleção de água no perfil do solo (ΔS) pode ser medida, mas normalmente só pode ser determinada em pontos discretos no campo. A distribuição estocástica de PE no campo é muitas vezes ignorada, da mesma forma que a distribuição de

IR que é conhecida por ser mais previsível, ainda assim é probabilística. Todas essas variações espaciais causam impacto na ET e em ΔS . A fim de obter estimativas confiáveis e reprodutíveis para PE, IR, R, D e ΔS para estimar ET, são necessárias medidas cuidadosas em parcelas em nível. Estas técnicas, utilizadas em experimentos, podem ser impraticáveis em muitas situações de campo.

Na prática diária de irrigação, a produtividade da água (WFP) é um termo mais relevante que WUE cujo significado depende da aplicação. Nos sistemas de produção agrícola, a WFP é usada para definir a relação entre produção comercial das culturas e a quantidade de água consumida nessa produção (ET), e tem servido como um indicador para quantificar o impacto dos calendários de irrigação com relação ao manejo da água. Dessa forma, a produção total de biomassa (matéria seca) é transformada em produção comercial da cultura (VAZIFEDOUST *et al.*, 2008; PERRY *et al.*, 2009) e define-se WFP com respeito à ET (WFP_{ET}), conforme Eq. (6). A WFP_{ET} constitui a chave para avaliação das estratégias de irrigação com *deficit* (GEERTS; RAES, 2009).

$$WFP_{ET} = \frac{\text{Rendimento comercial da cultura (kg)}}{\text{Evapotranspiração da cultura (m}^3\text{)}} \quad (6)$$

Na escala de campo, o uso de água representado no denominador da Eq. (6) é difícil de ser determinado com precisão. Assim, em algumas situações, outros substitutos para WFP são usados por muitos profissionais de irrigação e, como consequência, resultam diferentes valores. Se a quantidade total de água aplicada [irrigação (IR) + precipitação efetiva (PE)] é considerada como água consumida pela cultura, então a Eq. (6) pode ser usada para determinar a produtividade física da água (WFP_{IR+PE}). O denominador da Eq. (6) é um substituto do uso de água para se obter o rendimento comercial correspondente. Sob condições de muito baixa precipitação, como em regiões áridas e semiáridas, pode-se converter WFP_{IR+PE} em WFP_{IR} [Eq.(7)]. Nesse caso, negligencia-se a variação do armazenamento de água no solo durante o ciclo da cultura, a percolação, a ascensão capilar e o escoamento superficial. Muitos profissionais usam as Equações (7) e (8) com a finalidade de identificar diferenças entre os métodos de irrigação e manejo da irrigação.

$$WFP_{IR+PE} = \frac{\text{Rendimento comercial da cultura (kg)}}{\text{Volume de irrigação + precipitação (m}^3\text{)}} \quad (7)$$

$$WFP_{IR} = \frac{\text{Rendimento comercial da cultura (kg)}}{\text{Volume de irrigação (m}^3\text{)}} \quad (8)$$

Observa-se relativo consenso sobre o numerador de WFP ser o rendimento comercial. A biomassa total seca ou fresca ou produto colhido pode ser usado no numerador, expresso em termos físicos ou econômicos. No entanto, como os valores econômicos de diferentes produtos agrícolas não são os mesmos, a produtividade da água deve ser definida economicamente (HEYDARI, 2014). Por outro lado, algumas culturas são de base úmida, outras de base seca, algumas culturas como alfafa e milho podem ser reportadas em ambas as bases e para outras o produto final é mais importante (por exemplo, cana-de-açúcar, beterraba açucareira, arroz em casca, etc.). Já a definição e os componentes do denominador diferem entre os autores. Alguns consideram apenas a água transpirada pela cultura (BOUMAN, 2007), mas a maioria inclui tanto a água evaporada do solo quanto a transpirada pela cultura. Pereira *et al.* (2012) sugeriram o uso do volume total de água envolvido na produção, isto é, além da ET somam-se a fração de lixiviação, quando houver risco de sal na zona radicular, e o uso não benéfico de água, ou seja, a água que é percolada, escoada do local de cultivo e derivada pelo vento quando a irrigação é por aspersão (isto é, volume total de água aplicada).

O conceito de produtividade da água pode se referir à produção física ou ao seu valor econômico (RODRIGUES; PEREIRA, 2009; HEYDARI, 2014). Um termo adequado para o último

é a produtividade econômica da água (WEP), que se refere à razão entre produtos e insumos em termos monetários. Para culturas com baixos custos de investimento, por exemplo cereais, a produtividade econômica bruta da água de irrigação (WEPB_{IR}), que considera a margem bruta (receita bruta menos os custos variáveis) é aceitável [Eq. (9)] (FERNÁNDEZ *et al.*, 2020):

$$WEPB_{IR} = \frac{\text{Margem bruta } (\$ \text{ ha}^{-1})}{\text{Volume de irrigação } (\text{m}^3 \text{ ha}^{-1})} \quad (9)$$

em que o denominador representa apenas o uso da água aplicada por irrigação.

No caso de culturas lenhosas e outras culturas que requerem substancial investimento desde o início, a produtividade econômica líquida da água (WEPL_{IR}) é um indicador mais adequado (FERNÁNDEZ *et al.*, 2020), pois considera a margem líquida em vez da margem bruta, ou seja, inclui os custos variáveis e os fixos [Eq. (10)]:

$$WEPL_{IR} = \frac{\text{Margem líquida } (\$ \text{ ha}^{-1})}{\text{Volume de irrigação } (\text{m}^3 \text{ ha}^{-1})} \quad (10)$$

Ainda assim, nem WEPB_{IR} nem WEPL_{IR} consideram os custos de oportunidade, definidos como os benefícios perdidos ao longo da vida útil da cultura a uma determinada taxa de juros. Uma análise econômica adequada deve considerar os custos de oportunidade. Portanto, a produtividade econômica da água total (WEP_{IR+PE}), definida pela Eq. (11) é recomendada:

$$EP_{IR+PE} = \frac{\text{lucro } (\$ \text{ ha}^{-1})}{\text{Volume de irrigação} + \text{PE } (\text{m}^3 \text{ ha}^{-1})} \quad (11)$$

Se apenas o volume de irrigação for considerado no denominador, tem-se a produtividade econômica da água de irrigação (WEP_{IR}).

O lucro no numerador da Eq. (11), é definido como a receita bruta menos a soma dos custos fixos, variáveis e de oportunidade. Então WEP_{IR+PE} e WEP_{IR} são adequados para tomar decisões sobre o manejo da irrigação de culturas lenhosas (FERNÁNDEZ *et al.*, 2020). Ressalta-se que o tempo de vida da cultura afeta o valor WEP resultante, devido ao seu impacto nos custos fixos e de oportunidade. Isso é particularmente relevante para pomares de árvores frutíferas. Tanto WEP_{IR+PE} quanto WEP_{IR} são particularmente úteis para irrigantes que precisam tomar decisões sobre como gerenciar a irrigação da maneira mais lucrativa, ou seja, quando a meta de produção é aumentar a lucratividade e não a produtividade física da água. Entretanto, um cálculo preciso do WEP_{IR+PE} e WEP_{IR} não pode ser feito antes do final da colheita, quando a receita e os custos ainda não são conhecidos. A receita é dada pelo rendimento e pelo valor de mercado e, para o cálculo dos custos totais, devem ser conhecidos os custos fixos, variáveis e de oportunidade (ALCON *et al.*, 2013). Isso limita a utilização de WEP_{IR+PE} e WEP_{IR} para a tomada de decisão na irrigação, uma vez que a avaliação econômica deve ser feita antes do início da temporada de irrigação. O desafio é maior quando o valor do rendimento depende da qualidade do produto, e quando o preço de alguns insumos, como energia, fertilizantes e defensivos, varia de uma temporada para outra e mesmo durante o período de crescimento.

15.6 Fatores que afetam a produtividade da água

Os fatores que influenciam o rendimento das culturas (numerador das equações de WFP) e a água aplicada (denominador das equações de WFP) afetam a produtividade da água, e podem ser agrupados em diferentes categorias (ALI; TALUKDER, 2008; WALLACE; BATCHELOR, 1997).

Cultivar: as plantas perdem grande quantidade de água quando abrem seus estômatos para capturar CO₂ do ar não saturado. Através da cavidade sub-estomática o vapor

difunde para a atmosfera, enquanto que o CO₂ segue caminho oposto. A modelagem matemática destes dois processos opostos de difusão, mostra que WFP é uma função que depende fortemente dos gradientes de concentração de CO₂ e de vapor d'água entre o exterior e o interior da folha (ALI *et al.*, 2007). Estes dois fluxos opostos são regulados por estômatos. Portanto, o comportamento estomático irá determinar a WFP de uma determinada espécie ou cultivar. É sabido que as plantas C₄ têm maior WFP que plantas C₃. Dentro das plantas C₃, muitos relatos têm mostrado que genótipos podem ser selecionados para maior WFP, de acordo com a discriminação isotópica do carbono, em função do gradiente de concentração de CO₂ entre o interior e o exterior da folha.

Irrigação: muitas formas de conservação de água têm sido investigadas na agricultura irrigada. A irrigação com *deficit* e a irrigação por gotejamento têm mostrado que podem aumentar WFP em escala de campo (ALI *et al.*, 2007; JALOTA *et al.*, 2006; FERERES; SORIANO, 2007; GEERTS; RAES, 2009). Em geral, o manejo da irrigação com *deficit* estabelece uma relação de troca: menor produção para maior WFP. Então surge a pergunta se é possível aumentar WFP sem redução significativa de produtividade. Existem exemplos onde a produção de grãos, com grande proporção da biomassa total, mostra uma relação parabólica com retornos decrescentes em função do aumento da quantidade de irrigação. Isto sugere que, quando a quantidade de água aplicada é grande, o crescimento vegetativo excessivo pode levar a uma menor atividade de raízes, estrutura do dossel pouco saudável e um menor índice de colheita (razão entre a produção econômica e a fitomassa seca da parte aérea, ou total). Isso significa que a elevada produção de biomassa, decorrentes de um excesso de água, não levará a um alto valor de WFP, definida como a produção econômica por unidade de volume de água aplicada.

O objetivo é aumentar WFP através do aumento do rendimento econômico, pela limitação do fornecimento de água para aumentar o índice de colheita. Pesquisas do início dos anos 2000 têm mostrado que em algumas condições, a produção econômica de grãos pode ser melhorada reduzindo a quantidade de água aplicada à cultura (YANG *et al.*, 2000, 2001, 2002; FRIZZONE, 2004), principalmente através do aumento do índice de colheita que tem se mostrado componente chave para melhorar a WFP (EHDAIE; WAINES, 1993). Sob condições de *deficit* gradual e crescente, as culturas apresentam maiores taxas fotossintéticas do que sob condições de deficits severos e rápidos. No primeiro caso, a regulação osmótica aumenta até certo ponto, enquanto no segundo permanece constante (ALI; TALUKDER, 2008). No *deficit* gradual o ajustamento osmótico permite o crescimento e a manutenção da fotossíntese, e a adaptação estomática (VAZIFEDOUST *et al.*, 2008).

Quanto ao método de irrigação, há muitas razões para melhorar a tecnologia de irrigação. Na escala de campo, o potencial para aumento da proporção de água disponível na entrada da parcela que contribui com a transpiração da cultura é a fonte mais provável de aumento das receitas. Várias questões devem ser analisadas em cada situação para avaliar o impacto mais amplo de aumentar a transpiração. O aumento ou redução da evaporação é altamente dependente do método de irrigação, do manejo e da cultura. Por exemplo, com irrigação por gotejamento subsuperficial a evaporação é minimizada. Já para muitas culturas arbóreas, a irrigação por gotejamento superficial pode aumentar a evaporação porque parte da superfície do solo está molhada com bastante frequência. As diferenças específicas dependem da frequência relativa de irrigação e da fração de área de solo molhado.

Há décadas de experiência com quase todas as tecnologias de irrigação disponíveis. No entanto, as surpresas constituem regra mais do que exceção, quando se aplica pela primeira vez uma nova tecnologia. Tecnologias aparentemente promissoras, simplesmente não são apropriadas. Embora seja desejável que a irrigação melhore a produção no campo, por muitas razões (ambiental, qualidade de colheita, produtividade das culturas, consumo de

energia, etc.), é difícil encontrar a combinação mais adequada de modernização sustentável entre equipamento e manejo da irrigação para um local.

Fatores referentes ao solo: a perda de água por evaporação da superfície do solo tem papel importante no crescimento das plantas durante a germinação e estabelecimento de plântulas e, também, durante outros períodos de crescimento (PERRY *et al.*, 2009). A textura do solo e o teor de matéria orgânica determinam a capacidade de armazenamento de água do solo e as propriedades de disponibilidade. A rápida secagem do solo não proporciona oportunidade para regulação e ajustamento osmótico e, portanto, afeta a produção das culturas e a WFP. O estado nutricional da cultura jovem, especialmente quanto ao nitrogênio, pode afetar significativamente a taxa de desenvolvimento da área foliar e, conseqüentemente, a evaporação do solo. A matéria orgânica no solo interage com outros nutrientes e aumenta a atividade microbiana.

Fatores agronômicos: fatores agronômicos que afetam a WFP são época de semeadura, uniformidade de estabelecimento da cultura, utilização de herbicidas e o padrão do cultivo anterior. A WFP depende não só da forma como a cultura é manejada durante seu ciclo, mas também de como é ajustada ao manejo da fazenda, tanto no espaço quanto no tempo (WALLACE; BATCHELOR, 1997; ALI *et al.*, 2005).

Através de um melhor ajuste no tempo das fases de desenvolvimento vegetativo e de floração, pode-se garantir a época ideal de colheita e obter vantagens do clima para programar o plantio da próxima safra, facilitando bom estabelecimento da cultura. Qualquer técnica que facilita o desenvolvimento e permite uma rápida cobertura da superfície do solo pela cultura, reduzindo o estabelecimento de ervas daninhas, e que permita reduzir a velocidade do vento pode, na maioria das vezes, aumentar a competitividade da cultura e a WFP (COOPER; GREGORY, 1987). Entre as práticas que contribuem especialmente para esses fatores estão a semeadura precoce, a seleção de variedades com crescimento precoce, adubação adequada, população de plantas adequada e redução do espaçamento (GREGORY, 1991).

Dentro do conceito de melhoria da WFP, a água transpirada pelas plantas deve aumentar em relação à evaporação da superfície do solo (PERRY *et al.*, 2009). O manejo do solo e da palha pode influenciar o balanço de água no solo, afetando a infiltração, o armazenamento e as perdas de água por evaporação da superfície do solo. Esses efeitos combinados podem afetar a quantidade de água disponível para a cultura. O escoamento superficial pode ser bastante reduzido por uma boa cobertura de palha. A cobertura da superfície do solo com palha e matéria orgânica impacta a resposta das plantas em termos de aumento do crescimento e da produção, e oferece oportunidades para melhorar a WFP. O encrostamento da superfície de solos com estruturas deficientes, profundidade de semeadura irregular e uso de sementes de má qualidade podem levar a grandes falhas na cobertura vegetal.

Fatores de engenharia: uma importante restrição ao uso eficiente da água está associada com sua medida e quantificação. Medições e registros de dados de vazão, pressão do sistema, variáveis de clima são raros e com erros potenciais. A determinação correta da quantidade de água requerida pela cultura em períodos específicos do seu desenvolvimento é difícil, se não impossível, para muitos irrigantes. Sem a previsão da quantidade de irrigação definida como objetivo, é improvável que os agricultores apliquem a quantidade de água necessária (BURTON *et al.*, 1999). Dado o número e a natureza das variáveis que necessitam ser conhecidas (umidade do solo na capacidade de campo, conteúdo de água no solo em um dado momento, profundidade das raízes, vazão disponível, vazão aplicada, etc.) não é surpreendente que a eficiência de aplicação e a WFP para a maioria dos sistemas de irrigação sejam relativamente baixos - como poderia ser diferente?

Fatores humanos: fatores humanos influenciam o uso da água de irrigação na agricultura. Hábitos, preferências, tradições e nível de aversão ao risco são alguns elementos

importantes. Em geral, existe certo grau de desconfiança quanto às inovações tecnológicas e as tecnologias já utilizadas são mantidas, e suas inconveniências são tacitamente aceitas. O nível educacional do agricultor pode influenciar decisivamente no sucesso da irrigação. Agricultores de melhor formação tecnológica podem contribuir com o uso eficiente da água e superar as expectativas de desempenho dos sistemas de irrigação. Ao contrário, mesmo os sistemas de elevado nível tecnológico podem não corresponder às expectativas quando os agricultores não assimilam princípios básicos da operação desses sistemas.

Aversão ao risco é o comportamento normal de qualquer indivíduo. Embora os agricultores não usem o rigor das análises econômicas para tomarem decisão sobre a quantidade de irrigação, muitas vezes são capazes de desenvolver estratégias intuitivas para se protegerem do risco. Essas estratégias frequentemente estão relacionadas com o aumento da quantidade de irrigação aplicada (FRIZZONE, 2004). Tem-se observado que maiores riscos econômicos ocorrem para menores quantidades de água aplicada (irrigação com *deficit*) para um grande número de culturas. Neste caso, uma decisão racional do agricultor não escolheria livremente a irrigação com *deficit*, pois menores riscos estão associados à aplicação de maiores lâminas de água.

Fatores econômicos: fatores econômicos podem influenciar o nível ótimo de WFP. Às vezes, grandes custos adicionais são envolvidos no aumento da WFP, por exemplo, o investimento em sistemas de aspersão de alta tecnologia, gotejamento e microaspersão. Devem estar incluídos aqui os custos fixos e operacionais envolvidos em uma possível mudança de sistema de irrigação. Os benefícios incluem a água economizada mais o aumento da produção agrícola (se houver). O revestimento de canais de irrigação também envolve uma quantidade considerável de custo fixo, que muitas vezes não pode ser suportado pelos agricultores. A adaptabilidade de qualquer padrão de cultivo depende da sua rentabilidade, pois, os agricultores respondem às regras do mercado buscando o maior retorno por unidade de terra (quando a terra é restrita) ou por unidade de volume de água aplicado (quando a água é restrita) (FRIZZONE, 2004).

15.7 Técnicas para aumentar a produtividade da água

Há uma ampla gama de opções disponíveis para melhorar a eficiência da irrigação na escala de campo (WALLACE; BATCHELOR, 1997; PASSIOURA, 2006; ALI; TALUKDER, 2008). O manejo deficiente da irrigação é citado como a causa mais frequente do uso ineficiente da água em projetos de irrigação. Poucas das opções listadas abaixo resultarão aumento significativo na eficiência se a gestão da irrigação for de baixo padrão. As tentativas de melhorar a eficiência da irrigação e a WFP que são centradas unicamente em uma solução tecnológica, agrônômica ou institucional raramente são bem-sucedidas.

Agrônômicas: (i) adotar sistema de cultivo que possibilita melhor aproveitamento da precipitação ou reduz a evaporação - uso de resíduos de culturas na superfície do solo; escarificação profunda ou subsolagem para melhorar a infiltração da água; usar técnicas de conservação de solo e água; reduzir o espaçamento entre plantas para promover rápida cobertura do solo e reduzir a evaporação, (ii). adotar sistema de rotação de culturas e selecionar sequência de cultivos para reduzir a infestação de pragas, doenças e plantas daninhas, (iii) introduzir variedades de maior rendimento, (iv) adotar estratégias de cultivo que maximizam a área cultivada durante os períodos de baixo potencial de evaporação e períodos de alta pluviosidade, (v) melhorar a fertilidade do solo - solos com boa fertilidade propiciam maior desenvolvimento do sistema radicular, resultando melhor aproveitamento da água e, conseqüentemente, maior WFP (o manejo do nitrogênio é um dos principais fatores para atingir maior produtividade das culturas e atingir maior WFP em condições de *deficit* hídrico); aplicação de matéria orgânica no solo e uso de adubação verde (o cultivo e a incorporação de algumas leguminosas ao solo melhora a estrutura e aumenta a capacidade

de armazenar água e nutrientes), (vi) melhoramento genético - selecionar genótipos que respondem à irrigação para aumenta a WFP, que proporcionam alto índice de colheita e que tenham alta eficiência de transpiração (reduzir a transpiração sem prejuízo da fotossíntese), e (vii) usar estratégias avançadas de cultivo que maximizam a área cultivada durante os períodos de menor demanda de água ou quando a chuva apresentar maior probabilidade de ocorrência.

Engenharia: (i) melhorar a uniformidade de distribuição da água de irrigação, (ii) usar estruturas para conter e armazenar água de chuva, (iii) usar programas de conservação, manutenção e reparos dos sistemas de irrigação e das estruturas hidráulicas para reduzir riscos de falhas e perdas de água, (iv) na irrigação por sulcos, utilizar aplicação de água com vazão intermitente, (v) utilizar sistema de reúso da água escoada no final das parcelas de sistemas de irrigação por superfície, (vi) projetar sistemas de tratamento e reúso de águas servidas na fazenda, (vii) modernizar e otimizar os sistemas de irrigação (os aspectos técnicos de modernização incluem manejo da água, sistema de funcionamento e melhoria das estruturas e dos equipamentos), e (viii) utilizar técnicas de irrigação que reduzam a fração de área molhada.

Manejo: (i) promover irrigações com deficits pequenos a moderados para possibilitar a extração de águas pelas plantas em camadas mais profundas do solo, (ii) adotar sistemas de programação da irrigação baseados na demanda da cultura, via monitoramento da água no solo ou por monitoramento da evapotranspiração, (iii) realizar irrigações em horários de menor intensidades de radiação solar e de baixa velocidade dos ventos para reduzir perdas por evaporação e deriva, ou utilizar quebra-ventos para reduzir o efeito dos ventos, (iv) realizar irrigações pela manhã, nos horários em que os estômatos das plantas estão abertos, para aumentar o tempo de oportunidade de aproveitamento da água pelas plantas e reduzir a oportunidade de percolação profunda, especialmente em solos arenosos, (v) minimizar a salinidade na zona radicular das culturas, e (vi) melhorar o uso e a gestão de águas salinas e residuais.

Institucionais: (i) introdução de sistema de tarifação de água e estruturas legais para fornecer incentivos para o uso eficiente da água e penalidades para o uso ineficiente, (ii) introdução da gestão integrada da água na bacia, (iii) fomentar a educação e a formação do usuário para aprender técnicas modernas de irrigação e (iv) estimular a assistência técnica e a difusão de conhecimentos.

Econômicos: (i) em regiões onde a precipitação é significativa, utilizar sistemas de irrigação de menor investimento inicial, (ii) realocar água de cultivos de menor valor econômico para cultivos de maior valor econômico, e (iii) quando a disponibilidade de terra é restrita e a água é relativamente irrestrita, utilizar irrigação para maximizar a renda por unidade de área e, quando a água é restrita e a terra é relativamente irrestrita, irrigar para maximizar a renda por unidade de volume de água.

15.8 Considerações finais

A escassez e a competição por água são questões de crescente preocupação, assim como a escassez potencial de alimentos. Essas questões se cruzam tanto no setor agrícola quanto em todos os setores que usam água. A irrigação é de longe o maior usuário de água na maioria dos países com escassez de água, e está sob pressão para reduzir o uso (para liberar água para outros setores, incluindo o meio ambiente) e utilizar a água de forma mais produtiva para atender às demandas de alimentos e fibras. A terminologia para tal análise deve ser inequívoca entre os setores para que as intervenções e seus impactos sejam devidamente compreendidos. Para o setor de irrigação, essa terminologia é apresentada, com base em publicações atuais. Implicações para uma melhor compreensão das oportunidades para aumentar a produtividade física da água foram revisadas e discutidas, demonstrando a necessidade de uma contabilidade precisa da água. A busca por alto valor para a produtividade

física da água é um desafio importante para regiões com escassez hídrica. No entanto, existem ambiguidades nas terminologias e definições, especialmente quando são usadas para debates, visando planejamento e tomada de decisão em irrigação.

O termo “aumentar a produtividade da água” implica como se pode melhorar de forma eficaz o resultado ou o rendimento de uma cultura com a água atualmente em uso, ou com menos água. A resposta é dada em três níveis: (i) transpirar a maior parte da água fornecida, minimizando a evaporação, (ii) trocar água transpirada por CO₂ mais eficientemente na produção de biomassa, e (iii) converter a maior parte da biomassa em produção econômica. Muitas tecnologias para melhorar a produtividade da água e o manejo dos recursos hídricos escassos estão disponíveis. Entre as técnicas mais promissoras e eficientes estão a irrigação com *deficit* para otimizar a produtividade física da água, e o aproveitamento de água para melhorar o rendimento agrícola em ambiente seco. No entanto, a melhoria da produtividade da água exige que se explore não só o manejo da água, como também de outros fatores, como uso de cultivares melhorados, manejo da fertilidade do solo e práticas culturais que influenciam na produtividade.

Referências

- ALCON, F.; EGEEA, G.; NORTES, P.A. Financial feasibility of implementing regulated and sustained deficit irrigation in almond orchards. **Irrigation Science**, v.31, p.931-941, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0369-6>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- ALI, M.H.; HASSANUZZAMAN, M.; BHUIYA, S.H.; KHANAM, F. Evaluation of agro-climatic condition for rice cultivation in different regions of Bangladesh. **Bangladesh Journal of Environmental Science**, v.11, n.1, p.16-21, 2005.
- ALI, M.H.; HOQUE, M.R.; HASSAN, A.A.; KHAIR, A. Effects of deficit irrigation on yield, water productivity, and economic returns of wheat. **Agricultural Water Management**, v.92, p.151-161, 2007.
- ALI, M.H.; TALUKDER, M.S.U. Increasing water productivity in crop production – A synthesis. **Agricultural Water Management**, v.95, p.1201-1213, 2008.
- ARTHINGTON, A.H.; BHADURI, A.; BUNN, S.E.; JACKSON, S.E.; THARME, R.E.; TICKNER, D.; YOUNG, B.; ACREMAN, M.; BAKER, N.; CAPON, S.; HORNE, A.C.; KENDY, E.; MCCLAIN, M.E.; POFF, N.L.; RICHTER, B.D.; WARD, S. The Brisbane declaration and global action agenda on environmental flows. **Frontiers Environmental Science**, v.6; n.45, p.2-15, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- BLATCHFORD, M.L.; KARIMI, P.; BASTIAANSEN, W.M.G.; NOURI, H. From global goals to local gains - a framework for crop water productivity. **International Journal of Geo-Information**, v.7, n.414, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi7110414>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- BOUMAN, B.A.M. A conceptual framework for the improvement of crop water productivity at different spatial scales. **Agricultural Systems**, v.93, n.1-3, p.43-60, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2006.04.004>. Acesso em: 29 mar. 021.
- BURT, C.M.; CLEMMENS, A.J.; STRELKOFF, T.S.; SOLOMON, K.H.; BLIESNER, R.D.; HARDY, L.A.; HOWELL, T.A.; EISENHAUER, D.E. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.123, n.6, p.423- 442, 1997.
- BURTON, M.A.; KIVUMBI, D.; EL-ASKARI, K. Opportunities and constraints to improving irrigation water management: Foci for research. **Agricultural Water Management**, v.40, n.1, p.37-44, 1999.
- COOPER, P.J.M.; GREGORY, P.J. Soil water management in the rainfed farming systems of the Mediterranean region. **Soil Use Management**, v.3, p.57-62, 1987.
- COSGROVE, W.J.; LOUCKS, D.P. Water management: current and future challenges and research directions. **Water Resource Research**, v.51, p.4823-4839, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2014WR016869>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- DEGHANIPOU, A.H.; SCHOUPS, G.; ZAHABIYOUN, B.; BABAZADEH, H. Meeting agricultural and environmental water demand in endorheic irrigated river basins: A simulation-optimization approach

- applied to the Urmia Lake basin in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 241, 106353, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.10>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- DUNN, S.M.; STALHAM, M.; CHALMERS, N.; CRABTREE, B. Adjusting irrigation abstraction to minimise the impact on stream flow in the east of Scotland. **Journal of Environment Management**, v.68, n.1, p.95–107, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(03\)00006-9](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(03)00006-9). Acesso em: 29 mar. 2021.
- EHDAIE, B.; WAINES, J.G. Variation in water-use efficiency and its components in wheat. I. Well-watered pot experiment. **Crop Science**, v.33, p.294–299, 1993.
- ENGLISH, M.J. Deficit irrigation. I: Analytical framework. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.116, n.3, p.399-412, 1990.
- EXPÓSITO, A.; BERBEL, J. Microeconomics of deficit irrigation and subjective water response function for intensive olive groves. **Water**, v.8, n.254, p.1-10, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w8060254>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- FERERES, E.; SORIANO, A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.2, p.147–159, 2007. DOI 10.1093/jxb/erl165.
- FERNÁNDEZ, J.E.; ALCON, F.; DIAZ-ESPEJO, A.; HERNADEZ-SANTANA, V.; CUEVAS, M.V. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. **Agricultural Water Management**, v.237, n.106074, 2020. DOI 10.1016/j.agwat.2020.106074.
- FRIZZONE, J.A. Otimização do uso da água na agricultura irrigada: Perspectivas e desafios. **Engenharia Rural**, v.15, n.1, p.37-56, 2004.
- GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dray areas. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1275 - 1284, 2009.
- GRAFTON, R.Q.; WILLIAMS, C.J.; PERRY, C.J.; MOLLE, F.; RINGLER, C.; STEDUTO, P.; UDALL, B.; WHEELER, S.A.; WANG, Y.; GARRICK, D.; ALLEN, R.G. The paradox of irrigation efficiency. **Science**, v.361, n.6404, p.748- 750, 2018.
- GREGORY, P.J. Concepts of Water-Use Efficiency. In: HARRIS, H.C.; COOPER, P.J.M.; PALA, M. (Ed.). Soil and Crop Management for Improved Water-use Efficiency in Rainfed Areas. **ICARDA**, Aleppo, p.9-20, 1991.
- HELLEGERS, P.J.G.J.; SOPPE, R.; PERRY, C.J.; BASTIAANSEN, W.G.M. Remote sensing and economic indicators for supporting water resources management decisions. **Water Resource Management**, v.24, p.2419–2436, 2010. DOI 10.1007/s11269-009-9559-2.
- HEYDARI, N. Water productivity in agriculture: challenges in concepts, terms and values. **Irrigation and Drainage**, v.63, n.1; p.22–28, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ird.1816>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- HOWELL, T.A.; CUENCA, R.H; SOLOMON, K.H. Crop yield response. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. (Eds.). Management of Farm Irrigation Systems. St. Joseph. **American Society of Agricultural Engineers**, p.93-122, 1992.
- ISRAELSEN, O.W. **Irrigation principles and practices**, New York: Wiley and Sons, 471p., 1950.
- JÄGERMEYR, J.; PASTOR, A.; BIEMANS, H.; GERTEN, D. Reconciling irrigated food production with environmental flows for Sustainable Development Goals implementation. **Nature Communications**, v.8, n.9, p.1-9, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ncomms15900.15900>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- JALOTA, S.K.; SOOD, A.; CHAHAL, G.B.S.; CHOUDHURY, B.U. Crop water productivity of cotton–wheat system as influenced by deficit irrigation, soil texture and precipitation. **Agricultural Water Management**, v.84, p.137-146, 2006.
- JENSEN, M.E. Impacts of irrigation and drainage on the environment. In: 5th N.D. Gulhati Lecture, The Hague, The Netherlands, French and English, 26 p., 1993.
- JENSEN, M.E. Beyond irrigation efficiency. **Irrigation Science**, v.25, n.4, p.233-245, 2007.

- KIJNE, J.W.; BARKER, R.; MOLDEN, D. (Eds.). Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. Wallingford, UK: CABI; Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). **Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture**, Series 1, 332p. 2003.
- KNOX, J.W.; KAY, M.G.; WEATHERHEAD, E.K. Water regulation, crop production, and agricultural water management—understanding farmer perspectives on irrigation efficiency. **Agricultural Water Management**, v.108, p.3-8, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.06.007>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- KOECH, R.; LANGAT, P. Improving irrigation water use efficiency: A review of advances, challenges and opportunities in the Australian context. **Water**, v.10, 1771p., 2018. DOI 10.3390/w10121771.
- LEVIDOW, L.; ZACCARIA, D.; MAIA, R.; VIVAS, E.; TODOROVIC, M.; SCARDIGNO, A. Improving water-efficient irrigation: prospects and difficulties of innovative practices. **Agricultural Water Management**, v.146, p.84-94, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.012>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- MALANO, H.M.; DAVIDSON, B. A framework for assessing the trade-offs between economic and environmental uses of water in a river basin. **Irrigation and Drainage**, v.58, n.S1, p.S133–S147, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ird.484>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- MANCOSU, N.; SNYDER, R.L.; KYRIAKAKIS, G.; SPANO, D. Water scarcity and future challenges for food production. **Water**, v.7, p.975-992, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w7030975>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- MBAVA, N.; MUTEMA, M.; ZENGENI, R.; SHIMELIS, H.; CHAPLOT, V. Factors affecting crop water use efficiency: A worldwide meta-analysis. **Agricultural Water Management**, v.228, 105878p., 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105878>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- MCNEILL, K.; MACDONALD, K.; SINGH, A.; BINNS, A.D. Food and water security: Analysis of integrated modeling platforms. **Agricultural Water Management**, v.194, p.100 - 112, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.001>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- MESA-JURADO, M.A.; BERBEL, J.; ORGAZ, F. Estimating marginal value of water for irrigated olive grove with the production function method. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.8, n.S2, p.S197-S206, 2010.
- MOLDEN, D.; MURRAY-RUST, H.; SAKTHIVADIVEL, R.; MAKIN, I. A water-productivity framework for understanding and action. In: KIJNE, J.W.; BARKER, R.; MOLDEN, D. (Ed.). **Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement**. Wallingford: IWMI and CABI Publishing. 332p., 2003.
- MOLDEN, D. Accounting for Water Use and Productivity. **SWIM Paper**, IIMI, Colombo, n.1, 1997.
- PANG, A.; SUN, T.; YANG, Z. A framework for determining recommended environmental flows for balancing agricultural and ecosystem water demand. **Hydrological Sciences Journal**, v.59, n.3-4, p.890–903, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.816425>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- PASSIOURA, J. Increasing crop productivity when water is scarce—from breeding to field management. **Agricultural Water Management**, v.80, p.176-196, 2006.
- PEREIRA, L.S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, v.108, p.39–51, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- PERRY, C. Accounting for water use: terminology and implications for saving water and increasing production. **Agricultural Water Management**, v.98, p.1840–1846, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.10.002>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- PERRY, C.; STEDUTO, P.; ALLEN, R.G.; BURT, C.M. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. **Agricultural Water Management**, v.96, p 1517-1524, 2009.

- ROCKSTRÖM, J.; WILLIAMS, J.; DAILY, G.; NOBLE, A.; MATTHEWS, N.; GORDON, L.; WETTERSTRAND, H.; DECLERCK, F.; SHAH, M.; STEDUTO, P.; DE FRAITURE, C.; HATIBU, N.; UNVER, O.; BIRD, J.; SIBANDA, L.; SMITH, J. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. **Ambio**, v.46, n.1, p.4–17, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0793-6>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- RODRIGUES, G.C.; PEREIRA, L.S. Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs. **Biosystems Engineering**, v.103, n.4, p.536–551, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.05.002>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- SIEBERT, S.; DÖLL, P. Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation. **Journal of Hydrology**, v.384, n.3-4, p.198-217, 2010.
- SINCIK, M.; CANDOGAN, B.N.; DEMIRTAS, C.; BUYUCANGAZ, H.; YAZGAN, S.; GOKSOY, A.T. Deficit irrigation of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) in a sub-humid climate. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.194, p.200–205, 2008.
- SISTO, N.P. Environmental flows for rivers and economic compensation for irrigators. **Journal of Environmental Management**, v.90, n.2, p.1236–1240, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.06.005>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- SMAKHTIN, V.U.; SHILPAKAR, R.L.; HUGHES, D.A. Hydrology-based assessment of environmental flows: an example from Nepal. **Hydrological Science Journal**, v.51, n.2, p.207–222, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1623/hysj.51.2.207>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- SOLOMON, K.H.; BURT, C.M. Irrigation Sagacity: a measure of prudent water use. **Irrigation Science**, v.18, n.3, p.135-140, 1999.
- VALIPOUR, M.; AHMADI, M.Z.; RAEINI-SARJAZ, M.; SEFIDKOUHI, M.A.G.; SHAHNAZARI, A.; FAZLOLA, R.; DARZI-NAFTCHALI, A. Agricultural water management in the world during past half century. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v.61, n.5, p.657-678, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.944903>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- VAZIFEDOUST, M.; VAN DAM, J.C.; FEDDES, R.A.; FEIZI, M. Increasing water productivity of irrigated crop under limited water supply at field scale. **Agricultural Water Management**, v.95, n.2, p.89-102, 2008.
- VIETS, F.G. Fertilizers and the efficient use of water. **Advances in Agronomy**, v.14, p.223-264, 1962.
- WALLACE, J.S.; BATCHELOR, C.H. Managing water resources for crop production. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. **B. Biological Science**, v.352, n.1356, p.937-947, 1997.
- XUE, J.; GUI, D.; LEI, J.; SUN, H.; ZENG, F.; FENG, X. A hybrid Bayesian network approach for trade-offs between environmental flows and agricultural water using dynamic discretization. **Advances in Water Resources**, v.110, p.445-458, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.10.022>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- YANG, J.; ZHANG, J.; HUANG, Z.; ZHU, Q.; WANG, L. Remobilization of carbon reserves is improved by controlled soil-drying during grain filling of wheat. **Crop Science**, v.40, p.1645-1655, 2000.
- YANG, J.; ZHANG, J.; LIU, L.; WANG, Z.; ZHU, Q. Carbon remobilization and grain filling in japonica/ indica hybrid Rice subjected to post-anthesis water deficits. **Agronomy Journal**, v.94, p.102-109, 2002.
- YANG, J.; ZHANG, J.; WANG, Z.; ZHU, Q.; WANG, W. Remobilization of carbon reserves in response to water deficit during grain filling of rice. **Field Crop Research**, v.71, p.47-55, 2001.
- YASI, M.; ASHORI, M. Environmental flow contributions from in-basin Rivers and dams for saving Urmia Lake. Iranian Journal of Science and Technology. **Transactions of Civil Engineering**, v.41, p.55-64, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40996-016-0040-1>. Acesso em: 29 mar. 2021.

CAPÍTULO 16

16 EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA NA AGRICULTURA IRRIGADA

Salassier Bernardo, Elias Fernandes de Sousa e Everardo Chartuni Mantovani

Resumo

Na agricultura irrigada, uma maior eficiência no uso da água possibilitará uma melhor utilização dos demais fatores de produção, resultando em maiores produtividades alinhadas com a preservação ambiental. Tendo em vista que qualquer empreendimento somente será viável se seus benefícios econômicos forem maiores do que os custos, torna-se necessário alcançar a maior eficiência possível de uso da água na agricultura irrigada.

16.1 Introdução

Nas regiões onde se investiu em irrigação, ocorreu desenvolvimento econômico, desenvolvimento social, bem como redução da pobreza local, além dos impactos socioeconômicos diretos, como aumento da produtividade, aumento de lucro do produtor e aumento do número de empregos na região.

A prática da irrigação traz benefícios socioeconômicos indiretos ou externalidades socioeconômicas, mas elas só serão positivas se os projetos tiverem sustentabilidade econômica, sustentabilidade social e sustentabilidade ambiental, ou seja, se forem economicamente viáveis, socialmente responsáveis e ambientalmente saudáveis.

O polo de agricultura irrigada em "Juazeiro-Petrolina" é um dos exemplos vitoriosos no país. Na região, tornou-se evidente a importância da agricultura irrigada para ajudar a minorar a crítica situação social e de desigualdade financeira que vivenciamos. Não podemos esquecer que os investimentos para criar empregos são bem menores na agricultura irrigada do que no comércio e na indústria.

Não obstante os grandes benefícios advindos da irrigação sejam incontestes, ela pode causar alguns impactos ambientais, tais como "consumo exagerado da disponibilidade hídrica da região", "contaminação dos recursos hídricos", "modificação do meio ambiente" e "salinização", entre outros, os quais podem ser minimizados com uma maior eficiência de uso da água na agricultura irrigada.

Pode-se afirmar que a salinização é um subproduto da irrigação mal projetada e mal conduzida. Mas quanto maior for a eficiência de uso da água na irrigação, menor será a lâmina de água aplicada. Como consequência disso, menor será a quantidade de sal trazida para a área irrigada, bem como o volume de água drenado e/ou percolado. Outro efeito colateral da irrigação irracional é a possibilidade de contaminação dos rios, córregos e da água subterrânea, os quais podem também ser minimizados com uma maior eficiência de uso da água.

É de grande importância a conscientização da sociedade sobre a urgência de se usar de forma racional os recursos hídricos. O direito de utilização da água inclui também a responsabilidade de a usar de forma adequada, ou seja, com maior eficiência no seu uso. Sendo assim, é de capital importância "pensar", "ensinar" e "praticar" a irrigação com ênfase na sustentabilidade ambiental.

A demanda crescente por água, pelos vários setores da sociedade, associada aos movimentos de conscientização sobre a importância da água e de um meio ambiente menos

poluído, sem dúvida aumentará a pressão para que a agricultura irrigada seja conduzida com maior eficiência de uso da água.

Neste sentido, desenvolveu-se funções de produção objetivando: "otimização física", "otimização econômica", "ponto de equilíbrio", "eficiência de uso da água" e "rendimento por unidade de lâmina aplicada". Explicitaram-se, como demonstração, exemplos de aplicações dessas funções com dados reais.

Para o manejo racional de qualquer projeto de irrigação, alguns aspectos estão inter-relacionados e devem ser considerados. Os aspectos sociais e ecológicos regionais devem ser levados em conta na busca da maximização da produtividade e da eficiência de uso de água. A redução de custos, quer de mão de obra quer de capital, não pode prescindir das adequadas condições de umidade do solo e fitossanitárias para o bom desenvolvimento da cultura. Por outro lado, é possível aumentar a rentabilidade do cultivo devido ao aumento da produtividade ou a incorporação de terras que, sem o uso da irrigação, seriam economicamente inviáveis. E tendo sempre em mente a necessidade de melhorar ou, no mínimo, manter as condições físicas, químicas e biológicas do solo.

Tem-se que considerar, no manejo da irrigação, parâmetros que dependem do tipo de sistema de irrigação e do próprio projeto em si, como: grau de automação; reúso da água que escoar no final da parcela; necessidade de sistematização; medição de vazão; custo e disponibilidade de água e de mão de obra; características da cultura irrigada; e outros. Devem ser abordados juntamente com aqueles parâmetros comuns a todos os sistemas de irrigação, ou seja, quando irrigar; quanto aplicar por irrigação; a uniformidade de aplicação; a eficiência de uso da água; o benefício da irrigação; entre outros.

É importante que, na elaboração e na condução de um projeto de irrigação, não sejam consideradas apenas a captação e a condução de água ou somente a sua aplicação dentro da parcela, mas que se faça a abordagem como uma operação integrada. Deve-se considerar também a equidade na distribuição da água, as práticas culturais, a retirada do excesso de água da área irrigada e a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera. Caso essa integração não seja considerada, quer por falta de conhecimento, quer por falta de planejamento, a eficiência do projeto e sua vida útil serão muito prejudicadas.

Infelizmente, é muito comum, no desenvolvimento dos projetos públicos de irrigação, tratar isoladamente as seguintes etapas: "estudo de viabilidade", "planejamento", "dimensionamento" e "construção". E, para complicar ainda mais, não consideram os aspectos relacionados à operação e manutenção dos projetos depois de concluídos. Não se pode esquecer de que um sistema de irrigação é um processo dinâmico e de que essas etapas não podem ser tratadas isoladamente, mas como um todo, juntamente com os aspectos de agroengenharia, os sociais e os de impacto ambiental.

Na agricultura irrigada, o fator água otimizado possibilitará, sem maiores riscos, melhorar a utilização dos demais fatores de produção. Por consequência, uma maior produtividade será obtida com uma melhor combinação dos insumos empregados, sempre partindo do fato de que água é um bem nobre, com disponibilidade cada vez mais limitada e de uso múltiplo.

Atualmente, no mundo globalizado, há escassez de água de boa qualidade e de energia juntamente com uma crescente demanda de alimentos. Esse fato acarreta aumento dos custos da produção agrícola, pois congrega o aumento da demanda com a redução de oferta de insumos. Não se pode esquecer que qualquer empreendimento somente será economicamente viável se seus benefícios econômicos forem maiores do que os custos. Por isso, tem-se que, com urgência, melhorar a eficiência de uso da água na agricultura irrigada.

Os projetos públicos de irrigação na região nordeste brasileira foram as bases para a implantação dos atuais projetos privados e, como consequência, fundamentais para a geração

de empregos diretos e indiretos. Foi a ação governamental de menor custo e mais efetiva para a inclusão social na região, ajudando a reduzir a pobreza e a migração para a periferia das grandes cidades.

Têm-se à disposição bons conhecimentos técnicos para “dimensionar” e boas práticas para “implantar” sistemas de irrigação. Estas atividades podem ser consideradas as partes mais fáceis do projeto. Em projetos públicos, sem a menor dúvida, as mais difíceis de serem realizadas são: a seleção e a locação de colonos nos assentamentos; a seleção de produtores empreendedores para os projetos maiores (de modo a evitar os aventureiros) e o estabelecimento da corrente de comercialização de modo a dar viabilidade e sustentabilidade aos projetos de irrigação.

16.2 Meio ambiente

Existem muitas evidências no mundo de que, após os benefícios iniciais da irrigação, grandes áreas têm-se tornado impróprias à agricultura. Devido à condução inadequada da irrigação, tem-se produzido impactos ambientais adversos ao solo, à disponibilidade e à qualidade da água, à fauna, à flora e, em alguns casos, às condições socioeconômicas da população local.

Em geral, os grandes projetos de irrigação incluem barragens, lagos, unidades de bombeamento, canais e tubulações, sistema de distribuição d'água nas parcelas e sistema de drenagem. Assim, para analisar os efeitos da irrigação sobre o meio ambiente, devem ser considerados os diversos tipos de impactos ambientais inerentes aos projetos de irrigação, ou seja, impactos ambientais nas áreas inundadas, impactos ambientais à jusante das barragens e impactos ambientais da irrigação propriamente dita.

Quanto aos aspectos ecológicos, não são benéficas ao desenvolvimento sustentado da irrigação as posturas de desconsideração ou de supervalorização do impacto ambiental advindo da irrigação. Deve-se envidar esforços no sentido de obter dados confiáveis que permitam quantificar, com precisão, a magnitude do impacto ambiental ocasionado pela irrigação, de modo a serem considerados na implementação e no manejo dos projetos. Tal procedimento possibilitará um crescimento sustentável da irrigação no Brasil, evitando assim um crescimento baseado exclusivamente em benefícios financeiros de curto prazo, sem considerar os problemas relacionados ao meio ambiente.

A modificação do meio ambiente está historicamente mais associada ao aproveitamento das várzeas alagadas para o uso de sistemas de irrigação por superfície, notadamente por inundação ou sulco. A drenagem de grandes áreas contínuas e seu cultivo intensivo tem causado distúrbios às condições naturais da área, eliminando a vegetação nativa e, como consequência imediata, alterando a microflora e fauna regional, a produção de peixes, a população de insetos e as condições de erosão e sedimentação na bacia hidrográfica. Isso não impede o aproveitamento das várzeas de maneira racional, deixando um percentual da área em condições naturais a fim de manter o ecossistema que servirá de refúgio e local de reprodução da fauna.

Sem dúvida, um dos principais instrumentos para mitigação do impacto ambiental provocado pela irrigação será uma política intensiva de melhoria no manejo da irrigação. Política esta que exige mais estudos, mais pesquisas e mais ações extensionistas sobre o manejo da irrigação, passíveis tanto de premiação quanto de fiscalização. O Governo não pode prescindir de ações fiscalizadoras e até repressivas, quando necessárias, pois água de boa qualidade torna-se, cada dia mais, um bem muito escasso.

Não se pode concordar com aqueles que preconizam a paralisação do desenvolvimento de novos projetos de irrigação por causa de possíveis problemas ecológicos. Por outro lado, não se pode alinhar com os que desconsideram totalmente os impactos ambientais

relacionados com os novos projetos e se apoiam somente na relação custo/benefício. Ambos analisam, exclusivamente, uma única face do problema. Acredita-se que, na maioria dos casos, é possível compatibilizar desenvolvimento agrário com proteção ambiental.

As fases de planejamento e dimensionamento do projeto são os momentos adequados para diagnosticar os possíveis impactos ambientais resultantes da irrigação. Nelas podem ser realizados os ajustes necessários, de modo que os possíveis efeitos adversos oriundos da implementação do projeto sejam minimizados.

Os principais tipos de impactos ambientais inerente à irrigação são: o consumo exagerado da disponibilidade hídrica da região, a contaminação dos recursos hídricos (rios e águas subterrâneas), a modificação do meio ambiente e o consumo elevado de energia.

Órgãos internacionais já preconizam a necessidade de uma redução em torno de 10% do consumo mundial de água na agricultura. No planeta, a irrigação utiliza aproximadamente 68% do total de água retirada dos mananciais. No Brasil, com a irrigação, a utilização está em torno de 46,2% do total de água derivada dos nossos mananciais. Em outras atividades, são utilizados em torno de 23,3% para o abastecimento urbano; 9,2% para a indústria; 7,9% para a pecuária; 1,6% para a mineração, 10,3% para as termelétricas, e 1,6% para o abastecimento rural (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2017). Deste modo, cada vez mais, torna-se imprescindível a conscientização da sociedade sobre a necessidade de se usar de forma racional os recursos hídricos. O direito de utilização da água exige como contrapartida a responsabilidade de usá-la de forma mais eficiente.

O Brasil dispõe de aproximadamente 14% da água doce do planeta. Porém, em torno de 80% dessa água encontra-se na região Norte, onde vivem aproximadamente 7% da população. Nas regiões Sudeste e Sul, onde se concentram aproximadamente 60% da população e a maioria da atividade econômica do país, tem-se apenas 13% dessa água.

16.3 Benefício da irrigação

Um bom programa de irrigação pode beneficiar uma cultura de muitos modos, a saber: aumenta sua produtividade; permite maior eficiência no uso de fertilizantes; permite uma programação de cultivo, isto é, a elaboração de uma escala de plantio que possibilite a obtenção de duas ou mais colheitas por área/ano; introduz culturas com maior valor de mercado; otimização dos ativos da fazenda, o que minimiza os riscos do investimento na agricultura. Além disso, aumenta a demanda de mão de obra na agricultura que, por sua vez, fixa o homem ao meio rural, minimizando o êxodo rural desordenado que potencializa o crescimento populacional nas periferias das cidades. Mas é de capital importância que se tenha consciência de que a irrigação como prática isolada não propiciará os benefícios desejados. É necessário estar associada a outras práticas culturais para poder gerar os lucros esperados da agricultura irrigada, tais como, variedades produtivas e de bom valor comercial, adubações e tratamentos culturais apropriados.

Nas regiões onde se investiu em irrigação, ocorreu desenvolvimento econômico, desenvolvimento social e, conseqüentemente, redução de pobreza. Notadamente quando as ações foram integradas, sequenciais e em tempo hábil, permitindo a consolidação da corrente produtiva e a sustentabilidade de mercado para os produtos.

Além dos impactos socioeconômicos diretos da agricultura irrigada, como o aumento da produtividade e da produção e, conseqüentemente, do lucro do produtor e do aumento do número de empregos na região, existem benefícios socioeconômicos indiretos ou "externalidades socioeconômicas". Mas as externalidades socioeconômicas somente serão positivas se os projetos de irrigação tiverem sustentabilidade econômica, social e ambiental. Ou seja, a agricultura irrigada deve ser economicamente viável, socialmente responsável e ambientalmente saudável.

Os resultados relacionados aos indicadores de externalidades socioeconômicas não aparecem imediatamente após a implantação dos projetos de irrigação. Geralmente demandam um tempo de maturação em torno de dez anos. Isso se deve a vários fatores, como: a incapacidade do "entorno" de vislumbrar oportunidades; a necessidade de capital e de mão de obra qualificada; a introdução de culturas e de sistemas de produção novos na região; a abertura de novos mercados para comercialização da produção.

Sem dúvida, o polo de agricultura irrigada em "Juazeiro - Petrolina" é um dos exemplos vitoriosos no país. Houve, no início, os projetos públicos, seguidos de parcerias com o setor privado, gerando crescimento rápido com base em projetos privados, com real sucesso socioeconômico. Assim posto, é evidente a grande importância da agricultura irrigada para ajudar a minorar a crítica situação social e de desigualdade financeira do país. Destaca-se que os investimentos necessários para criar empregos são bem menores na agricultura irrigada do que no comércio e na indústria, principalmente na indústria química.

16.4 Salinização do solo

A maioria das grandes áreas irrigadas no mundo sofre, em maior ou menor intensidade, os efeitos da salinização do solo. Muitas áreas que já foram grandes produtoras de alimentos tomaram-se terras salinizadas e improdutivas. A salinização do solo afeta a germinação, a densidade e o desenvolvimento vegetativo das culturas, reduzindo suas produtividades e, nos casos mais intensos, levam as plantas à morte.

Estimativa da FAO adverte que aproximadamente 50% dos 250 milhões de hectares irrigados no mundo já apresentam problemas de salinização e saturação do solo e que 10 milhões de hectares são abandonados anualmente em virtude desses problemas.

As principais causas da salinização nas áreas irrigadas são os sais provenientes da água de irrigação e/ou, do lençol freático, quando este se eleva até próximo à superfície do solo. Pode-se afirmar que a salinização é subproduto da irrigação; por exemplo, cada lâmina de 100 mm de água de irrigação, com concentração de sais de $0,5 \text{ g L}^{-1}$, conduz 500 kg ha^{-1} de sal à área a ser irrigada. Por isso, há necessidade do manejo adequado da água, pois, quanto maior for a eficiência de uso da água na irrigação, menor será a lâmina de água aplicada. Por consequência, menor será a quantidade de sal conduzida para a área irrigada, bem como o volume de água drenado e/ou percolado.

Com as irrigações sucessivas, o sal vai-se acumulando quando não é removido por drenagem e/ou lixiviação. Na ausência de drenagem e/ou lixiviação, o sal se acumula na superfície do solo devido ao fluxo ascendente de umidade decorrente da evapotranspiração, criando os chamados solos salinos.

16.5 Contaminação dos recursos hídricos

Outra séria consequência da irrigação mal conduzida é a contaminação de rios, dos córregos e da água subterrânea. O excesso de água aplicada à área irrigada, que não é evapotranspirada pelas culturas, retorna aos rios e córregos por meio do escoamento tanto superficial quanto subsuperficial ou vai para os depósitos subterrâneos por percolação profunda. Nesta dinâmica, a água pode arrastar consigo sais solúveis, fertilizantes (N, P e nitratos), resíduos de defensivos e herbicidas, elementos tóxicos etc. Sem dúvida, a contaminação dos recursos hídricos tem causado sérios problemas ao suprimento de água potável, tanto nos centros urbanos como no meio rural.

A contaminação de rios e córregos é mais rápida e acontece imediatamente após a aplicação da água na irrigação por superfície, ou seja, por sulco, faixa e inundação. Na região sul do Brasil, têm-se verificado sérios problemas devido à aplicação de herbicidas na irrigação

por inundação do arroz, uma vez que parte da vazão aplicada sempre circula pelos tabuleiros e retorna aos córregos. É inerente ao método de irrigação por sulco, amplamente utilizada no passado, o escoamento, no seu final, de parte da vazão aplicada no início do sulco. Essa vazão que escoar no final dos sulcos traz sedimentos (em virtude da erosão no início do sulco), fertilizantes, defensivos e herbicidas. No final da parcela, ela é coletada pelo dreno que a conduz aos córregos.

A contaminação de rios e córregos também pode ocorrer de um modo um pouco mais lento, por meio do lençol freático subsuperficial que arrasta os elementos citados, exceto os sedimentos. Essa contaminação pode ser agravada se, no perfil do solo irrigado, houver sais solúveis, já que a água que se movimenta no perfil do solo arrasta tanto os sais trazidos para a área irrigada pela água de irrigação como os sais dissolvidos no perfil do solo.

A contaminação da água subterrânea é muito mais lenta. O tempo necessário para a água percolada atingir a água subterrânea aumenta com o decréscimo da permeabilidade do solo e com o aumento da profundidade do lençol freático. Dependendo da permeabilidade do solo, para a água atingir um lençol freático situado a aproximadamente 30 m de profundidade, o tempo necessário pode variar de 20 a 50 anos. Tal fato se torna um problema mais sério, tendo em vista que transcorrerá muito tempo até se ter ciência de que a água subterrânea está contaminada. Na poluição da água subterrânea, os sais dissolvidos, os nitratos, os pesticidas e os metais pesados são as substâncias químicas mais preocupantes.

Quanto maiores forem as perdas por escoamento superficial e por percolação na irrigação, maiores serão as chances de contaminação dos mananciais e da água subterrânea. Assim, torna-se cada vez mais necessário dimensionar e manejar os sistemas de irrigação com maior eficiência de uso da água.

A água que retorna da irrigação pela superfície ou subsuperfície do solo tem que ser considerada componente inerente aos recursos hídricos da bacia hidrográfica. A agricultura irrigada, normalmente, descarrega seu retorno diretamente no sistema hidrológico da bacia. Sendo assim, à medida que a área irrigada aumenta, os conflitos sobre o uso de água se agravarão, uma vez que a população, cada vez mais, está conscientizando-se sobre a importância da qualidade dos mananciais. Sob este ponto de vista, deve-se, sempre que possível, utilizar métodos de irrigação que permitem, com mais facilidade, uma maior eficiência de uso da água. A agricultura irrigada atual está se desenvolvendo privilegiando o uso de sistemas mais eficientes na aplicação de água como é o caso do pivô central, gotejamento, microaspersão e da nova aspersão convencional.

16.6 Disponibilidade de água

A humanidade já passou por diversas crises, como as de epidemia, alimentos e petróleo. Sem dúvida alguma, as atuais são de energia e disponibilidade de água de boa qualidade.

A crise de disponibilidade de água afetará a irrigação e será afetada por ela. Existem, no Brasil, dois grupos de problemas envolvendo a disputa pelo uso da água: um governamental, compreendendo o uso da água para irrigação, para hidroelétricas e para consumo urbano (humano e industrial); o outro se relaciona ao uso múltiplo da água pelos usuários de um rio.

Em algumas bacias, após a implementação de vários projetos de irrigação sem a adequada quantificação do volume de água disponível, tem faltado água para as áreas situadas a jusante. Esse problema pode ser se agravado, levando à falta de água para o consumo humano, animal e da fauna silvestre, causando, conseqüentemente, sérios impactos ambientais e atritos entre os envolvidos.

No passado a irrigação no Brasil, infelizmente, não era praticada com boa eficiência. Porém, observa-se, analisando os últimos 15 anos, uma mudança substancial no desempenho dos sistemas. Houve notável melhoria nos índices de eficiência do uso da água na agricultura irrigada no País. Pode-se atribuir esta mudança como consequência da pressão da sociedade; da maior conscientização dos produtores; da disponibilidade de sistemas de irrigação mais eficientes; da implementação da nova legislação da água no Brasil (por exemplo a Lei 9433 de 2017); e do alto custo da energia elétrica entre outros. Importante ressaltar a demanda crescente por água, pelos vários setores da sociedade, associada a maior conscientização da população sobre a importância do meio ambiente mais saudável (menos poluído) e fatores econômicos (custo da irrigação). Sem dúvida, tiveram grande impacto para que a irrigação seja conduzida com maior eficiência de uso da água. Ela deverá causar o mínimo de impacto possível no meio ambiente, notadamente no que diz respeito à disponibilidade e qualidade de água para as múltiplas atividades.

Deste modo, torna-se de grande importância a conscientização da sociedade em geral sobre a necessidade de se usar de forma racional os recursos hídricos. O direito de utilização da água inclui também a responsabilidade em a usar de forma adequada. Sendo assim, é de capital importância pensar, ensinar e praticar a irrigação com ênfase na sustentabilidade ambiental.

Dentre as atividades rurais, a irrigação é uma das práticas utilizadas na produção agrícola que mais consome energia. Atualmente ao se fazer análise e avaliação de projetos de irrigação em funcionamento, as modificações sugeridas para melhorar a eficiência da irrigação, ou seja, para otimizar o uso da água têm como consequência direta a redução do consumo de energia.

É comum verificar que os benefícios econômicos de uma melhoria no manejo da irrigação estão mais relacionados com a redução do custo com energia do que com o possível aumento da produtividade, notadamente nas culturas com menor valor de mercado.

Considerando ainda que as principais fontes de energia são as hidroelétricas e os derivados do petróleo, ambas as fontes produzem significativos impactos ambientais. O consumo de energia torna-se cada vez mais limitante, demandando prioridades no aumento da eficiência da irrigação. Importante também citar o uso crescente de fontes de energia sustentáveis como a energia eólica, fotovoltaica e de biomassa, que trazem uma nova perspectiva tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico.

Embora os grandes benefícios advindos do uso da irrigação sejam incontestáveis, os projetos de irrigação podem causar impactos adversos ao meio ambiente, à qualidade do solo e da água e ao aspecto socioeconômico da região. Assim, os sistemas de irrigação mal dimensionados, mal implementados e mal manejados ou incompletos, como os sem drenagem adequada, provocaram graves impactos ambientais no passado.

A falta de uma abordagem adequada desses impactos não contribui para o desenvolvimento sustentado da irrigação. Há os que advogam que se deve deixar a terra como ela era originalmente. Para isso, é necessário que a população renuncie ao padrão de conforto, alimentação e energia que usufrui atualmente, o que não será nada fácil. Também não é ético que pessoas que vivem confortável e prosperamente, em virtude de riquezas advindas de projetos já implementados, critiquem ou impeçam o desenvolvimento de novos projetos. Do mesmo modo, não se pode concordar com aqueles que preconizam a obtenção de alta produtividade visando exclusivamente ao lucro financeiro, desconsiderando suas possíveis consequências.

Assim sendo, cada vez mais, os técnicos que tratam desse assunto deverão cuidar para que a irrigação no país seja implementada de forma adequada, e que seus benefícios não sejam ilusórios ou momentâneos - sempre com enfoque no desenvolvimento sustentado, de

modo a gerar benefícios a curto, médio e longos prazos, sem degradar o solo e o meio ambiente. Nessa ótica, é necessário trabalhar para conscientizar a população de que água e energia são bens preciosos, com disponibilidade cada vez mais limitada e de uso múltiplo.

Como a disponibilidade de água de boa qualidade tem sido reconhecida como vital para as futuras gerações e a irrigação tem provocado alterações no meio ambiente difíceis de prever, é fundamental que se estabeleçam padrões claros e concisos para a avaliação do impacto ambiental resultante da irrigação. Isso permitirá o crescimento da irrigação sem a repetição dos problemas e malefícios constatados em alguns projetos em funcionamento ou desativados.

É possível conciliar direta e indiretamente a expansão da irrigação no Brasil com a proteção do meio ambiente. Pode-se afirmar que o uso racional e o crescimento bem planejado da irrigação, sem prejuízo para o meio ambiente, são viáveis. Ou seja, tem-se que pensar, ensinar e praticar a irrigação com ênfase na sustentabilidade ambiental.

16.7 Manejo de irrigação e o sistema solo-planta-atmosfera

Qualquer planejamento ou qualquer operação de um projeto de irrigação que vise à máxima produção e à boa qualidade do produto, usando de maneira eficiente a água, requer conhecimento das inter-relações entre o sistema solo-água-planta-atmosfera e manejo de irrigação.

Em regiões áridas, onde a água é fator limitante, as pesquisas devem ser conduzidas de modo que se faça o planejamento de irrigações em termos de máxima produção por unidade de água aplicada. Noutras condições, pode ser preferível orientar as pesquisas para a obtenção de máxima produção por unidade de área cultivada, por unidade de custo de mão de obra, por unidade de consumo de energia, ou para aumentar o emprego de mão de obra no meio rural, visando ao assentamento de famílias marginalizadas, ou ainda para assegurar a estabilidade social na região.

Ao iniciar um projeto de irrigação, deve-se ter em mente alguns propósitos, por exemplo, aumentar a produção, economizar trabalho, maximizar a eficiência de uso da água e minimizar a deterioração da estrutura do solo e a perda de nutrientes.

Há alguns princípios básicos que são úteis ao planejamento e à operação de um projeto de irrigação: (i) Para que haja o máximo crescimento vegetativo, a transpiração de uma superfície vegetal deve ser mantida na sua capacidade potencial, nas condições climáticas prevalentes, (ii) Durante o ciclo de irrigação, a tensão máxima da água do solo que se deve permitir é aquela na qual ainda haverá suficiente absorção de água pela planta, de modo que a ocorrência de deficiência hídrica não tenha impacto significativo na produtividade da cultura, (iii) A razão entre a água evapotranspirada pela cultura e a aplicada pela irrigação deve aproximar-se de um, para que se tenha máxima eficiência de uso e de aplicação, e (iv) Geralmente, a seleção de culturas ou de práticas culturais que visem ao aumento da produtividade ou à diminuição do ciclo vegetativo aumentará a eficiência de uso de água.

Em cada situação, as respostas para as mais importantes questões sobre irrigação, como "Quando irrigar?", "Quanto de água aplicar?", "Como aplicar a água?", devem ser baseadas nos princípios já mencionados e em pesquisas locais, e não em práticas específicas que tiveram sucesso em outras regiões.

Questões como "Qual percentagem de água útil pode ser utilizada?", "Qual tensão pode ser permitida na zona radicular de uma cultura sem reduzir a sua produtividade?" não têm a mesma resposta em todas as regiões. Esses limites devem ser determinados para cada situação ou extrapolados de outras regiões que tenham as mesmas condições edafoclimáticas. Em outras palavras, não há práticas específicas que possam ser generalizadas universalmente.

O *deficit* de água pode causar decréscimo acentuado nas atividades fisiológicas, principalmente na divisão e no crescimento das células e, em consequência, no crescimento das plantas. Quando o *deficit* ocorre em períodos curtos, normalmente após as 13 horas, quando há maior demanda evapotranspirométrica, seu efeito é mínimo, mas, quando persiste por longos períodos, seu efeito é drástico.

Em geral, as plantas cultivadas são mais sensíveis ao *deficit* de água no período que vai do início da formação floral até a fase inicial de enchimento de grãos.

A capacidade de retenção de água na zona radicular depende, basicamente, da textura e da estrutura do solo, da profundidade efetiva do sistema radicular da cultura e da profundidade da camada de solo. Quanto maior a profundidade do sistema radicular, maior a capacidade de retenção de água no solo; contudo, quanto mais profunda a camada do solo, menor será a percentagem de água aproveitável nessas camadas. Isso se deve ao decréscimo da densidade de raízes com o aumento da profundidade e a necessidade de maior gradiente de potencial para retirar água das camadas mais profundas. Isso pode ser visto na Figura 1, determinada por Gardner (1965), em que se observa o perfil da absorção de água pelas raízes de sorgo, em função da profundidade do solo e do número de dias após a irrigação.

Para obter máxima produtividade, o turno de rega deve, portanto, ser realizado de forma que a planta não precise extrair água das camadas mais profundas.

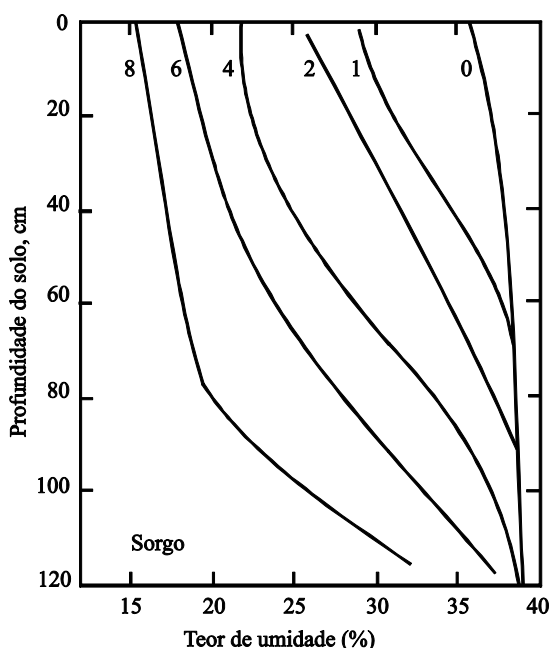


Figura 1. Perfil de extração de água pelas raízes de sorgo em função da profundidade do solo e do número de dias após a irrigação (GARDNER, 1965).

16.8 Relação entre produtividade e disponibilidade de água

Na literatura, há vários tipos de funções que relacionam produtividade com disponibilidade de água. Entre essas funções, é comum encontrar uma correlação entre produtividade e evapotranspiração, conforme ilustrado por Alves *et al.* (1982) na Figura 2.

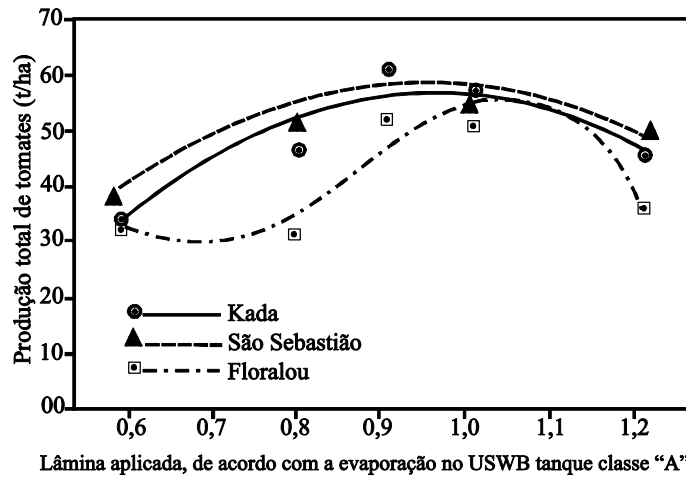


Figura 2. Curvas da produção total de tomate dos cultivares Kada, São Sebastião e Floralou (ALVES *et al.*, 1982).

O suprimento total de água (STA) nas áreas irrigadas é constituído pela sua disponibilidade no solo na época do plantio (DAP), pela precipitação efetiva durante o ciclo da cultura (PE) e pela irrigação aplicada (IR). Com base nos trabalhos de Stewart *et al.* (1976), pode-se facilmente relacionar a produtividade com os fatores que compõem o suprimento total de água, conforme ilustrado na Figura 3.

Analisando a Figura 3, verifica-se que, em agricultura não irrigada (agricultura de sequeiro), tem-se determinada produtividade, a qual dependerá da disponibilidade de água no solo na época do plantio (DAP) e da precipitação efetiva durante o ciclo da cultura (PE). Na agricultura irrigada, se a eficiência de uso de água fosse de 100%, toda a água aplicada por irrigação seria consumida pela evapotranspiração, desse modo, ter-se-ia uma função linear entre lâmina de irrigação e produtividade. Entretanto, como na realidade não se tem irrigação com eficiência de 100%, parte da água aplicada não será convertida em produtividade, ou seja, não será consumida pela evapotranspiração. Quanto maior a quantidade de irrigação a fim de se obter máxima produtividade, menor será a eficiência de uso de água; por conseguinte, a função de produtividade *versus* irrigação será convexa. Se a aplicação de água for em excesso, poderá haver decréscimo da produtividade, conforme ilustrado.

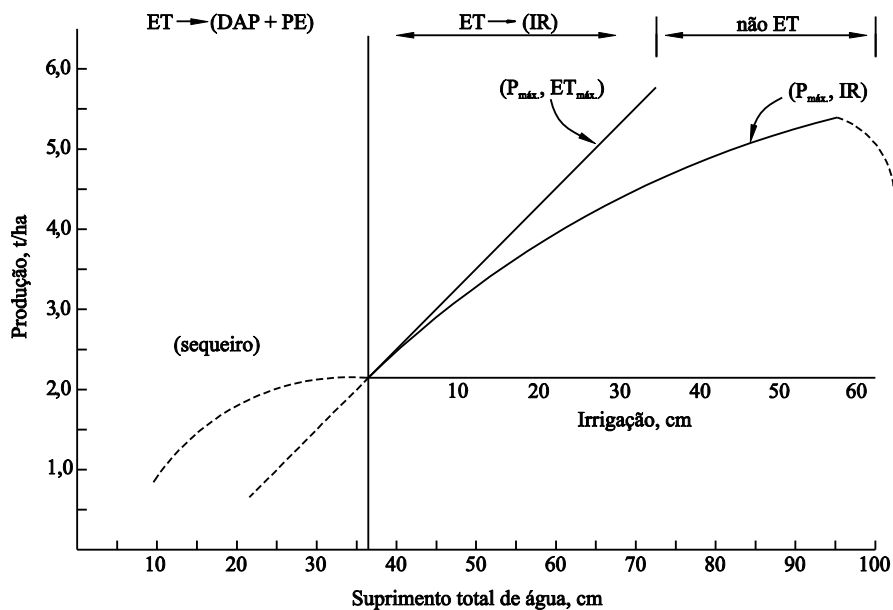


Figura 3. Relação entre produtividade, disponibilidade de água no solo na época do plantio (DAP), precipitação efetiva (PE), irrigação (IR) e evapotranspiração (ET).

16.9 Maximização da produtividade por unidade de água aplicada

Pode-se conseguir este objetivo da seguinte maneira: (i) Adequando melhor a irrigação aos períodos críticos de *deficit* de água: Para isso, precisam ser conhecidas as fases críticas das diversas culturas nas diferentes regiões do país e somente suprir adequadamente de água através da irrigação nesses períodos. Fora desses períodos, deve-se realizar suprimento parcial de água somente por meio da irrigação e/ou trabalhar com maior probabilidade de chuva. Já são bastante conhecidos os seguintes períodos críticos de *deficit* de água, comuns à maioria das culturas: germinação, floração e enchimento de grãos, e (ii) Irrigando com *deficit* de água em relação à evapotranspiração real: Consiste em estabelecer um programa de irrigação em que a lâmina média aplicada seja sempre menor do que a lâmina média evapotranspirada. Esse manejo é mais eficiente em sistemas de irrigação que facilitam a aplicação mais frequente (menor turno de rega) e com menor lâmina, como é o caso de irrigação por gotejamento, microaspersão, auto propelido e pivô central. Nesses dois últimos sistemas haveria a preocupação somente de manter elevado o teor de umidade nos primeiros 30 cm do solo, onde a demanda de umidade é maior, de acordo com a Figura 1. Para isso, podem-se usar tensiômetros instalados até 30 cm de profundidade, para funcionarem como indicadores de quando irrigar, uma vez que se sabe que os tensiômetros só funcionam na faixa superior de umidade do solo, ou seja, até uma tensão de aproximadamente 70 cbar.

Para as condições brasileiras, em que as irrigações, em razão da ocorrência de chuvas no principal período de cultivo, "devem ser suplementares", esse manejo, principalmente no período das chuvas, é o recomendável. Ele requer sistemas com menor capacidade, tanto da moto bomba como das tubulações, portanto com menor custo inicial e de operação. Ele aplica menor lâmina total de irrigação durante o ciclo da cultura, causando menor decréscimo de produtividade, em relação à produtividade potencial, o que permite melhor aproveitamento das chuvas.

Na fase inicial da cultura, como o consumo de água é menor que a evapotranspiração de referência (ET_o), pode-se aplicar, por meio da irrigação, um pouco menos do que a evapotranspiração da cultura (ET_c). Com isso, manter-se-á todo o perfil do solo com elevado teor de umidade. No período de máxima demanda evapotranspirométrica, manter-se-á o turno de rega pequeno e far-se-ão aplicações de quantidade um pouco menor que a ET_c; com isso, haverá reposição de umidade somente na camada superior do solo e a planta retirará parte da água necessária das camadas mais profundas. Na época de enchimento dos grãos, deve-se aplicar a lâmina necessária para atender à evapotranspiração real nessa fase.

16.10 Maximização da produtividade por unidade de área

Este objetivo pode ser economicamente justificado quando se tem limitação de áreas agricultáveis e/ou não se tem limitação de água e o custo de operação do sistema de irrigação é relativamente baixo.

Para conseguir máxima produção por unidade de área (produtividade), é necessário dispor de um suprimento de água suficiente para atender à demanda diária de evapotranspiração potencial. Será necessário um sistema capaz de irrigar a área com alta frequência de modo que seja mantido em nível elevado o teor de umidade da camada de solo na zona radicular. Para que as taxas de evapotranspiração e de fotossíntese sejam processadas e mantidas nos seus valores potenciais, deve-se manter elevada a disponibilidade de água no solo. Em muitas culturas, para que se obtenha máxima produtividade, em geral, deve-se permitir que somente sejam usados, entre duas irrigações sucessivas, 25 a 40% da disponibilidade de água do solo. É bom lembrar que nem sempre se deseja a produção da planta como um todo, mas somente de determinada parte da planta, por exemplo, grãos, raízes, entre outras, e que nem sempre a maior produtividade desta parte e/ou sua melhor qualidade estão relacionadas com o maior crescimento.

A maior ou menor frequência de irrigação dependerá muito do método de irrigar. É muito difícil, e não faz muito sentido, usar um turno de rega longo na irrigação por gotejamento ou por microaspersão, bem como um turno de rega muito curto na irrigação por superfície.

Em geral, para obter boa produtividade, podem-se usar, entre duas irrigações sucessivas, os seguintes percentuais de disponibilidade de água do solo: (i) verduras e legumes 20 a 60%, (ii) frutas 30 a 70%, (iii) feijão, milho e soja 40 a 70%, e (iv) sorgo, trigo e algodão 50 a 80%.

Quando se está praticando irrigação com alta frequência (gotejamento, micro aspersão, pivô central) e suprindo a demanda evapotranspirométrica, não há necessidade de se preocupar com o nível de disponibilidade de água no solo, pois, nesses casos, essa disponibilidade será sempre elevada.

16.11 Maximização dos lucros

Não se deve irrigar pelo simples prazer de dizer que está praticando agricultura irrigada. Com racionalidade e responsabilidade ambiental, o objetivo deve ser aumentar o lucro, obtendo maior produtividade, seja em quantidade, seja em qualidade. Além disso, pode-se buscar incorporar à agricultura terrenos em que, sem o uso da irrigação, não seria possível cultivar.

A estimativa do lucro é obtida por meio da comparação da estimativa do valor econômico da produção com a estimativa do custo financeiro a ser aplicado. Para isso, é necessário que se conheça o custo da irrigação por unidade de energia consumida, por unidade de volume de água aplicado e por número de irrigações, bem como a função de produtividade *versus* irrigação e o valor da produção.

Para estimar a demanda e o custo da energia, usa-se a seguinte equação:

$$DE = 0,0271 \frac{A D Hm}{E_i Emb} \quad (1)$$

em que DE se refere à demanda de energia (kWh), A à área a ser irrigada (ha), D à lâmina aplicada por irrigação ou no ciclo (mm), Hm à altura manométrica (m), E_i à eficiência de irrigação, em decimal; e Emb à eficiência da moto bomba, em decimal.

16.12 Otimização da eficiência de uso da água na agricultura

A sustentabilidade no uso dos recursos hídricos e de energia é a base para o aumento consolidado da produtividade agrícola e para a maior oferta permanente de empregos no meio rural. Para tanto, urge um choque de gestão e de regulamentação na prática do manejo da irrigação, envolvendo forte parceria público-privada. Mais do que nunca, precisa-se de uma gestão inovadora, a fim de melhorar o manejo e a eficiência da irrigação. Não será possível desconsiderar os efeitos relacionados aos impactos ambientais e ao consumo de água, daí a importância do enfoque de sustentabilidade. Se necessário, deve-se definir e impor limites mínimos de eficiência do uso da água para as diferentes regiões no país.

Na agricultura irrigada, o fator água deve ter seu uso otimizado, possibilitando, sem maiores riscos, o maior aproveitamento dos demais fatores de produção. Por consequência, é possível obter maior produtividade com uma melhor combinação dos insumos empregados. Para tanto, o conhecimento das funções de produtividade ou superfícies de resposta torna-se ferramenta importante para auxiliar nas decisões no processo de produção agrícola. Essas funções possibilitam determinar as interações entre os diversos fatores que afetam a

produtividade, o que permite escolher as soluções mais condizentes com a realidade regional, como aquelas que produzirão maior eficiência de uso da água.

Na agricultura irrigada, a análise econômica dos projetos é importante quando o custo dos processos de captação, condução e aplicação da água é elevado. Há cenários em que, em função das elevadas diferenças de nível e/ou longas distâncias entre a captação e a área irrigada, em função da utilização de emissores que demandam elevadas pressões de serviço - o que afeta expressivamente o custo da energia -, em função do uso de sistemas de irrigação de alto valor, há significativa elevação do custo de implantação dos projetos por unidade de área. Em contrapartida, as análises de eficiência de uso de água (produtividade por unidade de lâmina aplicada) devem receber especial atenção onde há pouca disponibilidade de água para irrigação. Maior cuidado é necessário em regiões onde já existem conflitos decorrentes dos usos múltiplos da água, de modo a reduzir o impacto no meio ambiente, notadamente no que diz respeito à disponibilidade e à qualidade de água para as múltiplas atividades.

A finalidade básica da irrigação é proporcionar água às culturas para atender às exigências hídricas durante todo seu cultivo, possibilitando altas produtividades e produtos de boa qualidade. A quantidade de água necessária às culturas está relacionada às exigências hídricas da espécie cultivada quanto à produtividade desejada, ao local de cultivo, ao estágio de desenvolvimento da cultura, ao tipo de solo e à época de plantio.

16.13 Funções de produção

O alto custo de implantação dos sistemas de irrigação, aliado à relação direta entre o custo de operação da irrigação e a quantidade de água a ser aplicada, conduz cada vez mais à necessidade de se otimizar tanto o uso da água, com um bom manejo da irrigação quanto dos demais insumos de produção. Dos fatores complementares da produção agrícola, a água e a adubação são aquelas que mais limitam os rendimentos, quando se tem um bom material genético e um bom controle de pragas e doenças. Deste modo, as aplicações racionais da irrigação e da adubação são fundamentais para o aumento da produtividade e do retorno econômico na agricultura irrigada. Estas aplicações racionais tanto da irrigação quanto da adubação poderão ser conseguidas mediante o conhecimento das funções de produção das culturas nas diferentes regiões do País.

Define-se função de produção como a relação técnica entre um conjunto específico de fatores envolvidos num processo produtivo qualquer e a produtividade física possível de se obter com a tecnologia existente.

Para quantificar os benefícios econômicos da irrigação, é necessário estimar o aumento na produtividade relacionado à quantidade de água aplicada. A representação gráfica ou matemática desta relação é denominada função de produção "água-cultura".

Uma função de produção água-cultura típica é quando se relaciona "lâmina de água aplicada durante o ciclo da cultura" *versus* "produtividade comercial". Outras maneiras de expressar funções de produção água-cultura são possíveis. Por exemplo, pode-se relacionar lâminas aplicadas por estádios de desenvolvimentos da cultura, ou evapotranspiração, ou tensão ou umidade do solo *versus* produtividade.

Na Figura 4, tem-se um exemplo clássico de uma função de produção "água-cultura", em que um menor incremento da lâmina aplicada no início da função de produção resulta em um incremento muito maior na produtividade.

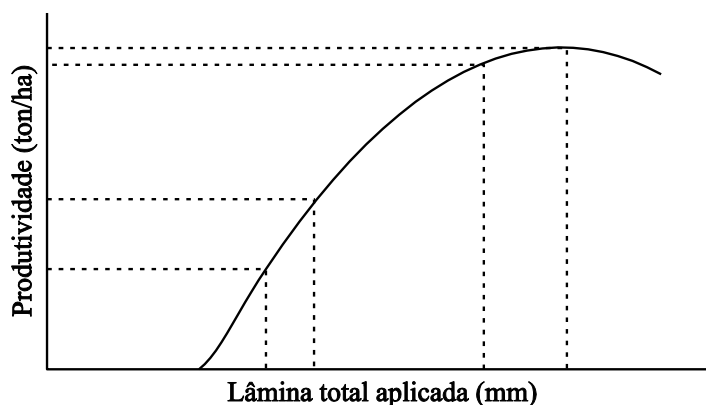


Figura 4. Exemplo típico de função de produção "água-cultura".

Normalmente, as expressões matemáticas das funções de produção "água-cultura" são do tipo linear, potencial e exponencial. Em geral, podemos expressá-las da seguinte forma:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

em que Y se refere à produtividade da cultura, e X_1 , X_2 e X_n aos fatores que afetam esta produtividade.

Trata-se de uma relação empírica, obtida normalmente por análise de regressão entre a variável dependente (produtividade) e uma ou mais variáveis independentes (entre elas, a lâmina de água aplicada), conforme o modelo proposto.

A função **água-cultura**, quando a produção é relacionada com a lâmina total aplicada, é normalmente representada por um modelo polinomial de segundo grau, da forma:

$$Y = a + b \cdot W + c \cdot W^2 \quad (3)$$

em que Y se refere à produtividade (kg ha^{-1} ou t ha^{-1}), W à lâmina total aplicada (mm), e a, b e c aos coeficientes de ajuste. Neste tipo de função, os valores de "a" e "c" geralmente são negativos.

Quando a produção é relacionada com evapotranspiração (ET), emprega-se, em geral, modelo linear (polinômio do primeiro grau), da forma $Y = a + b \cdot ET$, ou com o modelo preconizado pela FAO (DOORENBOS; KASSAN, 1979), relacionando decréscimo relativo de produtividade ($1 - Y/Y_{\text{max}}$), com o *deficit* relativo de evapotranspiração ($1 - E_{\text{Tr}}/E_{\text{Tc}}$) multiplicado pelo fator de produtividade da cultura irrigada (ky).

16.14 Otimização física

Considerando a função de produção (equação 3), a produtividade máxima em relação à lâmina aplicada é obtida, derivando-se esta função em relação à lâmina aplicada e igualando o resultado a zero (equações 4 e 5).

$$\frac{\partial Y}{\partial W} = b + 2 \cdot c \cdot W \quad (4)$$

Assim,

$$W_{\text{mpf}} = -\frac{b}{2 \cdot c} \quad (\text{lâmina que resultará na máxima produtividade física}) \quad (5)$$

16.15 Otimização econômica

Considerando como receita ou faturamento o valor arrecadado com a venda da produção e como custo a soma dos gastos ocorridos no processo de produção, o lucro ou rendimento será a diferença entre a receita e o custo da produção (Figura 5).

Sendo assim, a equação 6 representa a função que define o rendimento em relação à lâmina aplicada:

$$R = p_y \cdot Y - (p_a \cdot W + \dots + C_f) \quad (6)$$

em que R se refere ao rendimento da agricultura irrigada, p_y ao preço do produto, p_a ao custo da aplicação de água de irrigação (incluindo o custo de energia e mão de obra), e C_f ao custo fixo do sistema de irrigação.

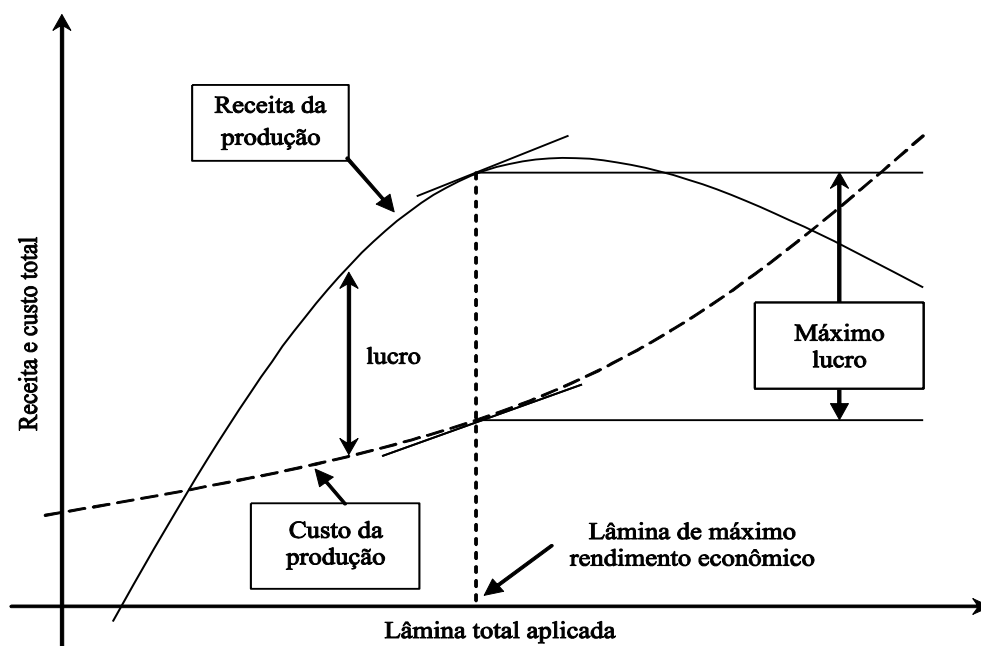


Figura 5. Relação entre receita e custo da produção versus lâmina total aplicada.

A lâmina de máximo rendimento econômico é obtida, derivando a equação 1.6 em relação à lâmina aplicada e igualando o resultado a zero (Equações 7 e 8).

$$\frac{\partial R}{\partial W} = \frac{\partial Y}{\partial W} p_y - p_a \quad (7)$$

Como $\frac{\partial Y}{\partial W} = b + 2 \cdot c \cdot W$ (Equação 1.4), tem-se:

$$W_{\text{mre}} = \frac{p_a - b \cdot p_y}{2 \cdot c \cdot p_y} \quad (\text{lâmina que resultará no máximo rendimento econômico}) \quad (8)$$

16.16 Ponto de equilíbrio

A partir da função que define o lucro (Equação 6), o ponto de equilíbrio ocorre quando o rendimento da produção irrigada se iguala ao seu custo (Equação 9).

$$p_y \cdot Y = (p_a \cdot W + C_f) \quad (9)$$

A solução analítica da equação 1.9 define a lâmina aplicada em que a receita se iguala ao custo de produção, ou seja, lâmina correspondente ao ponto de equilíbrio – W_{pe} (Equação 10).

$$W_{pe} = \pm \left[\frac{\sqrt{(-4 \cdot a \cdot c \cdot p_y^2 + b^2 \cdot p_y^2 - 2 \cdot b \cdot p_y \cdot p_a + 4 \cdot c \cdot C_f \cdot p_y + p_a^2)} - b \cdot p_y + p_a}{2 \cdot c \cdot p_y} \right] \quad (10)$$

16.17 Obtenção de dados no campo

Destaca-se a importância da qualidade e da quantidade de dados necessários para o estudo das funções de produção. Na obtenção de dados no campo para se ajustar a função de produção, deve-se trabalhar com, no mínimo, seis lâminas distintas, distribuídas uniformemente ao longo do ciclo da cultura, ou distribuídas por fase ou estágio da cultura. Quando se trabalha com lâmina total por ciclo, os dados são mais fáceis de obter e analisar, mas não possibilitam a otimização da lâmina aplicada por fase ou estágio da cultura. Em contrapartida, quando se trabalha por fase ou estágio da cultura, apesar de maior dificuldade para gerar e analisar os dados, é possível variar as lâminas por fase, em função da maior ou menor sensibilidade ao *deficit* de água da cultura, nos diferentes estádios de seu desenvolvimento, e obter maior eficiência no uso da água.

A maioria dos cultivos anuais ou bianuais é sensível à variação da umidade do solo, de forma diferenciada por espécie, e, em cada espécie, ao longo das fases ou estádios do seu ciclo vegetativo. Assim, existem as fases mais sensíveis ao *deficit* de umidade do solo, denominadas fases críticas.

No cultivo irrigado, é de capital importância definir os estágios de desenvolvimento da cultura a fim de otimizar a eficiência de aplicação da água. Assim sendo, pode-se dividir o ciclo da maioria das culturas em quatro ou cinco estádios de desenvolvimento. É necessário ainda identificar os estádios mais críticos ao *deficit* hídrico e os não muito críticos. Existem estádios que respondem positivamente ao *deficit* hídrico, por exemplo o período de pré-floração do café, da manga, do limão, e o período de maturação da cana-de-açúcar. Na fruticultura, geralmente, um *deficit* de umidade no solo antes da floração evita o excesso de crescimento vegetativo, induz a formação de gemas florais, antecipa e aumenta a formação de botões florais.

Para o crescimento sustentado do cultivo irrigado no país, tanto o poder público quanto a indústria e os produtores devem estabelecer programas com ações integradas e sequenciais. Urge que os governos - Federal, Estadual e Municipal – tenham uma política regional de apoio financeiro à pesquisa de irrigação em cultivares de alto potencial produtivo, sob condições ótimas de adubação e fitossanidade.

16.18 Eficiência de uso de água

Define-se, na agricultura irrigada, eficiência de uso de água (EUA) como produtividade por unidade de lâmina aplicada. Considerando que só existe interesse prático analisar a Eua no intervalo de lâmina aplicada, que vai da lâmina correspondente ao ponto de equilíbrio (W_{pe}) à lâmina correspondente ao ponto de máxima produtividade física (W_{mpf}), é neste intervalo que se deve calcular a eficiência de uso de água na agricultura irrigada.

A partir da função de produção (Equação 3) que relaciona água aplicada e produtividade, a Eua pode ser representada matematicamente pela seguinte equação:

$$EUA = \frac{(a + b \cdot W + c \cdot W^2)}{W} = \frac{a}{W} + b + c \cdot W \quad (11)$$

Derivando em relação a W e igualando a zero, obtém-se W_{meua} , sendo esta a lâmina que resultará na máxima eficiência de uso de água (Equação 12).

$$W_{meua} = \sqrt{\frac{a}{c}} \quad (12)$$

16.19 Rendimento por unidade de lâmina aplicada

Outra análise que se pode fazer é determinar o lucro ou rendimento por unidade de lâmina aplicada a partir da função que define o rendimento em relação à lâmina aplicada (Equação 6).

O lucro ou rendimento por unidade de lâmina aplicada (R_{ula}) será:

$$R_{ula} = \frac{[p_y \cdot Y - (p_a \cdot W + C_f)]}{W} \quad (13)$$

Derivando a equação 1.13 e igualando a zero, obtém-se W_{mrul} , que é a lâmina que resultará no máximo rendimento por unidade de lâmina aplicada, (Equação 14).

$$W_{mrul} = \sqrt{\frac{a}{c} - \frac{C_f}{p_y \cdot c}} \quad (14)$$

Aqui também somente nos interessa valores de W_{mrul} , entre a lâmina correspondente ao ponto de equilíbrio (W_{pe}) e a lâmina de máxima produtividade física (W_{mpf}).

Deve-se notar que, diferentemente da lâmina para o máximo rendimento econômico (W_{mre}), a lâmina que resultará no máximo rendimento por unidade de lâmina aplicada (W_{mrul}) é independente do preço da água (p_a). Ela depende do preço do produto (p_y), do custo fixo do sistema de irrigação (C_f) e dos coeficientes "a" e "c" ajustados segundo a equação 3.

Analisando as equações de W_{meua} e de W_{mrul} (Equações 12 e 14), verifica-se que a lâmina responsável pelo máximo rendimento por unidade de lâmina (W_{mrul}) será sempre maior ou, em condições especiais, igual à lâmina que resultará na máxima eficiência de uso de água (W_{meua}). Quanto menor for o custo fixo do sistema de irrigação (C_f) e/ou maior for o preço do produto (p_y), a W_{mrul} mais se aproximará da W_{meua} . Caso o custo fixo do sistema de irrigação seja muito pequeno para o produtor, ou seja, amplamente subsidiado ou que ele já tenha o sistema de irrigação disponível em sua propriedade, a W_{mrul} será praticamente igual à W_{meua} .

16.20 Produtividade na agricultura irrigada

No Brasil, há poucos trabalhos visando à obtenção de funções de produção agrícola das culturas irrigáveis nas diversas regiões. Serão apresentados na sequência alguns resultados de trabalhos realizados na Região Norte Fluminense para obtenção de funções de produção.

(i) Trabalho realizado em Campos dos Goytacazes-RJ, em 1996, objetivando determinar funções de produção da cana-de-açúcar em relação à lâmina de irrigação (SOUSA, 1997).

Na Figura 6, tem-se a relação entre produtividade de colmos e lâmina total aplicada. À medida que aumentou a quantidade de água aplicada (irrigação + precipitação efetiva), houve incrementos positivos de produtividade até atingir um valor máximo. Após esse valor, houve decréscimo de rendimento com o aumento de lâmina total aplicada.

Isso pode ser explicado pelo fato de a água ser um fator limitante à produção. À medida que se aumenta sua disponibilidade, a cultura pode expressar melhor o seu potencial produtivo até um determinado ponto, após o qual a produtividade passa a decrescer, devido ao excesso de água no solo, à baixa aeração na zona radicular e à lixiviação de nutrientes.

Com os dados obtidos na função de produtividade da cana-de-açúcar, utilizando o valor de $p_y = 35,00 \text{ R\$ t}^{-1}$, $C_f = 752,50 \text{ R\$ ha}^{-1}$ e $p_a = 2,058 \text{ R\$ mm}^{-1}$, juntamente com as equações 1.5; 1.8; 1.10; 1.12 e 1.14, obtiveram-se, respectivamente, as lâminas correspondentes: máxima produtividade física (W_{mpf}); máximo rendimento econômico (W_{mre}); ponto de equilíbrio (W_{pe}); máxima eficiência de uso de água (W_{meua}) e máximo rendimento por unidade de lâmina aplicada (W_{mrul}) (Tabela 1).

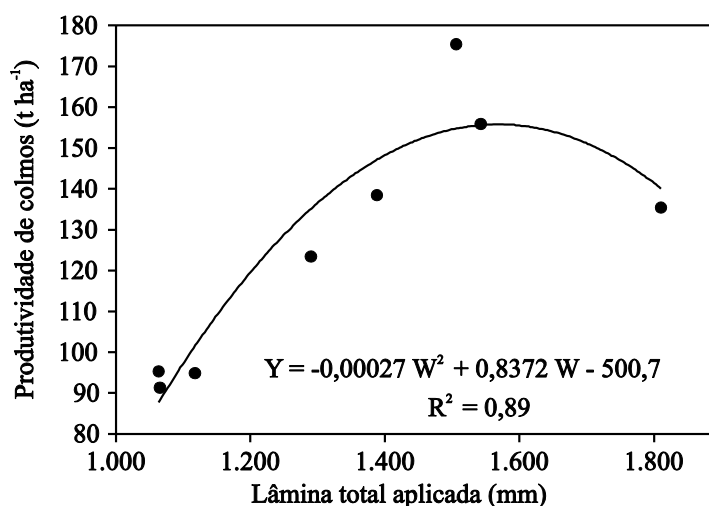


Figura 6. Produtividade da cana-de-açúcar, em t ha^{-1} de colmos, em função da lâmina total aplicada, para variedade RB72454. Campos dos Goytacazes (RJ).

Tabela 1. Lâminas (L, mm), produtividades (P, t ha^{-1}) e eficiência de uso água (EUA, $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) correspondentes obtidos a partir da função de produção água-cana-de-açúcar, variedade RB72454. Campos dos Goytacazes (RJ).

Produtividade	L	P	EUA	Rendimento	
				($\text{R\$ ha}^{-1}$)	($\text{R\$ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
Máxima produtividade física	1.551	148,6			
Máximo produtividade econômica	1.442	145,4		1.369,10	
Máximo produtividade por lâmina	1.391	141,7			0,97
Máxima eficiência de uso de água	1.362	139,0	102,0		
Ponto de equilíbrio	1061	83,9			

(ii) Trabalho realizado em São Francisco do Itabapoana-RJ, em 1996-1997, objetivando determinar funções de produção da goiabeira em relação à lâmina total de água (SOUSA, 1997).

Na Figura 7, tem-se a relação entre produtividade comercial da goiabeira e a lâmina total aplicada. À medida que se aumentou a quantidade de água aplicada, houve incrementos positivos de produtividade até atingir um valor máximo. Após esse valor, houve decréscimo de rendimento com o aumento de lâmina total aplicada.

Com os dados obtidos na função de produtividade da goiabeira, utilizando o valor de $p_y = R\$ 1,20 \text{ kg}^{-1}$, $C_f = R\$ 3,70 \text{ planta}^{-1}$ e $p_a = 0,0103 \text{ R\$ planta}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, juntamente com as equações 1.5; 1.8; 1.10; 1.12 e 1.14, obtiveram-se, respectivamente, as lâminas correspondentes: máxima produtividade física (W_{mpf}); máximo rendimento econômico (W_{mre}); ponto de equilíbrio (W_{pe}); máxima eficiência de uso de água (W_{meua}) e máximo rendimento por unidade de lâmina aplicada (W_{mru}) (Tabela 2).

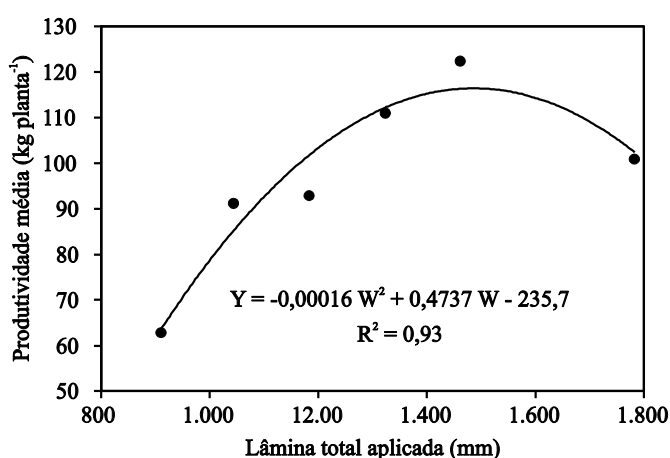


Figura 7. Estimativa de produtividade comercial da goiabeira, em kg planta^{-1} , em função da lâmina total aplicada. São Francisco de Itabapoana (RJ).

Tabela 2. Lâminas (L, mm), produtividades (P, t ha^{-1}) e eficiência de uso água (EUA, $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) correspondentes obtidos a partir da função de produção água-goiabeira, variedade Ogawa. São Francisco de Itabapoana, RJ.

Produtividade	L	P	EUA	Rendimento	
				($\text{R\$ pl}^{-1}$)	($\text{R\$ pl}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
Máxima produtividade física	1.480	114,8			
Máxima produtividade econômica	1.453	114,7		119,00	
Máxima produtividade por lâmina	1.222	104,1			0,09
Máxima eficiência de uso de água	1.214	103,5	85,2		
Ponto de equilíbrio	666	8,8			

(iii) Trabalho realizado em Campos dos Goytacazes-RJ, em 1996-1997, objetivando determinar funções de produção do maracujazeiro em relação à lâmina total de água (MARTINS, 1998).

Na Figura 8, tem-se a relação entre produtividade comercial do maracujazeiro e a lâmina total aplicada. À medida que aumentou a quantidade de água aplicada, houve incrementos positivos de produtividade até atingir um valor máximo. Após esse valor, houve decréscimo de rendimento com o aumento de lâmina total aplicada.

Com os dados obtidos na função de produtividade do maracujazeiro, utilizando o valor de $p_y = 0,20 \text{ R\$ kg}^{-1}$, $C_f = 2.895,00 \text{ R\$ ha}^{-1}$ e $p_a = 0,94 \text{ R\$ mm}^{-1}$, juntamente com as equações 1.5; 1.8; 1.10; 1.12; e 1.14, obtiveram-se, respectivamente, as lâminas correspondentes: máxima produtividade física (W_{mpf}); máximo rendimento econômico (W_{mre}); ponto de equilíbrio (W_{pe}); máxima eficiência de uso de água (W_{meua}) e máximo rendimento por unidade de lâmina aplicada (W_{mrul}) (Tabela 3)

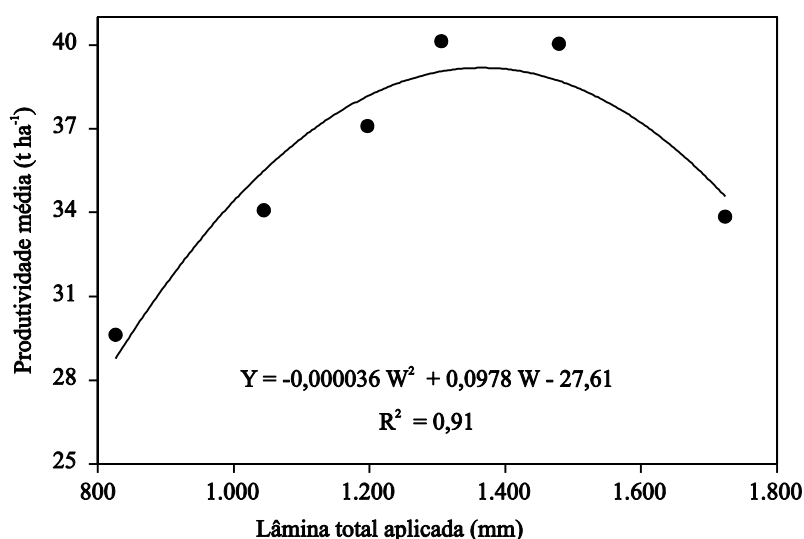


Figura 8. Estimativa da produtividade comercial do maracujazeiro ($t \text{ ha}^{-1}$) em função da lâmina total aplicada. Campos dos Goytacazes (RJ).

Tabela 3. Lâminas (L, mm), produtividades (P, $t \text{ ha}^{-1}$) e eficiência de uso água (EUA, $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) correspondentes obtidos a partir da função de produção água-maracujazeiro. Campos dos Goytacazes, RJ.

Produtividade	L	P	EUA	Rendimento	
				($\text{R\$ ha}^{-1}$)	($\text{R\$ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
Máxima produtividade física	1.363	39,1			
Máximo produtividade econômica	1.297	38,9		3.665,16	
Máximo produtividade por lâmina	1.083	36,2			3,08
Máxima eficiência de uso de água	877	30,6	34,9		
Ponto de equilíbrio	583	17,2			

16.21 Manejo do sistema de irrigação

Após a instalação do sistema e durante o primeiro ciclo de irrigação, é necessário avaliar e calibrar os equipamentos para garantir uma boa eficiência do sistema.

O acompanhamento, a análise e a avaliação de um sistema de irrigação são as bases para o seu correto manejo, devendo a avaliação ser realizada periodicamente. Um dos parâmetros de maior importância para se conduzir um sistema de irrigação é a medição da vazão, tanto a aplicada na irrigação quanto a vazão de escoamento no final da parcela, quando for o caso. Portanto, é muito importante para o desenvolvimento da irrigação no país a fabricação, a ampla difusão e o uso de medidores de vazão.

Todo projeto de irrigação que foi calibrado e, em consequência, ajustado, para que as demais irrigações sejam conduzidas com eficiência, permite que as operações de programação das irrigações, monitoramento e avaliação do sistema sejam mais fáceis. Isso decorre da necessidade, para uma calibração, da instalação de estruturas e equipamentos que permitirão obter dados importantes para a análise do sistema, como vazão aplicada, vazão de escoamento no final da parcela, características de infiltração do solo, tempo de irrigação.

Infelizmente, muitos dos projetos de irrigação são instalados sem a devida avaliação e correto monitoramento, o que acarreta um baixo desempenho dos sistemas.

O ponto-chave no manejo da irrigação é decidir quando irrigar e quanto de água aplicar.

O quanto de água aplicar é normalmente calculado com base na quantidade consumida pela cultura, dividida pela eficiência de aplicação. A quantidade consumida pela cultura pode ser estimada por meio da evapotranspiração real ou por intermédio da variação do teor de umidade do solo. Todavia, tem sido mais comum o uso da evapotranspiração real. É óbvio que a quantidade de água a ser aplicada por irrigação tem de ser compatível com a capacidade de retenção de água na zona radicular da cultura.

A questão de quando irrigar, que é, sem dúvida, um dos pontos mais importantes no manejo da irrigação, pode ser determinada de diferentes modos: pela medição da deficiência de água na planta, pelo sintoma desta deficiência, pela disponibilidade de água no solo, pela evapotranspiração real, pelo turno de rega e pelo balanço de água no solo.

Um dos parâmetros que mais influenciam o quando irrigar é o tipo de distribuição de água no projeto de irrigação. São estes os principais tipos de distribuição de água em uso nos sistemas de irrigação com múltiplos usuários: (i) distribuição por demanda: a água está continuamente à disposição do usuário. É só abrir o registro ou a comporta e irrigar. Este tipo de distribuição é comum na França (assemelha-se ao nosso sistema de distribuição de água potável). Geralmente requer sistemas automatizados, (ii) distribuição por solicitação: o irrigante terá que comunicar à gerência do projeto com determinado número de dias de antecedência, normalmente de dois a sete, quando e quanto de água ele necessitará, (iii) distribuição contínua: neste caso, cada usuário receberá uma vazão contínua durante todo o ciclo de cultivo. Este método não deve ser recomendado quando a área a ser irrigada por usuários for pequena, pois a vazão será muito baixa, o que tornará muito difícil conduzir a irrigação, e (iv) distribuição em rotação: Cada irrigante receberá água com determinado intervalo de tempo. Este é um dos métodos mais usados, principalmente nos projetos de irrigação em que a área a ser irrigada de cada usuário for média ou pequena.

A distribuição de água no projeto de irrigação pode ser com intervalo e vazão constantes durante todo o ciclo da cultura; com intervalo variável e vazão constante ao longo do ciclo (maior intervalo nos períodos de menor demanda e menor intervalo no período de maior demanda); e com intervalo e vazão variáveis ao longo do ciclo da cultura.

Ao se tratar de sistema de irrigação para um único usuário, principalmente quando envolve o uso de motobomba e/ou longos canais ou tubulações, o tempo de funcionamento deverá ser o maior possível. Isso se aplica para diminuir sua ociosidade e aumentar a sua capacidade de irrigação por unidade de área. A prática também evita o superdimensionamento do sistema de irrigação, a não ser quando se tratar de miniprojetos, pois existe uma vazão

mínima para poder conduzir satisfatoriamente a irrigação. A irrigação deverá ser conduzida em rotação entre as subparcelas do projeto, com o intervalo entre irrigação (turno de rega) e vazão variáveis ao longo do ciclo da cultura.

De modo geral, a questão de quando irrigar pode ser discutida sob dois aspectos, conforme abordado subseqüentemente.

16.22 Irrigação com turno de rega prefixado

Muitas vezes, em virtude das características de distribuição de água em sistemas de múltiplos usuários ou em razão da capacidade do sistema em relação à área a ser irrigada, tem-se de trabalhar com um turno de rega prefixado. Nesse caso, o turno de rega deve ser definido de modo que atenda somente a 70 a 80% da demanda evapotranspirométrica no período de maior demanda. Assim, antes do período de maior demanda evapotranspirométrica, a irrigação reporá ao solo toda a umidade consumida no intervalo entre cada duas irrigações, mantendo, assim, todo o perfil do solo com a máxima disponibilidade de água. No período de maior demanda evapotranspirométrica, já que o sistema não terá capacidade de suprir toda a água necessária, a planta completará suas necessidades, absorvendo a água das camadas mais profundas ou das precipitações pluviométricas que porventura ocorrerem nessa época; a lâmina real a ser aplicada por irrigação deverá ser igual ao somatório da ET_c , no período, para os sistemas com irrigação total, ou igual ao somatório da ET_c menos a precipitação efetiva, no período, para os sistemas com irrigação suplementar, ou seja:

(i) para irrigação total:

$$ITN = \frac{\sum_{i=1}^{TR} (ET_c)_i}{E_a} \quad (15)$$

(ii) para irrigação suplementar:

$$ITN = \frac{\sum_{i=1}^{TR} (ET_c)_i - P_{e_i}}{E_a} \quad (16)$$

em que ITN é a lâmina total a ser aplicada por irrigação (mm); ET_c a evapotranspiração da cultura no dia i (mm); P_{e_i} a precipitação efetiva no dia i (mm); e E_a a eficiência de aplicação (em decimal).

16.23 Irrigação com turno de rega variável

Sempre que possível, deve-se usar esse procedimento, que permite adequar a irrigação às diferentes fases do desenvolvimento vegetativo da cultura, bem como à variação da demanda evapotranspiratória ao longo do ciclo da cultura. Para o caso, podem-se usar quase todos os recursos já citados para decidir quando irrigar, ou seja, a medição da deficiência de água na planta, o sintoma desta deficiência, a determinação da umidade do solo e o balanço de água no solo. É mais comum, porém, decidir quando irrigar com base na determinação da umidade do solo ou no balanço de água no solo.

Quando a decisão de irrigar é baseada no teor de umidade do solo, tem-se de definir, *a priori*, qual nível de umidade no solo indicará quando irrigar. Esse nível deve ser definido em função da cultura, do órgão a ser colhido, da localização geográfica da área do projeto e das características de retenção de água do solo. Para a maioria das culturas, é comum usar a média entre o teor de umidade equivalente à "capacidade de campo" e o teor de umidade

equivalente ao ponto de murchamento, sendo o correto que este valor seja determinado por meio de pesquisa, para cada cultura em cada tipo de solo da região.

Dentre os diversos métodos de determinação da umidade do solo, é mais comum usar, para determinação da época de irrigação, o método-padrão de estufa, o TDR, os métodos eletrométricos (método de Bouyoucos, de Colman e outros) e o tensiômetro. Esses dois últimos permitem a automatização do sistema no que diz respeito à decisão de quando irrigar.

O método de balanço de água no solo, sem dúvida, tem-se mostrado eficiente para programar as irrigações, ou seja, para definir quando irrigar. O método de balanço de água no solo é comumente usado em países com maior tradição na irrigação.

Matematicamente, o método balanço de água no solo é descrito pela equação 17.

$$D_i = D_{i-1} + ET_{ci} - P_{ei} \quad (17)$$

em que D_i é a lâmina de água consumida até o dia i , em mm ($D_i = 0$ quando o teor de umidade de solo for igual à "Capacidade de campo"); D_{i-1} a lâmina de água consumida até o dia anterior, em mm; ET_{ci} a estimativa da evapotranspiração real no dia i , em mm; e P_{ei} a precipitação efetiva do dia i (mm).

O balanço é feito periodicamente e, quando D_i atinge um valor preestabelecido aplica-se a irrigação, a depender da disponibilidade de água do solo que será usada entre duas irrigações sucessivas. Vale lembrar-se de que esse valor preestabelecido depende da capacidade de retenção de água do solo (em mm por cm de profundidade do solo), do tipo de cultura e da profundidade do seu sistema radicular. Para determinada cultura, em certo tipo de solo, o sistema radicular inicia na germinação e vai-se desenvolvendo ao longo do ciclo vegetativo. Assim, o valor preestabelecido que definirá quando irrigar será menor no início e crescerá até atingir o valor máximo, o que acontece, na maior parte das vezes, a partir do momento em que a planta atinge aproximadamente 60% do seu desenvolvimento vegetativo.

Na Figura 9 está ilustrado graficamente esse balanço. Quando a precipitação efetiva (precipitação – escoamento superficial) ou a irrigação excederem a lâmina de água consumida até aquele dia, a demanda da cultura (D) será reduzida para zero.

Sempre que o sistema de irrigação permitir, a lâmina a ser aplicada na irrigação não deverá reduzir D a zero, para que possa ser aproveitada alguma chuva que porventura ocorra após a irrigação.

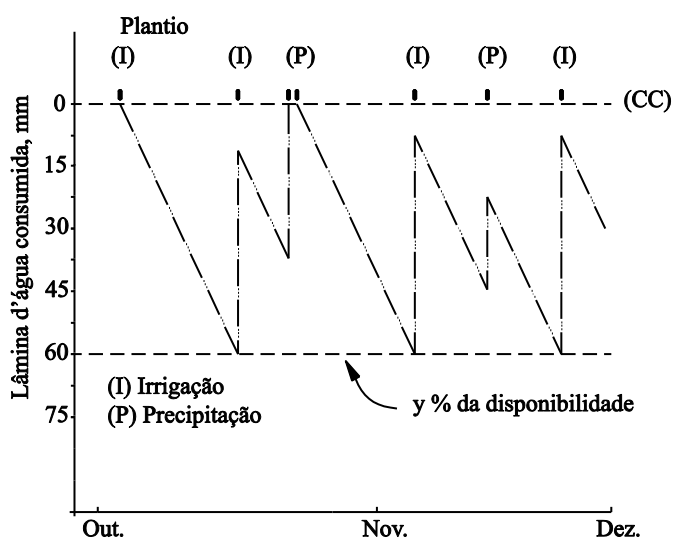


Figura 9. Esquema do balanço de água no solo.

Na Figura 10, é ilustrada a variação típica da disponibilidade da água no solo durante o ciclo de uma cultura irrigada por pivô central. As duas curvas mostram que se pode programar a irrigação de modo que seja mantido o teor de umidade mais elevado nos 30 cm da camada superior do solo e, ao mesmo tempo, permitir contínuo consumo da água das camadas inferiores. Nesse caso, ter-se-á muito pouca perda de água por percolação e maior aproveitamento das chuvas que porventura ocorrerem durante o ciclo da cultura (HEERMAN *et al.*, 1976).

É bem mais fácil programar quando e quanto irrigar nos sistemas de irrigação localizada e aspersão do que nos de irrigação por superfície, pois, na irrigação por sulco, o controle da irrigação depende não somente do sistema de irrigação, mas também, principalmente, das características de infiltração do solo, que variam conforme os tratos culturais, o número de irrigação, o tempo de avanço e de recessão, entre outros fatores.

Na prática, segundo Jensen *et al.* (1970), os usuários da irrigação não se têm mostrado muito sensíveis a melhorar o manejo da irrigação. Dentre as diversas causas, podem-se citar: (i) baixo custo da água de irrigação, em relação ao custo das práticas que melhorariam a eficiência de irrigação, (ii) dificuldade de qualificar e quantificar funções de produção que mostrem o decréscimo da produção em razão da falta ou do excesso de irrigação, (iii) falta de dados de campo para os que terão de decidir diariamente quando e quanto irrigar; e (iv) muitas vezes, nos projetos, as decisões sobre quando irrigar são relegadas a plano secundário.

Além do mais, é comum, nos meios empresarial, rural e governamental, acreditar-se que com poucas informações e rápido treinamento se pode transformar qualquer pessoa num especialista em irrigação.

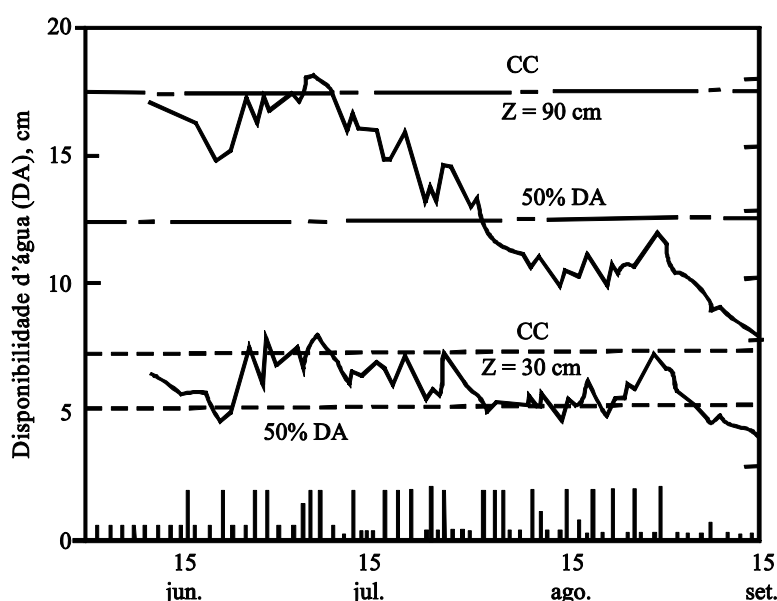


Figura 10. Variação típica da disponibilidade de água durante o ciclo de uma cultura irrigada por pivô central, em função da profundidade (Z).

16.24 Considerações finais

A água é um elemento essencial para vida e o seu uso eficiente e compartilhado tem sido uma exigência básica da sociedade. O conceito de sustentabilidade conduz para a busca do uso eficiente dos recursos disponíveis em geral e, em especial, na produção de alimentos, onde considera aspectos econômicos, sociais e ambientais.

Assim a implantação e uso de sistemas de irrigação que possibilitem elevada eficiência no uso da água para produção de alimentos, fibras e agroenergia se tornam condições básicas para o desenvolvimento da agricultura irrigada brasileira.

A eficiência de irrigação passa por três aspectos básicos: (i) que a captação de água de um manancial ocorra dentro de critérios técnicos considerando a disponibilidade real de água; (ii) que o sistema de irrigação utilizado tenha elevada eficiência de aplicação de água; e, (iii) que a decisão da irrigação (manejo) seja feita em base a critérios técnicos que possibilitem a aplicação na quantidade e no momento adequado.

Nas considerações sobre eficiência de uso de água na agricultura irrigada é importante analisar de maneira ampla o meio ambiente. Deve-se evitar a salinização do solo e a contaminação dos recursos hídricos, avaliar a disponibilidade de água, executar o manejo de irrigação com base no sistema solo-planta-atmosfera. Também é necessário analisar os benefícios da irrigação dentro do âmbito da relação entre produtividade e disponibilidade de água. Buscar a maximização da produtividade por unidade de água aplicada - onde ela for limitada - ou a maximização da produtividade por unidade de área, com aumento do lucro ou outros parâmetros onde houver maior abundância dos recursos hídricos.

Importante considerar que a otimização da eficiência de uso da água na agricultura e em especial na agricultura irrigada seja feita em base técnica e científica. Para isso, a utilização das funções de produção em base física e econômica permitem a análise abrangente da situação e assim poderão ser tomadas decisões baseadas em aspectos econômicos, associados as questões sociais e ambientais.

Neste sentido, é importante a obtenção de informações confiáveis do sistema de produção (dados no campo), utilização de conceitos de eficiência de uso de água por unidade de lâmina de irrigação aplicada, por produtividade das culturas, etc. Para isto é fundamental que sistemas de irrigação tenham a adoção de critérios de manejo técnico em base a turnos de rega fixos ou variáveis.

No passado a irrigação fez parte de um processo de "luta contra seca", onde as dificuldades técnicas dos sistemas e os equipamentos utilizados com baixa eficiência do uso de água, nem eram considerados como questões importantes. Com o avançar do processo e a crescente demanda pelos recursos hídricos em quantidade e qualidade no presente, e cada vez mais no futuro, o uso eficiente da água na agricultura irrigada é questão básica. Isto envolve o desenvolvimento de projetos adequados, uso de equipamentos com elevado potencial de eficiência no uso de água, sistemas de automação e controle à distância, assim como sistemas de manejo em base técnica.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: relatório pleno 2017. Brasília, ANA, 2017.

ALVES, E.M.; BERNARDO, S.; SILVA, J.F.; CONDE, A.R. Efeito de diferentes lâminas d'água sobre a produção de três cultivares de tomateiro (*Lycopersicon esculentum*, Mill.), com a utilização da irrigação por gotejamento. Revista Ceres, v.29, n.162, p.145-152, 1982.

BERNARDO, S. Impacto Ambiental da Irrigação no Brasil. In: SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. (Ed.). **Recursos Hídricos e Desenvolvimento Sustentável da Agricultura**. Brasília: MMA/SRH/ABEAS. Viçosa - MG. Departamento de Engenharia Agrícola, p.28-42, 1999.

BERNARDO, S. Impacto Ambiental da Irrigação no Brasil. Palestra proferida no II Workshop de Novas Tecnologias na Irrigação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE O USO MÚLTIPLO DA ÁGUA. Fortaleza-CE, 2008.

BERNARDO, S. Irrigação e produtividade. In: FARIA, M.A.; SILVA, E.L.; VILELA, L.A.A.; SILVA, A.M. (Ed.). **Manejo de irrigação**. Lavras-MG. Ufla/Sbea, p.117-132, 1998.

- BERNARDO, S. Irrigação: total, suplementar, com *deficit* e de salvação. **Revista ITEM**, Brasília-DF, n.71/72, p.64-68, 2006.
- BERNARDO, S. Manejo da irrigação na cana-de-açúcar. In: XVI CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM - CONIRD. Goiânia-GO, 2006.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, D.D.; SOARES, A.A. **Manual de irrigação**. 9. Ed., Viçosa-MG: Editora UFV, 545p., 2019.
- BRASIL. Lei 9433 de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, p. 470, 9 jan. 1997.
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H. Yield response to water. **Irrigation and drainage paper**. Rome: FAO, n.33, 193 p., 1979.
- DOORENBOS, J.; PRUIT, W.O. Crop water requirements. **Irrigation and drainage paper**. Roma: FAO, n.24, 179 p., 1975.
- GARDNER, W. R. Soil water movement and root absorption. In: PIERRE H. *et al.* (Ed.). Plant environment and efficient water use. W. Madison: Ann. **Soil Science Society of America**, p.127-149, 1965.
- HANKS, R.J.; GARDNER, W.R.; FLORIAN, R.L. Plant growth - evapotranspiration relations for several crops in Central Great Plains. **Agronomy Journal**, v.61, p.30-34, 1969.
- HEERMANN, D.F.; HAISE, H.R.; MICEISON, R.H. Scheduling center pivot sprinkler irrigation for corn production in easter Colorado. **Transaction of the ASAE**, v.19, n.1, p.284-287, 1976.
- JENSEN, M.E.; ROBB, D.C.N.; FRANZOY, G.E. Scheduling irrigation using climate-crop-soil data. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.96 (IRI), p.25-38, 1970.
- JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; PRATT, B.J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. **Transaction of the ASAE**, p.954-959, 1971.
- MARTINS, D.P. **Resposta do maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis* Sims var. *flavicarpa*) a lâminas de irrigação e doses de nitrogênio e potássio**. 84p., 1998. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes-RJ, 1998.
- SOUSA, E.F.; BERNARDO, S.; CARVALHO, J.A. Função de produção da cana-de-açúcar em relação à água para três cultivares, em Campos dos Goytacazes-RJ. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal-SP, v.19, n.1, p.28-42, 1999.
- SOUSA, E.F. **Função de produção da cana-de-açúcar e da goiabeira em relação à irrigação**. 119p., 1997. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes-RJ, 1997.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES, D. FAO crop yields response to water. **Irrigation and Drainage Paper**, n.66, 2012.
- STEGMAN, E.C.; MUSICK, J.T.; STEWART, J.I. Irrigation water management. In: JENSEN, M.E. (Ed.). **Design and operation of farm Irrigation systems**. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI, p.763-816, 1980.
- STEWART, J.I.; HAGAN, R.M.; PRUITT, W.O. **Production functions and predicted irrigation programmes for a principal crop as required for water resources planning and increased water efficiency**: final report. Washington, D.C.: Department of Interior, 1976.
- WRIGHT, J.L. New evapotranspiration crop coefficients. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v.108 (IR1), p.57-74, 1982.

CAPÍTULO 17

17 ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL

Durval Dourado Neto, Allan Delfino, Pedro Alves Quilici Coutinho, Rodnei Rizzo, Marcela Almeida de Araujo, Alberto Giaroli de Oliveira Pereira Barretto, Pedro Abel Vieira Júnior, Roberto Rodrigues e Alysson Paolinelli

Resumo

Com o objetivo de caracterizar a sustentabilidade do meio rural, foi proposta uma metodologia para caracterização do desenvolvimento econômico, social e ambiental, e realizado um estudo específico para os estabelecimentos localizados na área rural nos 645 municípios do Estado de São Paulo. Em função dos resultados obtidos, conclui-se que: (i) objetivamente, a sustentabilidade do meio rural pode ser caracterizada por intermédio dos índices de desenvolvimento econômico, social e ambiental; (ii) a metodologia proposta é adequada para caracterização da sustentabilidade no meio rural utilizando a média geométrica, por ser mais restritiva, apresentando maior aderência aos valores atuais da sociedade, de valorizar o desenvolvimento social e ambiental; e (iii) em função da caracterização da sustentabilidade econômica, social e ambiental dos estabelecimentos localizados no meio rural nos 645 municípios do Estado de São Paulo, pode-se subdividi-los em quatro classes: (Classe A) classe inferior contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor mínimo e o primeiro quartil, (Classe B) classe inferior intermediária, contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor correspondente ao primeiro quartil e a mediana, (Classe C) classe superior intermediária, contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor correspondente à mediana e ao terceiro quartil, e (Classe D) classe superior contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor correspondente ao terceiro quartil e o valor máximo médio encontrado. Este trabalho foi baseado na Dissertação de Mestrado defendida pelo segundo autor junto à FGV, sob a orientação do primeiro autor, desenvolvido em cooperação com o grupo de políticas públicas (GPP) da Esalq/USP.

17.1 Introdução

A tempos discute-se sobre o desenvolvimento sustentável e os caminhos pelos quais a sociedade moderna poderá alcançá-lo. Essa não é uma tarefa trivial, uma vez que tal processo visa conciliar o desenvolvimento econômico, à preservação ambiental e ainda garantir uma adequada qualidade de vida a todos (WORSTER, 1991). Além disso, os problemas ambientais são sistêmicos e estão relacionados a cadeias complexas e interdependentes, nas quais há constantes compensações (*trade-offs*) não lineares (GIATTI *et al.*, 2016). Um exemplo deste processo seria o nexos existente entre a disponibilidade de água, a produção de alimentos e energia. Neste caso, à adequada oferta de água requer energia, já as diferentes formas de geração de energia demandam recursos hídricos, e em paralelo, água e energia são essências para a produção de alimentos (BENITES-LAZARO; GIATTI, 2020). Logo, o manejo de um determinado serviço ambiental irá influenciar não somente o mesmo, mas também a todos os outros. Diante deste olhar, possíveis soluções “sustentáveis” requerem a mudança da percepção de todos, nos pensamentos, valores e comportamento. Para gerar tais soluções, é fundamental compreender nossos sistemas de produção e suas externalidades, tendo sempre

no horizonte o equilíbrio entre o setor econômico, social e ambiental. Neste contexto, soma-se ainda o desafio de satisfazer nossas necessidades e aspirações atuais, sem que haja impactos negativos para as gerações futuras” (CAPRA, 1982, 1996).

Sabe-se que uma grande problemática atual é o combate a possível escassez de alimentos, a qual está relacionada às projeções de crescimento populacional e aos limites planetários. Conforme estudos da Organização das Nações Unidas (ONU), a crescente demanda por alimentos só será atendida com a utilização de técnicas de irrigação, sendo que 80% de todo acréscimo na produção dependerá dos recursos hídricos (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2017). Essa questão torna-se ainda mais preocupante quando notamos que grande parte dos recursos hídricos utilizados atualmente, já são dedicados a atividades agrícolas (em torno de 70%) e a consequente produção de alimentos. Em muitas localidades já existe uma grande tensão quanto ao uso dos recursos hídricos, sendo evidente a competição entre o uso da água para o abastecimento ou agricultura. Isso é ainda mais preocupante se considerarmos os dados divulgados pelo relatório de desenvolvimento humano da ONU (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO, 2016). De acordo com tal relatório, no início do século 21, cerca de 1,1 bilhão de pessoas não tinham acesso a água potável. Ao manejar um recurso tão importante quanto a água é preciso compreender que sua escassez não se restringe somente a sua ausência física, mas também a sua baixa qualidade, má distribuição e em alguns casos, a apropriação por determinados atores sociais. No mais, é fundamental compreendermos a estreita relação entre a disponibilidade de água e o desenvolvimento social.

O histórico uso dos recursos naturais, especialmente o uso da água em todo o mundo é de longe cheio de problemas, causando preocupação em toda a humanidade. A escassez de água no planeta é reflexo do uso inconsciente deste recurso natural e, do manejo inadequado dela, trazendo preocupações futuras que poderão ser irreversíveis. Esse recurso apesar de ser renovável é fungível, visto que além da crescente população mundial, ainda nos deparamos com o constante desenvolvimento de alguns setores econômicos, entre eles o agrícola. É evidente a importância da agricultura para a existência humana, bem como em razão da representatividade que o agronegócio tem no Brasil, o qual corresponde a 21,5% do PIB nacional (BARROS; CASTRO, 2020). Diante deste contexto, devemos compreender o papel fundamental que a agricultura detém tanto para alavancar o desenvolvimento humano, quanto para preservar um recurso natural. No mais, temos que empregar a agricultura como ferramenta para reduzir as desigualdades sociais e regionais, haja vista, estar ela presente em todo território nacional, viabilizando assim o processo de desenvolvimento sustentável.

Para podermos assegurar o adequado desenvolvimento do setor agrícola, faz-se necessário que os mais diferentes atores sociais, dentre eles gestores e políticos, tenham uma perspectiva abrangente de como suas decisões influenciam a dinâmica sociodemográfica e o ambiente, assim como os impactos e desdobramento de tais decisões. Para isso é fundamental a concepção de índices e indicadores de fácil compreensão, grande abrangência e possibilidade de implementação, mesmo diante das limitações quanto a disponibilidade de dados. Um exemplo disto seria o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), o qual é utilizado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) em seu relatório anual. Esse índice foi desenvolvido em 1990, pelos economistas Amartya Sen e Mahbub ul Haq, com sua implementação após três anos e, desde então é amplamente utilizado. O cálculo do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é baseado no resultado de três combinações, sendo elas, expectativa de vida ao nascer, anos médios de estudo e anos esperados de escolaridade e, do PIB traduzido na renda per capita.

Apesar de muito utilizado para mensurar o desenvolvimento humano, este índice privilegia apenas o aspecto econômico do desenvolvimento, não abrangendo outros fatores muito importantes, e muito menos a sustentabilidade. De acordo com Sergio Ferraz de Lima,

a sustentabilidade busca conciliar a questão ambiental com a questão econômica, incorporando o princípio básico da continuidade, onde nada pode ser sustentável se não for contínuo (LIMA, 2008). Portanto, é fundamental que haja uma interação harmoniosa não só entre estes dois pilares, mas sim entre os três pilares aqui descritos, incluindo o social. Daí criar um índice de desenvolvimento rural sustentável, tem por finalidade investigar outros indicadores para a literatura, em sinergia com aquela já abordada no IDH. Assim sendo, podemos afirmar que a sua criação é um exercício de aproximação das discussões sociológicas a utilização de modelos matemáticos, de modo a aferir os diferentes níveis de desenvolvimento, respeitando as características dos espaços rurais.

Portanto, o presente trabalho busca propor e avaliar meios para caracterizar objetivamente a sustentabilidade do meio rural. Além disso, para demonstrar a aplicabilidade da técnica proposta, a mesma é empregada nos estabelecimentos localizados no meio rural do Estado de São Paulo. Neste caso, optou-se por analisar o estado de São Paulo pelo fato dele ser líder no país em diversos setores do agronegócio, dentre eles: cana-de-açúcar, açúcar e etanol, laranja (60% da produção mundial), a olericultura (40% da produção nacional), produção de flores, entre outras culturas, respondendo por 20% do agro brasileiro (MALISZEWSKI, 2019).

17.2 Índice de desenvolvimento rural sustentável

Este estudo (DELFINO, 2021) considerou todos os 645 municípios do estado de São Paulo e suas especificidades (Figura 1). Para uma melhor compreensão dos processos envolvidos na sustentabilidade do meio rural, os índices desenvolvidos foram espacializados, tendo como base a malha de municípios do IBGE para o ano de 2019 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2020). Sendo assim, para todo o território de cada um dos municípios, eram associados valores dos índices econômico, ambiental e social, assim como o índice de desenvolvimento econômico rural sustentável.

O método aqui proposto conta com fórmulas e índices concebidos especificamente para a caracterização da sustentabilidade. Todas essas ferramentas se baseiam nos três eixos do desenvolvimento sustentável, o econômico, o social e o ambiental. É fundamental também que se compreenda a estrutura metodológica desta técnica (Figura 2). Tal estrutura pode ser dividida em 3 níveis, sendo o primeiro correspondente as mais diversas características que compõe a sustentabilidade, e aqui abrangida por 2 índices relacionados ao eixo econômico, 2 referentes ao social e 3 relacionados ao ambiental (Figura 2). Já no segundo nível, esses índices são agregados por eixo, resultando, portanto, nos índices denominados econômico, social e ambiental. Por fim, no terceiro nível, busca-se uma caracterização abrangente da sustentabilidade rural, e conseqüentemente a confluência de todas as informações geradas em um único indicador, aqui descrito como o Índice de Desenvolvimento Rural Sustentável (IDRS).

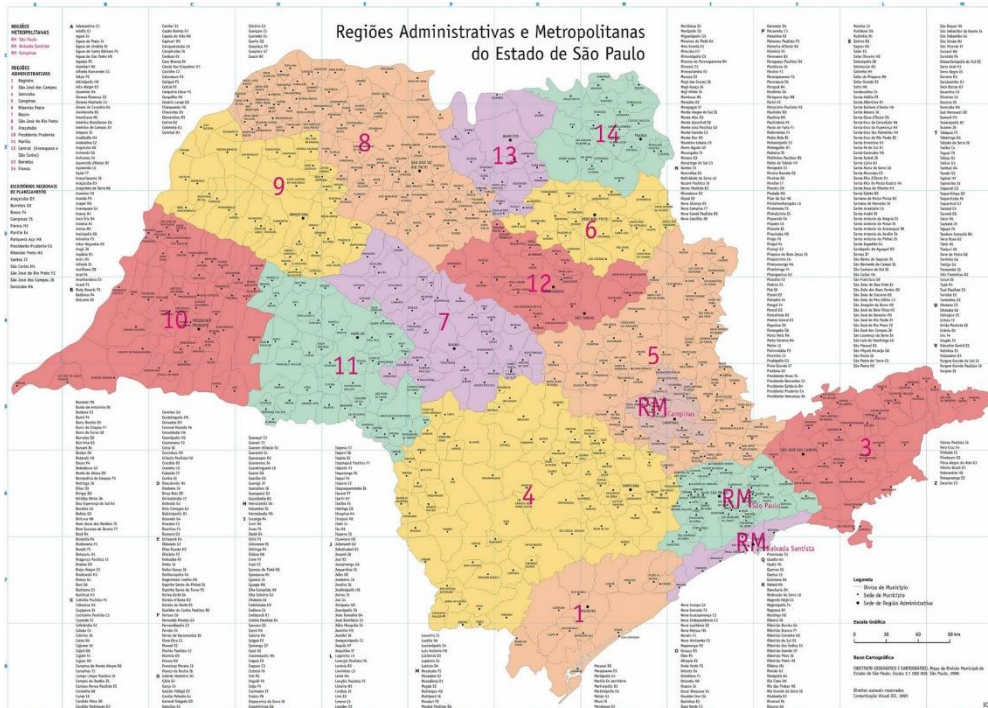


Figura 1. Mapa dos 645 municípios do Estado de São Paulo, especificando as regiões administrativas e metropolitanas do Estado de São Paulo (INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO, 2005).

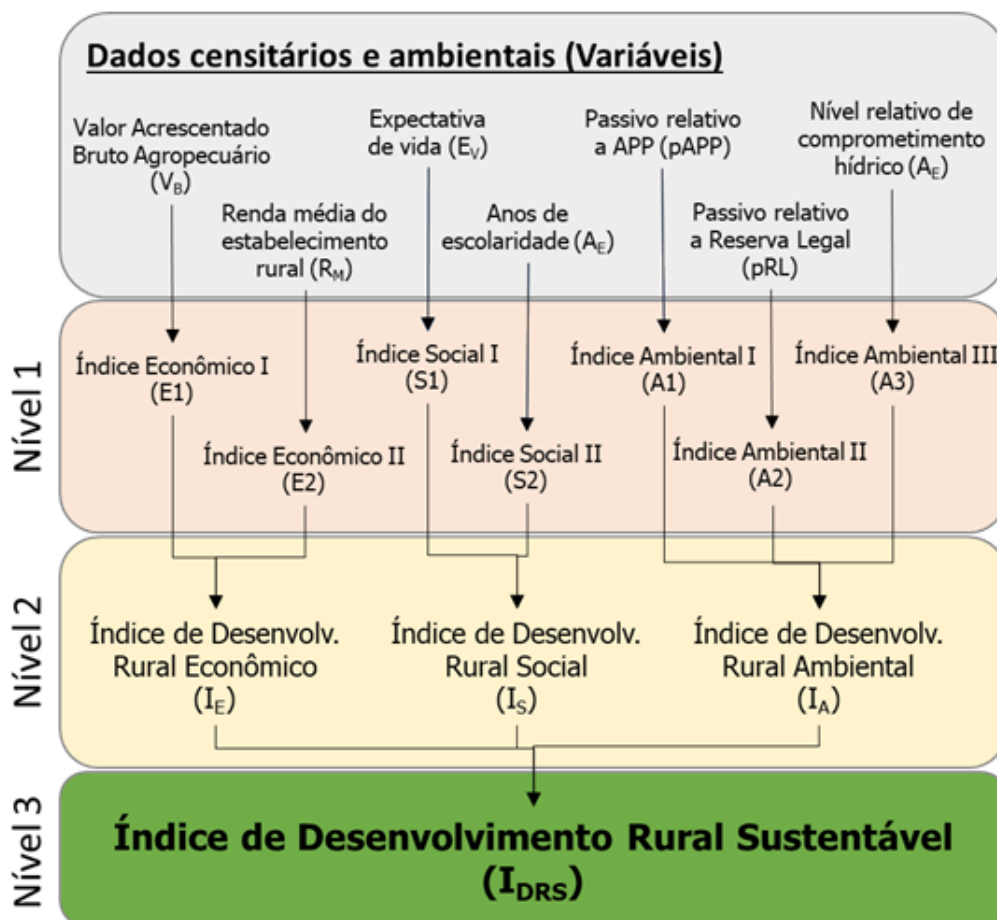


Figura 2. Estrutura metodológica para obtenção dos índices de desenvolvimento rural sustentável.

É importante observar que a base para a realização do método corresponde a obtenção de informações que indiquem as condições socioeconômica e ambiental dos municípios. Essas informações, chamadas a partir daqui de variáveis, são correspondentes a dados de levantamentos ambientais ou censitários (Figura 2). Informações referentes ao aspecto econômico correspondem ao valor acrescentado bruto agropecuário médio (V_B ; kR\$ município⁻¹ ano⁻¹) e renda média do estabelecimento rural (R_M ; kR\$ estabelecimento⁻¹ ano⁻¹) (Tabela 1).

Tabela 1. Índices representando cada um dos eixos de desenvolvimento sustentável, as respectivas variáveis utilizadas nos cálculos, assim como os limites superior (LS) e inferior (LI), além de uma descrição das classes associadas aos índices.

Índice	Valor	Variável I	Variável II	Variável III	LI	LS	Classe	Descrição
Econômico	Mínimo	V_{Bn}	R_{Mn}	-	-	-	-	-
	Primeiro Quartil	V_{Bpq}	R_{Mpq}	-	n	(pq)	A	Classe inferior (25%)
	Mediana	V_{Bm}	R_{Mm}	-	pq	(m)	B	Classe intermediária inferior (25%)
	Média	$V_{B\mu}$	$R_{M\mu}$	-	-	-	-	-
	Terceiro Quartil	V_{Btq}	R_{Mtq}	-	m	(tq)	C	Classe intermediária superior (25%)
	Máximo	V_{Bx}	R_{Mx}	-	tq	x	D	Classe superior (25%)
Social	Mínimo	E_{Vn}	A_{En}	-	-	-	-	-
	Primeiro Quartil	E_{Vpq}	A_{Epq}	-	n	(pq)	A	Classe inferior (25%)
	Mediana	E_{Vm}	A_{Em}	-	pq	(m)	B	Classe intermediária inferior (25%)
	Média	$E_{V\mu}$	$A_{E\mu}$	-	-	-	-	-
	Terceiro Quartil	E_{Vtq}	A_{Etq}	-	m	(tq)	C	Classe intermediária superior (25%)
	Máximo	E_{Vx}	A_{Ex}	-	tq	x	D	Classe superior (25%)
Ambiental	Mínimo	APP_{rn}	RL_{rn}	N_{Chn}	-	-	-	-
	Primeiro Quartil	APP_{rpq}	RL_{rpq}	N_{Chpq}	n	(pq)	A	Classe inferior (25%)
	Mediana	APP_{rm}	RL_{rm}	N_{Chm}	pq	(m)	B	Classe intermediária inferior (25%)
	Média	$APP_{r\mu}$	$RL_{r\mu}$	$N_{Ch\mu}$	-	-	-	-
	Terceiro Quartil	APP_{rtq}	RL_{rtq}	$N_{Ch tq}$	m	(tq)	C	Classe intermediária superior (25%)
	Máximo	APP_{rx}	RL_{rx}	N_{Chx}	tq	x	D	Classe superior (25%)

Abreviações: V_b : valor acrescentado bruto; R_m : renda média municipal ajustada; E_v : expectativa de vida; A_e : escolaridade; APP: área de preservação permanente; RL: área de reserva legal; N_{ch} : nível de comprometimento hídrico. **Sufixos**: mínimo (n), primeiro quartil (pq), mediana (m), média (μ), terceiro quartil (tq) e máximo (x).

Para caracterização do aspecto social, considera-se a expectativa de vida (E_v ; Anos) e os anos de escolaridade (A_e ; Anos) (Tabela 1). O E_v é tido neste estudo como um conceito estatístico, indicativo da longevidade (tempo de vida) de uma determinada população, estando este diretamente associado ao bem-estar do indivíduo. Já o A_e representa o grau de

escolaridade de uma população específica, considerando um ciclo escolar de 0 a 20 anos. Tanto A_E quanto E_V foram elaborados com base em dados do Censo Agropecuário de 2017 do Instituto Brasileiro de Geografia (IBGE). É importante ressaltar ainda, que os dados de expectativa de vida podem ser encontrados no Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, criado pela FJP, Ipea e PNUD.

Os aspectos ambientais por sua vez, são representados pelos passivos referentes às áreas de preservação permanente (pAPP; $m^2 m^{-2}$) e reserva legal (pRL; $m^2 m^{-2}$), assim como o nível relativo de comprometimento hídrico (N_{CH} ; $m^3 m^{-3}$). Neste contexto, os passivos ambientais aqui descritos podem ser compreendidos como a obrigação legal dos estabelecimentos rurais com a restauração das áreas de APP e RL, e, portanto, o comprometimento de recursos financeiros na restauração ambiental. O N_{CH} estabelece uma relação entre a demanda total de retirada de água e a disponibilidade dos recursos hídricos, onde os usos consuntivos são realizados.

17.2.1 Caracterização dos estabelecimentos municipais de acordo com os índices econômicos, sociais, ambientais e o índice de sustentabilidade

Uma vez que a base de dados preliminar foi preparada e as informações censitárias organizadas, o próximo passo consistiu em converter cada uma destas informações nos índices de primeiro nível (Figura 2). Essa conversão das variáveis em índices demandou o emprego de modelos matemáticos, os quais serão descritos em detalhes nos tópicos abaixo. No mais, vale ressaltar que os índices concebidos variam entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhores as condições da localidade avaliada.

17.2.2 Índices de 1º nível

17.2.2.1 Índice Econômico I - Valor Acrescentado Bruto (E_1)

Para o cálculo do valor acrescentado bruto agropecuário médio (V_{B_i} , R\$ estabelecimento⁻¹ ano⁻¹) referente ao i -ésimo do município do Estado de São Paulo, tem-se que:

$$V_{B_i} = \frac{\sum_{j=1}^{ne_i} VAB_{i,j}}{ne_i} \quad (1)$$

em que $VAB_{i,j}$ é o valor acrescentado bruto do j -ésimo estabelecimento rural do i -ésimo município do Estado de São Paulo (R\$ ano⁻¹), ne_i o número de estabelecimentos do i -ésimo município.

O valor do índice correspondente ao valor acrescentado bruto agropecuário (E_{1_i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$x_i = \frac{V_{B_i}}{V_{B_x}} \quad (2)$$

$$E_{1_i} = 1 - \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot e_1 \cdot (m + x_i)}} \quad (3)$$

em que V_{B_i} é o valor acrescentado bruto agropecuário médio (R\$ estabelecimento⁻¹ ano⁻¹) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, V_{B_x} o valor acrescentado bruto agropecuário médio (kR\$ município⁻¹ ano⁻¹) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i o valor acrescentado bruto agropecuário médio relativo (variável

adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, n o valor mínimo a ser estimado pelo modelo ($n = 0,01$), m o valor da mediana e e_1 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 3) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 2).

Tabela 2. Valores bases do índice correspondente ao valor acrescentado bruto agropecuário (E_1) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva e_1) do modelo (equação 3).

V_B	x	e_1	Classe
V_{Bn}	x_n	0,00	Muito baixo
V_{Bpq}	x_{pq}	0,10	Baixo
V_{Bm}	x_m	0,30	Médio
V_{Btq}	x_{tq}	0,60	Muito bom
V_{Bx}	x_x	1,00	Excelente

17.2.2.2 Índice Econômico II -Renda média municipal ajustada (E_2)

Para o cálculo da renda média municipal ajustada (R_{M_i} , kR\$ estabelecimento ano⁻¹), tem-se que:

$$R_{M_i} = \frac{\sum_j^{ne_i} R_{i,j}}{ne_i} \quad (4)$$

em que $R_{i,j}$ é a receita do j -ésimo estabelecimento rural do i -ésimo município do Estado de São Paulo (kR\$ ano⁻¹), ne_i o número de estabelecimentos do i -ésimo município.

O valor do índice correspondente à renda média municipal ajustada (E_{2_i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$x_i = \frac{R_{M_i}}{R_{M_x}} \quad (5)$$

$$E_{2_i} = 1 - \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot e_2 \cdot (m + x_i)}} \quad (6)$$

em que R_{M_i} é a renda média municipal ajustada (kR\$ município⁻¹ ano⁻¹) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, R_{M_x} a renda média municipal ajustada (kR\$ município⁻¹ ano⁻¹) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i a renda média municipal ajustada relativa (variável adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, e e_1 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 6) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 3).

Tabela 3. Valores bases do índice correspondente à renda média municipal ajustada (E_2) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva e_1) do modelo (equação 6).

R_M	x	e_2	Classe
R_{Mn}	x_n	0,00	Muito baixo
R_{Mpq}	x_{pq}	0,05	Baixo
R_{Mm}	x_m	0,15	Médio
R_{Mtq}	x_{tq}	0,30	Muito bom
R_{Mx}	x_x	1,00	Excelente

17.2.2.3 Índice Social I - Expectativa de vida (S_1)

O valor do índice correspondente ao valor acrescentado bruto agropecuário (S_{1i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$x_i = \frac{E_{V_i}}{E_{V_x}} \quad (7)$$

$$S_{1i} = 1 - \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot s_1 \cdot (m + x_i)}} \quad (8)$$

em que E_{V_i} é a expectativa de vida (anos) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, E_{V_x} a expectativa de vida (anos) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i a expectativa de vida relativa (variável adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, e e_1 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 8) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 4).

Tabela 4. Valores bases do índice correspondente à expectativa de vida (S_1) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva s_1) do modelo (equação 8).

E_v	x	s_1	Classe
E_{Vn}	x_n	0,05	Muito baixo
E_{Vpq}	x_{pq}	0,20	Baixo
E_{Vm}	x_m	0,40	Médio
E_{Vtq}	x_{tq}	0,70	Muito bom
E_{Vx}	x_x	1,00	Excelente

17.2.2.4 Índice Social II - Escolaridade (S_2)

O valor do índice correspondente à escolaridade (S_{2i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$x_i = \frac{A_{Ei}}{A_{Ex}} \quad (9)$$

$$S_{2i} = 1 - \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot S_2 \cdot (m + x_i)}} \quad (10)$$

em que R_{M_i} é a escolaridade (anos) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, R_{M_x} a escolaridade (anos) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i a escolaridade relativa (variável adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, e e_1 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 10) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 5).

Tabela 5. Valores bases do índice correspondente à escolaridade (S_2) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva e_1) do modelo (equação 10).

A_E	x	S_2	Classe
A_{En}	x_n	0,00	Muito baixo
A_{Epq}	x_{pq}	0,05	Baixo
A_{Em}	x_m	0,30	Médio
A_{Etq}	x_{tq}	0,50	Muito bom
A_{Ex}	x_x	1,00	Excelente

17.2.2.5 Índice Ambiental I - Área de preservação permanente relativa (A_1)

O valor do índice correspondente à área de preservação permanente relativa (A_{1i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão (Modelo Tipo II):

$$x_i = \frac{pAPP_i}{pAPP_x} \quad (11)$$

$$A_{1i} = \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot a_1 \cdot (m + x_i)}} \quad (12)$$

em que APP_{r_i} é a área de preservação permanente relativa ($m^2 \cdot m^{-2}$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, APP_{r_x} a área de preservação permanente relativa ($m^2 \cdot m^{-2}$) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i a área de preservação permanente relativa (variável adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, e e_1 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 12) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 6).

Tabela 6. Valores bases do índice correspondente à área de preservação permanente relativa (A_1) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva a_1) do modelo (equação 12).

APPr	x	A_1	Classe
APPr _n	x_n	0,05	Muito baixo
APPr _{pq}	x_{pq}	0,20	Baixo
APPr _m	x_m	0,40	Médio
APPr _{tq}	x_{tq}	0,70	Muito bom
APPr _x	x_x	1,00	Excelente

17.2.2.6 Índice Ambiental II - Área de reserva legal relativa (A_2)

O valor do índice correspondente à área de reserva legal relativa (A_{2_i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$x_i = \frac{pRL_i}{pRL_x} \quad (13)$$

$$A_{2_i} = \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot a_2 \cdot (m + x_i)}} \quad (14)$$

em que RL_{r_i} é a área de reserva legal relativa (m^2 m^{-2}) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, R_{M_x} a área de reserva legal relativa (anos) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i a área de reserva legal relativa (variável adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, e a_2 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 14) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 7).

Tabela 7. Valores bases do índice correspondente à área de reserva legal relativa (A_2) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva e_1) do modelo (equação 14).

RLr	x	a_2	Classe
RLr _n	x_n	0,000	Muito baixo
RLr _{pq}	x_{pq}	0,025	Baixo
RLr _m	x_m	0,200	Médio
RLr _{tq}	x_{tq}	0,500	Muito bom
RLr _x	x_x	1,000	Excelente

17.2.2.7 Índice Ambiental III - Comprometimento hídrico relativo (A_3)

O valor do índice correspondente ao nível de comprometimento hídrico relativo (A_{3_i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$x_i = \frac{N_{CH_i}}{N_{CH_x}} \quad (15)$$

$$A_{3_i} = \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot a_3 \cdot (m + x_i)}} \quad (16)$$

em que N_{CH_i} é o nível de comprometimento hídrico relativo ($m^3 m^{-3}$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, N_{CH_x} o nível de comprometimento hídrico relativo ($m^3 m^{-3}$) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i o nível de comprometimento hídrico relativo (variável adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, e e_1 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 16) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 8).

Tabela 8. Valores bases do índice correspondente ao nível de comprometimento hídrico relativo (A_3) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva a_3) do modelo (equação 16).

N_{CH}	x	a_3	Classe
N_{CH_n}	x_n	0,05	Muito baixo
$N_{CH_{pq}}$	x_{pq}	0,20	Baixo
N_{CH_m}	x_m	0,40	Médio
$N_{CH_{tq}}$	x_{tq}	0,70	Muito bom
N_{CH_x}	x_x	1,00	Excelente

17.2.3 Índices de 2º nível

17.2.3.1 Índice de desenvolvimento rural econômico

O índice de desenvolvimento rural econômico (I_E) é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$I_E = \sqrt{E_1 \cdot E_2} \quad (17)$$

em que E_1 é o índice referente ao valor acrescentado bruto agropecuário, e E_2 o índice referente à renda média ajustada.

17.2.3.2 Índice de desenvolvimento rural social

O índice de desenvolvimento rural social (I_S) é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$I_S = \sqrt{S_1 \cdot S_2} \quad (18)$$

em que S_1 é o índice referente ao índice referente à expectativa de vida, e S_2 ao índice referente aos anos de escolaridade, considerando um ciclo escolar de 0 (valor mínimo) a 20 anos (valor máximo).

17.2.3.3 Índice de desenvolvimento rural ambiental

O índice de desenvolvimento rural ambiental (I_A) é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$I_A = \sqrt{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3} \quad (19)$$

em que A_1 é o índice referente ao índice referente à área de preservação permanente relativa, A_2 o índice referente à área de reserva legal relativa, e A_3 o índice referente ao nível de comprometimento hídrico relativo.

17.2.4 Índice de 3º nível - Desenvolvimento Rural Sustentável

O índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$I_{ESAr} = \sqrt[3]{I_E \cdot I_S \cdot I_A} \quad (20)$$

em que I_E é o índice de desenvolvimento rural econômico, I_S o índice de rural social, e I_A o índice de desenvolvimento rural ambiental.

17.3 Estudo de caso: o desenvolvimento rural sustentável no estado de São Paulo

17.3.1 Desenvolvimento econômico no meio rural

Ao avaliar o valor agregado bruto nos diversos municípios do estado de São Paulo, nota-se que o valor médio observado foi de MR\$ 81 município⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 9). Contudo, em alguns poucos casos o V_B mostrou-se até 10 vezes maior que a média estadual (Figura 3A). Tal fato é observado no extremo Norte do estado, na região de Barretos, Orlândia e Franca (quadrante 48°W/50°W x 20°S/21°S) (Figura 3A). Essa superioridade decorre da concentração da atividade canavieira nestes locais, a qual gera o produto de maior valor agropecuário (CASER *et al.*, 2012, 2019; DELFINO, 2021). Outro exemplo similar é observado nos municípios à extremo Sul do estado, representado pela região de Itapeva, Itapetininga e Registro (quadrante 48°W/50°W x 23°S/25°S). Neste caso, a concentração é impulsionada não somente pela cana, mas também pelo cultivo da laranja, do tomate de mesa e de cereais (milho e soja) em Itapeva, a banana em Registro e uma gama de variedade em Itapetininga (laranja, carne de frango, uva de mesa, soja e milho, entre outros).

Os destaques no extremo Sudeste do mapa (quadrante 46°W/48°W x 23°S/24°S) estão relacionados às regiões de Mogi das Cruzes e Sorocaba (Piedade e Ibiúna). Nessas regiões se sobressaem as atividades de granjeiros (ovos), cultivo de frutas (caqui), o cultivo de folhagens (beterraba, repolho e verduras) e a criação de gado leiteiro. Todas estas atividades se renovam muito rápido, sendo a alta rotatividade responsável por impulsionar os dados da região, apesar das culturas não gerarem um alto valor agregado (CASER *et al.*, 2012, 2019; DELFINO, 2021). No extremo Oeste do estado (quadrante 50°W/52°W x 22°S/23°S), há superioridade da região de Presidente Prudente, Assis e Marília. Tal fato se deu pela concentração canavieira em Assis e Ourinhos, da carne bovina e do café beneficiado em Marília, e também da atividade canavieira em Presidente Prudente. Ademais, é importante indicar a contribuição considerável de outras variantes favoráveis, estas desenvolvidas basicamente em função da prosperidade do setor agrícola e demais atividades dependentes ou correlatas (KAGEYAMA, 2004).

Tabela 9. Valores mínimo, primeiro quartil, mediana, média, terceiro quartil e máximo referentes ao valor acrescentado bruto agropecuário médio (V_B , kR\$ município⁻¹ ano⁻¹), renda média municipal ajustada (R_M , kR\$ estabelecimento⁻¹ ano⁻¹) [índice Econômico], expectativa de vida (E_V , anos), anos de escolaridade (A_E , anos), considerando um ciclo escolar de 0 a 20 anos [índice Social] passivo relativo de APP ($pAPP$, m² m⁻²), passivo relativo de área de RL (pRL , m² m⁻²), nível relativo de comprometimento hídrico (N_{CH} , m³ m⁻³) [índice Ambiental].

Valor	Índice						
	Econômico		Social		Ambiental		
	V_B	R_M	E_V	A_E	$pAPP$	pRL	N_{CH}
Mínimo	0	0,0	71,49	5,000	0,007487	0,0000	0,000002
Primeiro Quartil	25.366	148,0	74,10	8,959	0,286409	0,3495	0,033502
Mediana	52.405	261,4	75,19	9,735	0,378804	0,5954	0,075875
Média	81.091	383,0	75,16	9,707	0,384880	0,5219	0,127085
Terceiro Quartil	103.334	495,6	76,15	10,539	0,489586	0,7333	0,165404
Máximo	831.100	2631,2	78,37	12,997	0,787642	0,9367	1,000000

Dentre as regiões avaliadas, pode-se notar que Pindamonhangaba e Guaratinguetá, localizadas no extremo Leste do estado (quadrante 44°W/48°W x 22°S/24°S), tiveram ínfima representação no mapa do agronegócio. O V_B destas localidades é reduzido devido a pouca diversidade de culturas nesta região. O seu principal produto é a carne bovina e o leite, uma vez que tais regiões são acidentadas e de baixa aptidão a agricultura, tendo como melhor aproveitamento a pecuária (CASER *et al.*, 2012, 2019; DELFINO, 2021).

Outro aspecto importante na análise econômica é a renda média dos estabelecimentos municipais. Neste caso, observou-se um valor médio de R_M , correspondente à kR\$ 383,0 estabelecimento⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 9) no Estado de São Paulo.

Analisando os mapas da R_M (Figura 3B), nota-se boa concordância entre a mesma e o V_B de determinadas regiões. Um exemplo disto é o Norte e extremo Oeste do Estado de São Paulo (quadrante 48°W/50°W x 20°S/21°S), correspondente a região de Barretos, Orlandia e Franca, ou a região de Presidente Prudente, Assis e Marília (quadrante 50°W/52°W x 22°S/23°S). Nessas localidades, nota-se que a renda média é alta, primeiro porque a atividade canieira é a de maior concentração, e segundo por ela ser de maior valor acrescentado bruto entre os produtos agropecuários. Além disso, percebe-se uma outra importante relação entre o tamanho das propriedades e a renda. Tal relação é devido a concentração de grandes propriedades canieiras, a qual reflete na maior concentração de renda nos municípios naquelas regiões (CASER *et al.*, 2012, 2019; DELFINO, 2021).

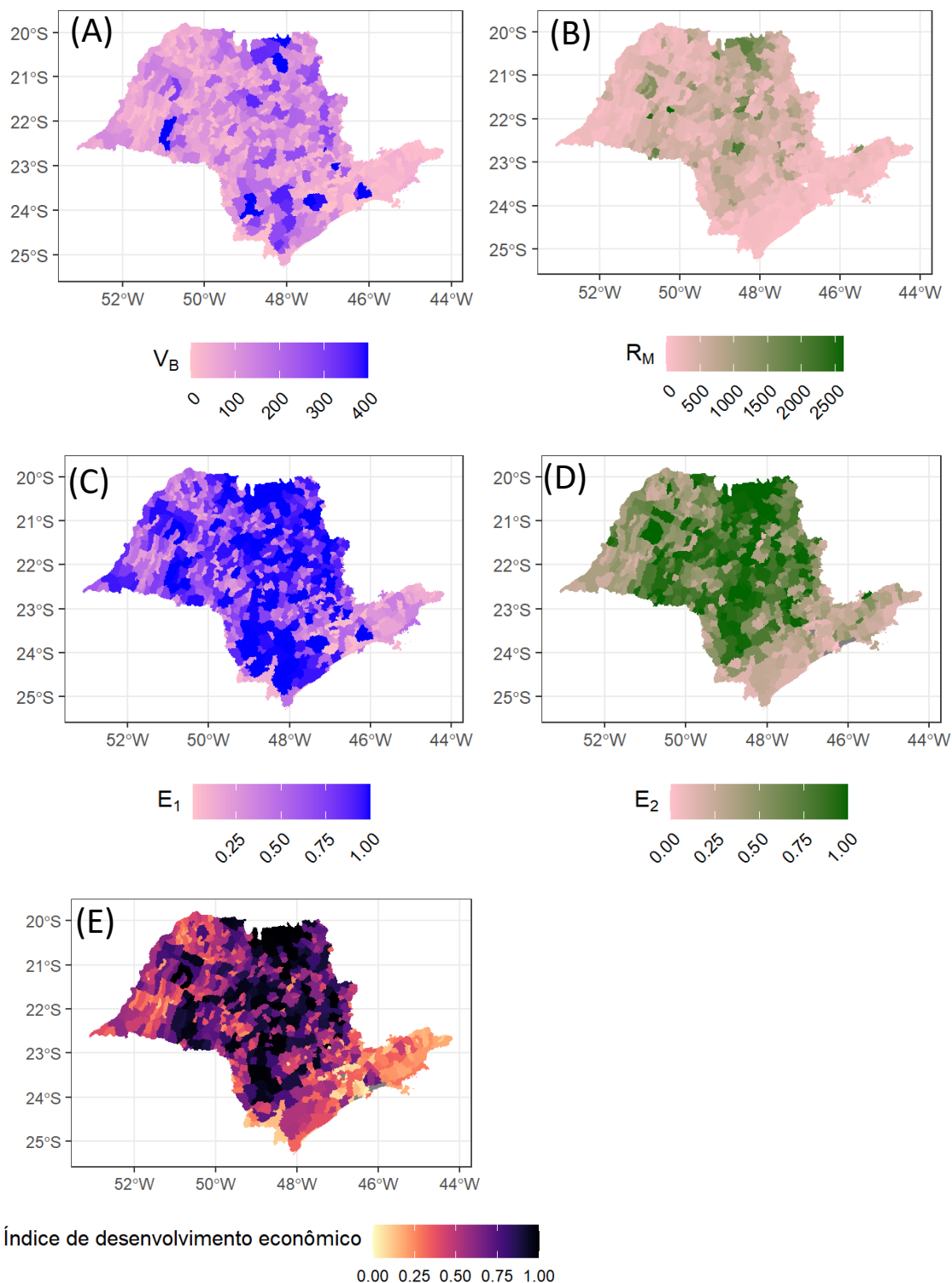


Figura 3. Mapas representando a distribuição espacial do Valor Agregado Bruto (V_B) (A), da renda média (R_M) (B), dos índices E_1 (C) e E_2 (D), assim como do índice de desenvolvimento rural econômico.

No extremo Sul do estado, na parte inferior do mapa (quadrante 48°W/50°W x 23°S/24°S), nota-se ligeira discordância entre V_B e R_M . Tal localidade corresponde a região de Itapeva, a qual está ligada a produção do tomate de mesa, este cultivado em pequenas propriedades rurais. Devido aos pequenos e numerosos estabelecimentos rurais, a renda é

bastante diluída. Isso não é exclusividade apenas do cultivo de tomate, processo semelhante ocorre com a produção de frango e ovos em Itapetininga e a banana em Registro.

Já nas regiões de Pindamonhangaba e Guaratinguetá, no extremo Leste do estado (quadrante 44°W/48°W x 22°S/24°S), os valores de R_M encontrados se mostram bem inferiores. Conforme já mencionado, a região (serrana) possui baixa aptidão agrícola, sendo mais aproveitada pela pecuária (leiteira e de corte) e seus muitos pequenos produtores, além de um baixo valor agregado do leite. Uma relação similar é observada no cinturão verde de Mogi das Cruzes e Sorocaba (Piedade e Ibiúna), onde a baixa renda é decorrente da grande quantidade de produtores rurais (CASER *et al.*, 2019).

Tendo em vista os padrões de variação da V_B e R_M nos municípios do estado de São Paulo, assim como o índice de desenvolvimento econômico (I_E) derivado delas (Figura 3C, D, E), fica evidente a capacidade do I_E em representar, na íntegra, a situação do desenvolvimento econômico estadual. Vemos uma grande superioridade da região Norte em relação as outras regiões, e uma inferioridade absoluta encontrada na região Sudeste do estado em razão das demais regiões do estado. Além de tudo, restou demonstrado que a parte Central do estado, apresentou bons números considerando a média estadual (Figura 3E).

17.3.2 O Desenvolvimento social no meio rural

O desenvolvimento social está intimamente relacionado a expectativa de vida, a qual é compreendida como indicador de bem-estar. No caso de estado de São Paulo, a expectativa de vida média foi de 75,16 anos de idade (Tabela 9). A variação da E_V nos municípios se mostrou baixa, com um mapa predominantemente homogêneo (Figura 3A). Conforme descrito pelo SEADE (Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados), a diferença entre os valores regionais extremos, em 2019, foi de 2,3 anos, valor este menor do que a observada em 2000 (4,5 anos). Tal redução sugere tendência de aproximação regional, resultante de ganhos expressivos em regiões com menores níveis de longevidade. Considerando regiões de menor longevidade, porém com ascendente expectativa de vida, é importante observar o extremo Sul do estado (quadrante 46W/50W x 23S/25S), onde localiza-se a antiga "região da fome" no estado, especialmente de Itapeva para baixo no Vale da Ribeira (Guapiara, Apiaí, Barra do Chapéu e Itaóca). Esta região foi por anos esquecida e, o reflexo disso na questão social demora muito para ser recuperado. Além disso, é importante sempre levar em conta que os habitantes da zona rural apresentam, em sua grande maioria, uma vida difícil, com muitas agruras e dissabores, em face da vulnerabilidade social (SOARES *et al.*, 2015).

Neste estudo, a escolaridade média dos municípios paulistas foi de 9,7 anos, considerando um ciclo de 0 a 20 anos (Tabela 9). No mais, não houve distinção da escolaridade média em relação aos municípios do estado. Em todos os quadrantes do mapa, seja ela de Norte a Sul ou de Leste a Oeste (Figura 4B), com raras exceções de índices mais elevados em algumas regiões ricas como Franca, São Joaquim da Barra, Votuporanga, São José do Rio Preto e Barretos na região Norte; Pindamonhangaba, Jundiaí, Campinas no Sudeste; Botucatu e Piracicaba no Centro Sul do Estado; Lins e Marília no Centro Oeste; e na região no Sudoeste Paulista a cidade de Presidente Prudente, importante ressaltar que todas elas são sedes de Universidades renomadas.

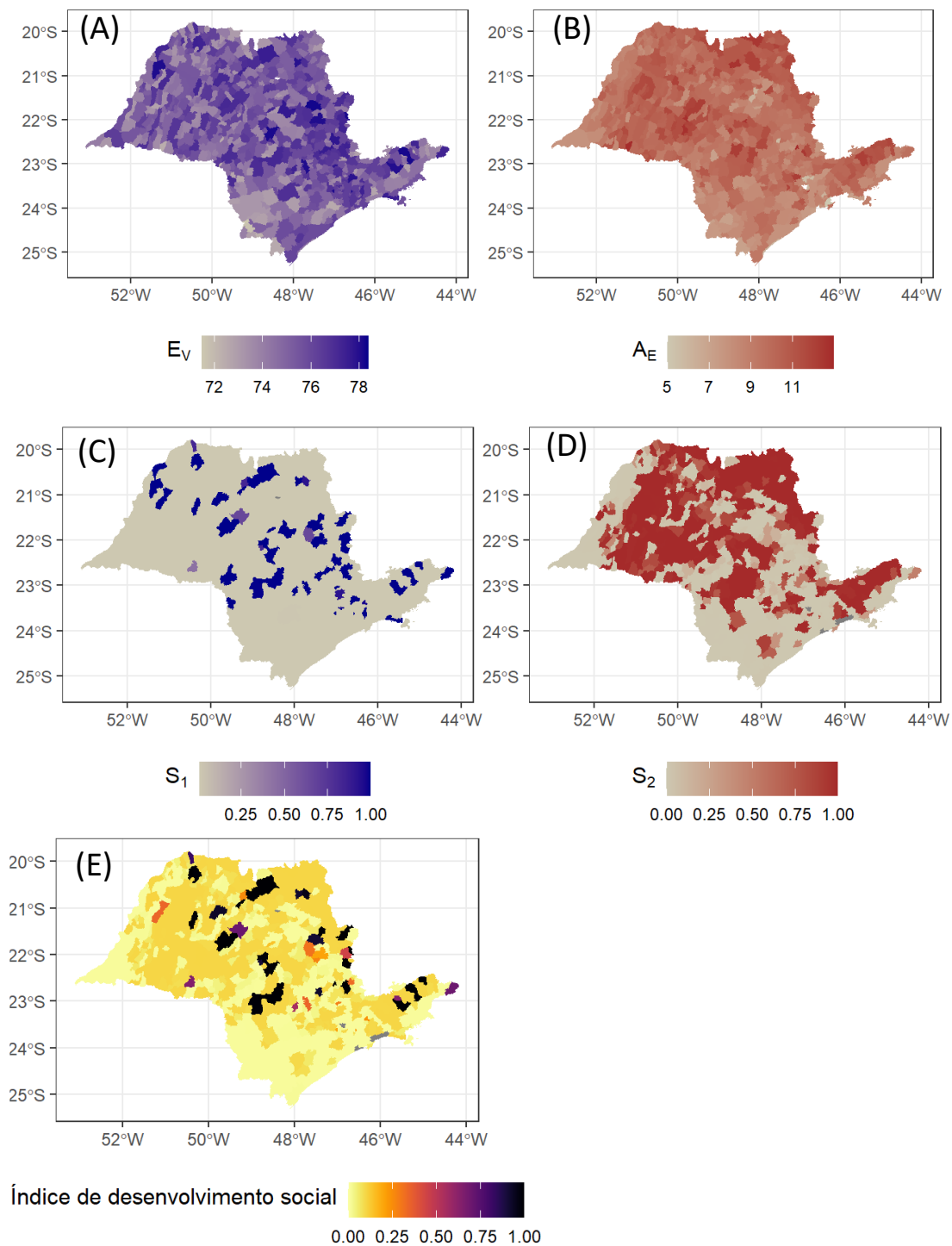


Figura 4. Mapas representando a distribuição espacial da Expectativa de vida (E_v) (A), da Escolaridade média (A_E) (B), dos índices S_1 (C) e S_2 (D), assim como do índice de desenvolvimento rural social.

Outro aspecto de grande relevância para o bem-estar e conseqüentemente a expectativa de vida, é o grau de escolaridade. A escolaridade possui um efeito direto na formação da renda e, de acordo com Langony (1973), ela influencia mais que fatores como sexo, idade, região e posição na ocupação. As disparidades de rendimentos, causadas pelo baixo nível de educação, advém, das diferenças existentes entre os indivíduos quanto aos seus atributos produtivos, geradas principalmente no período da infância e, da adolescência, fase

em que se acumula capital humano. Quando uma população tem muito pouca escolaridade, a qualidade da força de trabalho geralmente é baixa e homogênea. Em caso extremo, a maioria dos trabalhadores é analfabeta ou só tem o primário (BARROS *et al.*, 2002).

Por fim, com base nos mapas referentes aos índices sociais S_1 , S_2 , e no índice de desenvolvimento social (Figura 4C,D,E), fica evidente a capacidade dos mesmos em representar os aspectos sociais das regiões do estado. Neste caso, verifica-se uma inferioridade na região Sul do estado, que conforme destacado anteriormente possui um histórico de problemas sociais, sendo esta região negligenciada por muitos anos pelas políticas públicas.

17.3.3 O Desenvolvimento ambiental no meio rural

17.3.3.1 Os passivos ambientais relacionados a áreas de preservação permanente e reserva legal

Avaliando os valores relativos dos passivos ambientais de APP e RL, nota-se que as áreas médias a serem recuperadas correspondem à 0,38 m² m⁻² e 0,5219 m² m⁻², respectivamente (Tabela 9). À primeira vista, percebe-se que o *deficit* de passivo da RL é muito mais abrangente que o das APPs. Isto pois a RL corresponde a uma parcela expressiva das propriedades rurais, com valores na ordem de 20% dos imóveis.

Além disso, ao se avaliar os mapas de pApp e pRL (Figura 4A,B), observa-se discrepâncias consideráveis entre as regiões do estado. No extremo Sul (quadrante 46°W/48°W x 24°S/25°S), as variáveis de preservação apresentam-se mais elevadas. Está região, por se tratar de uma larga faixa litorânea com alta declividade, inviabiliza a atividade agrícola e inibe o surgimento de passivos ambientais. Além disso, nesta localidade existe uma extensa reserva de Mata Atlântica. Decorrente destes fatos, os índices de preservação apresentam-se mais elevados. De qualquer maneira, vale ressaltar que existem passivos a serem recuperados, na ordem estimada entre 10 e 20% do que se deve preservar.

Já no extremo Leste do estado (quadrante 44°W/46°W x 22°S/24°S), tem-se valores de passivos ambientais acima da média. Neste caso, a área encontra-se próxima a região costeira, com grande parte de suas superfícies onduladas, portanto impossibilitando a agricultura mecanizada. Por outro lado, tais condições não inviabilizam outras atividades, como a pecuária de corte e de leite, a qual predomina nesta região (Taubaté, Pindamonhangaba e Guaratinguetá). Tal fato explica o impacto ambiental acima da média, com um passivo estimado em 50% do total.

No extremo Norte do estado de São Paulo (quadrante 46°W/50°W x 20°S/21°S), observa-se que a região de Barretos, Orlandia e Franca, detém reduzida área de APP a se recuperar. Esta maior adesão à restauração das APPs está relacionada ao fato da União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) ter trabalhado em algumas frentes domésticas e internacionais para introduzir algumas iniciativas de sustentabilidade no setor regional. Iniciativas como o Protocolo Verde e o projeto Renovação, foram implementados visando práticas relacionadas à conservação do solo e da água, à proteção da vegetação ripária, a redução dos gases de efeito estufa e o uso responsável de pesticidas (CHADDAD, 2017). Um fato interessante nesta região é que o passivo referente a RL não segue a mesma tendência da APP. Ou seja, apesar da baixa necessidade de se restituir as áreas de preservação permanente, há grande necessidade de estabelecer as RL.

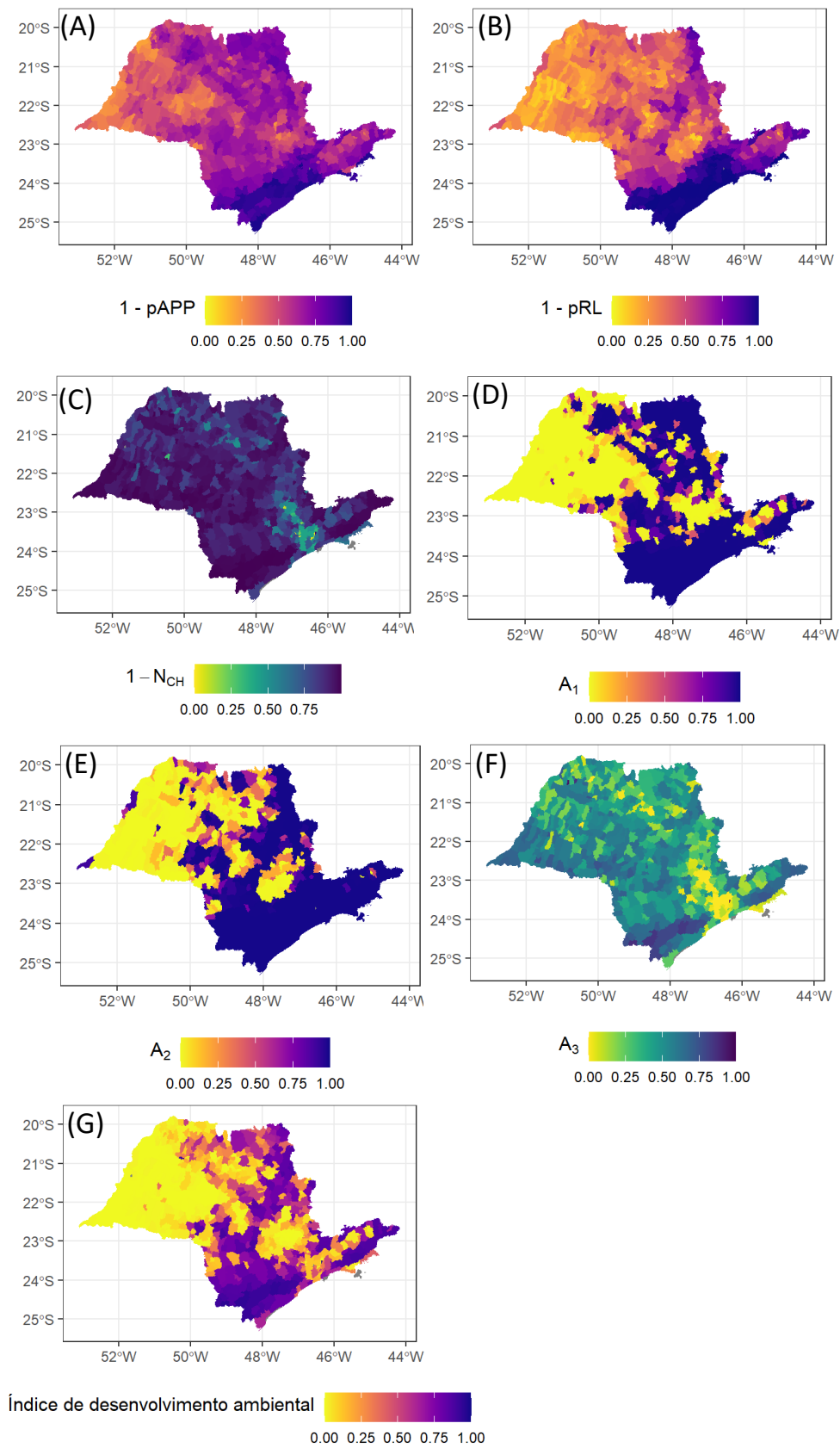


Figura 5. Mapas representando a distribuição espacial do passivo relativo referente as APPs (A) e RLs (B), assim como o nível relativo de comprometimento hídrico (C), e os índices ambientais A₁ (D), A₂ (E), A₃ (F) e o índice de desenvolvimento rural social (G).

Por último, tem-se o extremo Oeste (quadrante 48°W/54°W x 20°S/23°S), que abrange as regiões de Presidente Prudente, Assis e Marília. Esta é a localidade que possui menor cobertura vegetal, impactando diretamente os resultados deste trabalho, apresentando os maiores déficits de passivo ambiental, tanto para APP quanto RL.

No mais, verifica-se a importância da legislação ambiental e de áreas protegidas, como Unidades de Conservação e Área de Proteção de Mananciais, para manutenção de baixos valores de passivos ambientais. Exemplo de área protegida por lei é o Parque Estadual (Estação Ecológica do Jataí), localizado na cidade de Mogi-Guaçu (quadrante 46°W/48°W x 21°S/22°S).

17.3.3.2 O Nível de Comprometimento Hídrico no Estado de São Paulo

Além dos passivos ambientais, outro aspecto de grande relevância para a sustentabilidade rural é o Nível Relativo de Comprometimento Hídrico. Neste caso, tem-se um valor médio de 0,12 m³ m⁻³ de água a ser preservada ou conservada (Tabela 9) para os municípios do Estado de São Paulo. Neste contexto, observa-se que as regiões tanto ao Norte quanto ao Sul apresentam níveis de comprometimento baixo a moderado (Figura 5C). No extremo Leste e Sudeste do estado, (quadrante 44°W/48°W x 21°S/24°S), a situação é mais crítica. Isso se dá em grande parte à alta concentração demográfica e consequente necessidade de abastecimento dos centros urbanos. Além disso, tem-se uma região altamente agricultável e bastante diversificada, concentrando os dois cinturões verde do estado, com as regiões de Mogi das Cruzes e de Sorocaba, bem corroborado pelo mapa da Demanda Global (Figura 5C).

Já o extremo Oeste e parte do Noroeste do estado (quadrante 50°W/54°W x 20°S/23°S), detém coeficiente hídrico bem dividido. Em parte do Noroeste, os índices encontrados são reflexos da unidade hidrográfica dos rios Peixe e Aguapeí. Neste caso a demanda fica abaixo da média disponível, além das reservas subterrâneas que são muito utilizadas nesta zona do estado. No restante da região Noroeste, o coeficiente hídrico sofre uma maior demanda, ficando o uso destes recursos hídricos acima da média, conforme estudo da DAEE (DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA, 2006). Neste mesmo estudo, são indicados os conjuntos das Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) (situadas, em sua maioria, nas porções Norte e Oeste do Estado), as quais apresentam demandas de irrigação que superam as de outros setores (DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA, 2006).

Ao se avaliar o NC_H, é importante considerar a inter-relação existentes entre o recurso hídrico e aspectos socioeconômicos. O NC_H impacta diretamente na produtividade agrícola e, conseqüentemente traz reflexos diretos na renda média ajustada e no valor acrescentado bruto. Não por coincidência, os melhores índices encontrados estão perfeitamente relacionados nos quadrantes onde existem maior disponibilidade hídrica e tecnologia de irrigação adequada para suprir as demandas necessárias (Figura 6).

Por isso, observa-se a importância da manutenção e disponibilidade deste recurso em todas as propriedades rurais, para se obter uma melhor análise do IDRS. Diante de todo exposto, inserimos a disponibilidade hídrica na composição do IDRS, pois ela impacta diretamente na produtividade e, conseqüentemente traz reflexos diretos na renda média ajustada e valor acrescentado bruto, além de ser uma variável ambiental que tem ligação direta com a sustentabilidade. No mais, é importante refletir que o Brasil é um país rico em recursos hídricos, mas nem por isso não possui *deficit* hídrico. Muito embora este recurso seja abundante, ele é mal distribuído no território. Além disso, a política pública para utilização desse recurso deixa a desejar e é favorecida pelo aumento populacional, o crescimento desordenado das cidades e um consumo excessivo e sem controle.



Figura 6. Irrigação existente pelo sistema de pivô central no Estado de São Paulo (DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA, 2006).

17.3.3.3 O Índice de Desenvolvimento Rural Ambiental para o estado de São Paulo

Decorrente das variáveis pAPP, pRL e NC_H foram estabelecidos os índices A_1 , A_2 , A_3 , e estes foram agregados no índice de desenvolvimento rural ambiental (I_A) (Figura 4C,D,E,F). Com base nestas informações demonstrou-se que o I_A representa na íntegra a situação atual das regiões do estado, considerando os índices relativos do eixo ambiental. No mais, verificou-se uma grande superioridade positiva da região Sul em relação as outras regiões, com pouco passivo a recuperar (Figura 4). Além disso, foram encontrados números preocupantes na região Oeste, visto que é uma grande região produtora no estado de São Paulo. Por fim, observou-se um enorme passivo ambiental dentro do triângulo paulista (Campinas, Sorocaba e São Paulo), visto que, essas regiões comportam grandes centros urbanos.

17.4 Índice de desenvolvimento rural sustentável

Com base nos valores encontrados do índice referente ao desenvolvimento rural sustentável, referentes ao estado de São Paulo, foi observada a síntese no mapa (Figura 7), a qual representa na íntegra a situação atual do estado. O panorama geral apresenta pouca disparidade, exceto na região Oeste, com números mais negativos que a média geral. Portanto, esta região merece um olhar mais cuidadoso do poder público para ajudar na solução dos problemas ali apresentados. Ademais, apenas três localidades apresentaram números acima da média, sendo elas, Barretos, Avaré e Botucatu.

O índice foi também categorizado em baixo, médio, alto e muito alto, considerando o que consta em todos os mapas analisados, verifica-se: (i) superioridade demonstrada que vai desde as região central do estado até o Norte do estado, (ii) regularidade apresentada dentro das regiões Sul e Sudeste do estado, com exceção ao triângulo paulista por força da alta taxa de urbanização, e (iii) inferioridade da região Oeste do estado com índices bastante ruins, que se deve acender um sinal de alerta para esta região, devendo o estado implementar uma política mais próxima nesta região quanto aos índices ali encontrados.

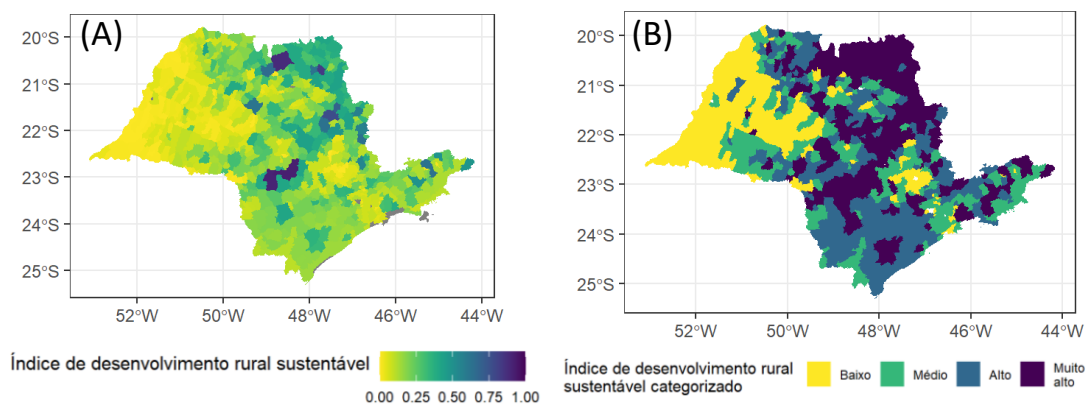


Figura 7. Índice referente ao desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) (A) e sua versão categorizada (I_{CESA}) (B).

17.5 Considerações finais

Em função dos resultados obtidos, conclui-se que a sustentabilidade do meio rural pode ser caracterizada por intermédio dos índices de desenvolvimento econômico, social e ambiental. Além disso, a metodologia descrita é adequada para caracterização da sustentabilidade no meio rural utilizando a média geométrica, por ser mais restritiva apresentando maior aderência aos valores atuais da sociedade de valorizar o desenvolvimento social e ambiental. Por fim, em função da caracterização da sustentabilidade econômica, social e ambiental dos estabelecimentos localizados no meio rural nos 645 municípios do Estado de São Paulo, pode-se subdividi-los em quatro classes, sendo elas: (Classe A) classe inferior contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor mínimo e o primeiro quartil; (Classe B) classe inferior intermediária contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor correspondente ao primeiro quartil e a mediana; (Classe C) classe superior intermediária contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor correspondente à mediana e ao terceiro quartil; (Classe D) classe superior contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor correspondente ao terceiro quartil e o valor máximo.

Referências

- BARROS, G.S.C.; CASTRO, N.R. Centro de Estudos avançados em economia aplicada (Cepea). PIB-Agro/Cepea: PIB do agronegócio encerra 2019 com alta de 3,81%. 2020. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/pib-agro-cepea-pib-do-agronegocio-encerra-2019-com-alta-de-3-81.as> px. Acesso em: 7 abr. 2021.
- BARROS, R.P.; HENRIQUES, R.; MENDONÇA, R. **Pelo fim das décadas perdidas**: educação e desenvolvimento sustentado no Brasil. Rio de Janeiro, Ipea, 2002.
- BENITES-LÁZARO; L.L.; GIATTI; L.L. **O nexó água-energia-alimentos**: desafios da integração de políticas. Diálogos Socioambientais na Macrometrópole Paulista, v.3, n.9, p.16-18, 2020.
- CAPRA, F. **A teia da vida**. Tradução de Newton Roberval Eichenberg. 16. Ed. São Paulo: Editora Pensamento-Cultrix. 1996.
- CAPRA, F. **O ponto de mutação**. Tradução de Álvaro Cabral. 10. Ed. São Paulo: Editora Pensamento-Cultrix. 1982.

- CASER, D.V.; SILVA, J.R.; COELHO, P.J.; BUENO, C.R.F.; PINATTI, E.; GHOBRI, C.N.; BINI, D.L.C. **Análises e indicadores do agronegócio**. 2019. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=14613>. Acesso em: 11 abr. 2021.
- CASER, D.V.; TSUNECHIRO, A.; COELHO, P.J.; BUENO, C.R.F.; PINATTI, E.; FILHO, E.P.C.; BINI, D.L.C. **Análises e indicadores do agronegócio**, v.7, n.6, jun., 2012. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=12382>. Acesso em: 10 abr. 2021.
- CHADDAD, F. **Economia e organização da agricultura brasileira**. Tradução Paula Diniz. 1. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
- DELFINO, A. Caracterização da sustentabilidade do meio rural no estado de São Paulo. 179p., 2021. Dissertação (Mestrado) - Escola de Economia de São Paulo (MPAGRO). Fundação Getúlio Vargas. 2021.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Plano Estadual de Recursos Hídricos: 2004 / 2007 **Resumo**. São Paulo, DAEE, 92p., 2006. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/arquivos/perh/CRH/1133/perh.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2021.
- DOURADO NETO, D. Notas de aula: Índice de desenvolvimento rural sustentável. Piracicaba: Esalq/USP. 10p. 2011.
- GIATTI, L.L.; JACOBI, P.R.; FAVARO, A.K.M.I.; EMPINOTTI, V.L. O nexa água, energia e alimentos no contexto da Metrópole Paulista. **Estudos Avançados**, v.30, n.88, p.43-61, 2016. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142016.30880005>. Acesso em: 18. abr. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Área territorial oficial. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/areaterritorial/principal.shtm>. Acesso em: 15 mai. 2020.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO. IGC. 2005. Disponível em: http://www.igc.sp.gov.br/produtos/regioes_adm.html. Acesso em: 30 abr. 2021.
- KAGEYAMA, A. **Desenvolvimento rural: conceito e medida**. Cadernos de Ciência e Tecnologia - Embrapa. Brasília, v.21, n.3, p.379-408, dez., 2004. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/8702>. Acesso em: 28 mar. 2021.
- LANGONI, C.G. **Distribuição da renda e desenvolvimento econômico do Brasil**. Rio de Janeiro, Expressão e Cultura, 1973.
- LIMA, F.A.R. O **direito ambiental nas constituições do Brasil**: um breve relato de sua construção histórica e o artigo 225 CF/88 com cláusula pétrea. 2014. Disponível em: http://ambitojuridico.com.br/site/?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=14555. Acesso em: 19 mar. 2021.
- LIMA, S.F. Introdução ao conceito de sustentabilidade aplicabilidade e limites. Faculdades Integradas do Brasil. **Caderno da Escola de Negócios**, v.4, n.4, 2008.
- MALISZEWSKI, E. São Paulo é 20% do agro brasileiro. **Agrolink**. 2019. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/noticias/sao-paulo-e-20-do-agro-brasileiro_425136.html#:~:text=Hoje%20S%C3%A3o%20Paulo%20%C3%A9%20o,bilh%C3%B5es%20de%20litros%20de%20etanol. Acesso em: 8 mar. 2021.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil**. 2013. Disponível em: <http://g1.globo.com/sao-paulo/itapetinga-regiao/noticia/2013/07/ribeirao-branco-tem-o-pior-idh-municipal-do-estado-de-sao-paulo.html>. Acesso em: 24. abr. 2021.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos**. 2017. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/acao/agua/>. Acesso em: 15 mar. 2021.
- PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **O índice de desenvolvimento humano municipal brasileiro**. PNUD-BRASIL. 2016. 96p. Disponível em: <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/library/idh/Atlas/o-idh-brasileiro0.html>. Acesso em: 8 mar. 2021.
- SOARES, R.A.S.; MORAES, R.M.; VIANNA, R.P.T.; PESSOA, V.M.; CARNEIRO, F.F. **Determinantes socioambientais e saúde: O Brasil rural versus o Brasil urbano**. 2015. Tempus, actas de saúde

coletiva, Brasília, v.9, n.2, p.221-235, 2015. Disponível em:
<https://www.tempusactas.unb.br/index.php/tempus/article/view/1718>. Acesso em 15 mar. 2021.

WORSTER, D. Para fazer história ambiental. Rio de Janeiro, **Revista Estudos Históricos**, v.4, n.8, p.198-215, 1991.

CAPÍTULO 18

18 FERTIRRIGAÇÃO: ASPECTOS RELEVANTES E VIABILIDADE TÉCNICA X FINANCEIRA

Luiz Fabiano Palaretti e Alexandre Barcellos Dalri

Resumo

Os benefícios e limitações da fertirrigação são elucidados de forma ampla na literatura. No entanto, os aspectos econômicos e algumas nuances acabam sendo pouco exploradas, principalmente no que tange a viabilidade econômica do processo, com enfoque na relação entre os custos de produção operacional e as necessidades da planta. Neste capítulo buscamos inicialmente preparar o leitor para os tópicos mais básicos da fertirrigação e suas particularidades, na sequência apresentar a dinâmica de equipamentos e suas principais características e finalizamos com a apresentação de um estudo de caso real de uma propriedade agrícola do Noroeste do Estado de São Paulo, que compara os custos de operação de fertilização aplicada de forma convencional com a aplicação de fertilizantes via água de irrigação na cultura dos citros.

18.1 Introdução

A temática da oferta versus produção de alimentos é amplamente debatida e neste contexto surgem diversas especulações, em alguns momentos, fracamente embasadas em critérios técnicos e agronômicos.

Produzir alimento em quantidade já é um desafio alcançado, o problema hoje se delinea em aspectos de logística, locação de centros de distribuição, que estão diretamente ligados à qualidade do produto final e sua vida de prateleira.

Assim, a qualidade de um produto é definida no campo de produção, uma vez que, após obtido o produto é muito difícil agregar valor nutricional e, ou melhorar seus aspectos qualitativos. Considerando esta narrativa, partimos do pressuposto que o uso de técnicas que contemplem o aumento da produção sem estar alinhada com o diferencial de qualidade do produto, são incompletas e se destinam ao fim.

A renovação dos padrões de produção objetivando a segurança alimentar de um mercado que busca cada vez mais produtos diferenciados nutricionalmente, somado a necessidade de conter a crescente onda de obesidade da população, ocasionada pelo excessivo consumo de produtos de baixa qualidade, é o antídoto necessário (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2018).

O Brasil, se destacou na categoria "qualidade e segurança dos alimentos" do índice global de segurança alimentar, com pontuação de 88,9, avançando 5% em relação a 2020 (NOTÍCIAS AGRÍCOLAS, 2021).

Neste sentido a racionalização de insumos agrícolas e seu melhor aproveitamento pelas culturas deve ser amplamente estudado, focando na obtenção de produtos em quantidade e qualidade exigida na atualidade.

Por entendermos que a nutrição de plantas é um forte aliado na obtenção de produtos agrícolas de maior qualidade e menor potencial de perecibilidade, neste capítulo faremos uma abordagem do uso da fertirrigação como técnica promissora na agricultura moderna.

18.2 Premissas da fertirrigação

Para o perfeito entendimento da técnica da fertirrigação é necessário elencar a irrigação como "ator" participante ativo no processo, uma vez que, por definição básica, a fertirrigação pode ser resumida como "*a aplicação de fertilizantes via água de irrigação*". Esta visão simplista ignora muitos outros aspectos que devem ser trazidos a luz da discussão para que evitemos erros grosseiros que possam desacreditar a aplicação da técnica agrícola.

A irrigação é requerida em diversas situações, de forma direta seu uso é atribuído como estratégia para suplementação hídrica em situações de variabilidade temporal e volumétrica de precipitações.

Historicamente os registros de precipitação significativamente abaixo da média, bem como os problemas gerados pela crise hídrica que agrava a produção de alimentos tem forçado os agricultores a aderirem ao uso da irrigação.

Permeando o aumento do uso da irrigação e conseqüentemente de água para esta finalidade, o aumento na demanda fertilizantes requeridos para a produção tem elevado os valores de compra e oscilações na logística de entrega. Em 2019 a quantidade de fertilizante entregue foi em torno de 36,2 milhões de toneladas e as perspectivas são crescentes e estimuladas pela relação de troca de potássio e fósforo com soja que se mostra positiva (12 sacas t⁻¹), em 2021 (NOTÍCIAS AGRÍCOLAS, 2021).

Em 2020 o setor de fertilizantes cresceu entre 6% e 7% no Brasil, apesar dos desafios impostos pela pandemia da Covid-19 e em janeiro de 2021 já foram negociados 40% do total previsto para o ano (NOTÍCIAS AGRÍCOLAS, 2021). Este cenário de aumento de demanda e oscilações de câmbio reflete diretamente na composição de preços de vendas de commodities, devido a sua alta correlação com moedas estrangeiras.

A fertirrigação facilita as operações de distribuição de fertilizantes, otimiza a mão de obra e maquinário no dia a dia do agricultor. No entanto, a complexidade desta técnica é muitas vezes negligenciada e de forma simplista muitos a adotam sem critérios técnicos bem definidos e as margens da insubordinação.

A priori, é fundamental que o produtor rural e, ou técnico, tenha em mente que o sucesso do uso da técnica da fertirrigação perfaz algumas prerrogativas. Dessa maneira, são necessários conhecimentos básicos acerca da qualidade da água, diluição do produto, do equipamento utilizado na injeção, dos métodos de aplicação, do tipo e da procedência da fonte de nutrientes utilizada, das características do fertilizante utilizado como da sua compatibilidade, da eficiência do uso dos nutrientes pelas plantas e sua dinâmica no solo, além do monitoramento constante deste processo extremamente dinâmico (Figura 1).

Um conceito equivocado é o de que fertirrigar, resume-se em dividir a recomendação de adubação de sequeiro (sem irrigação) em aplicações sucessivas. A fertirrigação é uma técnica de alta complexidade, principalmente pelo fato de que, em solução, todos os fertilizantes sofrem e causam modificações no processo de fertilização de plantas e solo.

Assim sendo, um dos principais objetivos deste capítulo está na desmistificação da forma simplista, como é encarada a fertirrigação, e deixar claro que não existe uma "receita milagrosa", em que, basta mistura "A + B", diluir em "X" litros de água, injetar utilizando "Y", parcelado em "N" vezes, em cultivos no solo, ou durante "tantas" horas, no caso de sistemas de cultivo sem solo. Também temos a prerrogativa de demonstrar a viabilidade econômica da fertirrigação por meio de um estudo de caso em uma propriedade rural do noroeste do estado de São Paulo.



Figura 1. Fatores importantes no processo de fertirrigação.

A falta de conhecimento, bem como o uso indiscriminado e sem critérios técnicos, da fertirrigação, tem resultado em insucessos no uso da técnica. Esta situação tem afetado de forma direta os custos de produção, o meio ambiente e a segurança alimentar da população.

No sistema produtivo, o perigo do uso errôneo da fertirrigação está causando problemas ambientais graves, de forma direta, a salinização do solo e a contaminação de águas subterrâneas e indiretamente a indução do estresse hídrico em plantas, mesmo sob irrigação.

Em situações de cultivo em ambiente protegido o descarte de soluções nutritivas é um problema agravado pela ausência de chuvas no interior da casa de vegetação, e o nutriente então não é carregado para as camadas mais profundas do perfil do solo, gerando salinização precoce do solo.

No Brasil os problemas advindos da salinização de solos por ações antrópicas são crescentes e o excesso de fertilizantes, que nada mais é do que "sais" acrescidos ao solo, são os principais agentes.

Como exemplo, uma irrigação de 100 mm com água que possui uma concentração de $0,5 \text{ g L}^{-1}$ de sal, aplica 500 kg de sal em uma área de 1 ha.

O excesso de sais no solo propicia dificuldade de absorção de água pelas plantas, reduz a permeabilidade e a infiltração de água no solo, além de desestruturação por dispersão das argilas (DUARTE *et al.*, 2015).

Em cultivos irrigados, grandes volumes de precipitação lixiviam os sais para as camadas mais profundas podendo contaminar o lençol freático. Um exemplo é o nitrato (NO_3^-) que dissolvido na solução do solo, é facilmente carregado ao longo do perfil do solo, contaminando as águas subterrâneas, diminuindo a eficiência do nutriente, exigindo, aumentos sucessivos na dose recomendada para a cultura, almejando resultados produtivos satisfatórios.

Tendo a certeza de que diversos são os fatores impactantes no uso da fertirrigação fica a pergunta: "Como usar a técnica"?

Para responder essa dúvida faremos uma sucinta abordagem.

Sistema de irrigação utilizado e sua eficiência

Definir o tipo de equipamento de irrigação e equalizá-lo para as características de topografia, quantidade e qualidade de água, disponibilidade de energia, espécie de cultivo, além de facilidade de acesso a peças de reposição, é muito importante.

Um bom projeto hidráulico aliado a escolha de um bom sistema de irrigação permitirá a obtenção de níveis elevados de uniformidade de distribuição de água e eficiência de irrigação.

O gerenciamento deste sistema também é importante e atualmente um dos maiores objetivos da agricultura irrigada.

Se o produtor tiver em mente que: "o sistema de irrigação será o veículo pelo qual o fertilizante será conduzido até atingir seu alvo" o caminho do sucesso já está "meio trilhado".

Sistemas mais eficientes no uso da água permitem a redução da lâmina de irrigação aplicada (bruta), bem como, evitam a contaminação de mananciais hídricos superficiais e subterrâneos.

Uma lâmina líquida de 45 mm quando aplicada por um sistema de aspersão, cuja eficiência mínima deve ser de 85%, gerará uma lâmina bruta de 52,94 mm, por outro lado, se o sistema de irrigação for por gotejamento, com eficiência mínima de 95%, a lâmina bruta será de 47,37 mm. Observe que a $L_{líquida}$ (45 mm) não foi alterada, diferentemente da L_{bruta} , que diferiu 5,57 mm entre os sistemas. É relevante dizer que 5,57 mm representa 55,7 m³ de água por hectare.

Compõem o cálculo de eficiência de aplicação de água às perdas de água que ocorrem durante e depois da irrigação. Normalmente estas são originadas de uso inadequado dos equipamentos, falhas na elaboração e execução de projeto, vazamentos em canalizações, evaporação e arraste da água aplicada.

Em se tratando de sistemas fertirrigados, as perdas após a aplicação de água pelos sistemas de irrigação ganham relevância, já que, escoamento superficial e percolação são os principais agentes contaminantes do ambiente irrigado.

No livro "Irrigação: Princípios e Métodos, de Mantovani et al, (2009) é possível encontrar a forma direta de determinação da eficiência de irrigação, além de outros assuntos de conceituação básica e aplicada.

O fato é que sistemas de irrigação utilizados para fertirrigação, criteriosamente dimensionados e combinados com um adequado sistema de injeção, podem definir o sucesso da técnica.

Assim como no sistema de irrigação, a uniformidade do sistema de injeção deve ser a melhor possível. Neste caso, a uniformidade está diretamente relacionada ao tipo de injetor utilizado e do tempo de avanço da calda na rede hidráulica do sistema de irrigação.

"Tempo de avanço é o tempo considerado para que a calda injetada na fertirrigação alcance o ponto mais distante do setor que se está irrigando, característica essa, exclusiva de cada setor de irrigação".

Em resumo, a injeção de fertilizante só deve ser iniciada com a rede de tubulações plenamente preenchida por água (sistema pressurizado), bem como o tempo de injeção deve ser o mais uniformemente distribuído dentro do número de horas de irrigação do setor a ser fertirrigado.

Na Figura 2, estão demonstrados alguns cenários que elucidam situações comuns no dia a dia de usuários de fertirrigação, considerando um tempo de avanço de 1 hora. No cenário I, observamos que o tempo de injeção é muito menor que o tempo de irrigação. Esta situação gera grande desuniformidade na distribuição da calda fertilizante pois o tempo de injeção é inferior ao tempo que o fertilizante leva para chegar ao último emissor, e o tempo excessivo de irrigação somado ao tempo de lavagem, pode ocasionar a lixiviação dos nutrientes.

No cenário II observamos que, após a fertirrigação, o problema da lixiviação dos nutrientes é amenizado, já que a irrigação é realizada antes da fertirrigação, por outro lado, a

desigualdade de tempos é marcante e indesejável, para uma operação que requer alta eficiência na execução.

O cenário III é mais interessante e indicado para fertirrigação em dias chuvosos, onde o sistema de irrigação não é necessário para a reposição de água, atuando como o veículo da distribuição dos nutrientes. Neste caso, pode ocorrer lixiviação, e este é um entrave do uso da fertirrigação, principalmente quando se injeta efluente de agroindústria ou de estações de tratamento de esgoto. Por outro lado, observamos que o tempo de avanço de 1 hora é respeitado e a uniformidade de injeção é alta, devido a distribuição dos tempos dentro da operação de fertirrigação.

No cenário IV, temos uma alta uniformidade de injeção, o tempo de avanço é respeitado, bem como é irrisória possibilidade de lixiviação, uma vez que a irrigação e a injeção são realizadas em pequenas proporções e de forma intercalada, ou seja, pequenas doses e com alta frequência. Este cenário é indicado para períodos secos do ano, e pode ser considerado como o método mais correto agronomicamente.

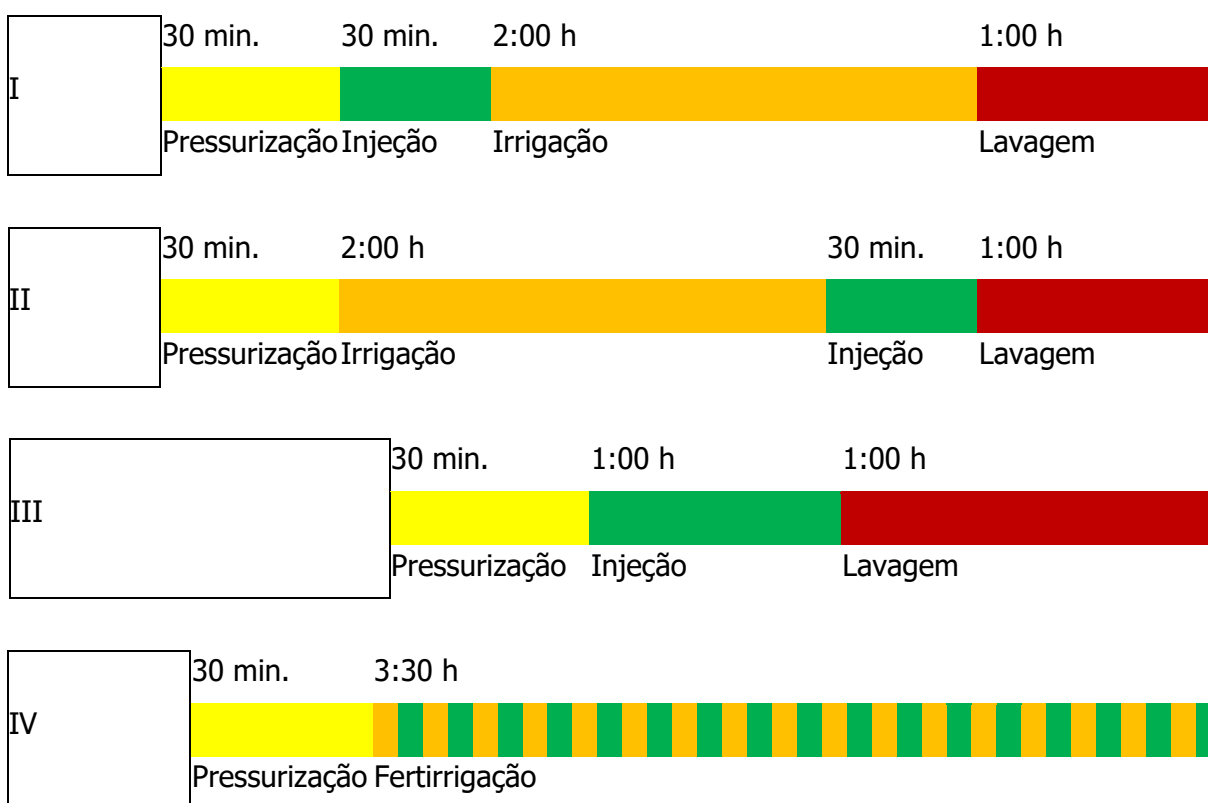


Figura 2. Cenários de fertirrigação, considerando o tempo de avanço de 1 hora, para aplicação de nutrientes em solo.

18.3 Quantidade e qualidade da fonte hídrica

Conhecer o volume de água disponível e obter a outorga de uso são os primeiros passos neste ponto.

Observar a forma de aplicação do sistema de irrigação é outro passo importante, já que, sistemas que molham a parte aérea (comestível) de vegetais exigem a análise de parâmetros microbiológicos da água.

Para fins de fertirrigação a observância deve ser feita de forma mais minuciosa nas características químicas da água utilizada, pois estas podem interferir diretamente na precipitação de fertilizantes e outros químicos injetados, bem como na presença de bactérias

reduzidas de ferro, que podem causar a oxidação do ferro dissolvido na água, ocasionando o entupimento dos orifícios de saída dos emissores. Lembrando que esta pode variar em função da estação do clima.

A negligência na obtenção de análises de água tem acarretado situações desastrosas no uso da fertirrigação, que dependendo do grau e concentração dos elementos pode tornar-se inapta para uso.

Fortemente ligada a qualidade de água está o perigo de salinização, que pode ser iniciado ou agravado pelo uso de água com alta concentração de sais, devendo-se evitar o uso de água com condutividade elétrica (CE) superior a $2,25 \text{ dS m}^{-1}$ (classe C₂ – salinidade média) (MANTOVANI *et al.*, 2009).

18.4 Sistema de injeção de fertilizantes

Vários são os sistemas disponíveis para injeção de fertilizantes. Cada qual com sua particularidade são adotados como “melhores”, no entanto, aqui faremos uma abordagem dos mais utilizados e que se enquadram como “eficientes” do ponto de vista de operacionalidade.

A escolha do tipo de injetor deverá ser feita com suporte técnico e levantamento prévio dos recursos disponíveis e prontamente aportáveis. É fundamental definir a finalidade de uso, disponibilidade de investimento e nível técnico do operador da irrigação.

Independente do sistema a ser utilizado a instalação física que abrigará a unidade de injeção deve ser construída de forma a proteger os equipamentos, os operadores, e se possível, acondicionar os fertilizantes que serão utilizados nas operações. Em alguns casos a estrutura pode servir de depósito e para tanto, necessita de plataforma de recebimento de sacarias guinchos para descarga de bags (1 ton). A proximidade entre os fertilizantes e a unidade de injeção diminui o tempo de operação, facilita o trabalho e evita o desperdício de produtos durante o transporte.

A unidade de injeção deverá abrigar dois reservatórios plásticos, de volume compatível com a solubilização da quantidade de fertilizante a ser trabalhada. A interligação entre o reservatório deve ser manejada por meio de um registro plástico de fecho rápido (esfera), para controle da circulação da calda. É importante uma tubulação de saída de fundo para limpeza de impurezas decantadas nos dois tanques.

Do reservatório 1 para o reservatório 2 deve ser feita uma pré filtragem da calda. O reservatório dois deve ser interligado ao sistema de injeção adotado (Figura 3).

A dissolução dos fertilizantes é um dos pontos mais importantes no sistema de injeção. Esta pode ser feita manualmente ou com o auxílio de um agitador mecânico (Figura 4). O agitador mecânico pode ser feito com motor elétrico de baixa rotação interligado a um redutor de polias e uma hélice para agitação da calda. Sugere-se que o conjunto de agitação da calda seja de plástico, alumínio e se possível aço inoxidável.



Figura 3. Disposição das caixas de diluição (A) e injeção (B) em sistema de fertirrigação (ANDRADE, 2010).

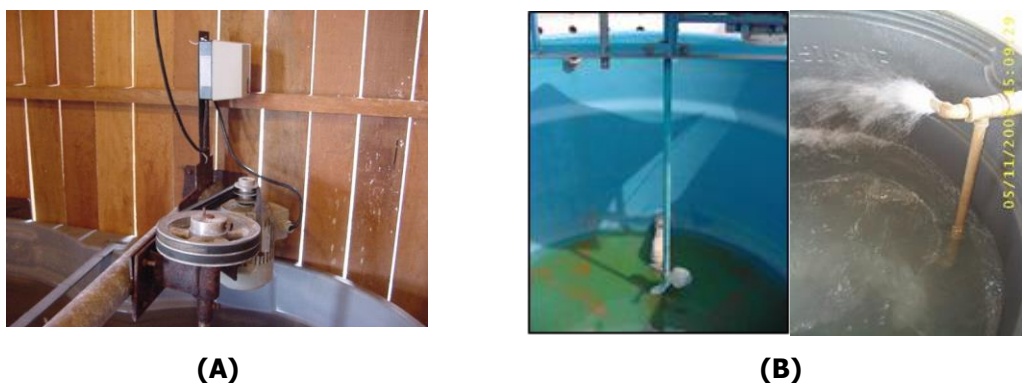


Figura 4. Agitadores, mecânico e manual, de fertilizantes (A) Drumond (2010), e (B) Palaretti (2009).

Na sequência abordaremos de forma direta alguns dos principais equipamentos e formas de injeção. Salientamos que existem outros, aqui não referenciados.

18.5 Injeção direta na sucção da bomba

Este sistema é um dos mais antigos e caracteriza-se pela sucção simultânea da calda e da água de irrigação, pela motobomba de pressurização do sistema de irrigação (Figura 5).

A uniformidade de fertirrigação é baixa, uma vez que, a injeção é feita por meio do princípio físico da sucção diferencial, no qual, na medida em que ocorre a diminuição da coluna de líquido do reservatório de calda, cairá a taxa de sucção. Portanto, oscilações de pressão no sistema acarretará a dinâmica de injeção da calda.

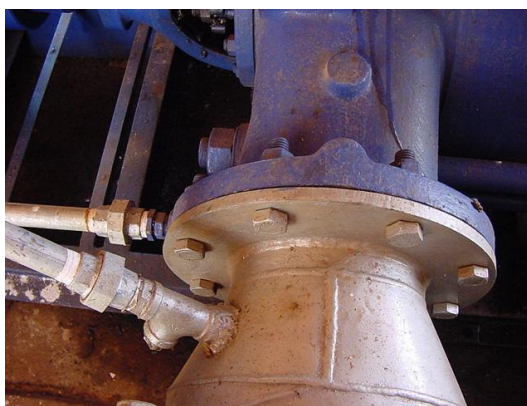


Figura 5. Injeção de fertilizantes diretamente na tubulação de sucção de motobomba utilizada na pressurização de sistemas de irrigação.

A regulagem de injeção é via válvula de gaveta instalada na interligação da caixa de injeção e a tubulação de sucção da motobombas de irrigação.

A injeção é rápida, de fácil manutenção e não exige mão de obra tecnicada para realização da operação, além de baixo valor de investimento.

Os inconvenientes se resumem ao desgaste prematuro do sistema de bombeamento de irrigação, pela ação corrosiva e abrasiva dos fertilizantes e potencialidade de poluir a fonte hídrica em caso de retorno ou rompimento de tubulações.

Este sistema deve ser evitado, já que, outras possibilidades de injeção são mais eficientes e de menor risco.

18.6 Injeção feita por tanques de diferencial de pressão

O atrativo deste sistema é não utilizar energia elétrica para injeção, ser de fácil operação e muito prático. É constituído por um tanque cilíndrico, de 20 a 500 litros dentro do qual são depositados os fertilizantes sólidos.

O tanque é hermeticamente fechado e conectado por mangueiras ($\pm 1''$) à tubulação adutora do sistema de irrigação, em "by pass". A água que circula, vinda da parte inferior do tanque, dilui os fertilizantes que são injetados a rede hidráulica de irrigação, pela parte superior do tanque (Figura 6).



Figura 6. Tanque de injeção de fertilizantes.

A vazão de injeção é controlada por válvulas ou registros, que criam um diferencial de pressão de até $0,5 \text{ kgf cm}^{-2}$ (5 mca), variando de 10 a 500 L h^{-1} , exigindo que as paredes do equipamento suportem a pressão interna.

Podem ser consideradas limitações deste injetor: a desuniformidade de injeção, uma vez que no início do processo a concentração de nutrientes na calda é maior, diminuindo ao longo do tempo; a taxa de injeção variável e a dificuldade no controle de dosagem, uma vez que, o tanque, por ser fechado, não permite a verificação visual do fim da injeção, exigindo monitoramento constante da CE de injeção, para finalização do processo.

18.7 Injeção por venturi

O venturi é um equipamento plástico contendo uma constricção entre uma seção convergente (entrada) e outra divergente (saída). Esta redução no diâmetro do conduto gera um aumento da velocidade provocando uma subpressão que succiona a calda fertilizante para o interior da tubulação (Figura 7).

A instalação do equipamento pode ser feita diretamente na tubulação de adução do sistema de irrigação ou paralela, em "by pass", sendo essa mais recomendada.

A inserção deste equipamento na tubulação gera perda de carga, que pode chegar a 20% da altura manométrica (pressão total do sistema), portanto, sua instalação deve ser estudada previamente.



Figura 7. Sistema de fertirrigação utilizando injetor venturi (A) Bastos (2008), e (B) NaanDan Jain (2021).

Usualmente, os problemas constatados no funcionamento do venturi, advêm de erros na instalação e operação do equipamento. Destaca-se a falta de sucção, danos na esfera de vedação, mangueiras e pressurização do equipamento.

O venturi apresenta boa eficiência de injeção, mantendo a concentração de fertilizante praticamente constante ao longo tempo de aplicação. O custo médio do equipamento varia de R\$ 150,00 (modelo de 3/4") a R\$ 350,00 (modelo de 2"), e pode ser instalado isolado ou em conjunto (paralelo) a outros equipamentos.

A simplicidade confere a este equipamento amplo uso na injeção de fertilizantes em sistemas irrigados de pequeno a médio porte, principalmente por não exigir mão de obra especializada e apresentar limitações de automatização.

É conveniente realizar uma calibração do venturi, para que se obtenha uniformidade na injeção, respeitando o tempo da frente de avanço, posto que a vazão de injeção varia de 10 a 2000 L h⁻¹.

Uma desvantagem no uso do venturi está na possibilidade de entupimento dele, com o uso de caldas de baixa qualidade (muito sólido em suspensão), uma vez que, o mesmo tem em sua constituição placa de orifício, de diâmetro milimétrico.

Como forma compensatória da perda de carga gerada pelo venturi, é comum a instalação, antes do equipamento, de uma bomba auxiliar de pressão suplementar ("booster"), com função de pressurizar o equipamento, possibilitando a sucção da calda fertilizante, por aumentar o diferencial de pressão. Este procedimento é interessante, para isolar o sistema de injeção do de irrigação.

18.8 Injeção via bomba centrífuga

É um sistema pressurizado de injeção de fertilizantes diretamente na tubulação de recalque do sistema de irrigação (Figura 8).

A grande vantagem deste tipo de injeção está na ausência de perda de carga, gerada pelo equipamento injetor, por outro lado a pressão de injeção deve ser superior àquela aferida na rede adutora.

Normalmente as bombas injetoras desta categoria são monobloco e multiestágio, confeccionadas em aço inoxidável, e com potência inferior a 3 cv e requerem acionamento elétrico.



(A)



(B)

Figura 8. Sistema de fertirrigação utilizando bomba injetora de aço inoxidável (A) Palaretti (2009), e (B) NaanDan Jain (2021).

É possível a utilização de qualquer bomba centrífuga, embora, aquelas cujo constituinte do corpo (carcaça e caracol) é de ferro fundido, irão sofrer a ação corrosiva dos fertilizantes injetados, e terão a vida útil reduzida.

A bomba centrífuga tem taxa de injeção variável e, portanto, deve ser calibrada no local, em função do tempo de avanço considerado.

Mesmo a bomba injetora sendo de aço inoxidável é pertinente avaliar os efeitos e particularidades de cada fertilizante a ser utilizado, desde sua solubilidade até seu potencial corrosivo. Este assunto será tratado oportunamente.

18.9 Injeção via bomba injetora

Nesta categoria estão as bombas de deslocamento positivo. Destacam-se as bombas de pistão, diafragma e mistas (pistão/diafragma). As bombas de engrenagens, peristálticas e rotativas excêntricas, não são muito comuns em sistemas de injeção de fertilizantes atualmente.

(i) Injetora de diafragma

O injetor por diafragma é um equipamento simples, portátil e leve. Caracteriza-se pela sucção/injeção controlada pelo deslocamento de uma membrana de borracha e uma mola (Figura 9). A vazão de injeção é extremamente dependente da vazão e da pressão da linha de recalque do sistema de irrigação e varia de 50 L h⁻¹ a 600 L h⁻¹.



Figura 9. Bomba injetora tipo diafragma.

O equipamento custa de R\$ 2.000,00 a R\$ 4.000,00, em função da vazão de injeção dele.

Sua instalação é feita em *by pass* à tubulação de recalque do sistema de irrigação e o ponto de sucção é ligado ao reservatório de injeção.

Os maiores inconvenientes deste equipamento são a faixa restrita de pressão de trabalho, até 65 mca, e o desperdício de água, já que para cada litro injetado ocorre o descarte de outro litro para o ambiente. Somam-se a isto a manutenção difícil e cara.

(ii) Injetora de pistão cerâmico

O funcionamento do injetor de pistão (bomba) é idêntico ao observado em motores de dois tempos. A calda é succionada para o interior da câmara de injeção por meio do deslocamento do pistão no interior de um cilindro, e injetada, quando o pistão é comprimido. Todo o movimento é sincronizado e controlado por válvulas de fechamento mecânico, de admissão e expulsão. Este tipo de equipamento também é utilizado em pressurização de lava autos, pulverizadores e atomizadores (Figura 10).



Figura 10. Sistema de fertirrigação utilizando bomba injetora de pistão (BASTOS, 2009).

Este tipo de injetor tem alto custo, cerca de R\$ 3.000,00 a R\$ 7.000,00, em função da dimensão do equipamento. A vazão da solução é descontínua e varia de 30 a 3.000 L h⁻¹, embora o equipamento apresente alta precisão de injeção.

O acionamento é feito por energia elétrica, embora algumas versões possam ser acionadas sem uso de eletricidade.

Um atrativo deste tipo de injetora é ser totalmente proporcional à frequência trabalhada no motor elétrico, sendo assim ideal para uso com sistemas precisos de automação

de injeção, com controle automático de CE e retroalimentação por sensores para ajuste do sistema.

18.10 Injetora de motor hidráulico – Bombas dosadoras

Também conhecidas como hidromotoras, estas bombas dosadoras são muito versáteis, eficientes e precisas. Tem preço médio de R\$ 1.500,00, baixo custo de manutenção (6% do valor de aquisição, por ano) e quando comparadas com outros injetores não elétricos, apresentam perda de carga média de 10 mca (Figura 11).

Uma particularidade atrativa deste tipo de dosador é a manutenção da taxa de injeção da calda fertilizante durante o tempo, mesmo sob variações de pressão na rede de irrigação, daí vem o nome desta injetora de “proporcional”.

Existem inúmeras possibilidades de instalação deste tipo de equipamento, isto é: diretamente na tubulação de adução da irrigação; em linha de tubulação paralela (*by pass*); isoladas ou em paralelo. Entretanto, quando utilizados em paralelo estes injetores preconizam a aplicação isolada dos nutrientes, em que, não é feita a mistura de vários produtos.

O princípio de funcionamento é bem simples, a própria água (fluido motor) ao passar no interior do injetor gera uma força motriz que acionando um embolo dosador que aspira a calda a ser injetada. A solução uma vez dentro do equipamento é misturada com a água e segue para a aplicação no sistema de irrigação. O movimento do embolo dosador é semelhante ao que ocorre nas bombas de pistão, quer dizer, ciclos de admissão e expulsão da calda. Na mangueira de sucção há uma válvula de retenção que impede que a calda e mesmo água limpa retornem para a caixa de calda fertilizante. Como há uma perda de carga para geração de força motriz, faz-se necessário um correto dimensionamento, adicionando pressão extra no sistema ou calculando-se bomba “booster” para suplementar a pressão necessária para seu correto funcionamento.

Os injetores deste tipo são confeccionados em polímeros, PVDF, polietileno reforçado com fibra de vidro, e etc. Existe disponível no mercado uma gama de produtos com este princípio, e em todos a manutenção é fácil e normalmente restringe-se a substituição de anéis de vedação de borracha desgastados.



(A)



(B)

Figura 11. Injeção de fertilizantes com bomba dosadora (MARCELO BASTOS, 2009).

Na aquisição do equipamento é importante informar ao fabricante quais as características dos produtos que serão injetados, contribuindo dessa forma, para que o dimensionamento dos materiais constituintes do injetor possa proporcionar maior vida útil ao mesmo.

Como informação, lembrando que estas irão variar em função do fabricante e modelo, o injetor hidráulico trabalha com pressões de 0,3 a 8 kgf cm⁻²; para 0,25 m³ h⁻¹ a 25 m³ h⁻¹ de vazão motriz e injetando de 0,0075 L h⁻¹ a 1.375 L h⁻¹.

18.11 Injetora multicanais

São equipamentos robustos e de alto custo, entretanto, alta precisão. Trata-se de unidades de injeção com foco em grandes áreas (Figura 12).

As injetoras multicanais, também chamadas "mesas de fertirrigação" são comandadas por controladores de irrigação, contendo sensores de alimentação de dados ou não. Tais equipamentos podem ser acionados pela pressão da rede, com uma tomada de vazão a jusante da motobomba principal e com injeção de fertilizante na sucção desta; também pode trabalhar com bomba "booster" e ficar instalada totalmente a jusante da motobomba principal.

O grande atrativo desta injetora é trabalhar com vários tipos de caldas fertilizantes com taxas de injeção diferentes em momentos de injeção também diferentes. A flexibilidade para o manejo perfeito pode ser conseguida com esse equipamento.

Também se pode injetar ácido e soluções cloradas para ajuste de pH e limpeza de sistemas de irrigação, respectivamente.



(A)



(B)

Figura 12. Sistema de fertirrigação utilizando injetoras multicanais (NAANDAN JAIN, 2021).

A injetora consiste em um controlador, uma motobomba (opcional) tubulação de entrada e saída, uma válvula para regulagem de pressão na saída, e os canais. Cada canal é composto de uma válvula solenoide de alta ciclagem, um Venturi, e um rotâmetro ajustável. Assim, se pode regular pela ciclagem da válvula solenoide e pela vazão do rotâmetro (equipamento que indica com boa precisão a vazão passante). Cada canal pode injetar de 300 litros por hora até 1.000 litros por hora.

Devido as características de automação e precisão deste tipo de injetora seu valor de mercado, dependendo do modelo, gira em torno de R\$ 40.000,00, além de exigir mão de obra bastante capacitada para operar e entender o processo da fertirrigação.

18.12 Considerações sobre o uso de fertilizantes em sistemas fertirrigados

A fonte de fertilizante para uso na fertirrigação deve ter como características a alta solubilidade, baixo risco de incompatibilidade química, custo acessível, facilidade de manuseio, pureza e fornecer outros nutrientes simultaneamente.

O uso de fertilizantes líquidos, que apresentam alta solubilidade tem se propagado, sob entrave de elevado custo e dificuldades de armazenamento na propriedade.

É indicado que se evite as formulações prontas, chamadas popularmente de "canela seca" por exemplo, 04-14-08; 20-05-20, em virtude do alto grau de impureza e a da baixa solubilidade.

Quanto maior a solubilidade melhor e menos custosa será a diluição do fertilizante e esta característica varia muito entre as fontes disponíveis. Via de regra a solubilidade sofre ação direta da temperatura da água de diluição e na literatura existem várias tabelas que condessam essas informações.

Os fertilizantes fosfatados convencionais raramente são aplicados via fertirrigação por serem de baixa solubilidade, bem como pela alta probabilidade de precipitação na forma de fosfato de cálcio, na presença de águas com alta concentração de cálcio. A formação do precipitado diminui a eficiência da fertirrigação e pode entupir os emissores como incrustar nas paredes da tubulação e no interior do injetor.

Já os fertilizantes fosfatados para fertirrigação, com alta pureza e alguns inclusive com pH tampão abaixo de 7,0 são utilizados na fertirrigação, de forma profissional, consciente e com ótimos resultados.

Os fertilizantes nitrogenados são os mais solúveis, principalmente as formas nítricas, e são amplamente utilizados na fertirrigação.

A solubilidade das fontes potássicas também favorece a aplicação via fertirrigação. O cloreto de potássio (KCl) branco é preferido, por ser mais solúvel e não possuir ferro em sua composição, embora, deve-se atentar para a toxicidade gerada nas plantas pelo alumínio (Al) presente na fonte.

O KCl vermelho é pouco indicado, já que no momento da diluição, forma uma "borra espumosa", de dissolução dificultosa, além de possuir concentrações de ferro que podem precipitar e obstruir tubulações e emissores.

Os micronutrientes também têm seu grau de solubilidade, geralmente são muito solúveis, exceto aqueles de fonte ferrosa. Uma dica para a injeção de fertilizantes é a diluição dos mesmos à parte, da caixa de diluição dos macronutrientes, e posterior adição no sistema de injeção. Isto evita a formação de precipitados e desuniformidade na diluição.

Em fertirrigação à prioridade é o uso de fertilizantes com baixo índice salino e baixa condutividade elétrica (CE), principalmente em situações em que seja propícia a salinização do ambiente de cultivo. A atenção deve ser redobrada quando a CE da água de diluição/irrigação for superior à 1,5 dS m⁻¹, já que neste caso, a água por si só já apresenta riscos moderados à salinização do solo.

Outro ponto importante que deve ser levado em conta é o poder de reação residual dos fertilizantes sobre o pH do solo e da água de irrigação, indicado pelos índices de acidez e alcalinidade. Para os fertilizantes de reação ácida há necessidade de se adicionar calcário (CaCO₃) para correção da acidez, na reação alcalina, considera-se a quantidade de CaCO₃ adicionada pela aplicação do fertilizante.

Alguns fertilizantes, quando misturados reagem e formam precipitados que reduzem a eficiência da fertirrigação, causam aumento de custos, o entupimento de emissores e a

redução no diâmetro das tubulações, bem como poluem o ambiente. Este processo é dinâmico e ocorre devido a incompatibilidade de fertilizantes e produtos, em condições normais de pH, concentração e temperatura.

Na mistura de fertilizantes pode ocorrer a compatibilidade total, na qual, não se observa nenhuma reação na mistura dos fertilizantes, bem como alteração em suas características intrínsecas; a compatibilidade parcial, em que, a mistura deve ser feita momentos antes de injetada (tanque de diluição) e incompatibilidade total, quando, a mistura de fertilizantes não pode ser feita em hipóteses alguma.

Geralmente produtos à base de cálcio, sulfato, fósforo e enxofre precisam de maior atenção, por causa da formação de precipitados, na forma de fosfatos e sulfatos insolúveis, quando misturados a outros produtos e, ou compostos.

As fontes de fósforo também merecem atenção, devido a incompatibilidade com a ureia, por ser esta, um dos fertilizantes mais utilizados na fertirrigação, como fonte de nitrogênio.

É indicado que, em caso de dúvida ou compatibilidade condicionada entre produtos a serem injetados no sistema de irrigação, que seja feita a mistura previamente, pelo menos um dia antes, e se faça a verificação visual da formação de precipitados.

A corrosão causada nos equipamentos de irrigação e injeção variam em função do fertilizante utilizado. Embora o uso de materiais plásticos seja desejável, em várias situações e componentes, o uso de materiais metálicos é comum.

Os materiais plásticos são menos "atacados" pelos fertilizantes. No entanto, limitações de pressão ($<16 \text{ kgf cm}^{-2}$) e sensibilidade à abrasão, impedem que num projeto de irrigação todos os componentes se restrinjam a este material.

É preciso entender que, a filtragem do sistema de fertirrigação tem que ser tão eficiente quanto aquela instalada no sistema de irrigação, atuando principalmente na retenção de partículas sólidas, evitando seu arraste ao longo da tubulação.

18.13 Rotina básica no sistema operacional de fertirrigação

Não existe uma receita para manejar os sistemas de injeção. Todavia, é indispensável seguir algumas recomendações, que permitiram reduzir as possibilidades de erros.

Antes da injeção, pressupondo que já foram cumpridos os passos de escolha da fonte de fertilizante mais adequada àquela situação, solubilidade, compatibilidade, etc, deve-se preparar o sistema de irrigação, e isto significa posicionar emissores, equipamentos (pivô central/autopropelido), setores de irrigação localizada (controlador/manual). Respeitando a frente de avanço e o tempo de injeção adequado, deve-se checar a pressão de funcionamento do sistema.

Um detalhe importante é aferir a temperatura da água, de forma simples, utilizando um termômetro digital ($\cong \text{R\$ } 35,00$). A temperatura deve estar próxima dos 20°C . Para efeitos de solubilidade, se a temperatura estiver abaixo deste valor, é pertinente diminuir a quantidade de fertilizante indicada nas tabelas e se houver tempo hábil, realizar um teste de diluição à parte.

Alguns fertilizantes necessitam de água mais quente para solubilizar, por exemplo, o bórax. Neste caso, na prática, pode-se deixar a água dentro da caixa de diluição, para que seja aquecida pelo sol.

Feito isso, procede-se a diluição dos fertilizantes, obedecendo a ordem de solubilidade, ou seja, do menos para o mais solúvel, na caixa de diluição. Lembrando que os fertilizantes que contiverem ou forem fonte de ferro devem ser evitados na fertirrigação, ou devem ser diluídos antes de serem adicionados à calda que será injetada.

A calda, após a diluição, deve ficar em repouso por no mínimo 30 minutos, para possibilitar decantação de partículas em suspensão, sejam elas de que natureza for.

Em seguida, abre-se o registro de interligação das caixas, permitindo o deslocamento da calda para a caixa de injeção, evitando-se a passagem de decantados e sobrenadantes, por meio da filtragem simples entre as caixas. Neste momento aciona-se o sistema de injeção.

Durante não há necessidade de agitação da calda, uma vez que, a calda estando na caixa de injeção, pode ficar lá em repouso, pois não há mais nada a decantar nem sobrenadar, por ser esta, uma solução salina pura, ou seja, sem saturação e sem gradiente de concentração. Este cuidado é importante pois evita que materiais sólidos, decantados no fundo, entrem em suspensão e sejam sugados pelo injetor.

O processo de injeção deve ser acompanhado de perto, verificando anormalidades e principalmente observando quaisquer alterações na pressão e vazão do sistema.

A injeção deve ser interrompida sempre que toda calda for aplicada. Ao término da injeção devem-se fechar os registros da bomba injetora e desligamento dela.

Depois da injeção deve-se lavar todo o conjunto de injeção, incluindo as caixas de diluição e injeção, com água limpa e corrente. Esta água pode ser a mesma que irá ser utilizada para lavagem do sistema de irrigação, após o término da injeção. O tempo de lavagem é relativo e deve ser o mais minucioso possível.

Recomenda-se não deixar acumular no fundo das caixas materiais decantados. Muitas vezes será necessária uma raspagem de detritos no fundo das caixas, é indicado utilizar neste procedimento, ferramentas de plástico ou borracha, com pontas e cantos "cegos".

Sempre que possível a fertirrigação deve ser feita nas horas menos quentes do dia, e conforme visto anteriormente, da forma mais parcelada possível. É evidente que no dia a dia do sistema produtivo, muitas das vezes, é improvável que isto ocorra, por outro lado, deve-se pensar na eficiência da fertirrigação, nos custos envolvidos e na facilidade do procedimento.

18.14 Manejo da fertirrigação via extrator de solução

Fertirrigar de forma eficiente significa ofertar, nutrientes e água, em quantidade suficiente e no momento certo, de forma a reduzir a competição entre plantas. Como discutido até aqui, a diversidade de produtos, equipamentos e conceitos é imensa, por outro lado, de nada adianta a aplicação e uso destes, sem atualizações constantes na forma de manejá-los.

A eficiência no uso de fertilizantes pelas plantas perpassa pelo monitoramento de sua concentração na solução do solo. Assim sendo, a coleta de solução nutritiva do solo é uma forma rápida e direta de se evidenciar os efeitos e o comportamento dos nutrientes no solo.

A coleta da solução de solo é feita por meio de extratores de solução de solo (ESS). Compõe o ESS, um tubo de PVC – linha soldável ou de esgoto com diâmetro de $\frac{3}{4}$ " , com uma capsula de cerâmica porosa, similar a de um tensiômetro, instalada em sua extremidade inferior, enquanto a superior é vedada por uma rolha de borracha e, ou um cap de PVC roscável (Figura 13A).

Após a instalação o ESS é vedado e mediante a sucção aplicada em seu interior a solução do solo entra por meio da cápsula porosa e ali fica retida para posterior retirada com uma seringa pela parte superior.

O vácuo interno do ESS é feito com uma seringa de 60 ml com bico roscável associada a um registro de 3 vias, conectados no microtubo que percorre todo o ESS até próximo a capsula porosa.

O registro de 3 vias fica conectado ao microtubo permanentemente e quando há necessidade de aplicação do vácuo ou a coleta da solução do solo, conecta-se o registro na seringa (Figura 13B). O manejo do registro é simples, numa via aplica-se o vácuo e em outra se expelle o ar do interior da seringa, esvaziando-a. O movimento de sucção e esvaziamento da seringa deve repetido pelo menos quatro vezes consecutivas para que seja gerado vácuo de aproximadamente -60 a -70 kPa, suficiente para a entrada da solução do solo no ESS.

Para aplicação do vácuo podemos utilizar uma pistola de vácuo (Figura 13C). A grande vantagem é a operacionalidade, quando se tem inúmeros ESS, bem como os mesmos amostram maiores profundidades do solo. Em lojas de ferramentaria este equipamento é comercializado por aproximadamente R\$ 500,00, com a finalidade de fazer vácuo em motores à diesel.

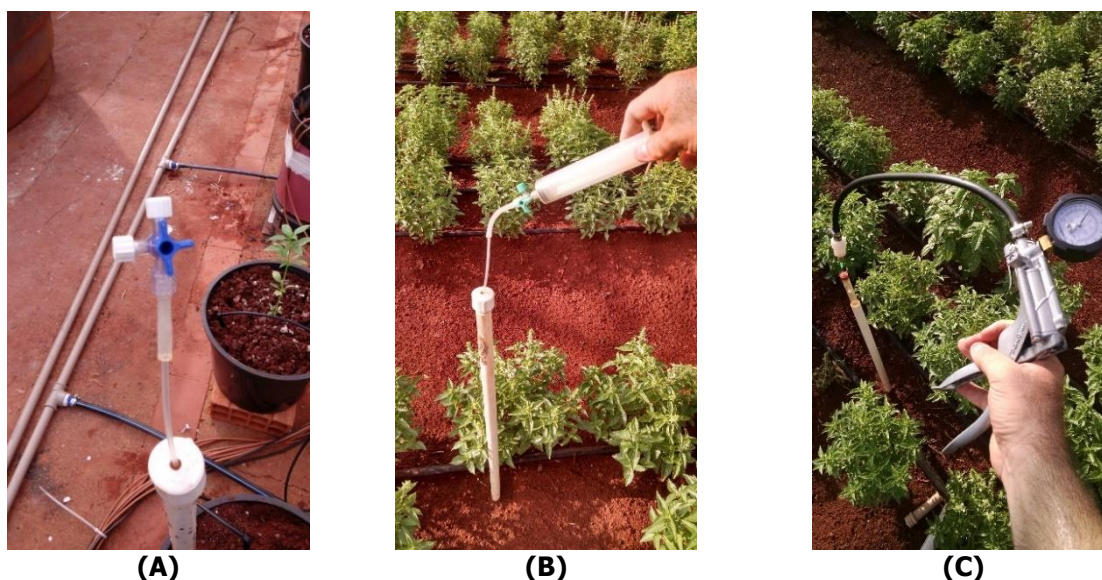


Figura 13. Detalhe do registro de 3 vias conectado ao microtubo (A); Aplicação de vácuo com seringa associada a registro de 3 vias (B) e com uso de pistola de vácuo (C).

A coleta da solução do solo é deve ser feita com frequência e quando a umidade do solo está próxima a capacidade de campo. Após uma chuva ou irrigação deve-se esperar por cerca de 1 hora e aplicar o vácuo, aguardando pelo menos 12 horas para a retirada da amostra de solução do solo.

Da solução coletada pode-se determinar a condutividade elétrica (EC), o pH e as concentrações de nutrientes. As concentrações podem ser obtidas em laboratório, a um custo de R\$ 10,00/amostra ou com o uso de kits rápidos, que em sua maioria utilizam fitas colorimétricas, e de resultado instantâneo.

É indicativo de fertirrigação em conformidade quando a diferença entre os pontos amostrados ao longo do perfil não ultrapassar $0,5 \text{ dS m}^{-1}$. Valores crescentes de EC indicam ocorrência de percolação profunda e lixiviação de sais. Em casos assim, medidas corretivas, como a diminuição da lâmina de irrigação e, ou diminuição na dose de nutrientes aplicada por vez, pode amenizar o problema.

18.15 Custos operacionais: adubação manual x fertirrigação

Para facilitar o entendimento deste item é importante caracterizarmos a situação em que estamos discutindo os custos comparativos. O cenário a ser apresentado é de pomares de citros da região Norte do estado de São Paulo. A empresa responsável pela coleta e análise das informações é a Stocler Engenharia e Consultoria Ltda.

Partimos do pressuposto que o produtor já tenha atendido a todos os requisitos básicos de eficiência do sistema de irrigação; escolha do fertilizante mais adequado; perfeito entendimento da "marcha de absorção" dos nutrientes pela cultura e injetores indicados para sua especificidade, tendo a seguinte caracterização: (i) árvores adultas de citros: 82.500 plantas, (ii) área: 162,20 hectares, (iii) sistema de irrigação: Gotejamento superficial – 1 Linha por planta - 3 setores, (iv) vazão: 325 m³/hora, (v) Bomba de injeção dos fertilizantes: 2% - 6.500 L h⁻¹, (vi) potência instalada: 287 kW - 1,76 kW ha⁻¹, (vii) custo energético: R\$ 0,27 kw/hora (dia); R\$ 0,08 kw/hora (noite), (viii) recomendação de adubação: Nitrogênio: 150 kg/hectare e Potássio: 160 kg ha⁻¹, (ix) Fontes Utilizadas:

Nitrato de Cálcio: 15,5% N e 19% Ca

Nitrato de Amônio: 32% N

Cloreto de Potássio: 58% k₂O

(x) dinâmica de parcelamento adotado pela Fazenda

Período obrigatório de uso da irrigação

Agosto:

5 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 5 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio + 20 kg ha⁻¹ KCl

Setembro:

20 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 20 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio + 50 kg ha⁻¹ KCl

Outubro:

15 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 15 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio + 15 kg ha⁻¹ KCl

Novembro:

10 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 10 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio

Período sem necessidade de irrigação

Fevereiro:

7,5 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 7,5 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio + 20 kg ha⁻¹ KCl

Março:

10 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 10 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio + 25 kg ha⁻¹ KCl

Abril:

7,5 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 7,5 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio + 30 kg ha⁻¹ KCl

(xi) Caracterização da irrigação e fertirrigação:

Nesta região noroeste do estado de São Paulo a indução do florescimento em citros se dá pelo *deficit* hídrico acumulado nos meses de abril a julho. A partir de agosto o sistema de irrigação é ligado para quebra do estresse hídrico e indução do florescimento. A irrigação perdura até o início de novembro, quando a temporada de chuvas se inicia.

A irrigação é interrompida de novembro a abril, já que o regime pluviométrico da região é suficiente para a dotação hídrica do pomar.

A adubação do pomar é feita de agosto à outubro, interrompida de novembro a janeiro, e retomada de fevereiro a abril.

Dentro desta dinâmica de reposição de água e fertilizantes, podemos perceber que a fertirrigação é utilizada nos meses em que se está irrigando (agosto-outubro). Por outro lado, para que a recomendação de adubação possa ser completa, há necessidade de ligar o sistema de irrigação também no período de chuvas (fevereiro-abril) (Figura 14).

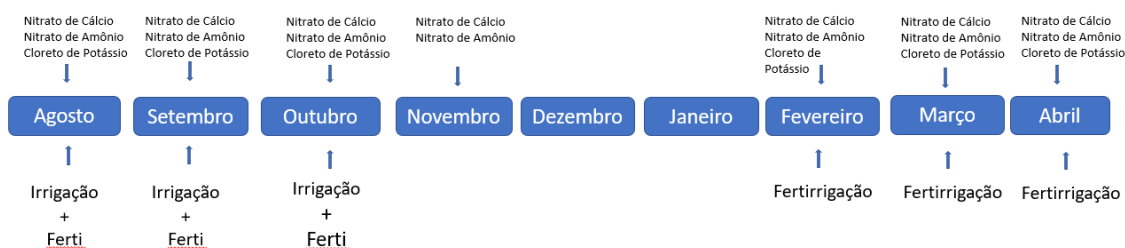


Figura 14. Resumo da dinâmica de irrigação e fertirrigação na cultura de citros no noroeste do estado de São Paulo, Brasil (Stocler Engenharia e Consultoria Ltda).

Considerando a estratégia exclusiva de uso da fertirrigação para aplicação dos fertilizantes, podemos avaliar cenários distintos (Figura 15).

Quando utilizamos o sistema de irrigação durante o dia, nos referidos períodos indicados acima, exclusivamente para fertirrigar (cenário I) o custo operacional por hectare é 59% superior ao de irrigar e fertirrigar (cenário III). Caso as operações sejam realizadas à noite, este custo comparativo é de 56% a mais para o cenário II em relação ao IV.

Esse comportamento pode ser atribuído ao maior custo energético no período de fevereiro à abril, quando a demanda contratada é utilizada somente para fertirrigação, já que neste período a reposição hídrica é feita pelas chuvas (cenário I)

Caso optemos pela aplicação de fertilizantes durante a noite o custo de realizar a irrigação e a fertirrigação (cenário IV) é 64% inferior quando se utiliza somente a irrigação (cenário II).

É importante frisar que mão de obra operacional pode sofrer alterações devido à eventual necessidade de adicional noturno, superando os R\$ 5.211,59 adotado neste estudo.

Tabela 1. Caso (I. irrigar só para fertirrigar durante o dia, II. irrigar só para fertirrigar durante a noite, III. irrigar e fertirrigar durante o dia, e IV. irrigar e fertirrigar durante a noite), tempo diário (t, h), custo energético (Ce, R\$), demanda (CPFL) (D, R\$), valor da mão-de-obra (vMO, R\$), custo total (Ct, R\$) e custo unitário (Co, R\$ ha⁻¹) referentes aos cenários de avaliação de custos da fertirrigação de citros no noroeste do estado de SP, Brasil (Stocler Engenharia e Consultoria Ltda).

Caso	t	Ce ¹	D	vMO ²	Ct	Co
I	310,21	24.038,46	21.154,77	5.211,59	50.404,82	310,76
II	310,21	7.211,54	21.154,77	5.211,59	33.577,90	207,02
III	310,21	14.258,82	12.088,44	5.211,59	31.558,86	194,57
IV	310,21	4.277,65	12.088,44	5.211,59	21.577,68	133,03

¹ Ce = Pt(kW).Pr(R\$ kW h⁻¹).t(h). ² vMO: 2.t(h).Cm(R\$ h⁻¹).

Após análise destes custos fica evidente que os custos operacionais são muito superiores quando ligamos o sistema de irrigação somente com o objetivo de fertirrigar nos períodos de chuva.

Quando consideramos a APLICAÇÃO CONVENCIONAL DE FERTILIZANTES, realizada por distribuidores de adubo à lanço, não é operacional dividir semanalmente a quantidade total recomendada de fertilizantes, como é feita na fertirrigação. Assim, para efeito de discussão consideraremos o parcelamento da adubação total em três períodos (Figura 15).



Figura 15. Resumo da dinâmica adubação convencional na cultura de citros no noroeste do estado de São Paulo, Brasil (Stocler Engenharia e Consultoria Ltda).

Considerando a estratégia de distribuição de fertilizantes adotada acima, podemos compor o custo operacional e observar que ele é inferior aos cenários I a III (fertirrigação), ficando 45% superior ao cenário IV (irrigação + Fertirrigação noturno) (Tabela 2).

Tabela 2. Custo operacional de adubação convencional na cultura de citros no noroeste do estado de São Paulo, Brasil (AGRIANUAL, 2018).

Descrição	Equipamento	Custo da Hora máquina	Tempo da operação	Custo Total	Custo por Hectare
Adubação (3x)	HM TP 4x4 85 CV + Adubador à lanço (1550 Kg)	R\$ 107,71	1,8 h	R\$ 31.447,01	R\$ 193,87

É importante salientar que esta discussão está restrita aos custos operacionais, não sendo levado em conta os benefícios da fertirrigação e as respostas da planta frente a este sistema de fornecimento de nutrientes.

Em resumo, podemos verificar que, para as condições caracterizadas acima, irrigar e fertirrigar nos meses de agosto, setembro, outubro, assim como fertirrigar nos meses de fevereiro, março e abril tem praticamente o mesmo custo operacional por hectare que a adubação convencional.

Este tipo de análise pode ajudar o produtor a encontrar o ponto de equilíbrio econômico e reduzir custos em seu processo.

18.16 Considerações finais

Dentro do tema proposto no capítulo buscamos delinear um panorama geral da fertirrigação, em suas mais variadas nuances, e finalizar com uma análise que muitas vezes nos leva a pensar nos reais benefícios da migração de um sistema convencional de adubação para a fertirrigação. O desfecho permite que o produtor trace estratégias que definam a melhor forma de conduzir sua lavoura, não necessariamente optando por um ou outro sistema, mas talvez um híbrido destes.

A fertirrigação potencializa a utilização dos sistemas de irrigação, e o aumento de mão de obra adicional na irrigação quando se realiza a fertirrigação não é significativa, entretanto, é importantíssimo o treinamento e a qualificação de todo o pessoal envolvido, para que a eficiência da aplicação da técnica seja alcançada.

Há evidência em alguns estudos que as doses recomendadas de certos nutrientes podem ser reduzidas em até 20% quando aplicadas por intermédio da água de irrigação, entretanto, é importante frisar que nem todos os fertilizantes proporcionam resultados satisfatório quando aplicados por intermédio da água de irrigação, e em muitos casos, os métodos convencionais são os preferíveis.

O lançamento no mercado de fertilizantes mais puros, voltados exclusivamente à sistemas fertirrigados demonstra a preocupação de todos os agentes da cadeia produtiva com a necessidade de se nutrir as plantas de forma mais eficiente, e fornecer juntamente com os nutrientes outros produtos de distintas finalidades.

Agradecimentos

Agradecemos aos parceiros profissionais e às empresas de irrigação que nos forneceram algumas das imagens e informações apresentadas.

Agradecemos ao amigo Stocler Manoel de Andrade, da empresa Stocler Engenharia e Consultoria Ltda – Bebedouro, SP, pela cessão do estudo de caso, fruto de seu trabalho prático frente às propriedades de citros do Estado de São Paulo.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE TECNOLOGIA EM NUTRIÇÃO VEGETAL. Anuário Brasileiro de tecnologia em nutrição vegetal. Abisolo. 2015. Online. Disponível em: <http://abisolo.com.br/n.php?n=custo-da-safra-15-16-de-milho-sobe-30-produtor-deve-ficar-atento>. Acesso em: 5 fev. 2016.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. ANDA. Disponível em: http://www.anda.org.br/estatistica/Principais_Indicadores_2016.pdf. Acesso em: 5 fev. 2016.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: AVI Book, 1992. 652p.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RIMA, 2000. p. 531.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1980. 251p.
- MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação Princípios e Métodos**. 3. Ed., Ed. UFV, 2009. 355p.
- VILLAS BOAS, R.L.; BOARETTO, A.E.; VITTI, G.C. Aspectos da fertirrigação. In: VITTI, G.C.; BOARETTO, E. (Ed.). **Fertilizantes fluidos**. Piracicaba: Potafos, 1994. p. 283-308

CAPÍTULO 19

19 UTILIZAÇÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA IRRIGAÇÃO: PASSADO, PRESENTE E FUTURO

Flávio Gonçalves Oliveira, Everardo Chartuni Mantovani e Marcelo Carazo Castro

Resumo

No passado, havia grandes limitações para a utilização da energia fotovoltaica (FV): do ponto de vista técnico, ela ficava restrita a pequenos motores em corrente contínua (CC); e do ponto de vista econômico, o alto custo dos painéis solares inviabilizava a expansão dessa tecnologia. Com o desenvolvimento dos inversores de corrente, foi possível converter de forma econômica a CC produzida pelos módulos FV em corrente alternada (CA), utilizada pelos motores normalmente empregados nos sistemas de irrigação. A restrição da potência dos motores possível de serem acionados com energia FV também foi superada. A redução dos custos dos painéis solares ocorreu de forma progressiva ao longo dos anos, sendo resultado de muitas melhorias, tanto técnicas quanto econômicas. De forma semelhante, a redução dos custos das baterias acompanhada de seu aperfeiçoamento técnico possibilitou a expansão dos sistemas fotovoltaicos desconectados da rede elétrica (sistemas *off grid*), refletindo em sua maior utilização na agricultura irrigada. Apesar da grande redução nos custos, os sistemas de irrigação FV continuam ainda sendo muito onerosos para os produtores rurais brasileiros e o desafio atual é facilitar o seu acesso ao crédito. Por ser um país tropical, o Brasil possui grande potencial para produção da energia FV, o que está sendo normatizado progressivamente com legislações federais. Entretanto, a lei em vigor (Lei 14.300/2022), ao sobretaxar a geração elétrica FV, pode desestimular a ampliação futura dos sistemas FV, afetando a agricultura irrigada. Logo, outro desafio seria a flexibilização da legislação a fim de tornar a agricultura irrigada não apenas uma fonte de alimentos, de fibras e de divisas para o país, mas também de energia, insumo indispensável para o progresso brasileiro.

19.1 Introdução

Alguns estudos indicam que, no Brasil, haverá uma redução das áreas agricultáveis como consequência das mudanças climáticas (DECONTO, 2008). Diante deste cenário, espera-se um aumento na demanda por irrigação, ampliando-se tanto a extensão das áreas irrigadas quanto a necessidade de água requerida pelas culturas (SENTELHAS, 2021). Pode-se observar, então, a importância que a irrigação terá para a segurança alimentar e o agronegócio nacional. Entretanto, o crescimento da agricultura irrigada demandará mais energia para seu atendimento o que pode ser feito com uma contribuição relevante da energia solar fotovoltaica.

A utilização da energia solar para geração de eletricidade teve um crescimento exponencial a nível mundial na última década (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2020). Seu uso pode evitar a utilização de geradores com motores de combustão interna, sendo então uma solução sustentável mais limpa e ecológica para a obtenção de energia elétrica em áreas remotas. Esta utilização pode ser realizada com sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica da concessionária de energia (sistemas *on-grid*) ou desconectados (sistemas *off-grid*).

Deve-se ressaltar que o Brasil recebe em média uma irradiação solar de $5400 \text{ Wh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com uma maior concentração nos estados do nordeste. Mesmo nos estados com menor

irradiância solar, como o Rio Grande do Sul, a intensidade média supera a de países europeus que utilizam amplamente a energia solar, como a Alemanha (PEREIRA *et al.*, 2017).

Tem-se observado um aumento expressivo da capacidade de geração de energia elétrica fotovoltaica (FV) no Brasil, seguindo a tendência mundial. Em 2012, a potência fotovoltaica instalada no país era de aproximadamente 7 MW enquanto que, em janeiro de 2022, ela ultrapassou os 13.500 MW (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, 2022).

Ciente da importância da energia elétrica para a produção econômica brasileira, o Governo Federal tem estimulado a adoção de alternativas energéticas para sua geração, a fim de facilitar o acesso a mesma (BRASIL, 2019). Tal ação foi bem recebida pelos produtores rurais, uma vez que a irrigação é uma das atividades que demandam maior utilização de energia na agropecuária (GUZMÁN *et al.*, 2018).

Além dos estímulos governamentais, outros fatores têm proporcionado uma expansão do setor FV brasileiro como a redução dos custos de implantação, maior oferta de mão-de-obra especializada e elevação das tarifas de energia elétrica. Isso tem gerado grande interesse por parte dos produtores rurais irrigantes, uma vez que a energia elétrica é o insumo de maior custo operacional dos sistemas de irrigação (BRASIL, 2019).

Os sistemas de bombeamento de água com energia solar fotovoltaicos estão entre as aplicações agrícolas mais promissoras com energia solar, especialmente em locais remotos sem acesso confiável à rede elétrica e nem a combustível diesel de baixo custo. Esses sistemas são ecoambientais com baixa manutenção e sem nenhum custo de combustível (GORJIAN *et al.*, 2020). São semelhantes aos de bombeamento convencionais (com energia elétrica da rede pública ou com motores a óleo diesel), a exceção da origem de energia para o motor.

Com inovações técnicas em sistemas de bombeamento movidos a energia FV, grande atenção tem sido dada à implantação dessa tecnologia em todo o mundo. Um progresso notável na tecnologia de bombeamento movido a energia solar fotovoltaica foi alcançado, superando as limitações técnicas apresentadas pelos primeiros sistemas de bombeamento solar de água. Com o esperado crescimento no custo dos combustíveis fósseis e a queda no custo das células solares, a energia fotovoltaica está se tornando cada vez mais acessível (GORJIAN *et al.*, 2020).

19.2 Evolução histórica do custo da implantação fotovoltaica

Os custos de aquisição de qualquer equipamento influenciam diretamente no volume de sua adoção pela sociedade. Isso não foi diferente para os sistemas fotovoltaicos, como apresentado a seguir.

Em 1975, o valor do painel FV era de US\$ 105,7/W; no ano 2000 era de US\$ 5,0/W e em 2020 tinha-se um valor de US\$ 0,2/W. Assim, nota-se que o preço da energia solar fotovoltaica diminuiu 25 vezes em relação ao do ano 2000, o que representa uma redução nos custos de 96 % em 20 anos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020).

Kavlak, McNerney e Trancik (2018) estudaram as causas da rápida diminuição dos custos dos módulos fotovoltaicos ao longo de quarenta anos e concluíram que:

- (i) o aumento da eficiência do módulo para a produção de eletricidade foi uma das principais causas de redução de custos entre 1980 e 2012, resultado dos esforços de pesquisa;
- (ii) após 2001, as economias de escala tornaram-se uma causa mais significativa de redução de custos. O tamanho das fábricas aumentou de 1 MW em 1980 para 1000 MW em 2012, resultando em economias de escala por meio de menor custo unitário

de matérias-primas, infraestrutura compartilhada, redução das exigências de mão de obra, maior rendimento e melhor controle de qualidade. Esse fato foi especialmente significativo após 2012, o qual contribuiu para uma redução significativa no custo do módulo. Nesse sentido, Roser (2020) menciona que a cada duplicação da capacidade de produção acumulada instalada, o preço dos módulos solares diminui 20,2 %.

- (iii) a melhoria da eficiência de fabricação, como por exemplo com o uso de revestimento antirreflexo e materiais encapsulantes, além do próprio processo de fabricação das células fotovoltaicas e reciclagem de materiais. O rendimento de produção das células passou de 75% em 1980 para 95% em 2012;
- (iv) redução da espessura das próprias placas fotovoltaicas, demandando uma diminuição da quantidade de silício necessária para sua fabricação;
- (v) melhor aproveitamento da área do módulo para a produção FV;
- (vi) reduções nos custos de materiais que não são de silício sempre foram fontes importantes de redução de custos, o que era feito por volume ou economias de escala em indústrias fornecedoras de materiais, e/ou projetos mais específicos de sua aplicação.

Associadas aos módulos fotovoltaicos estão as baterias. Elas são necessárias para sistemas fotovoltaicos *off-grid* e em alguns tipos de sistemas *on-grid*. Tem-se observado que o preço das baterias de íon-lítio diminuiu 97 % nas últimas três décadas, o que significa uma redução de 41 vezes. Assim, uma bateria com capacidade de um quilowatt-hora que custava US\$ 7.500,00 em 1991, passou a custar US\$ 181,00 em 2018. Apenas entre 2014 e 2018 o custo caiu pela metade. Em geral, o preço real por capacidade de energia desse tipo de bateria tem reduzido 13 % ao ano. Cada vez que a capacidade de produção das baterias duplica, os preços caem em média 18,9 %, o que é semelhante aos dos módulos solares fotovoltaicos. Além da redução dos custos, as melhorias tecnológicas das baterias tem proporcionado um aumento na densidade de carga. Em 1991, por exemplo, se obtinha 200 Wh de capacidade por litro de bateria, contra os mais de 700 Wh em 2020 (RITCHIE, 2021; ZIEGLER; TRANCIK, 2021).

19.3 Composição dos sistemas fotovoltaicos (FV) de bombeamento para irrigação

Um sistema de bombeamento fotovoltaico é basicamente composto por: (i) painel fotovoltaico; (ii) sistema de controle de energia; (iii) sistema de bombeamento conectado diretamente ou não ao sistema de irrigação; e (iv) sistema de distribuição ou de armazenamento, que pode ser uma caixa d'água (CAMPANA; LI; YAN, 2013). As Figuras 1 e 2 ilustram um esquema de sistema de irrigação FV do tipo *off-grid* e *on-grid*, respectivamente.

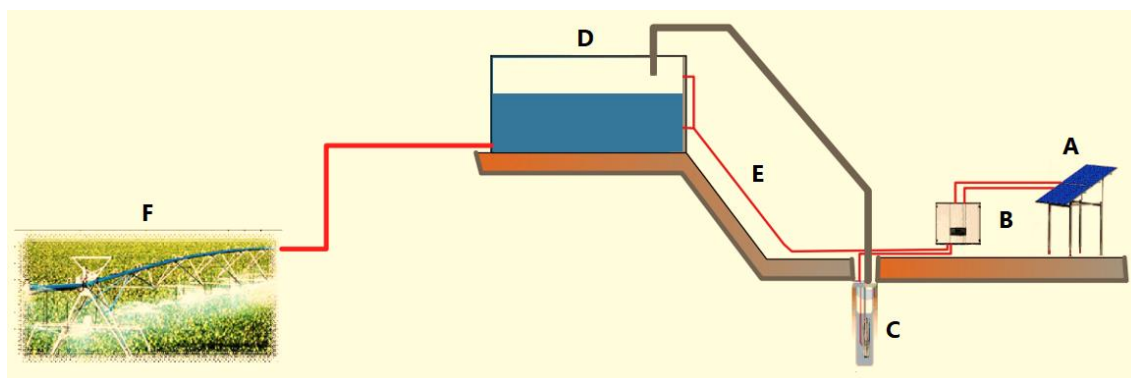


Figura 1. Esquema de um sistema de irrigação fotovoltaico *off-grid*: (A) módulos FV; (B) inversor de frequência; (C) conjunto motobomba; (D) reservatório; (E) sistema de controle de nível; (F) sistema de distribuição de água. (Adaptado de SANTANA *et al.*, 2021).

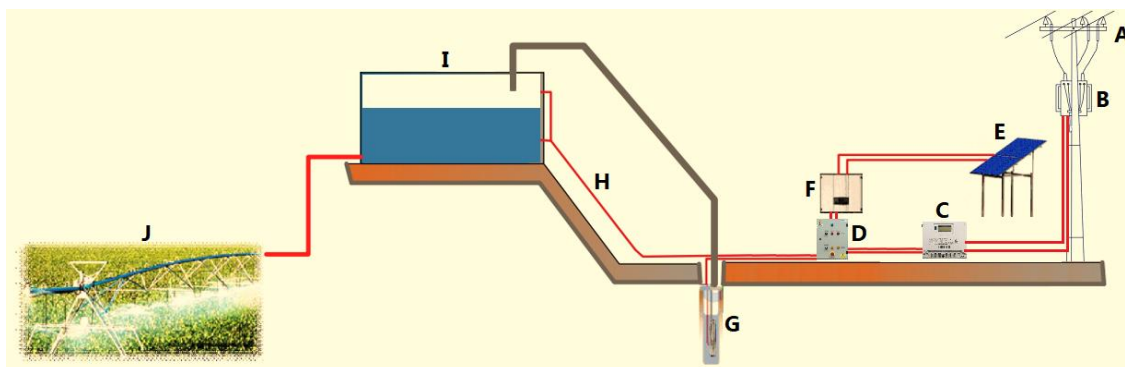


Figura 2. Esquema de um sistema de irrigação fotovoltaico on-grid: (A) rede pública de energia; (B) transformador; (C) medidor de energia; (D) quadro de energia; (E) módulos FV; (F) inversor de frequência; (G) conjunto motobomba; (H) sistema de controle de nível; (I) reservatório; (J) sistema de distribuição de água. (Adaptado de SANTANA *et al.*, 2021).

19.3.1 Painel FV e acessórios

A energia solar apresenta-se com elevada variabilidade espacial e temporal, decorrente de efeitos astronômicos, da inclinação do eixo terrestre, de fenômenos que ocorrem no sol e aqueles associados a atmosfera terrestre. Deve-se considerar ainda a influência da inclinação do objeto (painel FV) na superfície terrestre, que pode favorecer ou não a absorção da energia recebida (VIANELLO; ALVES, 1991).

Várias são as tecnologias disponíveis no mercado fotovoltaico, dentre as quais o grupo das células convencionais: células de silício monocristalino e de silício policristalino; grupo dos filmes finos: as células de silício amorfo e as células do composto binário, que compõem o grupo III-IV da tabela periódica dos elementos, disseleneto de cobre e índio (CIS), de índio e gálio (CIGS) ou de telureto de cádmio (CdTe), as de arseneto de gálio (GaAs), as do composto ternário, como exemplo, dissulfeto de cobre e índio (CuInSe₂), e as células de multijunção (BOLTON, 1982).

O tipo de tecnologia solar fotovoltaica a ser utilizada depende das características óticas de cada uma, do seu *band gap*, do seu coeficiente de absorção ou sua resposta espectral, associada com suas propriedades eletrônicas, que irão indicar o seu rendimento de acordo com a área disponível para a instalação do sistema (MANZANARES, 2008).

As células fotovoltaicas normalmente encontradas no mercado são à base de silício, notadamente o silício policristalino que possui uma boa relação custo-eficiência (GREENPRO, 2004). Os autores atestam também que as células são compostas por dois materiais semicondutores separados por uma barreira de potencial, em que, quando há a incidência da radiação em um desses materiais cria-se uma diferença de potencial na célula, e ao fechar-se o circuito ligando um material ao outro tem-se uma corrente elétrica.

Os módulos fotovoltaicos são constituídos por um arranjo de células, que quando conectadas, atingem o valor total de tensão e corrente que determinam a potência do módulo atendendo-se, assim, aos interesses comerciais. O dimensionamento de um projeto fotovoltaico considera entre outros aspectos técnicos, a incidência de energia solar sobre o local onde o sistema será implementado, a demanda de carga consumida e qual a potência do sistema fotovoltaico que atenderá ao consumidor (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Em sistemas de bombeamento movidos a energia fotovoltaica, o painel FV é instalado em uma estrutura fixa ou móvel (rastreador). Neste último caso, permite-se ao painel fazer o acompanhamento da trajetória do sol, mantendo-o perpendicular a ele (CAMPANA; LI; YAN, 2013; ALIYU *et al.*, 2018). Alguns estudos indicaram que a utilização de um rastreador mecânico solar de dois eixos, horizontal e vertical, pode resultar em um aumento de até 22 % na captação da energia solar (MORALES, 2011). Isso propicia o aumento em até 41 % o volume de água bombeada com o mesmo painel FV, dependendo das condições locais (EDRIZZI; SAUER, 2002).

Uma tecnologia que vem despontando recentemente é a utilização de painéis solares do tipo dupla face, ou bifaciais. Estes painéis possuem células fotovoltaicas em ambas as faces do módulo fotovoltaico, sendo capazes de absorver também a energia solar refletida da superfície do solo. Associado aos sistemas de rastreamento, os sistemas FV bifaciais possibilitam incrementar a produção de energia em 35 % (PORTALSOLAR, 2022).

Para reduzir a quantidade de painéis FV empregados em um sistema de bombeamento, e assim reduzir o custo de implantação do mesmo, pode-se utilizar dispositivos concentradores da energia solar. Tais equipamentos são baseados na reflexão dos raios para uma única região, no caso a placa FV. Melo Filho (2006), por exemplo, avaliou o desempenho de um concentrador solar tipo "V" acoplado ópticamente a um gerador FV para o acionamento de um sistema de irrigação por gotejamento. Ele observou um aumento na taxa de bombeamento em 1,68 e 2,28 em relação ao sistema com rastreamento e ao sistema com estrutura fixa, respectivamente.

19.3.2 Sistema de controle de energia

O sistema de controle de energia, ou sistema de controle de potência, é uma interface entre o sistema motobomba e os módulos fotovoltaicos. Tal sistema é composto por dispositivos condicionadores de potência que auxiliam o controle da energia FV produzida, maximizando sua eficiência. Dentre os vários dispositivos, destacam-se os conversores de corrente contínua para corrente contínua (CC/CC) e os inversores de corrente contínua para corrente alternada (CC/CA). Os conversores CC/CC ajustam a corrente e tensão produzidas regulando-as para seu correto atendimento aos motores CC. Os inversores CC/CA, por sua vez, convertem a corrente contínua produzida pelo sistema FV em corrente alternada para utilização pelos motores (MORALES, 2011).

Ressalta-se que o desenvolvimento do inversor CC/CA foi o principal progresso técnico da tecnologia de bombeamento fotovoltaico, que possibilitou o uso de motores CA nos sistemas de bombeamento FV (GAO *et al.*, 2018). Além de permitir o uso de motores CA, os inversores de potência são utilizados para conectar os sistemas fotovoltaicos à rede de distribuição elétrica (sistemas *on-grid*) (CORTEZ; DÍAZ, 2010).

Os controladores de carga de baterias se constituem em uma aplicação importante dos conversores CC/CC. Estes dispositivos controlam de forma precisa o fornecimento da energia FV produzida que é aplicada às baterias, garantindo-lhes uma maior vida útil. Tais conversores são ainda utilizados em sistemas que não utilizam baterias. Neste caso, eles operam como controladores entre a energia produzida pelos painéis FV e a consumida pelo motor CC (PINHO; GALDINO, 2014).

Tanto o conversor quanto o inversor são geralmente equipados com um dispositivo rastreador do ponto de máxima potência (MPPT) para maximizar a extração de energia do painel solar, pois operam sempre no ponto de máxima potência da curva corrente-tensão do sistema FV (CAMPANA, LI, YAN, 2013). O uso do MPPT se justifica devido a incapacidade dos sistemas mais simples de trabalharem no ponto de potência máxima do gerador fotovoltaico

devido à alta dependência das condições climáticas diárias (CHANDEL *et al.*, 2015). O MPPT é considerado um progresso tecnológico importante para os sistemas FV (GAO *et al.*, 2018).

Um estudo mostrou, por exemplo, que um sistema de acoplamento direto utiliza apenas 31% da capacidade fotovoltaica. Para não precisar superdimensionar o painel FV por causa disso, um rastreador de ponto de potência máxima pode ser utilizado. Os MPPTs podem extrair mais de 97% da energia fotovoltaica quando devidamente otimizados (OI, 2005).

19.3.3 Sistemas de armazenamento de energia

Para que o sistema FV de bombeamento possa ser utilizado de forma consistente na ausência, na insuficiência ou durante as oscilações da radiação solar, respectivamente período noturno, dias nublados e dias parcialmente nublados, é imperativo armazenar energia. Isso pode ser feito basicamente de duas formas: (i) armazenamento em baterias da energia elétrica FV produzida, ao todo ou em parte. No primeiro caso, o carregamento das baterias pode ser feito, por exemplo, no período que antecede o funcionamento da irrigação e no segundo caso armazenando apenas o excesso de energia não consumido pelo sistema; (ii) armazenamento da água bombeada em reservatórios. (HADJ *et al.*, 1999; RIZI; ASHRAFZADEH; RAMEZANI, 2019; TIMANÁ, 2019).

A utilização de baterias deve ser feita considerando-se questões logísticas-econômicas, pois haverá uma maior necessidade de manutenção e uma menor confiabilidade do sistema. Além disso, elas acarretam a diminuição da eficiência global do sistema fotovoltaico, além de serem caras, o que eleva o custo do sistema FV (KHATIB; MUHSEN, 2021). Geralmente, as baterias possuem pequena vida útil (seis anos contra 20 a 30 anos dos painéis fotovoltaicos) e produzem poluentes. A durabilidade delas é função do seu tipo e de suas condições ambientais e operacionais, como a temperatura ambiente e profundidade de descarga projetada. Sua utilização é justificada mais facilmente quando é necessário irrigar no período noturno (HADJ *et al.*, 1999; TIMANÁ, 2019).

Muitos tipos diferentes de baterias recarregáveis adequadas para aplicações fotovoltaicas estão disponíveis atualmente. O tipo mais utilizado é a de chumbo-ácido, pois permite um armazenamento relativamente econômico de quantidades úteis de energia elétrica. No entanto, a menos que ocorra melhorias na densidade de energia, no custo e na vida útil, outras tecnologias promissoras podem superá-la, como a de lítio (MESSENGER; ABTAHI, 2017).

Alternativamente, o armazenamento de água em um reservatório elevado é mais econômico, simples, seguro, eficiente e confiável do que o armazenamento de energia em baterias (LAMIGUEIRO, 2020; KHATIB; MUHSEN, 2021). Neste caso, os sistemas fotovoltaicos de bombeamento são dimensionados para armazenar água extra em dias ensolarados de forma que esteja disponível em dias nublados e à noite. A água pode ser armazenada em um tanque de irrigação maior do que o necessário ou em um tanque de armazenamento separado e, em seguida, alimenta por gravidade tanques de irrigação menores, ou mesmo o próprio sistema de distribuição de água (HALM, 2000). Normalmente, o tanque de armazenamento é projetado para proporcionar autonomia de três dias sem qualquer radiação solar para atender à demanda hídrica necessária (KHATIB; MUHSEN, 2021). Pode-se ainda, ao invés de realizar diretamente a irrigação com essa água armazenada, utilizá-la para girar uma turbina e produzir a eletricidade necessária para o acionamento do conjunto de bombeamento (MESSENGER; ABTAHI, 2017).

De forma geral, os sistemas FV de bombeamento para irrigação não utilizam baterias, mas às vezes são acoplados a sistemas de armazenamento de água, para operação em situações de dias nublados ou irrigações noturnas (AGRAWAL; JAIN, 2019). Porém, um tipo de sistema FV de bombeamento para irrigação que tem se destacado economicamente é a

irrigação direta FV autônoma, que não utiliza nem baterias e nem reservatórios (OKASHA, 2016; RECA *et al.*, 2016).

19.3.4 Medidores de energia

Medidores de energia são dispositivos obrigatórios nos sistemas FV *on-grid*. Em tais sistemas, pode-se utilizar: (i) dois medidores unidirecionais, sendo um para a medição da energia produzida pelos painéis FV e o outro para a medição da energia consumida pelo motor; (ii) um medidor bidirecional, que desempenha a função dos dois medidores unidirecionais anteriores. Ressalta-se que ambas as medições, da energia produzida e da energia consumida, são realizadas de forma independente (PINHO; GALDINO, 2014).

19.4 Modelos de utilização da energia solar FV em sistemas de irrigação

19.4.1 Sistemas de bombeamento e suas conexões ao sistema de geração FV

Existem quatro tipos de bombas que são utilizadas nos sistemas FV de bombeamento: diafragma, pistão, helicoidal e centrífuga. As três primeiras são chamadas de deslocamento positivo, e possuem a característica de fornecer altas pressões, mas pequenas vazões, normalmente inferior a 1000 L h^{-1} , e capacidade de trabalho com elevadas alturas de sucção. As características das bombas centrífugas são opostas: proporcionam maiores vazões e pequena altura de sucção. Entretanto, a bomba centrífuga é a melhor escolha quando a potência FV supera $1,5 \text{ kW}$, bem como quando há necessidade de bombeamento de elevados volumes diários (VICK; CLARK, 2009). De forma geral, para pequenas potências ($< 0,2 \text{ kWp}$) são utilizadas principalmente as bombas de deslocamento positivo do tipo diafragma, que fornecem altura manométrica elevada e vazão baixa, e em potências maiores, predominam as bombas centrífugas, que podem fornecer vazões mais elevadas (EDRIZZI; SAUER, 2002).

As quatro configurações típicas de motor elétrico e bomba mais utilizadas com os sistemas FV são: (i) motobomba submersível com motor CA; (ii) bomba submersível com motor de superfície; (iii) motobomba flutuante com bomba centrífuga e; (iv) motor CC com bomba centrífuga flutuante (LAMIGUEIRO, 2020).

O acoplamento entre o sistema FV e o motobomba pode ser feito de três formas distintas: (i) direto; (ii) por meio de baterias; (iii) por meio de equipamento condicionador de potência (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE, 2016).

O acoplamento direto do arranjo FV com o sistema de bombeamento de água foi introduzida pela primeira vez no final dos anos 1970, quando havia algumas limitações nos projetos anteriores em termos de desempenho geral (CHANDEL *et al.*, 2015; GAO *et al.*, 2018). Esse tipo é o de configuração mais simples, caracterizando-se ainda pelos baixos custos de aquisição e de manutenção. É utilizado principalmente com pequenos motores CC, com potências limitadas a $400 \text{ Watt pico (Wp)}$, acoplados a bombas de deslocamento positivo (MORALES, 2011). Nesse caso, a tensão de operação do motor deve ser a mesma da geração FV, ou seja, 12 ou 24 VCC.

No acoplamento por meio de baterias, o motor possui conexão a um banco de baterias que pode alimentá-lo de forma exclusiva ou de forma a complementar a energia insuficiente da fonte FV para uma operação com velocidade de rotação constante. Já no caso de acoplamento utilizando condicionador de potência, ou MPPT, descrito na seção anterior, estes dispositivos extraem a potência máxima do painel FV para cada condição atmosférica singular, transferindo-a ao motor.

19.4.2 Benefícios e limitações da energia FV em sistemas de irrigação

No planejamento de sistemas de irrigação FV, pode-se mencionar os seguintes benefícios:

- (i) A utilização de energia solar FV no sistema *off-grid* permite utilizar sistemas de irrigação especialmente em áreas que não têm acesso confiável à eletricidade ou não podem arcar com o custo do combustível diesel (GAO *et al.*, 2018). Assim, a energia solar FV pode auxiliar na expansão das áreas irrigadas;
- (ii) A energia solar FV no sistema *off-grid* proporciona uma facilidade para a implantação da automação dos sistemas de irrigação;
- (iii) A utilização da energia solar em sistemas de irrigação *on-grid* possibilita ao produtor ampliar seus rendimentos, tornando-se também um "produtor de energia". Nesse caso, o excesso de energia produzida pelo sistema FV seria injetado na rede, bem como toda a produção originada na entressafra;

A utilização da energia FV pode contribuir para a modernização dos sistemas de irrigação, viabilizando a substituição dos métodos de superfície pelos pressurizados (EYRE *et al.*, 2014).

Quanto às limitações tem-se:

- (i) Alto custo de aquisição, o que desestimula sua utilização quando a rede elétrica da concessionária está próxima da área irrigada;
- (ii) Perda de área de cultivo para sua implantação, o que pode ser crítico, ou mesmo inviável, em pequenas áreas rurais;
- (iii) De forma geral, os sistemas de irrigação FV requerem um maior capital inicial para sua implantação que seus similares a energia elétrica da concessionária ou a óleo diesel.

Do ponto de vista agrônomo e econômico, as bombas fotovoltaicas são melhor empregadas em cultivos intensivos de alto valor sob abordagens de irrigação que economizem água (SASS; HAHN, 2016).

Na operacionalização dos sistemas de irrigação, pode-se mencionar como benefícios:

- (i) Como a necessidade de água é maior em períodos quentes e secos, o que geralmente ocorre quando há grande disponibilidade de radiação solar, a produção FV coincide com a necessidade de água das plantas (LABOURET; VILLOZ, 2009). Assim, o período de maior demanda pelas culturas coincide também com o de maior capacidade de bombeamento FV;
- (ii) A energia solar FV proporciona maior confiabilidade de operação do sistema de irrigação, eliminando a preocupação do fornecimento estável e de qualidade da energia elétrica do sistema público;
- (iii) O custo operacional dos sistemas de irrigação FV é praticamente nulo, restrito basicamente a limpeza periódica dos painéis fotovoltaicos.

Já com relação à limitação:

- (i) Dada uma maior disponibilidade energética dos sistemas de irrigação FV, há o risco inerente de super utilização dos recursos hídricos utilizando esta tecnologia (SASS; HAHN, 2016).

19.4.3 Aplicabilidade dos sistemas fotovoltaicos em sistemas de irrigação

Para Cortez & Díaz (2010), os sistemas de irrigação FV são recomendados principalmente para pequenos produtores em regiões áridas e remotas cuja dificuldade de acesso à rede elétrica convencional tornam o seu investimento inicial muito elevado. Nesse sentido Hilarydoss (2021), os recomenda fortemente também para regiões com no máximo 300 a 400 mm de chuva por ano e distante no mínimo 2 km da rede elétrica da concessionária local, não especificando, entretanto, o tamanho da área irrigada.

O alto custo de aquisição dos sistemas FV de bombeamento para irrigação, apesar da grande redução nos valores comerciais dos módulos FV, e a falta de suporte financeiro (crédito) para os pequenos produtores se constituem nas principais dificuldades para a difusão deste tipo de sistema na agricultura irrigada (GAO *et al.*, 2018). Porém, não são os únicos problemas enfrentados na maioria dos países em desenvolvimento. Pode-se citar ainda o desconhecimento desta tecnologia que leva aos desafios relacionados à conscientização tecnológica e a falta de disponibilidade de mão de obra qualificada em áreas rurais, além das preocupações relacionadas à sua implantação sustentável (CHANDEL *et al.*, 2015; AGRAWAL; JAIN, 2019).

19.4.4 Parâmetros para o estudo da viabilidade econômica da irrigação FV

Para grandes áreas irrigadas nos EUA, como aquelas sob pivô central, a viabilidade da utilização de sistemas *off-grid* depende da taxa de utilização anual do sistema de irrigação, da possibilidade de utilização do excesso de energia FV gerada e dos subsídios governamentais. Uma estratégia empregada é utilizar dentro da própria fazenda, em outras atividades, o excesso de energia FV gerada ao invés de vendê-la para a concessionária de energia (VICK; ALMAS, 2011).

Na correta avaliação da viabilidade do uso de sistemas de bombeamento FV, em relação às formas alternativas de acionamento motriz com óleo diesel, deve-se considerar todo o ciclo de vida do equipamento FV (20 anos), e não apenas a do sistema a diesel, de menor vida útil.

Deve-se considerar ainda o valor da lâmina bruta diária utilizada, a altura manométrica do sistema e o número de ciclos anuais de produção. Quanto maior for a utilização do sistema de irrigação, maior será a viabilidade da adoção da energia FV em relação àquele com acionamento a óleo diesel, por exemplo (HAQUE, 2001).

Também deve-se considerar a possibilidade de utilização de reservatório de água para prolongar a duração da irrigação, bem como considerar a geração de energia do sistema FV fora da estação de cultivo para proporcionar renda adicional (POWELL; WELSH, 2019).

Avaliar se é econômico atender a época de maior demanda hídrica dos cultivos se os irrigantes não tiverem outros usos para essa energia na fazenda, ou se é melhor considerar uma irrigação deficitária (EYRE *et al.*, 2014).

O ponto máximo de aproveitamento da irradiação solar foi entre 5 e 6 horas por dia de funcionamento do sistema de irrigação, o mesmo ocorrendo com o custo total do sistema de irrigação fotovoltaico (ANDRADE, 2017).

Em trabalho realizado para o norte de Minas Gerais por Andrade (2017), para uma área de 4 ha de irrigação por aspersão convencional e bombeamento de poço tubular, comparando o uso de energia elétrica da rede da concessionária com o uso de um sistema FV *on-grid*, encontrou-se maior viabilidade no projeto fotovoltaico, com uma TIR de 11,18 %, VPL positivo de R\$ 4.613,20 e *payback* de 15 anos. Acredita-se que os índices de viabilidade econômica sejam mais favoráveis atualmente, uma vez que os custos das tarifas energéticas das

concessionárias sofreram grandes reajustes e o valor da instalação dos sistemas fotovoltaicos tiveram grande redução nos últimos anos.

De forma geral, tempos elevados de retorno de investimento (*payback*), por exemplo acima de oito anos, levam ao desinteresse dos empresários rurais à adoção da tecnologia FV. Na Austrália, por exemplo, um *payback* desejável seria de até quatro anos (WELSH, 2016).

19.5 Elementos para o dimensionamento de sistemas de irrigação FV

19.5.1 Considerações gerais

Para projetar um sistema de irrigação FV, o primeiro passo é a avaliação dos recursos hídricos disponíveis, sejam subterrâneos ou superficiais. As outras etapas relevantes incluem a determinação da demanda hídrica das culturas, o estudo dos dados de clima e de radiação solar, a estimativa ou cálculo da energia solar disponível, a determinação da taxa de aplicação do sistema de irrigação e a escolha dos módulos fotovoltaicos, do conjunto motobomba, e de outros dispositivos eletrônicos, hidráulicos e unidades auxiliares (GAO *et al.*, 2018). Dentre todos esses elementos, os mais importantes para o desempenho de um sistema FV de bombeamento são: (i) disponibilidade de radiação solar e variações da temperatura do ar no local de instalação; (ii) altura manométrica total; (iii) vazão; (iv) volume diário de água necessária (CHANDEL *et al.*, 2015).

De forma geral, os sistemas de distribuição de água pertinentes aos sistemas de irrigação FV tem sido projetados de forma tradicional, como se a fonte de energia fosse proveniente da rede elétrica pública. Isso pode ser observado no projeto de irrigação para estufas (RECA *et al.*, 2016), para pequenas áreas abertas (GUZMÁN *et al.*, 2018; OKASHA, 2016), e em outros locais irrigados dotados unicamente de emissores do tipo compensadores de pressão (EHRMANN; FICKERT; NOLZB, 2019; PANDE *et al.*, 2003). Em comum, observa-se nos mesmos um superdimensionamento das tubulações secundárias e terciárias de irrigação.

O dimensionamento dos sistemas de irrigação FV é extremamente afetado pelo caráter dinâmico da demanda hídrica e da energia solar coletável (CHANDEL *et al.*, 2015). Devido à natureza sazonal da radiação solar, normalmente é feito um superdimensionamento dos sistemas FV e/ou armazenamento de energia, quando não se utilizam simulações refinadas dos parâmetros hídrico-meteorológicos (CARROQUINO; LOPEZ; AGUSTÍN, 2015).

Entretanto, um superdimensionamento do sistema solar fotovoltaico, a fim de minimizar as consequências da variabilidade do bombeamento ou para atender a alguma necessidade casual do projeto, deve ser analisado com cautela. Eyre *et al.* (2014) por exemplo, mencionam que a infraestrutura solar em escala suficiente para atender à demanda de pico de irrigação não é economicamente viável para os irrigantes australianos que não têm outros usos para a energia na fazenda. Neste caso, pode-se considerar a utilização de um sistema híbrido solar-diesel para o atendimento de demandas evapotranspirométricas de pico, ao invés de dimensionar um sistema fotovoltaico para atender integralmente a todo ciclo de produção. Isso evita que o sistema fotovoltaico fique ocioso uma grande parte do tempo, reduzindo seus custos de implantação.

Sempre que possível, deve-se estudar alternativas para o bombeamento FV. Uma análise econômica preliminar com base nos custos de aquisição mostrou, por exemplo, que a solução mais econômica para uma situação específica foi obtida quando se adotou arranjo fotovoltaico fixo e motor CA, em relação ao arranjo com rastreamento e adoção de motor CC (CAMPANA; LI; YAN, 2013).

Historicamente, a forma de se contornar a variabilidade solar incidente é utilizando-se reservatórios de água (KENNA; GILLET, 1985). Outra forma seria a utilização de baterias

para armazenar energia elétrica e flexibilizar sua utilização. Em todo caso, o planejamento adequado, baseado em estudo de dados históricos diários de irradiância solar, auxilia a utilização adequada da energia solar fotovoltaica na irrigação (SANTANA *et al.*, 2021).

Especificamente para o dimensionamento elétrico e para a avaliação dos sistemas fotovoltaicos *on-grid* e *off-grid*, bem como para a especificação e o ensaio de alguns de seus elementos constituintes, a Associação Brasileira de Normas Técnicas possui nove publicações sobre o assunto. São elas: NBR 14.201/1998, NBR 14.202/1998, NBR 62.116/2012, NBR 16.149/2013, NBR 16.150/2013, NBR 16.274/2014, NBR 16.767/2019, NBR 16.690/2019 e NBR 16.612/2020. Pode-se perceber que as mesmas são relativamente recentes, tendo a maioria menos de 10 anos de existência. Isso reflete o avanço considerável da utilização desta tecnologia no Brasil.

19.5.2 Fatores que afetam a eficiência dos sistemas de geração de energia FV

Diversos fatores afetam o desempenho da geração de energia elétrica FV, dentre os quais se destacam aqueles que ocasionam perdas e, portanto, precisam ser considerados na elaboração do projeto de irrigação FV. Os principais tipos de perda são apresentados a seguir.

- (i) Perda decorrente do aumento de temperatura na célula FV: nos sistemas fotovoltaicos, a principal causa de perda está associada à temperatura do ar ambiente. Quanto maior for a temperatura, menor será a eficiência do módulo, e conseqüentemente menor será a potência produzida (PINHO; GALDINO, 2014);
- (ii) Perda devido a inclinação do módulo FV: a inclinação do módulo favorece a absorção ou a reflexão da radiação solar. A máxima absorção da radiação solar e, portanto, de geração de energia, ocorre quando o módulo encontra perpendicular à radiação solar incidente (PINHO; GALDINO, 2014);
- (iii) Perda devido ao tipo de célula FV utilizada: a eficiência da conversão da energia solar em elétrica depende das características construtivas do módulo FV, função da tecnologia e dos materiais utilizados (PINHO; GALDINO, 2014);
- (iv) Perda devido ao uso do inversor de frequência: a utilização de inversores CC/CA, necessários para a adoção de motores CA, implica em perdas internas neste dispositivo, as quais refletem sobre a eficiência global do sistema FV, reduzindo-a (MORALES, 2010). Estas perdas podem ser estimadas em 10% (PORTALENERGIA, 2010);
- (v) Perda devido a tensão de operação escolhida: Sempre haverá uma perda de energia nos condutores por efeito Joule, a qual será inversamente proporcional a tensão operacional escolhida. Assim, tensões mais elevadas devem ser preferidas para se ter melhores eficiências (MORALES, 2010). Tais perdas são limitadas de forma geral a 3% (PORTALENERGIA, 2010);
- (vi) Perda devido ao sombreamento: o sombreamento, mesmo que parcial dos módulos FV, leva a uma redução muitas vezes drástica da produção de energia. Em um experimento com sombreamento parcial na Argélia, por exemplo, observou-se uma redução de até 35% na eficiência de uma configuração de arranjo FV com dois painéis sombreados em cada linha; os resultados destas medições indicaram que vários painéis parcialmente sombreados resultaram em uma queda maior na eficiência do que uma única fileira completamente sombreada (MOHAMMEDI *et al.*, 2014);
- (vii) Perda devido ao tempo de uso do painel: quanto mais velhos forem os módulos, menor será sua eficiência. Um estudo realizado em painéis FV de silício monocristalino após 28 anos de exposição ao meio ambiente, por exemplo, indicou uma degradação da produção de energia fotovoltaica de cerca de 1,4% ao ano (CHANDEL *et al.*, 2015);

- (viii) Perda devido a sujeira acumulada sobre o painel: tem-se observado redução de até 30% na geração de energia devido ao acúmulo de poeira e outros materiais sobre a placa FV. Para evitar isso, um sistema de irrigação por microaspersão desenvolvido para essa finalidade tem sido utilizado para a limpeza automática dos painéis (SCHMIDT *et al.*, 2021);
- (ix) Perda devido ao uso de baterias: outra fonte de perdas é a bateria utilizada no sistema FV, uma vez que ela não restaura 100% da energia fornecida (LABOURET; VILLOZ, 2009). Nos bons projetos FV, estas perdas são limitadas a 10 % (PORTALENERGIA, 2010);
- (x) Perda devido a não operação do módulo FV na potência máxima (não utilização do MPPT): quando o regulador não é do tipo MPPT, surge uma perda por meio de incompatibilidade de tensão. Em um sistema com regulador clássico, a tensão é imposta pela bateria e, portanto, o módulo fotovoltaico não funciona em sua potência máxima (LABOURET; VILLOZ, 2009). Estas perdas podem ser estimadas em 10% (PORTALENERGIA, 2010).

19.5.3 Estimativa da área topográfica necessária para produção de energia FV para sistemas de irrigação

Os painéis fotovoltaicos são normalmente dimensionados especificando-se sua saída sob condições padrão de 100 mW por centímetro quadrado com a temperatura da célula em 25 °C. Esta saída é, no entanto, adversamente afetada pela temperatura, o qual reduz significativamente a potência nominal do painel (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE, 2016). O dimensionamento também depende da tecnologia utilizada na fabricação dos módulos fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014), bem como de um fator de segurança para evitar o sombreamento recíproco de painéis dispostos um atrás do outro em uma grande instalação (HABERLIN, 2012).

É extremamente importante, conhecer a disponibilidade de irradiação solar incidente na região de instalação do sistema FV. Caso não se tenha essas informações, uma forma de obtê-las é com a utilização do atlas de irradiação solar do Brasil (PEREIRA *et al.*, 2017), onde encontra-se a irradiação média anual para todo território nacional. Pode-se notar que as regiões brasileiras mais propícias ao aproveitamento da energia solar são o interior do Nordeste e o norte do Estado de Minas Gerais (Figura 3).

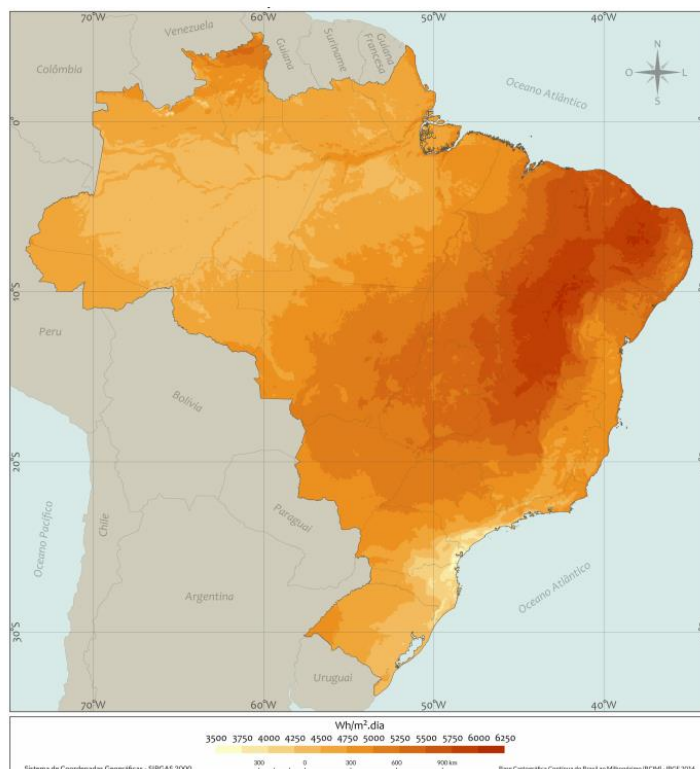


Figura 3. Atlas solarimétrico ilustrando o total diário da irradiação global horizontal, média anual para o território brasileiro em Wh/m²/dia. (PEREIRA *et al.*, 2017)

Para as condições médias brasileiras de irradiação solar, os sistemas de irrigação demandariam uma área para a instalação dos coletores solares que pode ser estimada pela equação 1.

$$A_{FV}F = 18,4 * P_{MB} \quad (1)$$

em que:

$A_{FV}F$: área necessária para instalação do sistema de geração FV, m²;

P_{MB} : potência da bomba de irrigação, CV.

Para sistemas de irrigação FV, os painéis solares são geralmente instalados ao nível do solo. Entretanto, eles podem ser ainda instalados sobre estruturas existentes, como estufas, sem a necessidade adicional de área (GAO *et al.*, 2018), ou mesmo em estruturas flutuadoras em represas ou açudes.

19.6 Legislação brasileira para sistemas fotovoltaicos

Algumas leis e diversas resoluções normativas tem marcado a história da legislação brasileira que norteia a utilização da energia solar em nosso país. Dentre estas, destaca-se a Lei 9.427, de 26 de dezembro de 1996, que estabeleceu as bases legais iniciais para a utilização das fontes de energia alternativa, como a solar fotovoltaica, juntamente com a criação da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

As resoluções normativas da ANEEL 77/2004, 482/2012, 493/2012, 687/2015 e 800/2017 fazem parte dos principais marcos regulatórios que norteiam a utilização da energia solar fotovoltaica no Brasil. Entre os seus atos, pode-se mencionar: estabelecimento das regras para a conexão dos sistemas fotovoltaicos à rede elétrica pública e definição dos valores dos descontos nas tarifas de transmissão e de distribuição da energia elétrica gerada a partir da fonte solar.

As resoluções normativas da ANEEL são complementadas ainda com as Leis 13.169/2015, 13.203/2015 e 14.120/2021. Tais leis alteram a legislação possibilitando, entre outros, um aumento da potência injetada e atualização dos descontos nas tarifas de transmissão e de distribuição, bem como prazos de validade para sua aplicação. Definem ainda a forma de cobrança de ICMS para a energia solar.

Atualmente, vigora a Lei 14.300, de 6 de janeiro de 2022, que modificou parte da legislação anterior referente à energia solar fotovoltaica. Um de seus principais atos instituídos é a cobrança pela utilização da rede elétrica da concessionária no qual o sistema fotovoltaico está conectado. Tal valor é variável, pois depende dos custos tarifários específicos de cada concessionária. Entretanto, esta cobrança impactará negativamente na viabilidade econômica de futuras instalações fotovoltaicas, destinadas ou não à agricultura irrigada.

19.7 Considerações finais

A implantação dos sistemas de irrigação fotovoltaicos geralmente requer um maior aporte de recursos financeiros que seus similares à energia elétrica da concessionária ou por motores de combustão interna. Isso implica em um grande desafio presente e futuro: facilitar o acesso ao seu financiamento, principalmente para o pequeno irrigante.

Deve-se lembrar que, quanto maior for a utilização dos sistemas fotovoltaicos na irrigação, menor será a pressão exercida pela agricultura irrigada sobre o Sistema Elétrico Nacional, desafogando-o para atender a outras áreas socioeconômicas de nosso país, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos, cada vez mais críticos, como observados nos dias atuais. Além disso, se devidamente estimulado por políticas público-econômicas governamentais, os sistemas de irrigação fotovoltaicos podem até mesmo vir a contribuir de forma significativa para uma maior disponibilidade de energia elétrica no Brasil, recurso este indispensável ao desenvolvimento nacional.

Referências

- AGRAWAL, S.; JAIN, A. Sustainable deployment of solar irrigation pumps: key determinants and strategies. **WIRES Energy and Environment**, v.8, n.2, 2019.
- ALIYU, M.; HASSAN, G.; SAID, S.A.; SIDDIQUI, M.U.; ALAWAMI, A.T.; ELAMIN, I.M. A review of solar powered water pumping systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.87, p. 61-76, 2018.
- ANDRADE, A.F. **Análise da análise da viabilidade econômica da implantação de projetos de irrigação por aspersão convencional com energia fotovoltaica**. Montes Claros, MG: ICA/UFMG, 59p., 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 14 fev. 2022.
- BOLTON, J.R. **Solar cells** - A technology assessment. Photochemistry Unit, Department of Chemistry, The University of Western Ontario, London, Ontario, 1982.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Boletim da Agricultura Irrigada**, v.1, 7p., 2019. Disponível em:

<https://www.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSDRU/ArquivosPDF/Boletim_Agricultura-Irigada_Primeira-Edio_-Setembro-de-2019.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2020.

CAMPANA, P.E.; LI, H.; YAN, J. Dynamic modelling of a PV pumping system with special consideration on water demand. **Applied Energy**, v.112, p. 635–645, 2013.

CARROQUINO, J.; LOPEZ, R.D.; AGUSTÍN, J.L.B. Sizing of off-grid renewable energy systems for drip irrigation in Mediterranean crops. **Renewable Energy**, v.76, p. 566-574, 2015.

CHANDEL, S.S.; NAIK, M.N.; SHARMA, V.; CHANDEL, R. Degradation analysis of 28 year field exposed mono-c-Si photovoltaic modules of a direct coupled solar water pumping system in western Himalayan region of India. **Renewable Energy**, v.78, p. 193-202, 2015.

CORTEZ, A.S.; DÍAZ, C.B. **Manual de pequeñas obras de riego en la agricultura familiar campesina**: características técnicas de las principales obras de riego bonificadas por INDAP. 2 ed. Santiago: INDAP, 225p., 2010.

DECONTO, J.G. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo: Posigraf, 82p., 2008.

EDRIZZI, M.C.; SAUER, I.L. Bombeamento solar fotovoltaico: histórico, características e projetos. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em:

<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100034&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 18 mai. 2021.

EHRMANN, S.; FICKERT, L. NOLZB, R. Optimizing the setup of a photovoltaic pumping system for irrigation considering different crop water requirements. **Journal of Photonics for Energy**, v.9, n 4, 2019.

EYRE, D.; ALEXANDRA, J.; RICHARDS, R.; SWANN, E. **The water & energy nexus**: a multi-factor productivity challenge. Queensland: NSW Farmers Association, 30p., 2014.

GAO, Z.; ZHANG, Y.; GAO, L.; LI, R. Progress on solar photovoltaic pumping irrigation technology. **Irrigation and Drainage**, v. 67, p. 89–96, 2018.

GORJIAN, S; SINGH, R.; SHUKLA, A.; MAZHAR, A.R. On-farm applications of solar PV systems. In: GORJIAN, S.; SHUKLA, A. (Ed.). **Photovoltaic Solar Energy Conversion**: Technologies, Applications and Environmental Impacts. New York: Academic Press, p. 147-190, 2000.

GREENPRO. **Energia fotovoltaica**: manual sobre tecnologias, projetos e instalação. Lisboa, 2004, v.2. Disponível em: <<http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2017.

GUZMÁN, A.B. *et al.* A Cost-Effective Methodology for Sizing Solar PV Systems for Existing Irrigation Facilities in Chile. **Energies**, v.11, 1853, 2018.

HABERLIN, H. **Photovoltaics**: system design and practice. London: John Wiley & Sons, 701p., 2012.

HADJ, A.; ARAB, F.; CHENLO, K.; MUKADAM, K.; BALENZATEGUI, J.L. Performance of PV water pumping systems. **Renewable Energy**, v.18, n.2, p.191-204, 1999.

HALM, A. Resource-conserving Irrigation with Photovoltaic Pumping Systems. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, 16., 2000, Glasgow. **Proceedings...** Glasgow, 2000.

HAQUE, M.M. Photovoltaic water pumping system for irrigation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL ENGINEERING, 4., 2001, Dhaka/Bangladesh. **Proceedings...** Dhaka: International Association of Engineers, p. 21-26, 2001.

HILARYDOSS, S. Suitability, sizing, economics, environmental impacts and limitations of solar photovoltaic water pumping system for groundwater irrigation - a brief review. **Environmental Science and Pollution Research**, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Evolution of solar PV module cost by data source, 1970-2020**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/evolution-of-solar-pv-module-cost-by-data-source-1970-2020>>. Acesso em: 04 jun. 2021.

- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Solar Energy**. Disponível em: <<https://www.irena.org/solar>>. Acesso em: 4 jul. 2020.
- KAVLAK, G.; McNERNEY, J.; TRANCIK, J.E. Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. **Energy Policy**, v.123, p.700-710, 2018.
- KENNA, J.; GILLET, B. **Solar water pumping: a handbook**. London: Russel, 123p., 1985.
- KHATIB, T.; MUHSEN, D.H. **Photovoltaic water pumping systems: concept, design, and methods of optimization**. London: Elsevier, 293p., 2021.
- LABOURET, A.; VILLOZ, M. **Solar photovoltaic energy**. 4ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 372p., 2009. (IET Renewable Energy Series, 9).
- LAMIGUEIRO, O.P. **Energía solar fotovoltaica**. Madrid: Lamigueiro, 180p., 2020.
- MANZANARES, J.L.B. **Tecnología de Células Solares de Silício Cristalino**. 50p., 2008. Dissertação (Master em Energía Renovables y Mercado Energético). DER - CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientas & Tecnológicas), 2008
- MELO FILHO, J.B. **Análise do sistema de irrigação na região semi-árida do nordeste, utilizando o bombeamento de água acionado por geradores fotovoltaicos com concentradores tipo V**, 167p., 2006. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.
- MESSINGER, R.; ABTAHI, H.A. **Photovoltaic Systems Engineering**. 4ed. Boca Raton: CRC, 504p., 2017.
- MOHAMMEDI, A.; MEZZAI, N.; REKIOUA, D.; REKIOUA, T. Impact of shadow on the performances of a domestic photovoltaic pumping system incorporating an MPPT control: a case study in Bejaia, North Algeria. **Energy Conversion and Management**, v.84, p. 20-29, 2014.
- MORALES, L.R.V. **Utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais**.170p., 2011. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, 2011.
- NARVARTE, L.; ALMEIDA, R.H.; CARRELO, I.B.; RODRIGUEZ, L.; CARRASCO, L.M., MORENO, F.M. On the number of PV modules in series for large-power irrigation systems. **Energy Conversion and Management**, v.186, p.516-525, 2019.
- OI, A. **Design and simulation of photovoltaic water pumping system**, 103 f., 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), San Luis Obispo: Faculty of California Polytechnic State University, 2005.
- OKASHA, A.M. Performance of a small drip irrigation system powered by solar photovoltaic for corn production. **Irrigation and Drainage**, v.33, n.4, p.1369-1386, 2016.
- PANDE, P.C.; SINGH, A.K.; VYAS, S.K.; DAVE, B.K. Design development and testing of a solar PV pump-based drip system for orchards. **Renewable Energy**, v.28, n.3, p.385-396, 2003.
- PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; GONÇALVES, A.R.; COSTA, R.S.; LIMA, F.L.; RÜTHER, R.; ABREU, S.L.; TIEPOLO, G.M.; PEREIRA, S.V.; SOUZA, J.G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 80p., 2017.
- PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESEB, 2014.
- PORTALENERGIA. **Energia fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. Guarda/Portugal: Portal Energia, 2010. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/>>. Acesso em: 02 dez. 2020.
- PORTALSOLAR. **Estudo mostra que painéis solares de dupla face são mais eficientes**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-renovavel/estudo-mostra-que-paineis-solares-de-dupla-face-sao-mais-eficientes.html/amp>>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- POWELL, J.W.; WELSH, J.M. **Integrating alternative energy: a farm case study at Emerald, QL**. Sidney: CottonInfo/AgEcon, 30p., 2019.

- RECA, J.; TORRENTE, C.; LUQUE, R.L.; MARTINEZ, J. Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses. **Renewable Energy**, v.85, p. 1143-1154, 2016.
- RITCHIE, H. **The price of batteries has declined by 97% in the last three decade**. Our World in Data, 2021. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/battery-price-decline#licence>>. Acesso em: 04 jun. 2021.
- RIZI, A.P.; ASHRAFZADEH, A.; RAMEZANI, A. A financial comparative study of solar and regular irrigation pumps: Case studies in eastern and southern Iran. **Renewable Energy**, v.138, p.1096-1103, 2019.
- ROSER, M. **Why did renewables become so cheap so fast?** Our World in Data, 2020. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>>. Acesso em: 04 jun. 2021.
- SANTANA, V.R.S.; OLIVEIRA, F.G.; MORAES, M.J.; REIS, J.B.R.S. Uso da energia solar fotovoltaica na agricultura irrigada. **Informe Agropecuário**, v.42, n.313, p. 79-90, 2021.
- SASS, J.; HAHN, A. **Solar powered irrigation systems (SPIS): technology, economy, impacts**. Eschborn: Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 184p., 2016.
- SCHMIDT, M.V.V.; BARTH, C. TESSLER, M.H.; OLIVEIRA, F.G.; REIS, J.B.R.; ARAUJO, M.S.P. Avanços tecnológicos dos equipamentos e emissores de irrigação. **Informe Agropecuário**, v.42, n.313, p.56-68, 2021.
- SENTELHAS, P.C. Variabilidade e mudanças climáticas no contexto agricultura irrigada. In: PAOLINELLI, A.; DOURADO NETO, D.; MANTOVANI, E.C. (Ed.) **Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: técnica e cultura**. Piracicaba: ESALQ, p.195-213, 2021.
- TIMANÁ, W.R.P. **Generación de energía fotovoltaica y su utilización en sistema de bombeo para riego tecnificado, aplicando la guía PMBOK.**, 119 p., 2019, Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Nacional de Piura, Peru.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA)-NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (NRCS). **Irrigation pumping plants**. Washington: USDA, 206p., 2016. (National Engineering Handbook, part 623 - Irrigation, chapter 8).
- VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. 1ed. Viçosa: UFV, 449p., 1991.
- VICK, B.D.; ALMAS, L.K. Developing Wind and/or Solar Powered Crop Irrigation Systems for the Great Plains. **Applied engineering in agriculture**, v.27, n.2, p.235-245, 2011.
- VICK, B.D.; CLARK, R.N. Determining the optimum solar water pumping system for domestic use, livestock watering or irrigation. In: ASES NATIONAL SOLAR CONFERENCE, 2009, Buffalo. **Proceedings ...** Buffalo: American Solar Energy Society, 2009.
- VILLALVA, M.G.; GAZOLI, J.F. **Energia solar conceitos e aplicações**. 1.ed. São Paulo: Érica/Saraiva, 2012.
- WELSH, J. **Solar pumping: economic and environmental rewards**. Sidney: CottonInfo, 2p., 2016
- ZIEGLER, M.S.; TRANCIK, J.E. Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline. **Energy & Environmental Science**, v.14, p.1635-1651, 2021.

CAPÍTULO 20

20 QUALIDADE DA ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

Gustavo Haddad Souza Vieira, José Geraldo Ferreira da Silva

Resumo

Na irrigação localizada, vários fatores podem comprometer o seu desempenho. O entupimento de emissores pode resultar de causas físicas, biológicas ou químicas. Os tratamentos da água podem ser preventivos ou de recuperação. Em síntese, consistem em filtragem, cloração para combater as bactérias, sedimentação para remoção do excesso de ferro e na acidificação para evitar precipitação química e reduzir o pH da solução, visando maior eficiência da cloração. Os filtros são indispensáveis para o tratamento da água de irrigação, no entanto, não conseguem reter grande parte das partículas e microrganismos presentes, sendo necessário o uso de outras práticas. O biocida mais econômico e amplamente utilizado é o cloro, na forma de hipoclorito de sódio (cloro líquido). Para remover parte dos constituintes da água de irrigação que possam promover obstruções nos equipamentos de irrigação, devido à precipitação química ou associados ao crescimento bacteriano, recomenda-se a sedimentação precedida da aeração. A aeração da água pode ser feita através de saltos na condução da água ou em bandejas sobrepostas, sistemas mecânicos em tanques abertos, ou injetando ar na água para induzir à oxidação e precipitação do ferro. A sedimentação pode ser realizada por tanques apropriados para sedimentação. Com esse procedimento, além de reduzir os problemas com obstrução de emissores, aumenta-se a eficiência dos filtros e aumentam-se os intervalos entre suas limpezas. O conjunto de tecnologias deve ser empregado para o correto manejo e manutenção dos sistemas de irrigação, com vistas a garantir seu pleno funcionamento, para aplicação eficiente e distribuição uniforme da água.

20.1 Introdução

Um dos aspectos mais importantes a serem observados no manejo da irrigação é a uniformidade de distribuição de água pelo sistema. Na irrigação localizada, vários fatores podem comprometer o seu desempenho, tais como a desuniformidade dos emissores devido a processos de fabricação, o dimensionamento inadequado do sistema, bem como o entupimento dos emissores, causado pelas partículas minerais ou orgânicas presentes na água (VIEIRA *et al.*, 2004). No sistema por gotejamento, a qualidade da água deve ser observada com atenção, pois ela escoar por orifícios de pequeno diâmetro (JORDAN, *et al.*, 2022), podendo causar obstrução devido à deposição dos materiais que carrega em suspensão ou mesmo microrganismos presentes (ZHANG *et al.*, 2021).

O melhor e mais econômico é prevenir a obstrução (HUANG *et al.*, 2022), mediante projeto de sistema de filtragem compatível com a qualidade da água (DURAN-ROS *et al.*, 2022), além de outras práticas, como a aeração e sedimentação (ZHANG *et al.*, 2021), tratamento químico preventivo (HAO *et al.*, 2018) e até mesmo a abertura do final das linhas laterais para remoção de sólidos depositados no interior das tubulações (LI *et al.*, 2019).

A uniformidade de distribuição de um sistema de irrigação influencia diretamente no manejo e na eficiência, podendo afetar o desempenho da lavoura e os custos de produção, comprometendo, desta forma, a sustentabilidade econômica e ambiental do projeto, uma vez que a desuniformidade da irrigação pode provocar *déficit* de água em algumas plantas e excesso em outras. Isto compromete todo o sistema de manejo da irrigação (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009).

20.2 Caracterização do problema

O entupimento de emissores pode resultar de causas físicas (areia, silte e argila) (RAMACHANDRULA; KASA, 2020), biológicas (bactérias e algas) (YAO *et al.*, 2021) ou químicas (deposição mineral) (SHI *et al.*, 2022). Segundo Ravina *et al.* (1992), a determinação da causa exata do entupimento de emissores pode ser complexa, visto que vários agentes na água podem interagir entre si, agravando o problema.

As obstruções por microrganismos são resultado de um fenômeno complexo: alimentando-se dos resíduos orgânicos que podem ser levados ao interior das tubulações pela água, se desenvolvem certas bactérias cujos filamentos podem aderir às paredes internas dos tubos e emissores (BAEZA; CONTRERAS, 2020). Além disso, as bactérias podem oxidar o ferro (MOSEER *et al.*, 2021), provocando precipitados retidos pelos filamentos, constituindo uma mucilagem que obstrui os estreitos condutos dos emissores.

Algumas bactérias oxidam o Fe^{++} solúvel transformando-o em Fe^{+++} que precipita (CHEN *et al.*, 2019a). Este precipitado é arrastado pelas águas de irrigação e contribui para formar uma massa gelatinosa que obstrui a passagem da água. Outras bactérias não filamentosas, podem, também, precipitar o ferro, transformando-o em uma massa gelatinosa, que por si só, pode obstruir os emissores e, ainda, atuar como agente cimentante de pequenas partículas minerais (GONG *et al.*, 2019).

As águas de irrigação começam a ser problemáticas quando a concentração de ferro total atinge valores a partir de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ (LIU; ZHANG; HE, 2022). O pH da água, a temperatura e a presença de carbono orgânico são fatores que influenciam a proliferação de bactérias responsáveis pelas obstruções dos emissores (MALIVA, 2020; SONG *et al.*, 2020; VAN BEEK *et al.*, 2020).

Os precipitados químicos podem ser produzidos ao se modificar as condições iniciais da água tais como o pH, temperatura, presença de íons incompatíveis e devido à evaporação da água nos emissores após cada irrigação, aumentando a concentração dos sais ao ponto de ultrapassar o limite da sua solubilidade. As obstruções químicas mais frequentes são de originados de precipitados de carbonatos de cálcio (RIZK *et al.*, 2019) ou sulfato de cálcio (CHEN *et al.*, 2019b). O risco de obstruções não depende somente das concentrações destes componentes, mas também do regime hidráulico, das dimensões e da forma dos emissores.

A Tabela 1 apresenta uma classificação para as águas, segundo seu grau de restrição ao uso em irrigação localizada.

TABELA 1. Influência da qualidade da água no surgimento de problemas de obstrução nos sistemas de irrigação localizada (MANTOVANI; BERNARDO e PALARETTI, 2009).

Fator de entupimento	Risco de entupimento		
	Baixo	Moderado	Severo
Físicos			
Sólidos em Suspensão (mg L ⁻¹)	< 50	50 - 100	> 100
Químicos			
PH	< 7,0	7,0 - 8,0	> 8,0
Sólidos Solúveis ¹ (mg L ⁻¹)	< 500	500 - 2.000	> 2.000
Manganês ¹ (mg L ⁻¹)	< 0,1	0,1 - 1,0	> 1,5
Ferro ¹ (mg L ⁻¹)	< 0,2	0,2 - 1,5	> 1,5
Sulfetos ¹ (mg L ⁻¹)	< 0,2	0,2 - 2,0	> 2,0
Biológicos (nº bactérias/L)			
Populações Bacterianas	< 10.000	10.000 - 50.000	> 50.000

Concentração máxima medida com um número representativo de amostras de água, usando-se procedimentos padrão para análise.

20.3 Tratamento da água de irrigação

Os tratamentos da água podem ser preventivos ou de recuperação. Em síntese, consistem em cloração para combater as bactérias, sedimentação para remoção do excesso de ferro e na acidificação para evitar precipitação química e reduzir o pH da solução, visando maior eficiência da cloração. Em qualquer destes tratamentos se deve tomar muito cuidado com o uso destas águas, principalmente para manuseio e consumo humano e animal.

Os problemas de origem biológica da água podem ser resolvidos com o tratamento químico usando o cloro, um dos elementos mais eficientes para controlar o desenvolvimento de microrganismos, porém requer manejo muito cuidadoso, principalmente devido ao seu potencial efeito tóxico para as culturas.

O cloro mata os microrganismos e oxida a matéria orgânica. A injeção contínua de cloro na água dos sistemas de irrigação localizada, mesmo que seja muito eficiente, pode ser antieconômica. A eficiência do tratamento está diretamente relacionada com o pH da água, requerendo para valores altos de pH, maiores quantidades de cloro. Na Tabela 2 tem-se típicos exemplos de doses de cloro utilizadas na irrigação localizada para inibir o desenvolvimento microbiano.

Tabela 2. Teores de cloro recomendados para controlar o desenvolvimento microbiano (Adaptado de KELLER e BLIESNER, 1990).

Problema	Doses de Cloro
Algas	0,5 - 1,0 mg L ⁻¹ em forma contínua ou 20 mg L ⁻¹ por 20 minutos
Ácido Sulfídrico	3,6 – 8,4 vezes o conteúdo de ácido sulfídrico (mg L ⁻¹)
Ferro-bactérias	1,0 mg L ⁻¹ para cada mg L ⁻¹ de ferro presente, mas varia com a população bacteriana
Precipitados de ferro	Usar 0,64 vezes o conteúdo de Fe ²⁺ para manter 1 mg L ⁻¹ de cloro livre residual no final das linhas laterais
Mucilagem (Lodo)	Manter 1 mg L ⁻¹ de cloro livre residual no final das linhas laterais

20.3.1 Filtragem

Os filtros são indispensáveis para o tratamento da água de irrigação, no entanto, não são capazes de reter grande parte das partículas e microrganismos presentes na água de irrigação. Os mais finos filtros de areia, discos ou tela podem ser atravessados por bactérias, que desta forma se acumulam no interior das tubulações, onde se desenvolvem, causando a obstrução dos emissores.

O dimensionamento dos filtros deve ser feito a partir de catálogos dos fabricantes, considerando-se a qualidade da água e a vazão que suportam. Há que se considerar, ainda, que no projeto do sistema deverá ser adicionado um valor de perda de carga promovida pelos filtros, que varia de 20 kPa (filtro limpo) a 60 kPa (filtro no momento de limpeza).

Os precipitados, principalmente de ferro, são muito instáveis e, por esta razão, dificilmente são retidos pelos filtros, exceto se a velocidade através destes seja bastante reduzida. Esta redução deve permitir que a velocidade de passagem da água no filtro seja, pelo menos, da ordem de 50% da velocidade normal. Desta forma, isto implica em duplicar o sistema de filtragem, encarecendo o projeto de irrigação.

Dessa forma, recomenda-se a utilização de filtros padronizados, com especificação da malha de filtragem (em mesh), que deverá ser definida baseando-se na abertura do emissor (Tabela 3). Pizarro Cabello (1996) recomenda que se use o critério de 1/7 da abertura do emissor, ou seja, que o tamanho do orifício da malha de filtragem seja sete vezes menor do que o diâmetro de abertura do emissor.

Tabela 3. Telas de aço recomendadas de acordo com o critério 1/7 (Adaptado de PIZARRO CABELLO, 1996).

Diâmetro do gotejador (mm)	Tela (mesh)
1,50	65
1,25	80
1,00	115
0,90	115
0,80	150
0,70	170
0,60	200
0,50	250

20.3.2 Cloração

O biocida mais econômico e amplamente utilizado é o cloro, na forma de hipoclorito de sódio (cloro líquido). Podem ser utilizadas outras formas de cloro, mas, além de serem mais caras, podem causar problemas de precipitação química, ao reagirem com sais existentes na água de irrigação, como o hipoclorito de cálcio (cloro sólido). A forma gasosa do cloro (Cl_2) é outra forma existente, mas necessita de equipamento específico para injeção no sistema de irrigação, além de promover maiores riscos de intoxicação aos operadores e corrosão do equipamento (DERY; BRASSIL; ROCK, 2020).

A forma ativa do cloro que promove ação biocida e oxidante na solução é o ácido hipocloroso (HOCl). Maiores concentrações deste composto se encontram na faixa de pH entre 4,0 a 6,5. À medida que o pH da solução aumenta, o HOCl se dissocia em hidroxilas (OH^-) e em íon hipoclorito (OCl^-), íons esses que não possuem ação contra os agentes de entupimento dos emissores. Em valores de pH abaixo de 4,0 há formação de cloro gasoso (Cl_2), sendo potencialmente tóxico aos operadores.

Segundo Clark e Smajstrla (1999) a quantidade de HOCl presente na solução depende do pH. Em pH igual a 8,0, somente cerca 22% do cloro injetado estará na forma ativa HOCl; em pH igual a 7,0 cerca de 73%; e em pH igual a 6,0 cerca de 96%. Assim, recomenda-se a manutenção do pH da solução abaixo de 6,0, para promover maior concentração do cloro ativo. A utilização do cloro deve ser preventiva. Uma vez formado os compostos pelas bactérias e os precipitados de ferro e enxofre a sua ação torna-se pouco eficaz.

O tratamento preventivo com cloro deve manter sempre o seguinte objetivo: no emissor mais afastado, durante pelo menos 30 minutos, a água deve sair com uma concentração de cloro livre entre 0,5 a 1,0 mg L^{-1} . Se o tempo for inferior, não se pode assegurar o efeito bactericida do cloro. Se a concentração do cloro livre for menor, pode ocorrer o oposto, já que pequenas quantidades de cloro podem estimular o rápido desenvolvimento dos microrganismos. Para garantir a concentração de cloro no final da linha deve-se medir a sua concentração, porém deve se ter em mente que é o cloro livre e não o cloro total.

Para se obter as concentrações citadas, deve-se ter no ponto de aplicação uma concentração entre 3 a 10 mg L^{-1} de cloro total, dependendo das condições da água. Quando o pH da água for maior que 7,5, a concentração final de cloro livre deverá ser entre 2 e 3 mg L^{-1} . É bom lembrar que cloro em excesso pode ser prejudicial às plantas e pode, ainda, danificar o diafragma dos gotejadores autocompensantes (GREEN *et al.*, 2018). Segundo Ayers e

Westcot (1999), valores de até 100 mg L⁻¹ de cloro na água de irrigação não causa danos a culturas sensíveis.

A injeção do cloro deve ser feita antes dos filtros, para se evitar crescimento bacteriano na areia. Deve-se fazer uma limpeza dos filtros antes da aplicação do cloro, para diminuir a necessidade de cloro.

A recuperação de emissores obstruídos por microrganismos é muito difícil. Se os gotejadores são desmontáveis, eles podem ser limpos manualmente, porém o custo desta operação pode sair mais caro que o próprio equipamento de irrigação. Tem-se aplicado superdosagens de cloro, variando entre 100 e 1.000 mg L⁻¹. Porém, estas concentrações podem prejudicar as plantas e o equipamento de irrigação. Caso os gotejadores estejam parcialmente obstruídos, ou seja, a solução aplicada alcance o interior dos emissores, especialmente os do tipo labirinto, pode-se aplicar uma dosagem contínua de 250 a 500 mg L⁻¹ por um período de 12 horas, seguida de uma aplicação de água sob pressão (PIZARRO CABELLO, 1996).

Segundo Cordeiro *et al.* (2003) outro tratamento que tem apresentado bons resultados na recuperação da vazão nominal do gotejador é a aplicação, por uma hora, de 100 a 150 mg L⁻¹ de cloro livre associado a ácido, mantendo-se o pH da solução entre 5 e 6. Segundo os autores, normalmente são necessárias em torno de três a cinco aplicações e, que se deve aumentar de 10 a 20% a concentração de cloro livre desejada, porque parte do cloro reage com as substâncias contidas na água de irrigação.

O volume de hipoclorito a ser injetado no sistema de irrigação a cada hora pode ser obtido pela Equação 1 (CORDEIRO *et al.*, 2003).

$$V = \frac{Cd Q}{12 Cc} \quad (1)$$

em que, V = volume de hipoclorito a ser aplicado a cada hora, em L h⁻¹; Cd = concentração desejada de cloro na água, em mg L⁻¹; Q = vazão do sistema de irrigação, em m³ h⁻¹; e Cc = concentração de cloro livre no produto comercial, em %.

Caso haja presença de magnésio na água, deve-se tomar o cuidado com a aplicação do hipoclorito, visto que as reações são muito mais lentas que a do ferro e os precipitados podem se formar após o sistema de filtragem.

Como alternativa ao cloro, têm surgido no mercado produtos à base de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e ácidos variados (clorídrico, fórmico, acético etc.). Diversos trabalhos têm mostrado a eficiência destes produtos na prevenção ao entupimento de causa biológica (BORDOVSKY; MUSTIAN, 2009; GREEN *et al.*, 2018; VAN RUIJVEN *et al.*, 2021). No entanto, Thomas *et al.* (2018) alertam para possíveis efeitos adversos do peróxido às culturas nas fases iniciais de desenvolvimento. Além disso, recomenda-se fazer uma comparação do custo e facilidade de aquisição destes produtos com o tratamento à base de cloro.

Exemplo de cálculo de cloro e ácido para injeção no sistema:

Calcular as quantidades necessária de hipoclorito de sódio e ácido acético necessários para tratar um setor de irrigação por gotejamento na cultura do café, com área de 0,5 ha (5.000 m²). Dose de hipoclorito na solução: 150 mg L⁻¹. Espaçamento dos gotejadores: 3 x 0,3 m. Vazão do gotejador: 2,3 L h⁻¹. Tempo de aplicação previsto: ½ hora.

Roteiro de procedimentos:

- (i) determinar a vazão do setor (L h⁻¹) e o volume de água a ser tratada (L);
- (ii) calcular a quantidade de hipoclorito de sódio necessária para ½ hora de injeção (tanque 1);

- (iii) calcular a quantidade de ácido (tanque 2);
- (iv) determinar a taxa de injeção ($L h^{-1}$);
- (v) determinar os volumes de calda (L);
- (vi) aplicar os produtos.

1 - Vazão do setor e volume de água:

Área de cada gotejador: $3 \times 0,3 \text{ m} = 0,9 \text{ m}^2$

Número de gotejadores no setor: $N_g = \frac{5.000}{0,9} = 5.555$ gotejadores

Vazão do setor: $Q_{\text{setor}} = 5.555 \times 2,3 = 12.778 \text{ L h}^{-1}$

Volume de água a ser tratada em $\frac{1}{2}$ hora: $\text{Volume} = 12.778 \times 0,5 = 6.388 \text{ L}$

Quantidade de hipoclorito de sódio (Densidade do hipoclorito: $1,2 \text{ g mL}^{-1}$)

Dose: 150 mg L^{-1}

Concentração de NaClO: 3,15% (Água sanitária)

$$\frac{150}{0,0315} = 4.761 \text{ mg L}^{-1} = 4,76 \text{ g L}^{-1}$$

$$1 \text{ mL} \text{ ---> } 1,2 \text{ g}$$

$$x < \text{---} 4,76 \text{ g} \quad x = 3,97 \text{ mL L}^{-1}$$

$$1 \text{ L} \text{ ---> } 3,79 \text{ mL}$$

$$6.388 \text{ L} \text{ ---> } x \quad x = 25.360 \text{ mL}$$

$$\text{Volume de hipoclorito} = 25,36 \text{ L}$$

Quantidade de ácido

Recomenda-se a dose geral entre 0,15 a 0,2 mL de ácido por litro de água a ser tratada. Resultado obtido em testes realizados com água do Rio Santa Maria do Doce (pH de 6,8), fazendo-se a titulação para se determinar a dose de ácido para abaixar o pH da solução, contendo 150 mg L^{-1} de hipoclorito de sódio, até 5,5. Se a água de irrigação apresentar características muito diferentes deste exemplo, recomenda-se fazer a titulação em laboratório.

$$0,2 \text{ mL/1L} = 200 \text{ mL/1.000L}$$

$$1.000\text{L} \text{ ---> } 200 \text{ mL}$$

$$6.388\text{L} \text{ ---> } x \quad x = 1.277,6 \text{ mL}$$

$$\text{Volume de ácido} = 1,28 \text{ L}$$

Cálculo da calda:

Taxa de injeção: 100L h⁻¹ (valor varia de acordo com o injetor utilizado)

$$\begin{array}{l} 1 \text{ h} \text{ --- } > 100 \text{ L} \\ 0,5 \text{ h} \text{ --- } > x \quad \quad x = 50 \text{ L de calda} \end{array}$$

Esse valor é o volume total de calda, para cada tambor, para o tempo de aplicação de ½ hora, devendo-se fazer a diluição do hipoclorito em um tambor e do ácido em outro. Caso haja dois injetores (um para o ácido e outro para o cloro), deve ser medida a taxa de injeção de cada injetor e o cálculo feito separadamente.

20.4 Aeração e sedimentação

Para remover parte dos constituintes da água que possam promover obstruções nos equipamentos de irrigação, devido à precipitação química ou associados ao crescimento bacteriano, recomenda-se a sedimentação precedida da aeração. Essa é uma solução relativamente simples e econômica, que deve ser pensada antes da fase de projeto do sistema de irrigação.

Um primeiro procedimento consiste em aerar a água que, apesar de não eliminar totalmente o ferro, pode ser uma solução eficiente. É bom lembrar a necessidade de um tempo de repouso da água, antes dela ser recalçada para o sistema propriamente dito. A aeração e decantação da água deverá ocorrer antes do sistema de filtragem.

A aeração da água pode ser feita por saltos (Figura 1A) na condução da água ou em bandejas sobrepostas (Figura 1B), sistemas mecânicos em tanques abertos, ou injetando ar na água para induzir à oxidação e precipitação do ferro, que poderá ser separado da água por filtros ou através sedimentação.

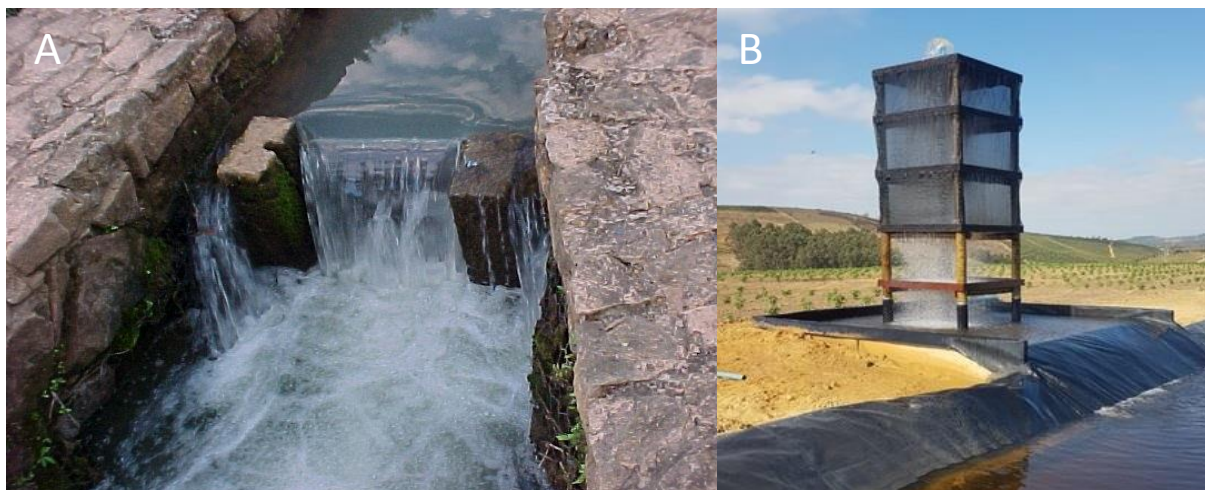


Figura 1. (A) Aeradores do tipo salto (Registro fotográfico de Gustavo Haddad Souza Vieira); (B) bandejas sobrepostas (Registro fotográfico de Bruno Pella).

A sedimentação pode ser realizada por tanques sedimentadores (PIZARRO CABELLO, 1996; CORDEIRO *et al.*, 2003). Com esse procedimento, além de reduzir os problemas com obstrução de emissores, aumenta-se a eficiência dos filtros e aumentam-se os intervalos entre suas limpezas (HAMAN *et al.*, 1989).

Recomenda-se remover as partículas com tamanho mínimo de 75 micra (equivalente à malha de filtragem de 200 mesh) (PIZARRO CABELLO, 1996). Assim, considerando que essas

partículas possuam densidade de $2,67 \text{ g cm}^{-3}$, é considerada uma velocidade de sedimentação de, aproximadamente, $0,0053 \text{ m s}^{-1}$. Partículas maiores e mais pesadas sedimentarão mais rápido.

O tempo de detenção das partículas no tanque de sedimentação deve ser duas vezes maior que o seu tempo de sedimentação, para evitar que as mesmas não sejam carregadas para fora do tanque junto com a água de irrigação. Para se calcular o comprimento e a largura do tanque, pode-se adotar a metodologia de Pizarro Cabello (1996), por meio da Equação 2.

$$2 \frac{h}{V_s} < \frac{L}{v} \quad (2)$$

em que, h = altura do tanque, em m; V_s = velocidade de sedimentação, em m s^{-1} ; L = comprimento do tanque, em m; e v = velocidade da água no tanque, m s^{-1} .

Assim, para se dimensionar o tanque, calcula-se a velocidade da água no tanque "v" com a Equação 3.

$$v = \frac{Q}{a h} \quad (3)$$

em que, Q = vazão do tanque, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$; a = largura do tanque, m; e h = altura do tanque, m.

Recomenda-se que a relação entre a largura e o comprimento do tanque seja de 1:5. Assim, assumindo-se os conceitos anteriores e substituindo-se as equações, pode-se calcular a largura do tanque pela Equação 4. A altura do tanque deve estar entre 0,8 e 1,5 m.

$$a > 4,5 \times 10^{-3} \sqrt{Q} \quad (4)$$

Em que, a = largura do tanque, em m; e Q = vazão do tanque, em $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Por praticidade construtiva, definem-se as dimensões do tanque com valores arredondados, devendo estes serem superiores aos valores calculados, ou seja, se o valor calculado for igual a 1,07 m, adota-se 1,1 m.

Uma vez definida a largura do tanque, e considerando a relação 1:5 entre largura e comprimento, define-se, então, o comprimento do tanque. Com essas dimensões, calcula-se a velocidade de escoamento da água no tanque (Equação 3) e, com a Equação 2, verifica-se se a relação entre tempo de detenção e tempo de sedimentação atende às recomendações.

Haman *et al.* (1989) e Zazueta (1992) recomendam, por medida de segurança, dobrar a área superficial do tanque. Assim, se faz necessária uma adequação das dimensões anteriormente calculadas.

Para construção do tanque, deve-se considerar alguns detalhes, como: (i) no início do tanque deve haver uma placa perfurada para uniformizar o fluxo de água e impedir a formação de correntes preferenciais; (ii) no final do tanque deve haver duas placas de retenção, sendo uma superior para reter o material sobrenadante e outra inferior, para reter o material sedimentado; (iii) acima do nível d'água deve-se deixar uma borda livre, para evitar transbordamento da água; (iv) a captação da água no tanque deve ser feita após a última placa de retenção, para evitar sucção do material sedimentado pela bomba.

Na Figura 2 é apresentado um croqui esquemático de um tanque de sedimentação. Vale ressaltar que sua construção deve considerar a área útil do tanque, sendo seu comprimento indo desde a placa perfurada até a placa inferior de retenção do material sedimentado.

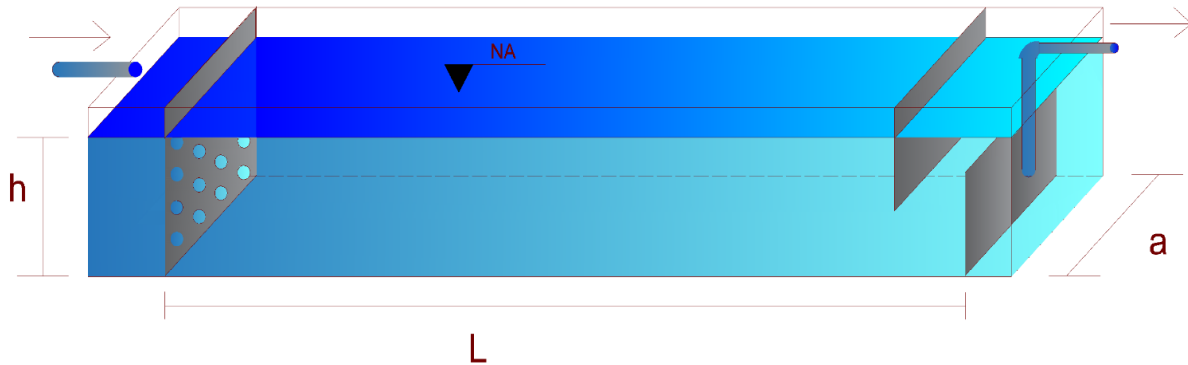


Figura 2. Croqui de um tanque de sedimentação.

Em muitas propriedades têm se observado a presença de tanques de sedimentação construídos sem as devidas recomendações técnicas, como se pode observar na Figura 3. Acredita-se que isso ocorra devido à maior facilidade construtiva, por serem tanques revestidos com lona plástica, ao invés de serem construídos em alvenaria. Mas atenção especial deve ser dada às características construtivas do tanque, pois se não forem seguidas, não há como assegurar o seu bom desempenho, além de haver a possibilidade de custos construtivos acima do necessário, quando as dimensões finais ultrapassam a necessidade técnica e operacional.

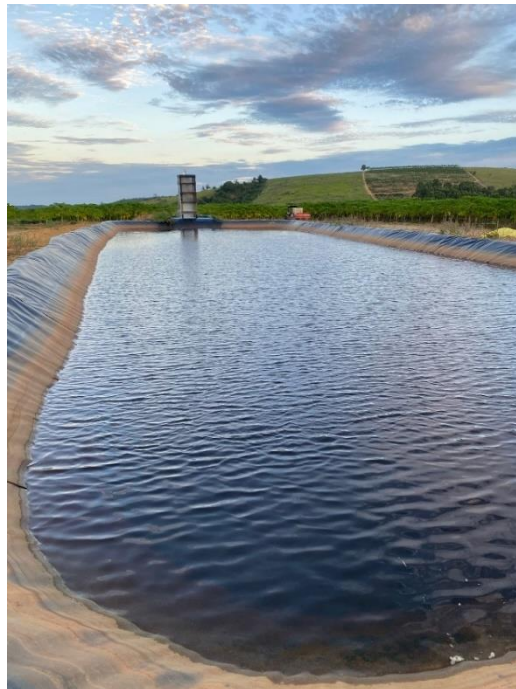


FIGURA 3. Tanque de sedimentação revestido com lona plástica. (Registro fotográfico de Bruno Pella)

Outro ponto importante a ser destacado é que o tanque sedimentador precisa de manutenção periódica, como limpeza para remoção do material sedimentado e folhas que eventualmente caíam no tanque, além da verificação de perfurações ou rachaduras para evitar vazamentos.

Exemplo de dimensionamento do tanque:

Dimensionar um tanque sedimentador para atender a um projeto de irrigação com vazão de 60 m³ h.

Pela Equação 4 tem-se:

$$a > 4,5 \times 10^{-3} \sqrt{65.000} \quad a > 1,15 \text{ m} \quad (5)$$

Pode-se adotar a largura de 1,20 m. Respeitando-se a relação de 1:5, o comprimento deverá ser de 6 m. Convertendo-se a vazão para m³/s e adotando-se a altura de 1 m, a velocidade de água no tanque será:

$$Q = 65 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \div 3.600 = 0,018 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$v = \frac{0,018}{1,2 \times 1} = 0,015 \text{ m s}^{-1} \quad (6)$$

Por meio da Equação 2 verifica-se se o tempo de detenção da água no tanque é duas vezes menor que o tempo de sedimentação das partículas:

$$2 \frac{1}{0,0053} < \frac{6}{0,015}$$

$$377 < 400 \quad (7)$$

Como a condição foi satisfeita, as dimensões estão adequadas. Assim, seguindo-se a recomendação de se dobrar a área superficial do tanque:

$$A = 1,15 \times 6 = 7,2 \text{ m}^2$$

$$7,2 \times 2 = 14,4 \text{ m}^2 \quad (8)$$

As dimensões do tanque serão:

Altura (h) = 1 m

Comprimento do tanque (L) = 7,2 m

Largura do tanque (a) = 2 m

Borda livre = 0,15 m

20.5 Considerações finais

O conhecimento da qualidade da água para irrigação localizada é de fundamental importância para se garantir o seu bom funcionamento e evitar redução da vida útil dos equipamentos. É preciso definir as práticas preventivas, adequadas a cada situação, utilizando-se de critérios técnicos e comprovadamente eficientes.

Vale lembrar que, não apenas uma prática, mas um conjunto de tecnologias, deve ser empregado para o correto manejo e manutenção dos sistemas de irrigação, com vistas a garantir seu pleno funcionamento, para aplicação eficiente e distribuição uniforme.

Apesar de que a implantação de um sistema de pré-tratamento da água aumenta o custo de instalação de um sistema de irrigação localizada, ele é compensado devido à redução nos custos de manutenção preventiva e aumento da vida útil, principalmente dos emissores.

Referências

- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução de GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F.de; DAMASCENO, F.A.V.; Campina Grande, PB: UFPB, 153p., 1999. Estudos FAO 29, 1985.
- BAEZA, R.; CONTRERAS, J.I. Evaluation of thirty-eight models of drippers using reclaimed water: effect on distribution uniformity and emitter clogging. **Water**, n.12, v.5, p.1463, 2020.
- BORDOVSKY, J.P.; MUSTIAN, J.T. Hydrogen Peroxide Treatment of Manganese Clogged SDI Emitters. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, American Society of Agricultural and Biological Engineers, Reno, Nevada, n.96156, 2009.
- CHEN, R.; LIU, H.; ZHANG, P.; ZHAO, L.; DING, K.; YUAN, S. Attenuation of Fe (III)-reducing bacteria during table fluctuation of groundwater containing Fe²⁺. **Science of the Total Environment**, v.694, p.133660, 2019a.
- CHEN, H.; LIU, Y.; CHEN, J.; ZHANG, L.; CAI, Y.; CHEN, H.; WU, S.; ZHOU, M. The clogging rules of ceramic emitter in irrigation using saline water with different EC. **Agronomy**, v.9, n.8, p.436, 2019b.
- CLARK, G.A.; SMAJSTRLA, A.G. **Treating irrigation systems with chlorine**. Circular 1039. Cooperative Extension Service, IFAS, University of Florida. 6p., 1999.
- CORDEIRO, E.A.; VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C. **Principais causas de obstruções de gotejadores e possíveis soluções** Viçosa: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais/UFV, DEA, 41p., 2003.
- DERY, J.L.; BRASSILL, N; ROCK, C.M. **Minimizing Risks: use of surface water in pre-harvest agricultural irrigation**. Cooperative Extension: University of Arizona. 10p., 2020.
- DURAN-ROS, M.; PUIG-BARGUÉS, J.; CUFÍ, S.; SOLÉ-TORRES, C.; ARBAT, G.; PUJOL, J.; DE CARTAGENA, F.R. Effect of different filter media on emitter clogging using reclaimed effluents. **Agricultural Water Management**, v.266, p.107591, 2022.
- GONG, J.; ERKELENS, M.; LAMBERT, M.F.; FORWARD, P. Experimental study of dynamic effects of iron bacteria–formed biofilms on pipeline head loss and roughness. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.145, n.9, p.4019038, 2019.
- GREEN, O.; KATZ, S.; TARCHITZKY, J.; CHEN, Y. Formation and prevention of biofilm and mineral precipitate clogging in drip irrigation systems applying treated wastewater. **Irrigation Science**, v.36, n.4, p.257-270. 2018.
- HAMAN, S.Z.; SMAJSTRLA, A.G.; ZAZUETA, F.S. **Screen Filters in Trickle Irrigation Systems**. Agricultural Engineering Fact Sheet AE-61, IFAS, University of Florida, 5p., 1989.
- HAO, F.; LI, J.; WANG, Z.; LI, Y. Effect of chlorination and acidification on clogging and biofilm formation in drip emitters applying secondary sewage effluent. **Transactions of the ASABE**, v.61, n.4, p.1351-1363, 2018.
- HUANG, S.; ZHANG, N.; LI, Y.; SONG, P.; LIU, Z. Pilot electrochemical prevention of reclaimed water irrigation clogging: Function interactions and microbial metabolism. **Journal of Cleaner Production**, p.130436, 2022.
- JORDAN, J.S.; XIA, Z.; WILLIAMS, E.R. Tips on Making Tiny Tips: Secrets to Submicron Nanoelectrospray Emitters. **Journal of the American Society for Mass Spectrometry**, v.33, n.3, p.607-611. 2022.

- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. Van Nostrand Reinold: New York, 652p., 1990.
- LI, N.; KANG, Y.; LI, X.; WAN, S.; ZHANG, C.; WANG, X. Lateral flushing with fresh water reduced emitter clogging in drip irrigation with treated effluent. **Irrigation Science**, v.37, n.5, p.627-635. 2019.
- LIU, X.; ZHANG, L.; HE, X. Emitter clogging characteristics under reclaimed wastewater drip irrigation: a meta-analysis. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. Online first. 2022.
- MALIVA, R.G. Clogging. In: ____ **Anthropogenic Aquifer Recharge**. Springer: Cham, p.307-342, 2020.
- MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F., **Irrigação: princípios e prática**. 3ed. Viçosa: Ed. UFV, 355 p., 2009.
- MOSER, B.; BEKNAZAROVA, M.; WHILEY, H.; KEERTHIRATHNE, T.P.; HARRINGTON, N.; DEGARIS, K.; WALLIS, I. Investigation into the Cause of Iron-Related Clogging of Groundwater Bores Used for Viticulture in the Limestone Coast, South Australia. **Water**, v.13, n.5, p.683, 2021.
- PIZARRO CABELLO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RELAF): gotejo, microaspersión y exudación**. 3ed. Madrid: Mundi-Prensa, 513 p., 1996.
- RAMACHANDRULA, V.R.; KASA, R.R. Non-destructive characterization of physical and chemical clogging in cylindrical drip emitters. **Heliyon**, v.6, n.10, 05327, 2020.
- RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SHISHA, A.; SAGI, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. **Irrigation Science**, v.1, n.3, p.129-139, 1992.
- RIZK, N.; AIT-MOUHEB, N.; MOLLE, B.; ROCHE, N. Treated wastewater reuse in micro-irrigation: effect of shear stress on biofilm development kinetics and chemical precipitation. **Environmental Technology**, v.42, n.2, p.206-216, 2019.
- SHI, K.; LU, T.; ZHENG, W.; ZHANG, X.; ZHANGZHONG, L. A Review of the Category, Mechanism, and Controlling Methods of Chemical Clogging in Drip Irrigation System. **Agriculture**, v.12, n.2, p.202, 2022.
- SONG, W.; LIU, X.; ZHENG, T.; YANG, J. A review of recharge and clogging in sandstone aquifer. **Geothermics**, v.87, p.101857, 2020.
- THOMAS, P.; BALSYS, R.; MIDMORE, D.J.; WALSH, K.B.; BHATTARAI, S.P. Effect of stabilised hydrogen peroxide on seed germination and seedling growth and its implication for managing drip irrigation. In: XXX INTERNATIONAL HORTICULTURAL CONGRESS IHC2018: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WATER AND NUTRIENT RELATIONS AND MANAGEMENT OF 1253. p. 125-132, 2018.
- VAN BEEK, C.G.E.M.; HOFMAN-CARIS, C.H.M.; ZWEERE, G.J. Drinking water treatment and chemical well clogging by iron (II) oxidation and hydrous ferric oxide (HFO) precipitation. **Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA**, v.69, n.5, p.427-437, 2020.
- VAN RUIJVEN, J.P.M.; PERSIJN, A.; LEARBUCH, K.L.G.; VERSCHOOR, A.M. Treatment of biofilm formation in irrigation lines in zero liquid discharge cultivation systems. In: III INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SOILLESS CULTURE AND HYDROPONICS: INNOVATION AND ADVANCED TECHNOLOGY FOR CIRCULAR HORTICULTURE 1321, p. 39-46, 2021.
- VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C.; DA SILVA, J.G.F.; RAMOS, M.M.; SILVA, C.M. Recuperação de gotejadores obstruídos devido à utilização de águas ferruginosas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, p.1-6, 2004.
- YAO, C.; ZHANG, L.; WU, P.; LIU, Y.; CAI, Y.; ZHOU, W. Clogging formation and an anti-clogging method in subsurface irrigation system with porous ceramic emitter. **Agricultural Water Management**, v.250, p.106770, 2021.
- ZAZUETA, F.S. **Microirrigation**. ICFA, International, Inc. México, 1992.
- ZHANG, W.; LV, C.; ZHAO, X.; DONG, A.; NIU, W. The influence mechanism of the main suspended

particles of Yellow River sand on the emitter clogging– An attempt to improve the irrigation water utilization efficiency in Yellow River basin. **Agricultural Water Management**, v.258, p.107202, 2021.

Klaus Reichardt

HOMENAGEM

Recurso Hídrico



Klaus Reichardt, natural de Santos, São Paulo, Brasil, nasceu em 14 de dezembro de 1940. Em 1963, tornou-se Engenheiro Agrônomo pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (Esalq/USP). Desenvolveu sua carreira acadêmica no Departamento de Ciências Exatas, passando por Doutorado em Agronomia (1965); Livre Docência em Física e Meteorologia (1968), Ph.D. em Ciência do Solo (1971), University of California (EUA) e; Professor Titular em Física e Meteorologia (1981). Paralelamente, atuou no Centro de Energia Nuclear na Agricultura, também da Universidade de São Paulo, como Pesquisador do Laboratório de Física de Solos.

No âmbito nacional, destacou-se por seu intercâmbio com instituições como Embrapa, Unesp, Unicamp, diferentes Universidades Federais, CNPq, Capes e Fapesp, tendo orientado 84 alunos de pós-graduação (Mestrado e Doutorado) e publicado 296 trabalhos científicos.

Internacionalmente, Dr. Klaus se destacou junto à Universidade da Califórnia, (EUA); Agência Internacional de Energia Atômica (Áustria); Instituto de Mecânica de Grenoble (França); Universidade de Gent (Bélgica); Universidade de Viena (Áustria); Universidade de Praga (República Tcheca) e Instituto de Física Teórica (Itália). De 1982 a 1985, foi Chefe da Seção de Fertilidade de Solo, Irrigação e Nutrição de Plantas da Divisão Conjunta FAO/IAEA das Nações Unidas, em Viena (Áustria), o que o levou a atuar, também, como perito em física de solos na Tailândia em 1986.

Em 1991, foi indicado “Personalidade da Agricultura” pelo Sindicato dos Engenheiros do Estado de São Paulo, Brasil. Como colaborador da Enciclopédia Brasileira, recebeu o prêmio Jabuti (1996). Em 2001, recebeu do Governo do Estado de São Paulo a “Medalha de Mérito Científico”. Pela edição do livro do centenário da Esalq/USP, recebeu o prêmio “Ciclo de História” (2002). Como reconhecimento de seu intercâmbio internacional, a *Soil Science Society of America* (SSSA) lhe conferiu em 2003, o título de *Fellow*. É titular da Academia Brasileira de Ciências na área de Ciências Agrárias desde 2006. Recebeu também o “Prêmio Fundação Bunge” nas áreas de Recursos Hídricos/Agricultura, em 2013. No mesmo ano, foi condecorado com a Comenda da Ordem Nacional do Mérito Científico. Em 2014, por sua contribuição com a Esalq/USP e Cena/USP, que se localizam na cidade de Piracicaba, recebeu o título de Cidadão Piracicabano da Câmara de Vereadores, do qual tanto se orgulha.

Atualmente, aos 80 anos, é Professor Titular aposentado da Universidade de São Paulo; Professor Sênior junto ao Cena/USP e continua atuando como pesquisador e orientador junto ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Esalq/USP.

Merecedor de reconhecimentos por suas contribuições, nada mais justo do que a homenagem neste livro publicado como parte da Cátedra Luiz de Queiroz do período 2021/2022 e em comemoração aos 121 anos da Esalq/USP.

Alysson Paolinelli
Durval Dourado Neto
Everardo Chartuni Mantovani

3 de junho de 2022

RELAÇÃO DE AUTORES, CAPÍTULOS E E-MAILS

Id	Autor	Capítulo	E-mail
1	Alberto Giaroli de Oliveira Pereira Barretto	17	barretto.alberto@gmail.com
2	Allan Delfino	17	alldel74@hotmail.com
3	Alexandre Barcellos Dalri	18	alexandre.dalri@unesp.br
4	Alysson Paolinelli	17	alysson.paolinelli@hotmail.com
5	Catariny Cabral Aleman	13	catariny@ufv.br
6	Daniel Fonseca de Carvalho	4	daniel.fonseca.carvalho@gmail.com
7	Durval Dourado Neto	17	ddourado@usp.br
8	Edmar José Scaloppi	10	edmar.scaloppi@unesp.br
9	Elias Fernandes de Sousa	16	efs@uenf.br
10	Everardo Chartuni Mantovani	16/19	everardo@ufv.br
11	Fernando França da Cunha	13	fernando.cunha@ufv.br
12	Flávio Gonçalves Oliveira	19	flaviogoliveira.ufmg@hotmail.com
13	Gustavo Fanelli Hossri	5	gustavo.hossri@hotmail.com
14	Gustavo Haddad Souza Vieira	20	ghsvieira@gmail.com
15	Jarbas Honorio de Miranda	6	jhmirand@usp.br
16	João Carlos Cury Saad	8	joao.saad@unesp.br
17	José Antônio Frizzone	15	frizzone@usp.br
18	José Geraldo Ferreira da Silva	20	j.geraldos525@gmail.com
19	Juliano Dalcin Martins	12	juliano.martins@ufsm.br
20	Laura Elizabeth Christianson	6	lechris@illinois.edu
21	Luciano Alves de Oliveira	6	luciano8@illinois.edu
22	Luís Henrique Basso	9	luis.basso@embrapa.br
23	Luiz Fabiano Palaretti	18	luiz.f.palaretti@unesp.br
24	Luiz Fernando Coutinho de Oliveira	4	coutinho@deg.ufla.br
25	Marcela Almeida de Araujo	17	marcela.araujo@usp.br
26	Marcelo Carazo Castro	19	marcelocastro@ufv.br
27	Marcus Henrique Tessler	3	marcus.tessler@netafim.com
28	Mirta Teresinha Petry	12	mirta.petry@ufsm.br
29	Paulo Cesar Sentelhas	11	
30	Pedro Abel Vieira Júnior	17	pedroabelvieira@gmail.com
31	Pedro Alves Quilici Coutinho	17	paq.coutinho@gmail.com
32	Reimar Carlesso	12	reimar.carlesso@gmail.com
33	Renato Silva	2	renato.silva@valmont.com
34	Roberto Filgueiras	13	roberto.f.filgueiras@ufv.br
35	Roberto Rodrigues	17	gvagro@fgv.br

36	Rodnei Rizzo	17	rodnei.rizzo@gmail.com
37	Rodrigo Ribeiro Franco Vieira	14	rodrigo.franco@codevasf.gov.br
38	Rubens Alves de Oliveira	13	rubens@ufv.br
39	Rubens Duarte Coelho	1	rdcoelho@usp.br
40	Salassier Bernardo	16	salassierb@gmail.com
41	Sergio Nascimento Duarte	7	snduarte@usp.br
42	Verônica Gaspar Martins Leite de Melo	15	vegaspar.vg@gmail.com

OS ORGANIZADORES



Alysson Paolinelli. Engenheiro Agrônomo (ESAL, 1959). Diretor da ESAL (1967-1971). Secretário de Agricultura do Estado de Minas Gerais (1971-1974). Ministro da Agricultura (1974-1979). Presidente do Banco do Estado de Minas Gerais (1979-1982). Presidente da Associação Brasileira de Bancos Comerciais Estaduais (Asbace) (1980-1982). Presidente da Fiat Allis Latino Americana (1982-1996 e 1998-2001). Deputado Federal (1987-1991). Presidente da Confederação Nacional de Agricultura do Brasil (CNA, 1988-1990). Presidente do Fórum Nacional de Agricultura (1992-1993). Presidente da Associação Brasileira dos Produtores de Milho (Abramilho, 2010-2015). Prêmio *World Food Prize* (2006). Indicado ao Prêmio Nobel da Paz (2021 e 2022). Terceiro Titular da Cátedra Luiz de Queiroz (Esalq/USP, 2020-2022).



Durval Dourado Neto. Engenheiro Agrônomo (UFV, 1984). Especialização (Física do Solo, ICTP/Itália, 1989). Mestre (Irrigação e Drenagem, Esalq/USP, 1989). Doutor (Solos e Nutrição de Planta, Esalq/USP, 1992). Pós-Doutor (University of California/EUA, 1993-1995). Pesquisador CNPq (Nível 1A). Coordenador do Grupo de Políticas Públicas e do Laboratório de Modelagem Agrícola, Pecuária e Ambiental - Pixel. Professor Titular do Departamento de Produção Vegetal. Diretor da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP.



Everardo Chartuni Mantovani. Engenheiro Agrícola (UFV, 1981). Mestre (Engenharia Agrícola, UFV, 1986). Doutor (Agronomia – Manejo da Irrigação, Universidad de Córdoba, 1993). Criou e coordenou por 20 anos o Grupo de Estudos e Soluções para Agricultura Irrigada – Gesai (DEA/UFV). Professor (desde 1983) Titular Sênior do Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. É o atual Presidente da ABID (Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem).

AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL

Ciência e Tecnologia



Portal Monumental da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
Universidade de São Paulo