



AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL

Inovação,
Empreendedorismo
e Sistemas
de Produção

Alysson Paolinelli
Durval Dourado Neto
Everardo Chartuni Mantovani

ORGANIZADORES



ESALQ

USP



ASSOCIAÇÃO
BRASILEIRA DE
IRRIGAÇÃO E
DRENAGEM

Agricultura irrigada no Brasil: Inovação, Empreendedorismo e Sistemas de Produção

ISBN: 978-65-87391-24-3

DOI: 10.11606/9786587391243

**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: inovação, empreendedorismo e sistemas de produção [recurso eletrônico] / organização de Alysson Paolinelli, Durval Dourado Neto e Everardo Chartuni Mantovani. - - Piracicaba : ESALQ; Viçosa : ABID, 2022

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

ISBN: 978-65-87391-24-3

DOI: 10.11606/9786587391243

1. Agricultura irrigada - Brasil 2. Irrigação 3. Inovação 4. Empreendedorismo 5. Sistemas de produção I. Paolinelli, A., org. II. Dourado Neto, D., org. III. Mantovani, E. C., org. IV. Título
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. Everardo Mantovani; 2. Valmont; 3. Everardo Mantovani
(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: inovação, empreendedorismo e sistemas de produção** foi organizado em 10 CAPÍTULOS, 245 páginas (além de outras 24 páginas na parte pré-textual), contemplando 26 AUTORES de diferentes instituições públicas e privadas, assim discriminados:

CAPÍTULO 1. Irrigação de pastagens por *Luís César Dias Drumond, Fernando Campos Mendonça, André Santana Andrade, Maicon Fábio Appelt e Danielle Morais Amorim*

CAPÍTULO 2. Irrigação do cafeeiro por *André Luís Teixeira Fernandes e Eusímio Felisbino Fraga Júnior*

CAPÍTULO 3. Irrigação de fruteiras tropicais (abacaxizeiro, bananeira, mamoeiro e mangueira) por *Eugênio Ferreira Coelho, Dionei Lima Santos e Welson Lima Simões*

CAPÍTULO 4. Irrigação de fruteiras subtropicais (citricultura e videira) por *Regina Célia de Matos Pires, Marco Antônio Fonseca Conceição e Maurício Antônio Coelho Filho*

CAPÍTULO 5. Manejo da irrigação em plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares por *Patrícia Angélica Alves Marques e Catariny Cabral Aleman*

CAPÍTULO 6. Irrigação para gramados e paisagismo no Brasil por *Jose Giacoia Neto*

CAPÍTULO 7. Sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar no Brasil: história, mitos e desafios por *Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira*

CAPÍTULO 8. Sistema irrigado de produção de cana de açúcar no Brasil: métodos, recomendações e resposta produtiva por *Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira*

CAPÍTULO 9. Agricultura Irrigada no Cerrado por *Lineu Neiva Rodrigues, Maria Emília Borges Alves, Daniel Althoff e Diego Bispo dos Santos Farias*

CAPÍTULO 10. Sensoriamento remoto na agricultura irrigada por *Christopher M. U. Neale, Ivo Zution Gonçalves e Mitchell S. Maguire*

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. André Luís Teixeira Fernandes. Engenheiro Agrônomo e Mestre em Irrigação e Drenagem (Esalq/USP), Doutor em Engenharia Agrícola (Feagri/Unicam). É Pró-Reitor de Pesquisa, Pós-Graduação e Extensão da Universidade de Uberaba (UNIUBE), é membro titular do Conselho Estadual de Recursos Hídricos, Presidente Executivo do Instituto de Estudos Avançados em Veterinária José Caetano e Presidente da Associação Brasileira de Engenharia Agrícola (SBEA).

2. André Santana Andrade. Engenheiro Agrônomo pela UFV (2011), Mestre pela Esalq/USP (2014), Professor Assistente 1 do Unipam e Consultor técnico da empresa Capital Agrícola. Possui vários artigos científicos publicados em periódicos nacionais e internacionais e trabalhos apresentados em eventos técnicos e científicos. Atualmente trabalha na área de fertirrigação de pastagens com águas residuárias, mudanças climáticas e seus impactos na agropecuária, modelagem do crescimento de plantas forrageiras e fertilidade do solo.

3. 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.

4. Christopher M. U. Neale. Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia Maua em São Caetano do Sul, SP, com Mestrado e Doutorado em Engenharia Agrícola pela Colorado State University. Foi professor de irrigação na Utah State University durante 25 anos antes de assumir a diretoria de pesquisa do Daugherty Water for Food Global Institute da Universidade de Nebraska. É especialista em engenharia de irrigação e sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento da agricultura e recursos naturais.

5. Daniel Althoff. Doutor em Engenharia Agrícola com ênfase em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente é pesquisador de pós-doutorado na Universidade de Stockholm. Tem experiência em modelagem hidrológica e na aplicação de técnicas de aprendizado de máquina.

6. Danielle Morais Amorim. Engenheira Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (2013), Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (2015). Foi bolsista de extensão pelo CNPq na modalidade EXP C atuando na mobilização e capacitação de grupos em comunidades, promovendo o planejamento, desenvolvimento e execução de projetos agroambientais. Atualmente é doutoranda da Esalq/USP.

7. Diego Bispo dos Santos Farias. Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal de Sergipe (2018), Mestre em Engenharia Agrícola pela UFV (2020). Doutorando em Engenharia Agrícola na UFV. Tem experiência na área de Engenharia Agrícola com ênfase em Irrigação, atuando principalmente nos temas: manejo de água/planta na agricultura irrigada, déficit hídrico, modelagem agrícola e sistemas de irrigação.

8. Dionei Lima Santos. Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Mestre e Doutor em Engenharia Agrícola pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Campus Conceição do Araguaia, PA.

9. Eugênio Ferreira Coelho. Engenheiro Agrícola e Mestre em Engenharia Agrícola pela UFV, e Doutor em Engenharia de irrigação pela Universidade do Estado de Utah (EUA). Atualmente é membro do corpo docente da Pós-graduação do Centro Ciências Agrárias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, professor do curso de Pós-graduação em Produção vegetal no Semiárido do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, IF Baiano e pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

10. Eusímio Felisbino Fraga Júnior. Engenheiro Agrônomo (FAZU), Mestre e Doutor em Irrigação e Drenagem (Esalq/USP). Atualmente é Professor Adjunto do Instituto de Ciências Agrárias na Universidade Federal de Uberlândia UFU/Campus Monte Carmelo. Atua principalmente nas áreas de: Engenharia de Água e Solo, Agrometeorologia, Relações hídricas dos cultivos/Cafeicultura Irrigada e Estresse Hídrico/Irrigação deficitária.

11. Felipe Cardoso de Oliveira Maia. Engenheiro Agrônomo (2016) pela UnB, Mestre em Produção Sustentável, com foco em Geotecnologias e Manejo da Água e Solo (2018) pela UnB, e Doutorando em Agronomia pela UnB. Bolsista DTI em Irrigação, zoneamento edafoclimático e sensoriamento remoto para eficiência de uso de água da cana-de- açúcar no Cerrado (Embrapa Cerrados, 2021).

12. Fernando Campos Mendonça. Engenheiro Agrônomo pela Esalq/USP (1990), Mestre e Doutor em Irrigação Drenagem pela Universidade de São Paulo (1994 e 1999). Ex-professor substituto da Universidade Federal de Uberlândia (UFU-1998-2000). Pós-doutorado em Reúso Agrícola de Águas Residuárias (2001-2002). Ex-professor da Universidade do Oeste Paulista (Unoeste-2003-2005). Ex-pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste (2005-2010). Atualmente é professor da Esalq/USP.

13. Ivo Zution Gonçalves. Engenheiro Agrônomo e Mestre pela Universidade Federal do Espírito Santo, Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Campinas. Trabalhou como pesquisador associado no Daugherty Water for Food Global Institute da Universidade de Nebraska (EUA) por 5 anos. Atualmente é pós-doutorando pela Esalq/USP atuando nas áreas de sensoriamento remoto aplicado à agricultura irrigada.

14. Jose Giacoia Neto. Engenheiro Agrícola. Mestre em Irrigação e Drenagem (UFV). MBA em Gestão Comercial (FGV/Ohio State University). Gerente Internacional de Negócios para a América Latina pela Rain Bird International. Possui mais de 25 anos de experiência em irrigação técnica para áreas paisagísticas e esportivas. Entre suas principais realizações no setor estão a concepção e assessoria de projetos de irrigação que foram instalados em áreas públicas em mais de oito países com destaque para os 11 estádios usados na Copa do Mundo de 2014.

15. Lineu Neiva Rodrigues. Pesquisador na área de recursos hídricos e irrigação da Embrapa Cerrados. É mestre e doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa e pós-doutor pela Universidade de Nebraska-EUA, Lincoln, em Engenharia de Irrigação e Manejo de Água. Foi consultor da Organização dos Estados Americanos e pesquisador visitante na Universidade da Califórnia-EUA, Davis. Foi presidente da Câmara Técnica de Ciência e Tecnologia e Conselheiro titular do Conselho Nacional de Recursos Hídricos.

16. Luís César Dias Drumond. Engenheiro agrônomo pela UFV (1986), Mestre em Engenharia Agrícola pela UFV (1989) e Doutor em Agronomia pela Unesp-Jaboticabal (2003). Foi professor e pesquisador da Universidade de Uberaba e Faculdades Associadas de Uberaba. Foi Vice-Diretor da Universidade Federal de Viçosa - Campus de Rio Paranaíba. Escreveu 10 livros e vários capítulos de livros. Atua principalmente na área de fertirrigação de pastagem voltada a produção bovina intensiva e uso racional de efluente em fertirrigação. É professor e pesquisador na Universidade Federal de Viçosa.

17. Maicon Fábio Appelt. Engenheiro Agrônomo pela UFV (2012), Mestre pela UFV (2014), Especialização em Nutrição de Ruminantes pela Fazu (2016). Atua nas áreas de pastagem, forragicultura, fertilidade do solo e recursos hídricos, com ênfase em fertirrigação e uso de

águas residuárias. Ministrou várias palestras em eventos técnicos no Brasil e Exterior. Participou da organização de eventos e atualmente realiza consultorias ligadas a irrigação, uso de água residuária e produção animal a pasto.

18. Marco Antônio Fonseca Conceição. Engenheiro Civil (1983) pela Universidade de Uberaba, Mestre (1988) em Engenharia Agrícola pela UFV e Doutor (2002) em Agronomia (Irrigação e Drenagem) pela Esalq/USP. Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) desde 1988, estando lotado atualmente na Embrapa Uva e Vinho/Estação Experimental de Viticultura Tropical (EVT), em Jales, SP.

19. Maria Emília Borges Alves. Pesquisadora da Embrapa Cerrados, Engenheira Agrícola (UFLA/1996), mestre em Engenharia Agrícola/Irrigação e Drenagem (UFLA/1999), especialista em Meio Ambiente e Gestão de Recursos Hídricos (CEFET-MG/2004), doutora em Meteorologia Agrícola (UFV/2009) e pós-doutorado desenvolvido na Embrapa Milho e Sorgo. Atuação nos setores privado e público com Engenheira Agrícola, nas áreas de Irrigação e Agrometeorologia.

20. Maurício Antônio Coelho Filho. Engenheiro Agrônomo pela UFBA, Mestre e Doutor em Agronomia/Irrigação e Drenagem pela Universidade de São Paulo (1998/2020). Pesquisador visitante de Rothamsted Research (UK) nos anos de (2011 a 2013). Pesquisador da Embrapa Mandioca e Fruticultura e professor permanente em cursos de PG (Engenharia Agrícola: UFRB e Produção Vegetal no Semiárido: IFBaiano, Guanambi). Experiência nos estudos de manejo de Irrigação, tolerância de plantas aos estresses abióticos e zoneamento de risco climático.

21. Mitchell S. Maguire. Engenheiro Agrícola com graduação, mestrado e doutorado no departamento de engenharia de biosistemas da Universidade do Nebraska-Lincoln. É piloto certificado de drones e administra as atividades do NU-AIRE laboratory no departamento de engenharia de biosistemas. Atualmente é pós-doutorando no Daugherty Water for Food Global Institute, Universidade de Nebraska onde participa de projetos de pesquisa no manejo da água na agricultura irrigada.

22. Patricia Angélica Alves Marques. Engenheira Agrônoma, Mestre e Doutora em Irrigação e Drenagem pela Esalq/USP. Professora Associada (INCT-EI e LEB/Esalq/USP) atua na graduação e na Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas (PPGESA). Tem experiência na área de Engenharia Agrícola, com ênfase em softwares, inteligência artificial e modelos para Engenharia de Água no Solo, manejo da Irrigação, e viabilidade econômica da irrigação.

23. Regina Célia de Matos Pires. Engenheira Agrônoma (Faculdade de Agronomia e Zootecnia Manuel Carlos Gonçalves - 1984), Mestre e Doutora em Agronomia (Área de Irrigação e Drenagem) pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (Esalq/USP). Pesquisadora científica e Diretora do Centro de Pesquisa de Ecofisiologia e Biofísica do Instituto Agrônomo (IAC). Professora do Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical do IAC.

24. Rodrigo Moura Pereira. Engenheiro Agrícola pela UEG (2012), Mestre em Agronomia, com foco em Solo e Água (UFG, 2015). Especialização em Recursos Hídricos (UnB, 2018). D.Sc. em Agronomia, com foco em Produção Sustentável (UnB, 2021). Bolsista DTI em irrigação, zoneamento edafoclimático e sensoriamento remoto para eficiência de uso da água da cana-de-açúcar no Cerrado (Embrapa Cerrados, 2021).

25. Vinicius Bof Bufon. Engenheiro Agrícola (2003), Mestre em Engenharia Agrícola (Recursos Hídricos e Irrigação, 2005) pela Universidade Federal de Viçosa, e Ph.D. em Agronomia (Eficiência de uso de água na produção agrícola, 2009) pela Texas Tech University. Atualmente é pesquisador da Embrapa Cerrados, atuando principalmente no desenvolvimento de sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar para o Cerrado, e de ferramentas de sistema de informação geográfica, sensoriamento remoto e aprendizado de máquina para suporte à gestão da eficiência de uso de água.

26. Welson Lima Simões. Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras e Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente é pesquisador da Embrapa Semiárido na área de irrigação e drenagem.

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

Inovar sempre foi uma atividade humana, desde os tempos mais antigos. Assim, plantar para produzir alimentos levou à uma grande inovação: a agricultura, que permitiu a humanidade chegar até os dias atuais, com alimento e prosperidade. E mais ainda, garantiu estarmos no futuro por meio de contínuas inovações, como a iniciativa de irrigar as plantações. Inicialmente com o desvio de cursos de água por meio de canais, foi assim que a irrigação se difundiu, transformando a atividade agrícola numa atividade de menor risco por garantir a estabilidade do fluxo de água para as plantas. A irrigação foi uma das primeiras inovações, após a própria agricultura, a alterar intencionalmente o ambiente de produção. As consequências da atividade para o meio ambiente estão cada vez mais sendo trabalhadas no sentido de mitigar possíveis efeitos negativos, na perspectiva da sustentabilidade do processo produtivo com impacto mínimo sobre os recursos naturais.

A inovação, como regra, decorre da necessidade de encontrar solução para um determinado desafio a ser vencido como, por exemplo, garantir a produção agrícola frente a uma dada condição de seca, que ameaça a safra agrícola em uma determinada localidade. Mas, para que uma inovação possa acontecer a partir de um novo conhecimento, de uma novidade, é essencial estar presente também o empreendedorismo. Alguém, ou uma comunidade, que deve perseguir o novo como solução e, finalmente, encaminhar o escalonamento da tecnologia ou até mesmo da inovação pré-comercial. Para isto, é imprescindível o empreendedor conectar a tecnologia ao mercado, que é onde realmente a inovação acontece, onde a novidade vira nota fiscal. E é o que aconteceu com a irrigação ao longo dos tempos e hoje o Brasil se beneficia dela, adaptando-a permanentemente em atenção às necessidades da produção agrícola que deve ser cada vez mais sustentável sob todos os pontos de vista. Para isso, valem das pesquisas e dos seus resultados robustos a partir, principalmente, das Ciências Agrárias, área praticada nas universidades, empresas e organizações estaduais e federais de pesquisa.

Há, atualmente, um cenário que projeta um considerável aumento da fome no mundo, em função da pandemia da COVID-19 e dos efeitos da guerra na Europa. É preciso reverter este cenário, o que implica na necessidade de aumentar significativamente a produção de alimentos como soja e milho pelo Brasil, que certamente exigirá um aumento considerável da irrigação em nosso país e deverá ser acompanhado de medidas efetivas de controle e redução dos impactos ambientais. É preciso perseguir o que sempre apregoa o Professor Durval Dourado Neto, atual diretor da Esalq/USP, um dos maiores especialistas da área, "produzir mais alimentos com impacto mínimo", em especial sobre os recursos hídricos. Isto não é somente possível, mas necessário. Temos estoque de conhecimentos e de inovações que podem ser mobilizados para uma produção agrícola cada vez mais sustentável. É uma questão de meta e planejamento para a agricultura brasileira mostrar seu crescente valor para alimentar além dos brasileiros, pessoas em todo o mundo, contribuindo definitivamente para o processo da paz mundial. Como diz o ex-Ministro da Agricultura, Roberto Rodrigues, alimento é paz!

A presente obra vem preencher uma lacuna em publicações nesta área em nosso país, permitindo aos nossos técnicos e produtores rurais aliarem sua capacidade de empreender aos novos conhecimentos científicos. Os autores são cientistas renomados e técnicos muito experientes. A maioria apresenta formação em Engenharia Agrícola e Agronomia, Mestres e Doutores, dedicados à pesquisa e à extensão nas universidades, empresas de pesquisa ou técnicos dedicados à assistência prestada por empresas. Todos dedicados ao tema da irrigação, seja em pastagens, fruteiras, lavouras de café, plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares, gramados, cana-de-açúcar e plantações no cerrado, por exemplo.

Finalmente, é necessário enfatizar que para otimizar os sistemas de produção, a irrigação é um precioso insumo, pelo valor que agrega na estabilização da produção e contribuição para diminuir riscos e ameaças à produção. No processo de evolução dos sistemas de produção agrícola é cada vez mais mandatário trabalhar a questão do uso da água e, conseqüentemente, a incorporação de modalidades de irrigação.

A todos, o agradecimento pelo fortalecimento da agricultura brasileira e a preservação dos recursos hídricos, patrimônio de todos os brasileiros.

Evaldo Ferreira Vilela

Presidente do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)
Quarto Titular da Cátedra Luiz de Queiroz de Sistemas Agropecuários Integrados

AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL

Inovação, Empreendedorismo e Sistemas de Produção

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1		
1	Irrigação de pastagens	1
	<i>Luís César Dias Drumond, Fernando Campos Mendonça, André Santana Andrade, Maicon Fábio Appelt e Danielle Morais Amorim</i>	
	Resumo	1
1.1	Introdução	1
1.2	Princípios básicos de irrigação e fertirrigação de pastagem	2
1.3	Potencial produtivo de pastagens fertirrigadas	4
1.4	Sistemas de irrigação mais utilizados em pastagem	10
1.5	Irrigação por aspersão	10
1.6	Fertirrigação e uso racional de efluentes em pastagens	15
1.7	Produção intensiva de volumoso para confinamento	17
1.8	Manejo racional da irrigação de pastagens	21
1.9	Perspectivas e tendências futuras de irrigação de pastagem	23
1.10	Considerações finais	23
	Referências	24

CAPÍTULO 2		
2	Irrigação do cafeeiro	29
	<i>André Luís Teixeira Fernandes e Eusímio Felisbino Fraga Júnior</i>	
	Resumo	29
2.1	Introdução	29
2.2	Cafeicultura irrigada	30
2.3	Investimentos na irrigação do cafeeiro	31
2.4	Sistemas de irrigação para o cafeeiro	35
2.5	Gerenciamento e manejo da irrigação	38
2.6	Fertirrigação do cafeeiro	43
2.7	Considerações finais	45
	Referências	45

CAPÍTULO 3

3	Irrigação de fruteiras tropicais (abacaxizeiro, bananeira, mamoeiro e mangueira)	55
	<i>Eugênio Ferreira Coelho, Dionei Lima Santos e Welson Lima Simões</i>	
	Resumo	55
3.1	Introdução	55
3.2	Irrigação do abacaxizeiro (<i>Ananas comosus</i>)	57
3.3	Irrigação da bananeira (<i>Musa spp.</i>)	63
3.4	Irrigação do mamoeiro (<i>Carica papaya</i>)	69
3.5	Irrigação da mangueira (<i>Mangifera indica L.</i>)	74
3.6	Considerações finais	78
	Referências	78

CAPÍTULO 4

4	Irrigação de fruteiras subtropicais (citricultura e videira)	87
	<i>Regina Célia de Matos Pires, Marco Antônio Fonseca Conceição, Maurício Antônio Coelho Filho</i>	
	Resumo	87
4.1	Introdução	87
4.2	Citricultura	88
4.3	Viticultura	110
4.4	Considerações finais	114
	Referências	114

CAPÍTULO 5

5	Manejo da irrigação em plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares	123
	<i>Patrícia Angélica Alves Marques e Catariny Cabral Aleman</i>	
	Resumo	123
5.1	Introdução	123
5.2	Recursos hídricos frente a produção de planta medicinal, aromática e condimentar	124
5.3	Manejo de irrigação de plantas medicinais de importância econômica	127
5.4	Considerações finais	134
	Referências	134

CAPÍTULO 6

6	Irrigação para gramados e paisagismo no Brasil	139
	<i>Jose Giacoia Neto</i>	
	Resumo	139
6.1	Introdução	139
6.2	História da irrigação para paisagismo e gramados esportivos	140
6.3	Emissores de água	141
6.4	Válvulas e estações	158
6.5	Automação	160
6.6	Considerações finais	162
	Referências	162

CAPÍTULO 7

7	Sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar no Brasil: história, mitos e desafios	163
	<i>Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira</i>	
	Resumo	163
7.1	Introdução	163
7.2	Alinhando conceitos	164
7.3	Transição tecnológica e geográfica para produção irrigada	165
7.4	Crises hídrica e econômica	167
7.5	Sistema irrigado de produção: a nova realidade do setor	168
7.6	Considerações finais	178
	Referências	179

CAPÍTULO 8

8	Sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar no Brasil: métodos, recomendações e resposta produtiva	185
	<i>Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira</i>	
	Resumo	185
8.1	Introdução	186
8.2	Tipos de sistema de irrigação para cana-de-açúcar	186
8.3	Demanda hídrica e de irrigação	189
8.4	Manejo da irrigação	191
8.5	Parâmetros para estimativa de demanda hídrica	194
8.6	Estratégias de manejo	197
8.7	Estratégia de maturação (<i>drying-off</i>)	198
8.8	Recomendações para estimar a demanda hídrica da cana-de-açúcar no Cerrado	199
8.9	Resposta produtiva da cana-de-açúcar ao sistema irrigado	202
8.10	Plano de investimentos em produção irrigada	205
8.11	Viabilidade econômica	207
8.12	Considerações finais	208
	Referências	209

CAPÍTULO 9		
9	Agricultura irrigada no Cerrado	215
	<i>Lineu Neiva Rodrigues, Maria Emília Borges Alves, Daniel Althoff e Diego Bispo dos Santos Farias</i>	
	Resumo	215
9.1	Introdução	215
9.2	Área irrigada atual	216
9.3	Projeção futura	220
9.4	Considerações finais	222
	Referências	225

CAPÍTULO 10		
10	Sensoriamento remoto na agricultura irrigada	227
	<i>Christopher M. U. Neale, Ivo Zution Gonçalves e Mitchell S. Maguire</i>	
	Resumo	227
10.1	Introdução	227
10.2	Conceitos de Sensoriamento Remoto	227
10.3	<i>Google Earth Engine - GEE</i>	231
10.4	Uso de sensoriamento remoto na agricultura	231
10.5	Considerações finais	238
	Referências	238

	HOMENAGEM (Antonio Fernando Lordelo Olitta)	241
	Relação de Autores, Capítulos e E-mails	243
	Os Organizadores	245

CAPÍTULO 1

1 IRRIGAÇÃO DE PASTAGENS

Luís César Dias Drumond, Fernando Campos Mendonça, André Santana Andrade, Maicon Fábio Appelt e Danielle Moraes Amorim

Resumo

Para que serve a irrigação de pastagens? O alto potencial produtivo das pastagens tropicais irrigadas (Taxas de lotação animal de 8-12 UA ha⁻¹) é importante fator de decisão, bem como a necessidade de nutrientes dessas forrageiras, que podem chegar 1800 kg/ha.ano de N. Entretanto, os sistemas de irrigação podem desempenhar diversas funções além do óbvio suprimento de água às forrageiras. Este capítulo inicia com a exposição dos princípios básicos que norteiam a irrigação e a nutri irrigação de pastagens, desde a fonte de água e a vazão outorgável até a qualidade e a disponibilidade de mão de obra. A seguir, discorre sobre o planejamento de investimentos em sistemas intensivos de produção animal, abordando outros fatores dos sistemas de produção afetados pelo uso da irrigação, geralmente negligenciados à primeira vista, tais como a redução da compactação do solo e a sobressemeadura de forrageiras de inverno em pastagens tropicais. As perspectivas e tendências apontam para a Irrigação de Precisão (Irrigação 4.0), com tecnologias associadas a Big Data, Internet das Coisas (IoT) e Inteligência Artificial (AI). No atual estágio tecnológico surgiram plataformas para gerenciamento da irrigação e fertirrigação, o uso de fontes renováveis de energia e equipamentos autônomos na irrigação (robotização). Tais avanços possibilitaram a criação de sistemas multi-tarefa, que realizam atividades de irrigação, nutri irrigação, quimificação, bioirrigação, monitoramento de pragas e doenças, sombreamento, fornecimento de água às plantas e aos animais, e auxílio nas tomadas de decisão sobre as atividades produtivas. Trabalhos sobre viabilidade da irrigação de pastagem devem considerar todos esses aspectos e a decisão sobre o uso da irrigação deve considerar mais que o simples aumento da produção de forragem. O uso de modelos para estimativa do potencial produtivo e verificação dos principais fatores limitantes à produção de forragem em diferentes regiões é fundamental para a decisão, permitindo a estimativa da produção e a simulação de ajustes nos sistemas de produção.

1.1 Introdução

No trabalho com irrigação de pastagem é primordial entender que o sucesso não depende somente do equipamento adquirido. Vários são os fatores que interferem na produção e na qualidade de forragem.

Dentre os fatores que impactam o projeto fertirrigação de pastagem, destacam-se: (i) fonte de água; superficial ou subterrânea, afetando o consumo de energia; (ii) vazão outorgável: bacias hidrográficas em situação crítica (vazão outorgável já concedida) demandam maior investimento devido à necessidade de projetos de barramento; (iii) energia: pode ser combustível (diesel) ou elétrica do Sistema Interligado Brasileiro, de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), de biodigestores, de sistema solar fotovoltaico e de energia eólica; (iv) clima: principal fator que afeta o potencial produtivo das forrageiras; (v) escolha da forrageira (gênero, espécie, variedade ou híbrido); (vi) fertilidade do solo e interpretação por balanço de massa; (vii) topografia; (viii) disponibilidade de equipamentos de irrigação e fertirrigação; (ix) suprimento de animais para a área intensificada (maior custo do processo); e (x) mão de obra (disponibilidade e qualidade).

Qualquer investimento em técnicas de intensificação da produção animal baseada em pastagem deve ser precedido por um estudo de retorno econômico da atividade proposta, seja leite, carne ou lã, pois a forragem produzida deve colhida eficientemente e transformada em produto animal.

Isto implica no planejamento amplo de investimentos, tanto no sistema de irrigação e fertirrigação quanto em fertilidade do solo e na infraestrutura da fazenda. Para lidar com o aumento na lotação animal é necessário planejar os investimentos em cercas para piqueteamento, corredores, áreas de lazer e sombra, bebedouros e suas tubulações, cochos para suplementação e na aquisição de animais, geralmente o fator de maior demanda financeira.

1.2 Princípios básicos de irrigação e fertirrigação de pastagem

Em sistemas para gado de corte, os principais fatores responsáveis pela variação do resultado econômico são o preço de compra de animais de reposição e o preço de venda de animais, tanto em sistemas de recria quanto de engorda. Diferentemente do senso comum do produtor rural, a irrigação não é uma tecnologia cara. Nos investimentos em sistemas de produção pecuária intensiva em pastagens fertirrigadas, a aplicação total de capital na terra, em média, é de aproximadamente 40 a 50 mil reais por hectare (R\$ ha⁻¹) para gado de corte, enquanto varia de 60 a 70 mil para gado de leite. Essa aproximação refere-se a todo investimento (irrigação, cercas, infraestrutura, animais, e energia elétrica, principalmente), sendo que deste total aproximadamente 30 a 40% refere-se ao sistema de irrigação em sistemas para gado de corte, ao passo que 20 a 30% seria uma proporção aproximada para sistemas para gado de leite.

Todo esse investimento é devido à complexidade do sistema de produção animal a pasto, que é composto por três etapas principais: crescimento, utilização e conversão. Observa-se que a irrigação atua juntamente com outros fatores, como a adubação e as condições climáticas para a produção vegetal, que em conjunto são apenas uma das etapas de produção.

Para que o investimento na primeira etapa (crescimento) resulte em retorno econômico, é necessário estar atento às demais etapas (utilização e conversão), o que implica em eficiência de utilização da forragem produzida. É necessário que os animais consumam o máximo possível da forragem produzida, para que o desperdício não anule o aumento da produção. Nesta etapa atua, principalmente, o manejo do pastejo. Adicionalmente, a forragem consumida deve ser eficientemente convertida em produto animal. Isso significa que o animal deve ganhar peso ou produzir leite, e nesta etapa também atua o equilíbrio nutricional da forragem e da dieta, e o mérito genético dos animais.

Além de a irrigação ser um dos fatores de aumento da produção vegetal devido ao suprimento de água, ela também interfere em outros fatores de custo de produção. Destacam-se a redução da compactação e danos às forrageiras causados por máquinas, e a possibilidade de aplicação de fertilizantes via equipamento de irrigação (fertirrigação), que reduz os custos de aplicação e aumenta a eficiência de uso dos nutrientes.

O uso da fertirrigação também otimiza o uso da terra – que tem valorização crescente – e da infraestrutura do sistema de produção, pois aumenta a segurança e a flexibilidade do sistema de produção em termos de mercado, aumenta da escala de produção e possibilita adquirir e vender animais em períodos variados do ano. No sistema de produção de carne, permite firmar contratos com frigoríficos, com valorização da carcaça produzida.

O uso da fertirrigação em pastagens tem função mais importante que a simples aplicação de água à pastagem. Estimula o produtor a fazer adubação, a manejar melhor a fertilidade do solo e a pastagem, investir em tecnologia, otimizar o uso de recursos naturais e

incrementar o planejamento de seus investimentos. Assim, colabora para aumentar a esperança de sucesso da atividade pecuária.

Nossa experiência no trabalho com irrigação e fertirrigação em pastagens permite observar que a avaliação de sua viabilidade nas várias regiões brasileiras deve levar em consideração as características climáticas, principalmente temperatura e precipitação pluvial. Para haver resposta satisfatória à irrigação é necessário que a temperatura permita o crescimento da espécie forrageira de interesse. Entretanto, além do clima há outros fatores que devem ser levados em consideração: espécie forrageira utilizada, tipo de solo, características topográficas (forma e relevo da área), disponibilidade e distância da água à área, disponibilidade e fonte de energia elétrica, valor agregado da produção, eficiência da unidade produtiva, intensidade de uso e valor da terra, custo de alimentos suplementares, questões operacionais da fazenda, mercado de animais, afinidade do produtor com a atividade, e subsídios do governo.

Muitos trabalhos científicos avaliaram a viabilidade da irrigação de pastagem, porém, geralmente os trabalhos não consideram todos esses fatores. Assim, a tomada de decisão deve ser mais ampla. A depender da situação, a fertirrigação de pastagem pode, ou não, ser viável em qualquer região do Brasil. Por isso, a interpretação sobre tal viabilidade deve ser tomada com o devido conhecimento sobre o tema e sistemas de produção.

Para as forrageiras tropicais mais comumente utilizadas em áreas irrigadas (*Panicum*, *Pennisetum*, *Cynodon* e *Brachiaria*), a resposta é diretamente proporcional ao período em que há temperaturas altas e ausência de chuvas. Espécies adaptadas a clima temperado (Ex.: aveia, azevém, etc.) apresentam resposta satisfatória à irrigação em períodos de frio e seca do Brasil. Na maioria da área das regiões Sudeste e Centro-Oeste, os períodos seco e frio coincidem. Nessas condições é importante considerar a temperatura basal inferior das espécies utilizadas e utilizar estudos de modelagem do crescimento de plantas forrageiras, principalmente os que utilizam a associação entre produção de forragem e o acúmulo de graus-dias de desenvolvimento (GDD).

Na irrigação de pastagem a condição física dos solos é de extrema importância, devido à alta carga animal. Na época de chuvas, solos muito argilosos podem apresentar problemas no manejo. Assim, muda-se alguns conceitos, pois corrigir a fertilidade de um solo geralmente tem custo inferior ao da implantação de um sistema de drenagem. Exceto em solos salinos, os atributos químicos assumem importância secundária, visto que na maioria das vezes é possível a correção de problemas como acidez e concentrações tóxicas de alumínio e manganês por meio de corretivos (calcário, silicatos, óxidos, hidróxidos, entre outros) ou de adubação.

É possível afirmar que, para sistemas altamente intensivos, solos com textura média a grosseira (arenosos) são mais adequados a sistemas de produção com fertirrigação, devido à menor formação de áreas encharcadas e barro, especialmente em áreas de lazer, ao redor de cochos e bebedouros, e em corredores de acesso. O monitoramento de elementos químicos e práticas de manejo devem ser ajustados em função das características do solo.

Não é recomendada a irrigação de pastagens em solos mal drenados e/ou com probabilidade de alagamento em alguns períodos do ano. Tal fato se deve às limitações ambientais ao uso de adubação intensiva, à necessidade de uso de espécies tolerantes específicas – que podem não ser as mais recomendadas para altos níveis de produção – e às complicações operacionais e de manejo no período chuvoso. Novas variedades vêm sendo desenvolvidas e estudadas para tais áreas (Ex.: *Panicum* PM455) e o avanço das pesquisas devem levar a mudanças em breve.

Com relação ao local de instalação do equipamento, deve-se considerar a distância e o desnível do ponto de captação de água à área irrigada. Em situações de grande distância ou

desnível elevado, pode-se projetar um reservatório em um ponto previamente estudado e fazer uma avaliação econômica do projeto. Tal alternativa é particularmente interessante quando há limitações de água e/ou energia elétrica, que são situações muito frequentes, pois pode-se bombear para o reservatório por um período de até 21 h dia⁻¹ e irrigar durante a noite. Isto resulta em aumento da área irrigada e redução do custo de energia dos sistemas de fertirrigação.

O processo de implantação e utilização da irrigação e fertirrigação em pastagens demanda conhecimento técnico adequado em todas as fases (projeto, implantação, uso e avaliação de desempenho técnico e econômico). Por isso, é importante que haja um esforço contínuo, em escala nacional, para o treinamento e a capacitação de profissionais ao trabalho com a produção animal em áreas irrigadas. Embora tal iniciativa já seja tomada por diversas instituições brasileiras, ainda pode ser aprimorada por meio do estabelecimento de indicadores de performance e eficiência de sistemas de irrigação e fertirrigação. Qualquer sistema de produção deve ter acompanhamento técnico de profissionais da área. Quanto maiores o profissionalismo aplicado e a busca de conhecimento (como visitas em áreas de sucesso), maiores as chances de sucesso de um projeto.

1.3 Potencial produtivo de pastagens fertirrigadas

O potencial produtivo de pastagens é determinado por vários fatores, manipuláveis ou não. As condições climáticas constituem os fatores não manipuláveis e geralmente são os principais a considerar na determinação do potencial produtivo e da resposta à irrigação, denominado de potencial produtivo climático. Os fatores de maior impacto são disponibilidade hídrica, temperatura e radiação solar. No caso das pastagens irrigadas, o foco pode se resumir aos dois últimos, pois a irrigação suprirá parcial ou integralmente a demanda das plantas.

As produtividades alcançadas com forrageiras tropicais fertirrigadas são consideravelmente altas. Vários projetos em regiões de clima tropical já alcançam produtividade anual 40 a 60 toneladas de matéria seca por hectare (t [MS] ha⁻¹), capaz de sustentar 8 a 12 Unidades Animais por hectare (UA ha⁻¹; 1 UA = 450 kgf de peso vivo).

Para atingir tais níveis de produtividade, as plantas forrageiras chegam a extrair mais de 900 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio (N) em sistemas de pastejo, e mais de 1.800 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N em sistemas de produção e corte de forragem (DRUMOND; AGUIAR, 2005; MELO *et al.*, 2020).

Na determinação do potencial produtivo, geralmente se considera cada espécie e/ou cultivar separadamente, porém, genótipos com comportamento semelhante em determinados sistemas podem ser agrupados. A estimativa do potencial produtivo real pode ser feita por meio de modelos matemáticos, que requerem informações climáticas, bem como informações sobre fertilidade do solo e adubação, características físicas do solo, sanidade das plantas, estrutura em que a pastagem é mantida (quantidade e qualidade da área foliar), efeitos diretos (frequência e intensidade de desfolha) e indiretos do pastejo (pisoteio, distribuição de excretas, etc.), e mão de obra.

Há muitos tipos de modelos, com diferentes níveis de complexidade e número de variáveis consideradas. Geralmente os modelos de estimativa do potencial produtivo que consideram somente temperatura, balanço hídrico e adubação nitrogenada são satisfatórios para plantas sem estímulos fisiológicos específicos. Em condições de irrigação total (sem *deficit*) pode-se excluir o balanço hídrico, assim, modelos simples podem executar boas estimativas de produção de forrageiras irrigadas que se tornam importantes ferramentas no planejamento de um projeto.

Modelos agrícolas integram conhecimentos multidisciplinares, como física e química do solo, fisiologia e melhoramento vegetal, agrometeorologia e manejo, dentro de equações

matemáticas utilizadas para prever crescimento, desenvolvimento e produção (HOOGENBOOM, 2000). Assim, auxiliam na organização, interpretação e aplicação do conhecimento científico atual, sugerindo prioridades na pesquisa pela identificação de lacunas no conhecimento e estímulo de novas ideias.

A modelagem tem sido uma ferramenta eficaz na simulação do crescimento de plantas com significativos avanços nos últimos anos, principalmente devido ao aumento da demanda por previsões de safras, estudos sobre mudanças climáticas e avanços da informática (DOURADO-NETO *et al.*, 1998a). Os usuários de modelos acompanharam essa evolução e estão crescendo em número e grau de sofisticação (GRABLE, 1987). No entanto, cuidados devem ser tomados, principalmente em relação às limitações intrínsecas de cada modelo. É necessário fazer a validação para cada cultura e região, de modo a garantir a qualidade dos dados e a confiabilidade dos resultados. As maiores limitações na geração e uso dos modelos são o histórico disponível do sistema a ser simulado e a disponibilidade de dados de entrada (HOOGENBOOM, 2000).

Modelos variam de muito simples (uma equação linear) a extremamente complexos (milhares de equações) (HOOGENBOOM, 2000), e podem ter várias classificações: estáticos ou dinâmicos, discretos ou contínuos, determinísticos ou estocásticos e mecanísticos ou empíricos.

Modelos dinâmicos têm o tempo como variável, e os estáticos, não. Tanto os discretos quanto os contínuos são dinâmicos. Nos contínuos, porém, o tempo é um valor real (exemplo 2, 24 h), enquanto nos discretos o tempo é identificado por valores inteiros (exemplo 2 h).

Modelos estocásticos contêm algum elemento de aleatoriedade ou distribuição de probabilidade; os determinísticos, não (TEH, 2006). Modelos para predição da produção de MS de plantas geralmente são determinísticos e dinâmicos: buscam representar as respostas de um sistema responde ao longo do tempo, sem distribuição de probabilidade associada (THORNLEY; JOHNSON, 1990). Podem ser mecanicistas ou empíricos e são o alvo desta revisão.

Os modelos mecanicistas consideram os conhecimentos dos processos físicos, químicos e biológicos que governam os fenômenos em estudo (TEH, 2006), permitindo o entendimento e uma provável extrapolação das condições em que foram gerados. No entanto, são necessárias mais informações para a sua geração e utilização, por isso, são mais utilizados na pesquisa.

Os modelos empíricos (também chamados de correlativos ou estatísticos) são de geração simples e fácil aplicação. No entanto, estão sujeitos a maiores erros e são limitados à faixa de condições em que foram gerados (DOURADO-NETO *et al.*, 1998b). São elaborados buscando a correlação entre produção ou crescimento de plantas com uma ou mais variáveis (temperatura, radiação, disponibilidade hídrica e de nutrientes, especialmente o nitrogênio). Atualmente, são os mais estudados nas condições tropicais (CRUZ *et al.*, 2011; TONATO *et al.*, 2010).

Obviamente, a escolha do tipo de modelo a ser utilizado dependerá dos objetivos da previsão e da disponibilidade de informações. Os modelos empíricos são os de mais fácil utilização, principalmente devido à disponibilidade de dados. Assim, neste capítulo vamos abordar somente a aplicação desse modelo.

A análise de regressão é a técnica mais comum de gerar modelos matemáticos empíricos. As técnicas de regressão são utilizadas visando gerar equações capazes de estimar a produção de plantas (variável dependente) em função de fatores relacionados (variáveis independentes). As variáveis meteorológicas são as mais comuns (HOOGENBOOM, 2000).

As principais variáveis utilizadas na geração de modelos para forrageiras são as temperaturas do ar (máxima – T_x , média – T_d e mínima – T_n), a radiação solar global (R_g), o fotoperíodo (N) e a disponibilidade de água no solo. Frequentemente outras variáveis são calculadas visando melhorar a capacidade preditiva, principalmente as somas térmicas em: (i) graus-dia (GD) (OMETTO, 1981), que relaciona o acúmulo de temperaturas ocorridas entre um ou dois limites de temperatura-base (inferior, ou inferior e superior) e o crescimento de plantas; (ii) Unidades Fototérmicas (UF) (VILLA NOVA *et al.*, 1983), que considera os GD e o fotoperíodo; e (iii) o Índice Climático de Crescimento (ICC) (FITZPATRICK; NIX, 1973), que leva em consideração a R_g , um índice térmico de crescimento da planta e um fator de penalização hídrico, geralmente a relação entre a evapotranspiração real (ET_r) e a potencial (ET_p).

Como os valores exatos não são conhecidos, o uso de valores com pequenos desvios na modelagem do crescimento pode resultar em grandes erros nas estimativas de produção. Assim, é importante que na aplicação dos modelos sempre se considere a temperatura-base utilizada ou estimada pelo autor do modelo, pois apesar de ser considerada fixa para cada espécie, variações têm sido observadas entre trabalhos (Tabela 1).

Modelos recentes com boa capacidade preditiva da produção de forrageiras geradas por Araujo *et al.* (2013), Cruz *et al.* (2011), Pezzopane *et al.* (2012), Rodrigues (2004) e Tonato *et al.* (2010) estão sumarizados na Tabela 2. A temperatura média dos experimentos que geraram a base de dados destes modelos situou-se entre 16 e 26°C, aproximadamente.

Os modelos variam entre espécies e cultivares, no entanto, alguns foram agrupados para forrageiras com respostas semelhantes. Em geral os modelos gerados são lineares univariados, sendo, portanto, simples e de fácil aplicação. Os ajustes têm variado desde coeficientes de determinação (R^2) inferiores a 0,40 até 0,87, a depender do genótipo e da variável utilizada.

A síntese desses modelos (Tabela 2) permite afirmar que os de melhor ajuste (maior R^2) foram baseados em disponibilidade térmica e hídrica, com a variável evapotranspiração real (ET_r), ou temperatura, ou graus-dia associados ao um índice baseado no balanço hídrico (GD_{corr}).

Tabela 1. Temperatura-base inferior para diferentes gramíneas tropicais e subtropicais determinadas em condições de campo no Brasil.

Poácea	T _{bi} (°C)	Referência
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	17,2	Cruz <i>et al.</i> (2011)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	18,6	Rodrigues (2004)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	16,3	Lara (2007)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	15,0	Mendonça e Rassini (2006)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Arapoty	17,8	Rodrigues (2004)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Capiorã	18,3	Rodrigues (2004)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Xaraés	19,0	Rodrigues (2004)
<i>Brachiaria decumbens</i> cv. Basilisk	16,7	Mendonça e Rassini (2006)
<i>Pennisetum purpureum</i> cv. Napier	13,9	Mendonça e Rassini (2006)
<i>Pennisetum purpureum</i> cv. Napier	15,0	Villa Nova <i>et al.</i> (2007)
<i>Panicum maximum</i> cv. Mombaça	15,6	Araujo <i>et al.</i> (2013)
<i>Panicum maximum</i> cv. Tanzânia	15,0	Mendonça e Rassini (2006)
<i>Paspalum atratum</i> cv. Pojuca	15,6	Mendonça e Rassini (2006)
<i>Cynodon nlemfuensis</i> cv. Florico	11,5	Villa Nova <i>et al.</i> (2007)

Tabela 2. Modelos empíricos lineares univariados (Coeficiente angular: a. Coeficiente linear: b) correlacionando produção de matéria seca com temperatura ou variáveis relacionadas.

Poácea	Variável	a	b	R ²	Referência
<i>B. brizantha</i> cv. Marandu	Tn	11,93	-134,95	0,73	Cruz <i>et al.</i> (2011)
<i>B. brizantha</i> cv. Marandu	Tn _{corr}	5,78	-17,24	0,75	Cruz <i>et al.</i> (2011)
<i>B. brizantha</i> cv. Marandu	GD _{corr} *	12,9	6,52	0,75	Cruz <i>et al.</i> (2011)
<i>Brachiaria</i> Grupo 1 ^a	Tn	8,19	-94,92	0,55-0,50	Tonato <i>et al.</i> (2010)
<i>Brachiaria</i> Grupo 2 ^b	Tn	10,66	-128,07	0,55-0,60	Tonato <i>et al.</i> (2010)
<i>Cynodon</i> Grupo 1 ^c	Tn	9,06	-84,69	0,60-0,70	Tonato <i>et al.</i> (2010)
<i>Cynodon</i> Grupo 2 ^d	Tn	7,97	-67,01	0,60-0,70	Tonato <i>et al.</i> (2010)
<i>Panicum</i> Grupo 1 ^e	Tn	6,36	-55,22	< 0,40	Tonato <i>et al.</i> (2010)
<i>Panicum</i> Grupo 2 ^f	Tn	5,93	-29,15	< 0,40	Tonato <i>et al.</i> (2010)
<i>B. brizantha</i> cv. Marandu	Tn	0,98	-11,92	0,59	Rodrigues (2004)
<i>B. brizantha</i> cv. Arapoty	Tn	0,95	-10,30	0,64	Rodrigues (2004)
<i>B. brizantha</i> cv. Capiporã	Tn	1,10	-13,23	0,83	Rodrigues (2004)
<i>B. brizantha</i> cv. Xaraés	Tn	1,09	-13,55	0,74	Rodrigues (2004)
<i>P. maximum</i> cv. Mombaça	ΣUF	0,226	600,01	0,86	Araujo <i>et al.</i> (2013)
<i>P. maximum</i> cv. Mombaça	ΣICC	368,14	-311,94	0,83	Araujo <i>et al.</i> (2013)
<i>P. maximum</i> cv. Mombaça	ΣGD	11,52	-304,8	0,78	Araujo <i>et al.</i> (2013)
<i>P. maximum</i> cv. Tanzânia	ETr	34,73	-21,58	0,87	Pezzopane <i>et al.</i> (2012)
<i>P. maximum</i> cv. Tanzânia	GD _{corr} *	18,80	-17,02	0,84	Pezzopane <i>et al.</i> (2012)
<i>P. maximum</i> cv. Tanzânia	GD _{corr} **	18,90	-6,38	0,87	Pezzopane <i>et al.</i> (2012)
<i>P. maximum</i> cv. Tanzânia	ICC	330,09	-12,88	0,84	Pezzopane <i>et al.</i> (2012)

^a Marandu, Basilisk e Arapoty; ^b Capiporã e Xaraés; ^c Tifton 85 e Estrela; ^d Coastcross, Florico e Florona; ^e Atlas e Mombaça; ^f Tanzânia e Tobiatã; Tn_{corr}=Temperatura mínima corrigida por fator de penalização hídrica; GD_{corr}=Graus-dia (calculado com base na Tbi) corrigido por fator de penalização hídrica: *pela relação ETr/ETp e **pela relação Armazenamento atual/máximo do solo; ICC=índice climático de crescimento diário; ΣUF=soma diária de unidades fototérmicas; ΣICC=soma do ICC; ΣGD=soma dos graus-dia. Observação: (i) A variável resposta (y) é a taxa de acúmulo de forragem (kg [MS] ha⁻¹ dia⁻¹), exceto para os modelos de Araujo (2011), gerados com as somas diárias de todo o ciclo, em que a variável resposta (y) é a massa de forragem total em cada ciclo. (ii) Os valores de temperatura são dados em graus célsius (°C). (iii) Os dados de Rodrigues (2004) estão transformados pela raiz quadrada.

Quanto menor o intervalo de tempo utilizado para o cálculo da variável, melhor será a estimativa. O ideal é o uso de dados diários, porém, estes geralmente não estão disponíveis. Nos modelos de Cruz *et al.* (2011) e Pezzopane *et al.* (2012), o balanço hídrico foi realizado em escala de cinco dias. Entretanto, em muitas regiões não é possível a obtenção de dados climáticos diários. Se um técnico ou pecuarista deseja saber o potencial de produção de forragem em determinada região para avaliar a viabilidade de um projeto, necessita ter acesso aos dados de estações meteorológicas próximas. Se não for possível, as estimativas podem ser realizadas com base em dados de médias mensais, de mais fácil obtenção, mas a interpretação dos resultados deve ser feita com cautela. Meses de chuvas intensas e concentradas frequentes, por exemplo, podem gerar médias mensais de alta disponibilidade hídrica, mesmo que ocorram períodos de 15 a 20 dias sem chuvas. Neste caso, pode haver superestimativa do potencial produtivo.

Para suprir a falta de dados de estações meteorológicas locais, podem ser utilizadas bases de dados como a NASA Power (<https://power.larc.nasa.gov/>) e a Global Weather (<https://power.larc.nasa.gov/>), que utilizam a combinação de dados de estações meteorológicas, satélites meteorológicos, modelos matemáticos e sistemas de georreferenciamento que possibilitam a estimativa de dados locais em escala diária.

Por outro lado, nas áreas irrigadas parte-se do pressuposto que não há *deficit* hídrico, com reposição integral da evapotranspiração. Portanto, as simulações podem ser simplificadas ao uso da temperatura ou de graus-dia, e os erros oriundos da disponibilidade hídrica são reduzidos. Tal como discutido anteriormente, aplicações de modelos empíricos devem ser realizadas em situações semelhantes àquelas de obtenção do modelo.

Para exemplificar, pode-se considerar o potencial para diferentes regiões e tomar o modelo empírico de Pezzopane *et al.* (2012) para estimativa da produção de matéria seca de *P. maximum* cv. Tanzânia com base na evapotranspiração real (ETR) (Tabela 2). Foram realizadas estimativas para condições irrigadas e de sequeiro para as localidades de Presidente Prudente-SP, Uberaba-MG e Porto Nacional-TO (Figura 1). Considerando os dados climáticos normais com escala mensal (BD Clima, 2013), o modelo foi composto pela equação linear:

$$\text{TAF} = 34,73 \times \text{ETr} - 21,58 \quad (p < 0,01, r^2 = 0,87, \text{ amplitude de } 0,62 \text{ a } 4,02).$$

Em que:

TAF = taxa de acúmulo de forragem média (kg [MS] ha⁻¹ dia⁻¹); e

ETr = evapotranspiração real (mm).

Uma vez que no balanço hídrico utilizado calcula-se a ETR considerando o *deficit* hídrico (THORNTHWAITE; MATHER, 1955), estipulou-se que na condição irrigada não há *deficit* hídrico e a evapotranspiração real é igual a evapotranspiração potencial (ETr = ETp). Observa-se claramente o aumento da resposta das forrageiras à irrigação com o aumento da intensidade ou extensão de condições de alta temperatura e limitação hídrica, especialmente na primavera.

Em Porto Nacional (TO), o “inverno” apresenta temperaturas altas e um período seco. Por isso, a diferença de produção entre a condição irrigada e de sequeiro é bem superior à das demais localidades (inverno seco e frio).

No entanto, o ganho em produção de matéria seca necessário para viabilizar a implantação do sistema de irrigação deve ser convertido em desempenho animal por área. O ajuste deve ser realizado com aumento em taxa de lotação que, dentro de certos limites, proporcionará um resultado ótimo por área. Se a alteração em produção de forragem não for acompanhada de ajuste na taxa de lotação, o efeito será transferido ao desempenho dos animais. Neste exemplo, uma alta taxa de lotação poderia ser mantida com ganho de peso diário médio adequado na condição irrigada, mas não na condição de sequeiro.

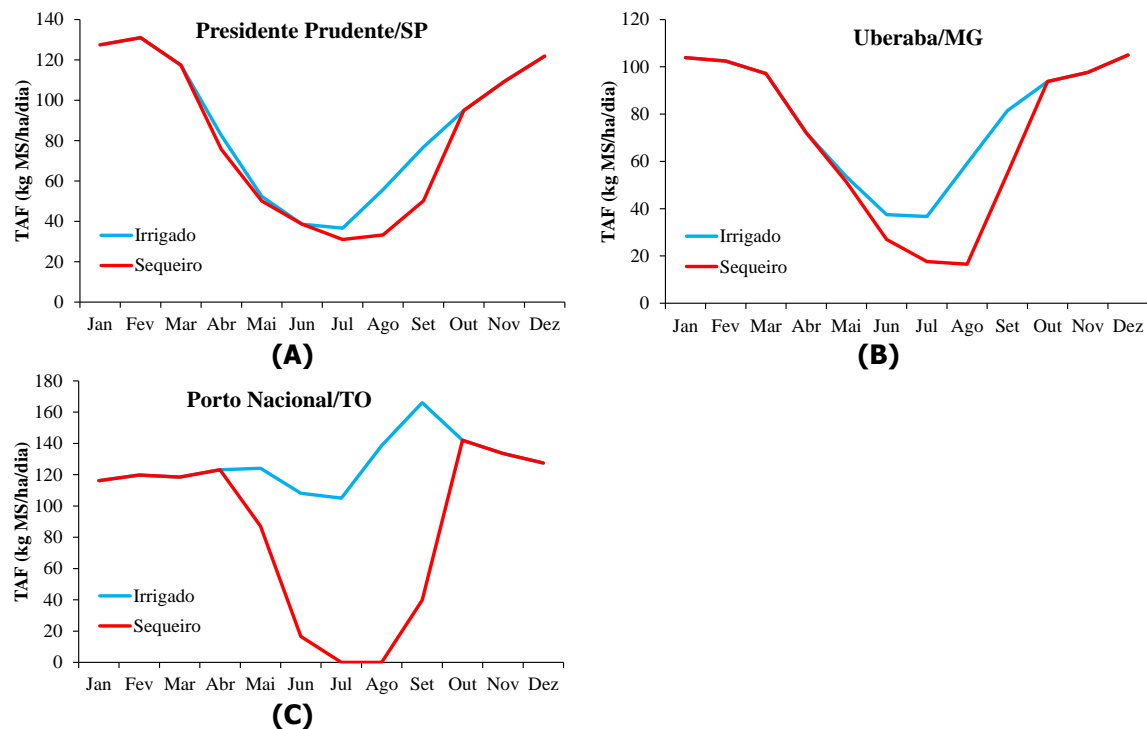


Figura 1. Taxa de acúmulo média mensal (kg [MS] ha dia⁻¹) do capim-Tanzânia simulada por modelo empírico (PEZZOPANE *et al.*, 2012) em condição irrigada e de sequeiro em três localidades: (A) Presidente Prudente, SP; (B) Uberaba, MG; e (C) Porto Nacional, TO. Dados climáticos: BD Clima (2013).

Em regiões com clima de inverno frio e seco, uma alternativa para aumento da produção de forragem é a sobressemeadura de espécies de inverno nas pastagens tropicais irrigadas. A sobressemeadura é utilizada há muito tempo na região Sul do Brasil, onde o inverno é chuvoso, mas passou a ser utilizada nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, principalmente em sistemas de produção de leite.

As espécies mais utilizadas das áreas de pastagens com sobressemeadura são a aveia preta (*Avena strigosa*) e o azevém anual (*Lolium multiflorum*) (MENDONÇA, 2021), mas há outras opções, como os cereais de duplo propósito utilizados na região Sul (trigo, aveia branca, cevada, centeio e triticale) (FONTANELI *et al.*, 2016). O uso de várias espécies hibernais colabora para equilibrar a oferta de forragem no período de estacionalidade das forrageiras tropicais, pois a produção de cada espécie ocorre em diferentes períodos: aveias são precoces (60% em junho e julho) e o azevém, tardio (70% entre agosto e setembro) (POSTIGLIONI, 1982).

Os dados provenientes do trabalho de Oliveira *et al.* (2005) mostram que o ganho em lotação animal de até 70% no período de outono-inverno, passando de 2,5-3,5 a 5-6 UA ha⁻¹.

Uma revisão de literatura feita por Rodrigues *et al.* (2011) tratando da sobressemeadura mostrou resultados diversos, de acordo com a combinação de forrageiras tropicais e hibernais. Os autores concluíram que os resultados são melhores em forrageiras tropicais e subtropicais de porte baixo (Ex.: gênero *Cynodon*) e com rebaixamento mais acentuado nas forrageiras de porte alto (Ex.: gêneros *Panicum* e *Pennisetum*).

Mais detalhes sobre a sobressemeadura e seus benefícios em sistemas de produção animal podem ser encontrados em uma extensa revisão sobre o tema no trabalho de Mendonça (2021).

1.4 Sistemas de irrigação mais utilizados em pastagem

Inicialmente, a irrigação de pastagens foi feita com sistemas de baixo nível tecnológico. Geralmente o sistema de irrigação apresentava equipamentos superdimensionados (aspersores, tubos, bomba, entre outros), alto consumo de energia por área, baixa uniformidade de distribuição, baixo custo de aquisição e implantação (principal atrativo para o produtor rural) e alto custo total (aquisição + implantação + financeiro + manutenção + mão de obra + energia).

A revolução que levou às melhorias significativas dos sistemas de irrigação utilizados em pastagens foi possível graças a cinco fatores: (i) evolução tecnológica dos equipamentos de irrigação; (ii) treinamento de projetistas por meio de empresas públicas e privadas; (iii) mudança na conjuntura econômica nacional (novas linhas de crédito, redução da inflação e dos juros para financiamento agrícola); (iv) treinamento de profissionais de assistência técnica e extensão rural voltados aos sistemas de produção animal; e (v) uso da Internet para ampla divulgação de conceitos adequados aos projetos de sistemas (vídeos, textos online, livros técnicos palestras, entre outros).

A evolução dos equipamentos de irrigação e o treinamento de projetistas possibilitaram o acesso do produtor rural a sistemas mais eficientes em termos de uso de água e energia.

As linhas de crédito (Pronaf, ModerInfra, entre outras) facilitam o acesso a recursos financeiros para a aquisição de sistemas de irrigação.

Tão importante quanto o acesso ao crédito é saber o momento adequado de solicitá-lo. O profissional de assistência técnica e extensão rural auxilia o produtor rural no monitoramento de seu sistema de produção, inclusive as condições financeiras de seu negócio. Assim, pode orientar o produtor a solicitar o crédito apenas quando o investimento for economicamente viável.

Finalmente, o uso adequado da Internet possibilita aos técnicos e produtores um amplo acesso a informações técnicas e a estudos de casos sobre a irrigação de pastagens (artigos técnicos e científicos, livros, palestras, vídeos, entre outros), bem como possibilitou a discussão e a troca de informações por meio de aplicativos de smartphones para comunicação rápida. Tal como em outros setores do agronegócio, essa conjuntura é única na história da irrigação e permite a rápida evolução que se atualmente vê.

Tal revolução tem levado à redução do custo total de irrigação (aquisição, implantação, financeiro, mão de obra e energia), aumentando a eficiência de distribuição de água, permitindo o emprego de técnicas de manejo de água na área irrigada e resultando em aumento da probabilidade de sucesso na irrigação de pastagens.

Basicamente, a irrigação em pastagens é feita por aspersão, principalmente por sistemas de aspersão convencional fixa e pivô central, mas também há pastagens irrigadas com autopropelido (carretel enrolador). Recentemente surgiram áreas de pastagem com irrigação localizada por gotejamento subsuperficial, principalmente em regiões de clima semiárido ou com grande competição pelo uso de água.

Neste trabalho serão apresentados e caracterizados os sistemas mais utilizados atualmente (aspersão convencional e pivô central).

1.5 Irrigação por aspersão

A maioria dos sistemas de irrigação utilizados em pastagens é composta por sistemas de aspersão convencional e pivôs centrais. De modo geral, a aspersão convencional é utilizada em áreas menores (até 40 ha) e com formato regular (quadrada ou retangular) ou irregular,

e praticamente em qualquer relevo (plano, ondulado e acidentado). Já o pivô central é o equipamento mais utilizado em grandes áreas (RICHTER, 2012).

Inicialmente, os sistemas de aspersão convencional eram móveis ou semifixos, e atualmente a maioria dos sistemas instalados é de aspersão fixa. Tais sistemas são comumente empregados em pequenas propriedades rurais, principalmente na produção de leite, cuja maioria tem área igual ou inferior a 20 ha na maior parte do Brasil (Tabela 3). Embora seja mais raro, tais sistemas também são instalados em áreas maiores (até 75 ha), principalmente aquelas com formato e/ou relevo que dificultem a utilização de pivôs centrais.

Tabela 3. Distribuição das propriedades produtoras de leite, no Brasil e por região (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017).

Classe de área (ha)	Área acumulada (%)					
	Brasil	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste
≤ 1	0,84	0,18	1,64	0,55	0,79	32,66
1 - 5	11,26	1,93	17,34	10,64	11,78	65,16
5 - 10	24,48	5,17	32,10	24,28	29,07	73,53
10 - 20	45,61	13,98	50,97	45,41	60,38	81,73
20 - 50	73,38	47,17	75,88	72,66	88,47	89,57
50 - 100	86,23	71,39	87,68	86,13	95,67	94,03
100 - 200	93,23	85,95	94,21	93,83	98,10	96,70
200 - 500	97,61	94,49	98,24	98,43	99,39	98,37
500 - 1000	99,00	97,39	99,42	99,54	99,78	99,15
1000 - 2500	99,73	99,20	99,87	99,94	99,96	99,63
2500 - 10000	99,97	99,93	99,99	100	100	99,88
≥ 10000	100	100	100	100	100	100

O pivô central é o sistema mais empregado em áreas superiores a 40 ha, devido à redução do custo fixo (aquisição e implantação), pois enquanto o comprimento da linha lateral (tubulação aérea) cresce linearmente (comprimento, em m), a área irrigada cresce ao quadrado (área, em m²).

1.5.1 Aspersão convencional fixa

Inicialmente, a irrigação por aspersão em pastagens foi feita com sistemas de aspersão convencional móvel ou semifixa, com linha principal fixa e linhas laterais móveis (tubulações em que estão os aspersores), aproveitando o conceito pré-existente utilizado em outras culturas (Figura 2). Tais sistemas têm baixo custo fixo (aquisição e implantação), e alto custo variável (manutenção, mão de obra e energia), em relação aos sistemas fixos. As avarias em tubulações são comuns, devido ao processo de desmontagem, transporte e remontagem.

Muitos sistemas eram montados sem projeto de dimensionamento, o que acarretava no uso de aspersores com alta pressão de serviço (≥ 40 mca¹), alta relação entre energia consumida e área irrigada (potência/área de 5-15 cv ha⁻¹) e alto custo operacional (mão de obra e energia).

¹ mca: metros de coluna de água (medida prática de pressão). 1 mca = 0,1 kgf cm⁻².

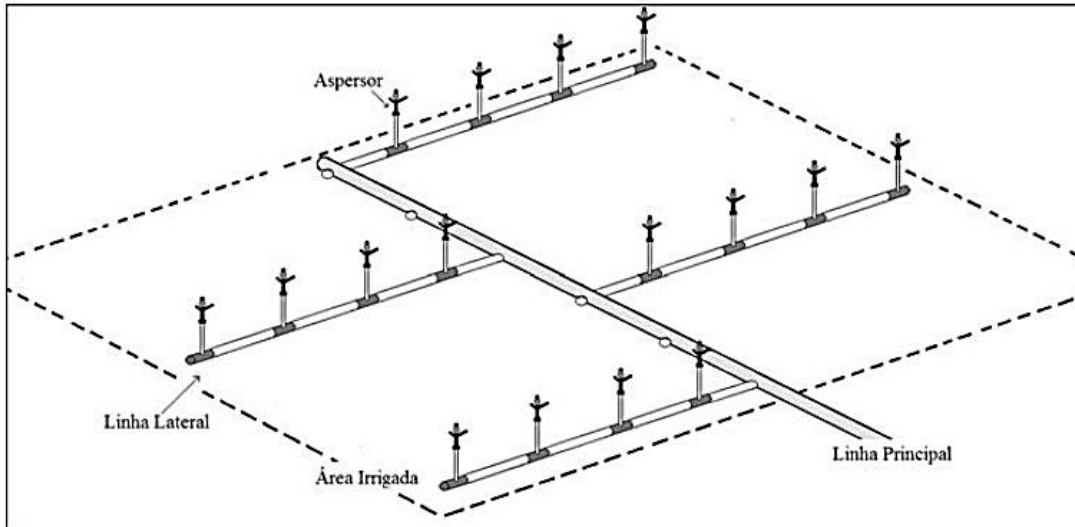


Figura 2. Esquema de um sistema de aspersão convencional semifixa (linhas laterais móveis) (BISCARO, 2009).

Os sistemas fixos passaram a ser utilizados para reduzir os custos de manutenção e operação. São compostos por linha principal enterrada (saída única de água), linhas de derivação (múltiplas saídas) e linhas laterais (geralmente múltiplas saídas) (Figura 3).

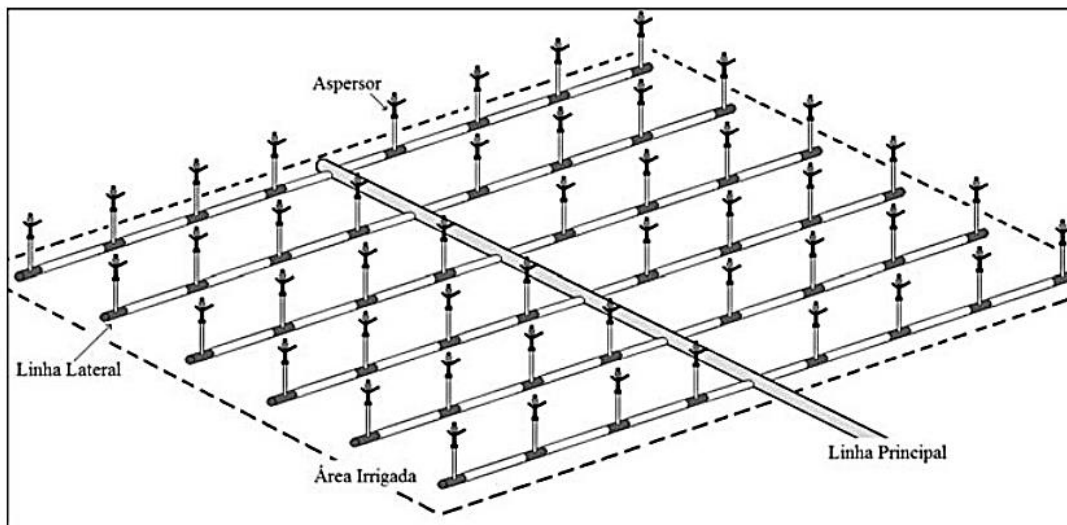


Figura 3. Esquema de um sistema de aspersão convencional fixa (BISCARO, 2009).

Tais sistemas têm maior custo fixo e menor custo variável que os sistemas móveis. Aproveitam conceitos empregados na irrigação localizada (cavaletes, linhas de derivação e distribuição de água em setores). São projetados para trabalhar com aspersores de baixa ou média pressão de serviço (10 a 30 mca), têm baixa relação potência/área ($1,0-2,5 \text{ cv ha}^{-1}$) e possibilitam operação automática, com acentuada redução do custo operacional (energia e mão de obra).

Um sistema que foi utilizado em muitas áreas durante a transição da aspersão semifixa para os sistemas fixos foi a aspersão em malha. Nesse sistema, duas tubulações de linhas laterais têm sua extremidade interligada (Figura 4), formando a "malha". Em cada malha é colocado apenas um aspersor. Como a vazão do aspersor é dividida em duas tubulações, pode-se utilizar aspersores com vazão relativamente alta em tubos de pequeno diâmetro (Ex. $3,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ em tubos de 32 mm) e o custo de implantação é reduzido em relação aos sistemas fixos com tampão final (fundo cego).

A aspersão em malha permite que os custos fixos (aquisição e implantação) e o custo de energia sejam mais baixos que nos demais sistemas fixos. Entretanto, o sistema já não tem sido tão utilizado por conta de dificuldades operacionais em áreas de pastejo rotacionado. O operador de campo deve fazer ao menos uma troca diária dos aspersores, o que demanda mais tempo e custo que nos sistemas em que os aspersores são fixos. O trabalho necessário na troca inclui a passagem por várias cercas que, inclusive, podem ser eletrificadas, aumentando a chance de o operador receber descargas elétricas (choques).

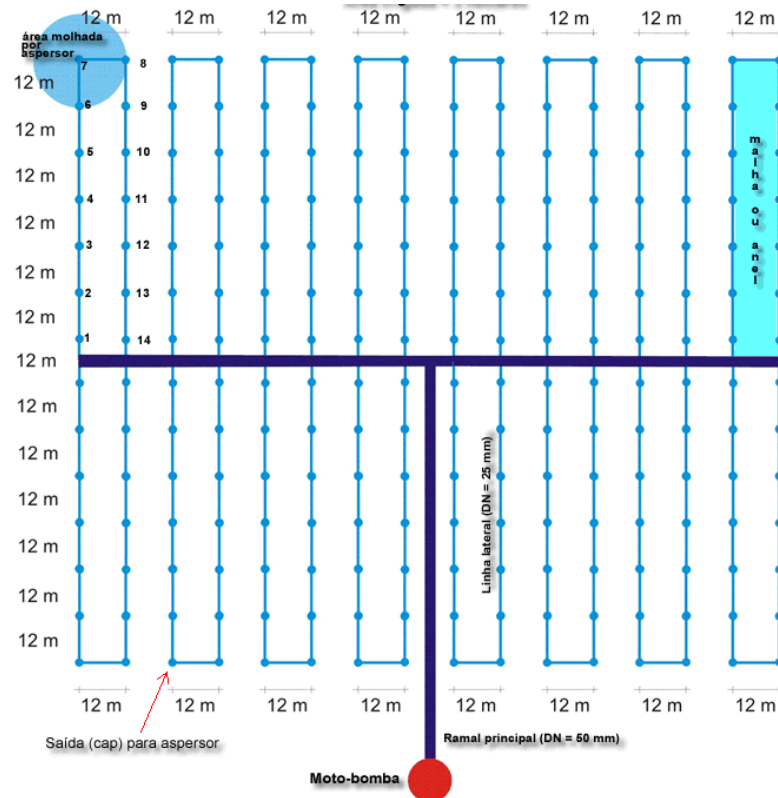


Figura 4. Esquema de um sistema de aspersão em malha (Rede Agronomia: <https://agronomos.ning.com/profiles/blogs/irrigacao-de-pastagens-por>).

Atualmente predomina o uso de aspersão setorizada, devido à praticidade de operação. A área é dividida em setores, que são irrigados individualmente e compostos por cavalete, linha de derivação e linhas laterais (Figuras 5 e 6).

Os setores podem ser divididos em duas (2) partes para reduzir a vazão em um ponto intermediário da linha principal (LP). No exemplo apresentado na Figura 5, o sistema tem 4 setores subdivididos e a vazão é reduzida a partir do ponto em que a LP é representada na cor azul claro. Tal redução de vazão resulta em menor diâmetro da tubulação a partir do ponto indicado, com redução da potência e do custo de aquisição do conjunto motobomba e do custo de energia.

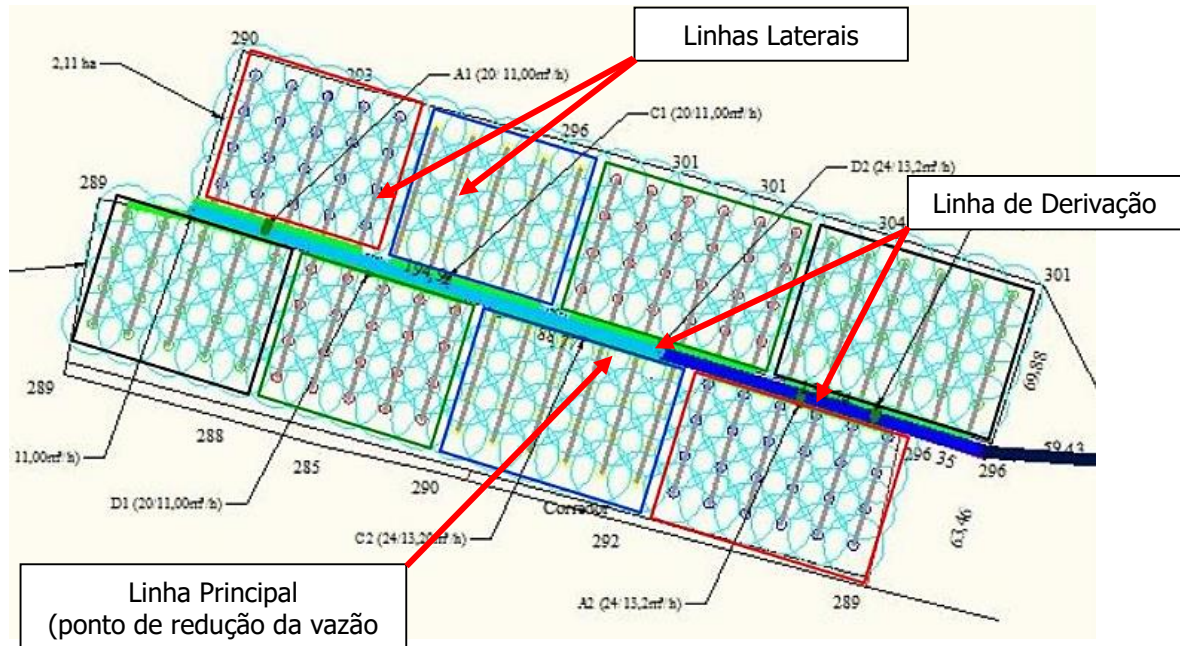


Figura 5. Esquema de sistema de aspersão convencional fixa, com setores distintos por cores e subdivididos (2 partes por setor) (IrrigaRural).

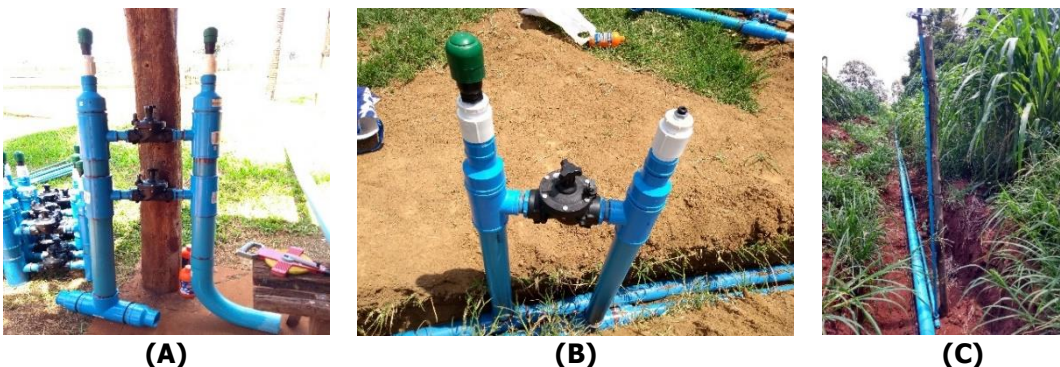


Figura 6. Componentes de um setor de sistema de aspersão convencional fixa: cavalete duplo (A); cavalete simples e linha de derivação (B); e linha lateral (C). Fontes: IrrigaRural e Senninger.

1.5.2 Pivô central

O sistema de irrigação por pivô central tem baixo custo operacional em relação à aspersão convencional. Suas principais características são a baixa relação potência/área (≤ 3 cv ha⁻¹), alta uniformidade de distribuição de água e emissores (*sprayers*) de baixa pressão de serviço (4,2 a 14 mca), e a possibilidade de operação automática. Mesmo em operação manual, o pivô central permite que uma pessoa opere vários equipamentos, garantindo um baixo custo de mão de obra.

O sistema é instalado em áreas que possibilitem formar círculos ou semicírculos irrigados, em áreas com declividade até 30%, embora seja mais comum em terrenos com declividade inferior a 20%. O sistema pode ser fixo (ponto central único) ou móvel (rebocável com trator, geralmente com 2-3 pontos de engate) (Figura 7).

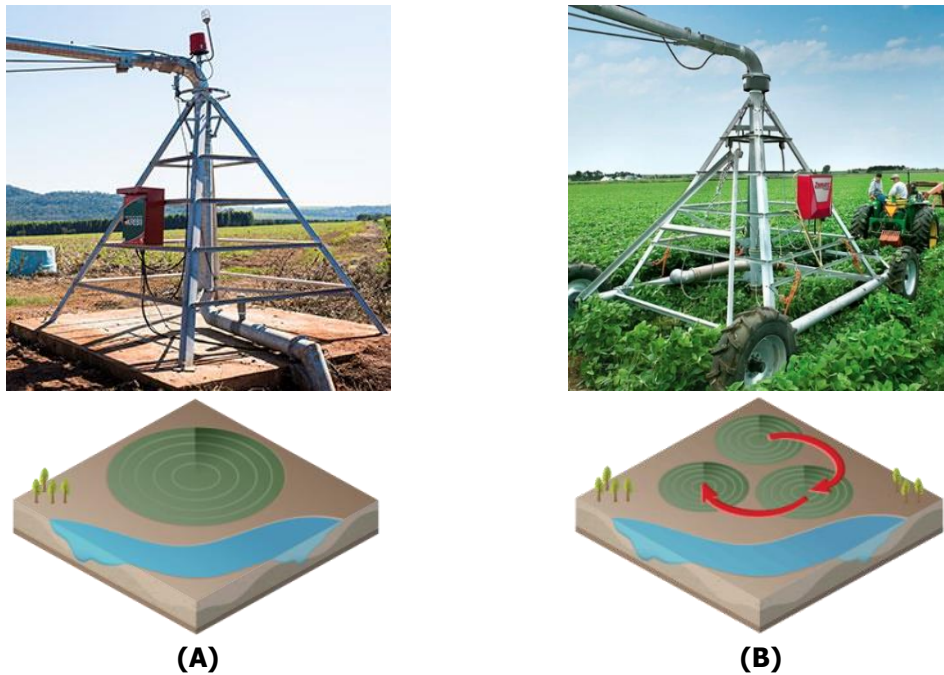


Figura 7. Pivô central com base fixa (A) e rebocável (B). Fontes: Lindsay²; Bauer³; Krebs⁴.

Além das funções básicas (irrigação e fertirrigação), o pivô central também tem sido usado como suporte para bebedouros e para o sombreamento (Figura 8).

As funções adicionais melhoram as condições de bem-estar animal, contribuem para o aumento da produtividade animal e são um forte apelo junto ao consumidor brasileiro e aos países importadores de carne e leite.



Figura 8. Bebedouros e tela sombrite instalados na estrutura de uma torre de pivô central (Senninger).

1.6 Fertirrigação e uso racional de efluentes em pastagens

Um dos maiores desafios para a agropecuária nesta década será o de desenvolver sistemas sustentáveis de produção de alimentos e fibras em quantidade e qualidade

² <https://www.lindsay.com/lam/pt/irrigacao/marcas/zimmatic/produtos/pivos-laterais/pivos-moveis/>

³ <https://www.bauer-br.com/pt/produtos/irrigacao/sistemas-pivo>

⁴ <http://krebs.com.br/pivos/>

suficientes, com mínimo impacto ambiental. Tecnologias que levam à intensificação têm sido empregadas para conseguir aumento de produtividade e melhoria na qualidade de vários produtos agropecuários. A produção bovina vem se beneficiando de tais tecnologias, tais como melhoramento genético e seleção de espécies forrageiras e de animais, pastejo rotacionado, adubação por balanço de massa, implantação de áreas fertirrigadas e qualificação de mão de obra.

Ao implantar projetos de irrigação de pastagens, é importante incluir a fertirrigação. Entende-se por fertirrigação a técnica de adubação que utiliza a água de irrigação para levar nutrientes ao solo cultivado, provenientes de fertilizantes químicos ou efluentes líquidos diluídos. Quando se trabalha com efluentes, deve-se assegurar que não possuem elementos químicos que possam causar contaminação no meio ambiente.

Essa técnica tem as seguintes vantagens: maior parcelamento da adubação ao longo do ano; redução custo de mão de obra e uso de máquinas; redução do tempo para os nutrientes chegarem à zona radicular e conseqüente maior eficiência no uso de fertilizantes; possibilidade de utilizar o sistema de fertirrigação para aplicação de produtos (inseticidas e fungicidas de controle biológico, inoculantes etc.). Observa-se, porém, que a uniformidade de distribuição dos nutrientes está atrelada à a uniformidade de aplicação de água pelo equipamento de irrigação.

Os fertilizantes a serem utilizados devem apresentar boa solubilidade. O nitrogênio, o fósforo e o potássio são os nutrientes mais aplicados em sistemas de fertirrigação, mas qualquer elemento químico de interesse pode ser aplicado via fertirrigação.

Os equipamentos para fertirrigação dependem de cada projeto, mas a composição básica inclui turbina de ar (mecanismo de homogeneização), duas (02) caixas de 4 a 5 m³, motobomba injetora e medidor volumétrico (Figura 9).



Figura 9. Vista geral do sistema de fertirrigação composto por turbina de ar para homogeneização da solução, caixas para diluição, motobomba injetora e medidor volumétrico.

É importante fazer o monitoramento da solução do solo, que permite realizar alterações rápidas nas quantidades de nutrientes aplicados, se necessário. Dentre os equipamentos de monitoramento da concentração de elementos químicos no solo, destacam-se os extratores de solução de solo, compostos por tubos de PVC soldável de 1/2", cápsula de cerâmica porosa de 3/4", borrachas de vedação em silicone e tampão de proteção. Com o auxílio de uma bomba de vácuo é possível coletar amostras da solução de solo e realizar as análises pertinentes ao manejo da fertilidade do solo e da fertirrigação (ANDRADE; DRUMOND, 2012; MELO *et al.*, 2020).

Outro ponto importante é que a fertirrigação permite aplicar efluentes diluídos na água de irrigação, propiciando o reúso (fertirrigação com águas residuárias). O termo reúso é usado para descrever a reutilização da água e segundo a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (2014), o reúso da água é a utilização dessa substância por mais de uma vez. Tal fenômeno ocorre espontaneamente na própria natureza, no ciclo hidrológico ou através da ação humana, de forma planejada. O reúso planejado da água pode ser feito para irrigação de várias culturas, recarga de lençol freático, geração de energia, reabilitação de copos d'água e industrial. Portanto, o reúso pode ser uma contribuição significativa para economia de água no planeta.

Estudos comprovam que a aplicação de águas residuárias tem potencial para promover melhoria nas propriedades físicas, biológicas e químicas do solo. Portanto, sua utilização pode favorecer tanto o produtor quanto o meio ambiente. O tratamento biológico avançado é de extrema complexidade e alto custo operacional. Já a disposição final da água residuária por fertirrigação é mais segura, mais simples operacionalmente e tem custo operacional desprezível quando comparado aos processos biológicos.

O reúso também pode ajudar em situações de crise hídrica. As projeções de crescimento das demandas futuras por água feitas em pesquisas mostram que a demanda hídrica no Brasil em 2050 será 55% maior (AYARS *et al.*, 2015), indicando uma condição de escassez iminente em várias bacias hidrográficas.

Quando se trabalha com reúso em fertirrigação, deve-se fazer uma análise química, física e biológica do efluente a ser aplicado na fertirrigação. Os elementos químicos presentes deverão ser totalmente consumidos como nutrientes para o crescimento e produção das plantas forrageiras. Assim, não haverá residual passível de lixiviação para camadas do solo abaixo da zona radicular, com risco de atingir o lençol freático.

Os maiores benefícios desta prática são o menor risco de eutrofização dos recursos hídricos destinados ao consumo humano, a garantia da disponibilidade permanente de água para a produção agrícola e a economia de fertilizantes químicos.

Gentil *et al.* (2016) realizaram um estudo sobre fertirrigação de pastagem usando efluente de graxaria nas condições climáticas de Rio Paranaíba-MG (Altitude 1.100 m), e concluíram que as aplicações dessa água residuária contribuíram com aumento na produção de matéria seca do Capim Vaquero, chegando a 45 t/ha.ano de MS. Os teores de nitrato ficaram abaixo do nível crítico de contaminação das águas, e os teores fósforo total e nitrogênio total no solo e no lixiviado não representaram riscos de contaminação de solo ou de águas subsuperficiais, evidenciando o potencial do uso desse efluente em fertirrigação de pastagens.

Uma preocupação quando se trabalha com pastagem fertirrigada é a vida do solo (qualidade biológica). Gouvêa *et al.* (2015) avaliaram o efeito da fertirrigação com água residuária de agroindústria sobre a atividade microbiana de um solo sob pastagem, por meio da taxa de respiração, da biomassa microbiana, do carbono orgânico total do solo e do quociente metabólico e microbiano. Não foi observado efeito nocivo da aplicação da água residuária agroindustrial sobre a atividade microbiana nas diferentes profundidades do solo dessa pastagem. Não foram detectadas diferenças significativas da atividade microbiana entre áreas de pastagem fertirrigada com esse efluente e de pastagem fertirrigada com água e adubo químico equivalente ao efluente em elementos químicos, evidenciando que a água residuária não provocou impacto negativo sobre a microbiota do solo.

1.7 Produção intensiva de volumoso para confinamento

Com implantação de projetos fertirrigados em pastagens e o aumento do número de confinamentos no Brasil, cresceu o interesse de técnicos de produtores para a produção de

volumoso de capim, por ter boa qualidade nutricional e menor custo que as alternativas (silagem de milho, cana etc.). A produtividade de forragem é alta e a técnica de ensilagem dessas forrageiras é dominada por técnicos consultores e equipes das propriedades rurais. As forrageiras do gênero *Panicum* são as mais ensiladas (Ex.: Mombaça, Zuri e Paredão). O custo de produção de uma tonelada de silagem desses capins fertirrigados com adubo químico está em torno de 40% do custo de produção de silagem de milho. Quando se utiliza efluentes na fertirrigação, esse custo é reduzido e pode chegar a 20-30% do custo de produção da silagem de milho, considerando a mesma condição de produção.

Para conseguir altas produtividades de silagens dessas forragens é necessário que a irrigação, a adubação e o manejo sejam estabelecidos de acordo com o potencial de produção para a região do projeto. Em áreas irrigadas, o maior problema é em relação à adubação.

De forma geral, as recomendações de adubação de pastagens no Brasil têm sido baseadas em boletins de recomendações de calagem e adubação para diversas culturas, publicadas por instituições de pesquisa. Os mais utilizados são o Boletim 100 (VAN RAIJ *et al.*, 1996) e a 5ª aproximação (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 1999), que se baseiam nos critérios de classes de fertilidade do solo e níveis tecnológicos para sugerir os níveis de adubação. Entretanto, tal abordagem pode não ser a mais adequada em sistemas de produção intensiva.

Drumond e Aguiar (2005) observam que muitos avanços têm ocorrido em termos de adubação de pastagens, especialmente em sistemas mais tecnificados, tais como em pastagens irrigadas. Vários trabalhos têm questionado o uso dos boletins citados para a recomendação de adubação em sistemas de produção intensiva bovina, propondo modelos matemáticos de predição, tais como o Balanço de Massa e o Modelo Dinâmico. As vantagens desses modelos são: possibilidade de se fazer balanços nutricionais para produtividades específicas, considerando a complexidade da dinâmica dos nutrientes na pastagem (principalmente devido à ação dos animais); e a associação das adubações à evolução do sistema produtivo.

Os modelos dinâmicos são modelos mecanicistas (ou de processos) e situam-se na área de modelagem matemática, uma área da análise de sistemas. Esses modelos compilam praticamente todos os processos que ocorrem no sistema solo-planta-animal, por meio de sistemas computacionais com centenas de equações. Esses modelos têm grande poder de previsão e simulação do sistema produtivo, por isso, seu uso tem crescido em áreas comerciais de produção altamente tecnificada. Exemplos de modelos são o APSIM e o GRAZPLAN/AUSFARM, desenvolvidos na Austrália, o CROPGRO/DSSAT desenvolvido nos Estados Unidos e o PASIM desenvolvido na União Europeia. A limitação desses modelos é a necessidade de parametrização nas condições brasileiras e a exigência de muitos dados de entrada, que incluem características físicas e químicas do solo, manejo vegetal e dados meteorológicos.

O Método do Balanço de Massa permite a realização do balanço nutricional considerando muitos processos e exige menor quantidade de informação, podendo ser utilizado no Brasil por meio de cálculos que proporcionam bons resultados com reduzida margem de erro (ANDRADE; DRUMOND, 2012).

Nesse modelo considera-se a produção anual de forragem desejada, a eficiência de colheita, os índices de ciclagem via fezes e urina (quando em pastejo), incluindo taxas de decomposição e distribuição do material na área, os índices de colheita (sistemas de corte de forragem), índices de ciclagem da forragem não colhida (material morto oriundo do resíduo, senescência, acamamento, material coletado e não ingerido, etc.) e os índices de eficiência dos nutrientes em formas orgânicas (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC, 1994; DRUMOND; AGUIAR, 2005; AGUIAR, 2011; DUBEUX JR. *et al.*, 2011; ANDRADE; DRUMOND, 2012).

Para que não ocorra empobrecimento do solo e se consiga manter o nível alto de produção da forrageira, é necessário repor ao solo as quantidades de nutrientes retirados e matéria orgânica. Deve-se levar em consideração a dinâmica na pastagem, pela ação dos animais sobre a reciclagem da planta, contabilizar a massa de cada nutriente nos componentes solo-planta-animal, as variáveis de acréscimos e perdas. Ao final desse processo, gera-se uma estimativa da quantidade necessária de acréscimo de cada elemento químico (adubação). A reposição desses elementos tem que vir da adubação química e/ou do uso de biofertilizantes (efluentes). O Método do Balanço de Massa é indicado por considerar a interação entre componentes do sistema e prever alterações no fluxo de nutrientes à medida que fatores de produção são modificados por meio do manejo.

Em trabalho realizado por Melo *et al.* (2019), os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu e Zn estimados pelo conjunto de resultados, de forma ponderada, de efluentes de confinamento bovino foram: 669,5 mg/L de N; 102,3 mg/L de P; 580,4 mg/L de K; 97,3 mg/L de Ca; 90,5 mg/L de Mg; 12,3 mg/L de S; 0,02 mg/L de Cu e 0,01 mg/L de Zn. Tais valores apontam a capacidade de reposição de nutrientes no solo com reúso, pois cada 100 m³ desse efluente contém, aproximadamente, 68 kg de N; 10,5 kg de P; 59 kg de K; 10 kg de Ca; 9 kg de Mg; 1,2 kg de S; 0,002 kg de Cu e 0,001 kg de Zn por dia, evidenciando o potencial de adubação com esse efluente.

Os custos de produção devem merecer especial atenção em projetos de fertirrigação de pastagens, pois determinam as ações de técnicos e produtores no planejamento da atividade pecuária. As Tabelas 4 e 5 contêm o resumo dos principais custos de produção, tanto para recria/engorda em condição de pasto fertirrigado, quanto para produção de silagem de capim.

A utilização de efluentes na fertirrigação diminui sensivelmente o custo da arroba produzida. Efluentes de bovinocultura e suinocultura são mais estáveis que efluentes da agroindústria, pelas variações que normalmente ocorrem dentro do processamento industrial.

Nesses sistemas intensivos com fertirrigação com adubação química, o custo da arroba produzida é em torno de 31 dólares. Quando se utiliza água residuária de bovinos e suínos na fertirrigação, o custo da arroba produzida é cerca de 15 dólares, uma redução da ordem de 50% no custo de produção da arroba.

A redução do custo de produção de volumoso resulta em redução do custo total de produção em confinamentos de machos, fêmeas (novilhas) e vacas com bezerros, beneficiando produtores que incorporam tal tecnologia. Vêm crescendo no país o número de confinamentos de vacas para produção de bezerros (Figuras 10 e 11), sistema em que é possível desmamar um bezerro entre 7 a 8 meses de vida com 270 a 300 kg de peso vivo e custo de produção entre 200 e 250 dólares.

Tabela 4. Custos de produção em condição de pastagem fertirrigada para recria/engorda com adubação química, sem suplementação energética dos animais.

CUSTOS FIXOS		%
Equipamento de irrigação		7,50
Cerca elétrica e convencional		0,50
Implantação da pastagem (sementes, fertilizantes, etc.)		0,60
Manejo de animais e equipamentos manejo da irrigação		0,20
Rede de água		0,20
Outros (mão de obra para instalação)		0,20
Total Custos Fixos		9,20
CUSTOS OPERACIONAIS		%
Fertilizantes		46,40
Energia elétrica		19,50
Calagem (com operação)		1,50
Manutenção de equipamentos		1,60
Sal mineral		2,00
Mão de obra (1 pessoa)		5,00
Outros (controle de plantas daninhas, pragas e manutenção de cercas)		1,90
Total Custos Variáveis		77,90
OUTROS		%
Juros ao ano sobre o investimento (7%)		11,50
Administração/outros do custo operacional (2%)		1,40
Total Outros		12,90

Tabela 5. Custos de produção em condição de pastagem fertirrigada para recria/engorda com adubação com efluente* e complementação com adubação química, sem suplementação energética dos animais.

CUSTOS FIXOS		%
Equipamento de irrigação		14,50
Cerca elétrica e convencional		1,00
Implantação da pastagem (sementes, fertilizantes, etc.)		1,20
Manejo de animais e equipamentos manejo da irrigação		0,50
Rede de água		0,40
Outros (mão de-obra para instalação)		0,50
Total Custos Fixos		18,10
CUSTOS OPERACIONAIS		%
Fertilizantes		8,20
Energia elétrica		24,20
Calagem (com operação)		3,10
Manutenção de equipamentos		3,00
Sal mineral		5,10
Mão de obra (1 pessoa)		10,00
Outros (controle de plantas daninhas, pragas e manutenção de cercas)		3,90
Total Custos Variáveis		57,50
OUTROS		%
Juros ao ano sobre o investimento (7%)		23,50
Administração/outros do custo operacional (2%)		0,90
Total Outros		24,40

* Foi tomado como base o efluente de confinamento tratado com biodigestor.



Figura 10. Vista geral de um confinamento que utiliza silagem de *Panicum* como volumoso.



Figura 11. Vista geral de um confinamento de vacas para produção de bezerros.

1.8 Manejo racional da irrigação de pastagens

Inicialmente o manejo da irrigação era feito por monitoramento da umidade do solo, da estimativa do consumo de água por meio de dados climáticos ou de sistemas mistos (solo + clima).

No monitoramento via solo, sensores de umidade (sondas TDR - Reflectância no domínio do tempo ou FDR- Reflectância no domínio do tempo, etc.) ou dispositivos de medição do potencial matricial de água no solo (tensiômetros) são instalados para fazer medições em camadas, dentro e abaixo da zona radicular. Com o auxílio de curvas características de retenção de água no solo pode-se determinar a lâmina d'água a ser repostada para elevar a umidade à máxima capacidade de retenção do solo (capacidade de campo).

No monitoramento via clima utiliza-se estações meteorológicas para medição de temperatura e umidade relativa do ar, precipitação pluvial, radiação solar e fluxo de calor no solo. Esses dados são utilizados em modelos de estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc). A partir das estimativas de ETc e de chuvas, utiliza-se o balanço hídrico de cultura para determinar a lâmina d'água de irrigação que faça a umidade do solo retornar à capacidade de campo.

O sensoriamento remoto e as tecnologias de processamento de imagens possibilitam o desenvolvimento de novos métodos de estimativa de evapotranspiração em dosséis vegetais, tais como: Índice de Balanço de Energia de Superfície – SEBI (CHOUDHURY; MENENTI, 1993), o Sistema de Balanço de Energia de Superfície – SEBS (SU, 2002); Índice de Balanço de Energia de Superfície Simplificado – S-SEBI (ROERINK *et al.*, 2000); Algoritmo de Balanço de Energia de Superfície para Terra – SEBAL (BASTIAANSSEN *et al.*, 1998a e 1998b); Mapeamento de Evapotranspiração com Calibração Internalizada – METRIC (ALLEN *et al.*, 2007); e Balanço de Energia de Superfície Simplificado Operacional – SSEBop (SENAY *et al.*, 2013).

Embora facilitem a estimativa da evapotranspiração e o balanço hídrico, os métodos baseados em sensoriamento remoto e imagens de satélite têm limitações similares, tais como a impossibilidade de obtenção de dados em dias nublados, falta de precisão e exatidão em certos parâmetros utilizados nos modelos e carência de informações para certas escalas de mapeamento (TANG *et al.*, 2009). Vários dos métodos citados fazem correções com dados meteorológicos na tentativa de reduzir ou eliminar os problemas citados.

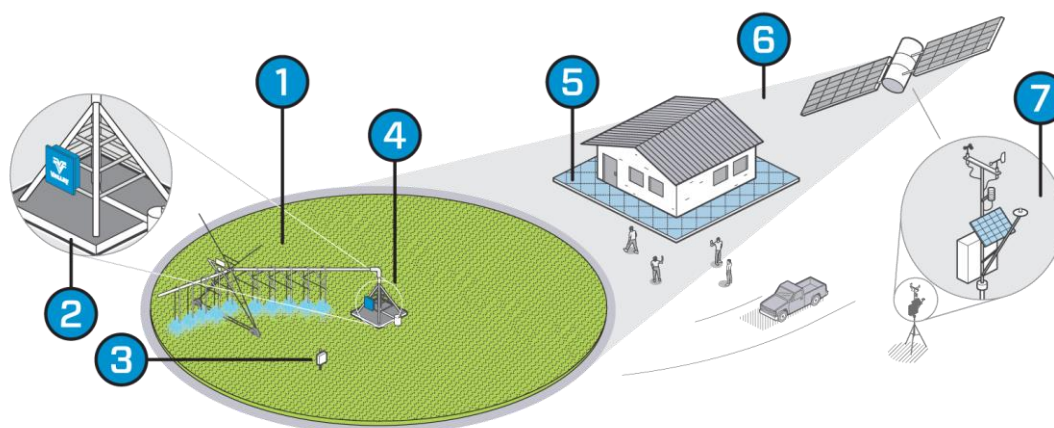


Figura 12. Esquema de um sistema de manejo em sistema de irrigação por pivô central. [1] Informações sobre a propriedade, dados de campo e preferências do proprietário, compilação de dados por softwares e estimativa de necessidade hídrica. [2] Sensoriamento remoto aplicado ao manejo. [3] Sensores de umidade do solo. [4] Equipamento de irrigação (pivô central). [5] Suporte técnico e treinamento contínuo. [6] Controle da irrigação de precisão (taxa variável). [7] Estação meteorológica automática (Irriger/Valley (2020) – <http://www.irriger.com.br/pt-BR>).

A evolução tecnológica e a revolução digital têm disponibilizado novas ferramentas para o manejo da irrigação, tais como sistemas de monitoramento por imagens (satélites e drones), modelos de estimativa de evapotranspiração por imagens, softwares para computadores e aplicativos para smartphones. A junção métodos, equipamentos e técnicas de estimativa e/ou determinação permite melhorias significativas no manejo da irrigação e dos cultivos irrigados.

O processo de tomada de decisão também evoluiu, passando de totalmente local e individual (técnico e/ou equipe da fazenda) para um sistema misto (equipe da fazenda e empresa de monitoramento e assessoria técnica). Um exemplo desse tipo de sistema de manejo e assessoria técnica é apresentado na Figura 12. O trabalho envolve a disponibilização

de hardware (estação meteorológica, sensores, sistema de transmissão e central de armazenamento de dados), software (operação de equipamentos de campo, coleta, transmissão e processamento de dados, sistemas de alerta meteorológico e orientação para o manejo da irrigação) e assistência técnica (visitas de campo e reuniões para discussão e ajustes).

O sistema apresentado neste exemplo inclui: (i) visitas presenciais de implantação e acompanhamento; (ii) teste de campo para levantamento de características físico-hídricas; (iii) configuração de plataforma de manejo e treinamento de equipe da fazenda; (iv) auditoria online quinzenal utilizando a plataforma de manejo; (v) envio e disponibilização automática de dados climáticos; (vi) relatórios periódicos mensais de consumo de energia e da safra; (vii) sensoriamento remoto (Imagens NDVI⁵, ocorrência e intensidade de *deficit*); (viii) aplicativos para celular (monitoramento, alertas etc.); e (ix) previsão climática para os próximos 7 dias (ETc, chuvas, geada e graus-dia).

1.9 Perspectivas e tendências futuras de irrigação de pastagem

O avanço da tecnologia e inovação da Indústria 4.0 tem influenciado a modernização do setor agrícola. Sensores, softwares, Big Data, Internet das Coisas (IoT) e inteligência artificial (AI) estão entre as tecnologias que têm ganhado espaço nas atividades agrícolas, caracterizando o que se tem chamado de "Agricultura 4.0".

O uso das tecnologias digitais na agricultura possibilita a realização e o acompanhamento de processos de forma mais eficiente, garantindo precisão nas mais diversas ações. Na irrigação, a tecnologia favorece o gerenciamento inteligente e sustentável da água, garantindo informações precisas referentes ao momento (quando) e à lâmina d'água (quanto) de irrigação.

Assim, nasceu um novo conceito na agricultura irrigada: "Irrigação de precisão", que consiste no gerenciamento da variabilidade da disponibilidade hídrica no campo por meio de ferramentas da tecnologia digital, otimizando o manejo da irrigação. Imagens de satélite aliadas contendo as bandas espectrais adequadas, aliadas a sistemas de monitoramento inteligente em campo, geram dados referentes ao solo, à lavoura e ao clima. Devidamente processados, esses dados resultam em informações técnicas que facilitam a tomada de decisão do produtor irrigante.

Empresas líderes do setor têm investimentos crescentes em soluções inteligentes para o gerenciamento da irrigação e em equipamentos mais eficientes, alcançando bons resultados. Entre os produtos já lançados no mercado estão: (i) plataformas intuitivas para o gerenciamento da irrigação e da fertirrigação; (ii) ferramentas que possibilitam ligar e desligar um sistema de irrigação de forma remota; e (iii) softwares que permitem ao produtor monitorar e gerenciar a irrigação a partir de smartphones.

Além das citadas, há iniciativas de associar fontes renováveis de energia a sistemas de irrigação, o que agrega mais sustentabilidade à agricultura irrigada. Alguns exemplos recentes são pivôs com fonte de energia solar fotovoltaica e sistemas híbridos de energia (diesel + solar fotovoltaica, ou rede elétrica nacional + solar fotovoltaica).

1.10 Considerações finais

A tecnologia digital traz uma nova força à agricultura irrigada. Ao associar inovação ao manejo agrônômico, o manejo da irrigação no contexto da agricultura 4.0 possibilita maior

⁵ Índice de Vegetação da Diferença Normalizada.

assertividade na tomada de decisão, promovendo o uso racional da água, a redução de custos e aumentos de produtividade e rentabilidade.

A evolução dos sistemas de irrigação fez com que eles passassem de meros equipamentos mecânicos de aplicação de água a sistemas interativos, com tendência a uma crescente autonomia e a uma possível transformação em robôs.

Os sistemas de irrigação tendem a evoluir para sistemas multi-tarefa, executando funções como irrigação, nutrição, quimificação, bioirrigação, monitoramento de cultivos e animais (câmeras comuns e/ou sensores multiespectrais) e câmeras de vigilância (furtos, incêndios, entre outros), controle de pragas e doenças, sombreamento e fornecimento de água aos animais.

Em síntese, na Agricultura 4.0, todo equipamento que vai ao campo, ou que está sempre nele, deve gerar informações para suporte a decisões e colaborar na realização das tarefas relativas às decisões tomadas.

Referências

- AGUIAR, A.P.A. **Correção e adubação do solo da pastagem**. Uberaba: A.P.A. AGUIAR, 244p., 2011.
- ALLEN, R.G.; TASUJMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, 2007.
- ANDRADE, A.S.; DRUMOND, L.C.D. Adubação de pastagens irrigadas: princípios e recomendações. **Revista Cerrado Agrociências**, 2012.
- ARAUJO, L.C.; SANTOS, P.M.; RODRIGUEZ, R.; PEZZOPANE, J.R.M.; OLIVEIRA, P.P.A.; CRUZ, P.G. Simulating Guinea grass production: empirical and mechanistic approaches. **Agronomy Journal**, Madison, v.105, p.61-69, 2013.
- AYARS, J.E.; FULTON, A.; TAYLOR, B. Subsurface drip irrigation in California-Here to stay? **Agricultural Water Management**, vol.157, issue C, p.39-47, 2015.
- BANCO DE DADOS CLIMÁTICOS DO BRASIL. Disponível em: <http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/>. Acesso em: 4 nov. 2013.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, Wageningen, v.212 - 213, p.198-212, 1998a.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 2: Validation. **Journal of Hydrology**, Wageningen, v.212-213, p.213-229, 1998b.
- BERTOLETE, L.E.M. **Sobre semeadura de forrageiras de clima temperado em pastagens tropicais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia de Botucatu, 84p., 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/104139>. Acesso em: 4 nov. 2013.
- BAUER. Disponível em: <https://www.bauer-br.com/pt/produtos/irrigacao/sistemas-pivo>. Acesso em: 30 abr. 2021.
- BISCARO, G.A. **Sistemas de irrigação por aspersão**. Dourados: Editora da UFGD, 134p., 2009.
- CHOUDHURY, B.J.; MENENTI, M. **Parameterization of land surface evaporation by means of location dependent potential evaporation and surface temperature range**. Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra): London, v.212, p.561-568, 1993.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Passo Fundo, SBCS - Núcleo Regional Sul, 224p., 1994.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª aproximação. Viçosa: CFSEMG, 359p., 1999.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Água de Reúso** - Modelos de Comercialização. SABESP. Disponível em: http://site.sabesp.com.br/uploads/file/ap_sabesp_div_grand_cons_leste.pdf. Acesso em: 20 nov. 2014.

CRUZ, P.G.; SANTOS, P.M.; PEZZOPANE, J.R.M.; OLIVEIRA, P.P.A.; ARAUJO, L.C. Modelos empíricos para estimar o acúmulo de matéria seca de capim-marandu com variáveis agrometeorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.7, p.675-681, 2011.

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D.A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: III. Modeling of root growth and other belowground processes, limitations of the models, and the future of modeling in agriculture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55, p.58-61, 1998a.

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D.A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J.A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55, p.46-50, 1998b.

DRUMOND, L.C.D.; AGUIAR, A.P.A. **Irrigação de Pastagem**. Uberaba, 210p., 2005.

DUBEUX JR., J.C.B.; SANTOS, M.V.F.; LIRA, M.A.; MELLO, A.C.L.; SILVA, H.M.S.; LIRA, C.C. A ciclagem de nutrientes no contexto do manejo das pastagens. In: SIMPÓSIO DE FORRAGICULTURA E PASTAGENS, 8., Lavras, 2011. **Anais**, Lavras: UFLA. 196p., p.79-98, 2011.

FITZPATRICK, E.A.; NIX, H.A. The climatic factor in Australian grassland ecology. In: MOORE, R.M. (Ed.). **Australian grasslands**. Canberra: Australian National University Presschap, v.1, p.3-36, 1973.

FONTANELI, R.S.; MEINERZ, G.R.; SANTOS, H.P.; BIAZUS, V.; FAVERO, D.; REBECHI, I.D.A. A contribuição das forrageiras de inverno para a pecuária de leite. In: VILELA, D.; FERREIRA, R.P.; FERNANDES, E.N.; JUNTOLLI, F.V. (Ed.). **Pecuária de leite no Brasil: cenários e avanços tecnológicos**. Brasília: Embrapa, p.239-253., 2016.

GENTIL, F.H.; DRUMOND, L.C.D.; CARVALHO, A.M.X. **Lixiviação de nutrientes e alteração de propriedades químicas do solo submetido a aplicação de água residuária de graxaria**. 25p., 2016. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Produção Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa. Rio Paranaíba: UFV, 2016.

GOUVÊA, M.M.; PEREIRA, M.C.; DRUMOND, L.C.D. **Efeito da fertirrigação com água residuária de agroindústria sobre a atividade microbiana de um solo sob pastagem**. 23p., 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba: UFV, 2015.

GRABLE, A.R. The future of applied plant growth modeling. In: WISIOL, K.; HESKETH, J.D. (Ed.). **Plant growth modeling for resource management: current models and methods**. Boca Raton: CRC Press, p.141-156, 1987.

HOOGENBOOM, G. Contribution of Agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p.137-157, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo agropecuário, Rio de Janeiro, IBGE, 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9827-censo-agropecuaria.html?=&t=o-que-e>. Acesso em 20 jul. 2019.

IRRIGER/VALLEY. 2020. Disponível em: <http://www.irriger.com.br/pt-BR>. Acesso em 30 abr. 2021.

KREBS. Disponível em: <http://krebs.com.br/pivos/>. Acesso em: 30 abr. 2021.

LARA, M.A.S. **Respostas morfofisiológicas de cinco cultivares de *Brachiaria* spp. às variações estacionais da temperatura do ar e do fotoperíodo**, 91p., 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

LINDSAY. Disponível em: <https://www.lindsay.com/lam/pt/irrigacao/marcas/zimmatic/produtos/pivos-laterais/pivos-moveis/>. Acesso em: 30 abr. 2021.

MELO, C.C.F.; DRUMOND, L.C.D.; CARVALHO FILHO, A. **Fertirrigação de pastagem com efluente de bovinocultura e interações com o sistema solo-planta**. 43p., 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Gráfica UFV VII, UFV CRP, 2019.

MELO, M.C.; GUIMARÃES, L.M.; SILVA, P.L.; CAMARGO, D.D.; DRUMOND, L.C.D. Crescimento e produtividade de *Brachiaria* adubada e irrigada por gotejamento subsuperficial. **Irriga**, v.25, p.10-27, 2020.

MENDONÇA, F.; RASSINI, J. Temperatura-base inferior e estacionalidade de produção de gramíneas forrageiras tropicais. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, **Circular técnica**, 459p., 2006.

MENDONÇA, F.C. **Irrigação de pastagens: Pesquisa, desenvolvimento tecnológico e transferência de tecnologia**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021.

OLIVEIRA, P.P.A.; PRIMAVESI, A.C.; CAMARGO, A.C.; RIBEIRO, W.M.; SILVA, E.T.M. Recomendação da sobressemeadura de aveia em pastagens tropicais ou subtropicais irrigadas. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste. **Comunicado Técnico** 61, 2005.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 440p., 1981.

PEZZOPANE, J.R.M.; SANTOS, P.M.; MENDONÇA, F.C.; ARAUJO, L.C.; CRUZ, P.G. Dry matter production of Tanzania grass as a function of agrometeorological variables. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, p.471-477, 2012.

POSTIGLIONI, S.R. Comportamento da aveia, azevém e centeio na região dos Campos Gerais, PR. Londrina, IAPAR, **Boletim técnico**, n.14, 18p., 1982.

RICHTER, L.A. Irrigação de pastagens. In: FONTANELI, R.S.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S. (Ed.). **Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região Sul-Brasileira**. 2. Ed. Passo Fundo: Embrapa Trigo, p.487-507, 2012. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/li/li01-forrageiras/cap17.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2020.

RODRIGUES, D.A.; AVANZA, M.F.B.; DIAS, L.G.G.G. Sobressemeadura de aveia e azevém em pastagens tropicais no inverno: revisão de literatura. **Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária**, Garça, v.9, n.16, 2011.

RODRIGUES, D.C. **Produção de forragem de cultivares de *Brachiaria brizantha* (Hochst. Ex A. Rich) Staf e modelagem de respostas produtivas em função de variáveis climáticas**, 94p., 2004. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

ROERINK, G.J.; SU, Z.; MENENTI, M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth Part B Hydrology Oceans and Atmosphere**, v.25, n.2, p.147-157, 2000.

SENAY, G.B.; KAGONE, S.; SINGH, R.K.; GOWDA, P.H. Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. **Journal of the American Water Resources Association**, v.49, n.3, p.577-591, 2013.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, Wageningen, v.1, n.6, p.85-99, 2002.

TANG, Q.; GAO, H.; LU, H.; LETTENMAIER, D.P. **Remote Sensing: Hydrology**. Progress in Physical Geography, Seattle, v.4, n.33, p.490-509, 2009.

TEH, C. **Introduction to mathematical modeling of crop growth: how the equations derived and assembled into a computer model**. Boca Raton: Brown Walker Press, 256p., 2006.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modeling: a mathematical approach to plant and crop physiology**. Caldwell: The Blackburn Press, 669p., 1990.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p., 1955.

TONATO, F.; BARIONI, L.G.; PEDREIRA, C.G.S.; DANTAS, O.D.; MALAQUIAS, J.V. Desenvolvimento de modelos preditores de acúmulo de forragem em pastagens tropicais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, p.522-529, 2010.

VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. **Boletim Técnico**, 100. Campinas: IAC, 285p., 1996.

VILLA NOVA, N.A.; CARRETERO, M.V.; SCADUA, R.A. Um modelo de avaliação do crescimento de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) em termos da ação combinada do fotoperíodo e da temperatura do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2, Campinas. **Anais**. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, p.31-48, 1983.

YARS, J.E.; FULTON, A.; TAYLOR, B. Subsurface drip irrigation in California - Here to stay? **Agriculture Water Management**, v.157, p.39-47, 2020.

CAPÍTULO 2

2 IRRIGAÇÃO DO CAFEIEIRO

André Luís Teixeira Fernandes e Eusímio Felisbino Fraga Júnior

Resumo

A cafeicultura brasileira apresenta grande importância na geração de empregos, recursos e divisas, em várias regiões brasileiras, em sua maioria, com cultivo em condições de sequeiro. Porém, nos últimos anos, tem se observado que a irrigação é cada dia mais usada pelos cafeicultores brasileiros, principalmente nas regiões onde o *deficit* hídrico é mais pronunciado. Hoje, o parque cafeeiro irrigado já conta com 450 mil hectares. O aumento do interesse pelos cafeicultores à irrigação é devido a vários fatores, dentre os quais se destacam: a expansão da cafeicultura para novas fronteiras; a evolução da técnica da irrigação; a diminuição dos custos dos sistemas de irrigação e a mentalidade do cafeicultor no sistema de produção café, priorizando a eficiência e a qualidade da produção. Existem diferentes sistemas de irrigação que podem ser utilizados, sendo que a escolha do mais adequado depende de uma série de fatores, destacando-se o tipo de solo, a topografia, o tamanho da área, os fatores climáticos, os fatores relacionados ao manejo da cultura, o *deficit* hídrico, a capacidade de investimento do produtor e o custo do sistema de irrigação. A determinação da época da irrigação e da quantidade de água a ser aplicada pode ser feita com o monitoramento da planta, do solo ou do clima. A cafeicultura brasileira é uma das mais tecnologicamente desenvolvidas do mundo, pois alia altas produtividades à excelente qualidade do café produzido. Esta superioridade é alcançada devido ao clima favorável, mecanização em, praticamente, todas as etapas de produção, irrigação e modernas práticas fitossanitárias, culturais e nutricionais.

2.1 Introdução

O café é uma das bebidas mais consumidas no mundo (LOFTFIELD *et al.*, 2018). Segundo Tverdal *et al.* (2020), globalmente o café é a bebida estimulante mais frequentemente consumida e, provavelmente, é a mais segura do ponto de vista alimentar. DaMatta (2004) comenta que o café é uma das mais importantes *commodities* na agricultura internacional e representa significativa fonte de recursos para países latino-americanos, africanos e asiáticos.

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café e em breve será também o maior consumidor. A área plantada com a cultura de café em 2019 (espécies arábica e robusta) no país totaliza 2,16 milhões hectares, equivalente à cultivada em 2018. Desse total, 319,72 mil hectares (14,8%) estão em formação e 1,84 milhão de hectares (85,2%) em produção (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2019).

A cafeicultura brasileira apresenta grande importância na geração de empregos, recursos e divisas, sendo bastante diversificada, com particularidades regionais. O Cerrado brasileiro abrange mais de 200 milhões de hectares, distribuídos nos Estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Tocantins, Bahia, Piauí, Maranhão e Distrito Federal, e tem se destacado com produção superior a 5 milhões de sacas por ano, principalmente de *Coffea arabica* L. A cafeicultura, nesta região, é caracterizada por apresentar produtividade acima da média nacional e utilizar, de maneira mais eficiente, insumos agrícolas, irrigação, genótipos apropriados e mecanização, dentre outras práticas.

A expansão da cafeicultura no país foi alavanca na década de 1970 com a elaboração do zoneamento climático para os cafés arábica e robusta, realizado por pesquisadores do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Este trabalho determinou áreas com melhores condições de temperatura e disponibilidade de água, restringindo áreas mais sujeitas à geada ou com deficiências hídricas, das quais no final da década de 80 passaram a ser cultivadas mediante a irrigação, de forma que a irrigação não é uma prática recomendada extensivamente para regiões zoneadas como climaticamente aptas à cafeicultura. No entanto, essas regiões sofrem com o efeito das estiagens prolongadas nos períodos críticos de demanda de água pelo cafeeiro, promovendo queda de produção e de qualidade, indicando a necessidade e a viabilidade da adoção da prática da irrigação.

De acordo com Nikolskii *et al.* (2019), a irrigação aumenta a produtividade agrícola e afeta inevitavelmente as propriedades do solo. Quando a água de irrigação é de boa qualidade e não causa salinidade, sodicidade ou contaminação do solo, e quando não há erosão do solo, espera-se, como regra geral, um aumento gradual da fertilidade do solo sob condições de irrigação.

O aumento de produtividade é resultado dos incrementos tecnológicos adotados pelos produtores desde 1984, principalmente nas chamadas novas fronteiras do café, aumentando o uso da mecanização, o desenvolvimento de novas variedades e também a adoção de técnicas de irrigação (VOLSI *et al.*, 2019).

Especificamente para café, a irrigação tem proporcionado resultados altamente positivos na produtividade das lavouras, seja nas já existentes, recuperando-as de 10 a 15 para 30 a 35 sacas por hectare, seja nas novas, com média de 45 a 55 sacas anuais por hectare (SANTINATO *et al.*, 2008). Desta forma, tem sido observado que a irrigação é cada dia mais usada pelos cafeicultores do Cerrado e do Brasil.

2.2 Cafeicultura irrigada

A irrigação do cafeeiro tem recebido grande destaque nos últimos anos, sendo tal interesse devido a vários fatores, dentre os quais se destacam: a expansão da cafeicultura para novas fronteiras; a evolução da técnica da irrigação; a diminuição dos custos dos sistemas de irrigação e a mentalidade do cafeicultor no sistema de produção café, priorizando a eficiência e a qualidade da produção (MANTOVANI; SOARES, 2003; SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 2008; SANTINATO; FERNANDES, 2012; FERNANDES *et al.*, 2012; GARCIA *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2018; HO *et al.*, 2018; FERNANDES *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2019; VICENTE *et al.*, 2018; COSTA *et al.*, 2020). No Brasil, 449.282,8 ha já são irrigados por diferentes sistemas, sendo estes distribuídos nas diferentes regiões cafeeiras do País, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Áreas irrigadas nas principais regiões cafeeiras do Brasil (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2020; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021).

Cultivo de café	Área Total (ha)	Área Irrigada (ha)	% Irrigada
Brasil	1.927.356,0	449.282,8	23,3
Acre	1.047,0	0,0	0,0
Alagoas	0,0	0,0	0,0
Amazonas	4.622,0	0,0	0,0
Bahia	124.500,0	45.753,6	36,7
Ceará	1.447,0	0,0	0,0
Distrito Federal	410,0	293,5	71,6
Espírito Santo	384.828,0	207.741,5	54,0
Goiás	7.470,0	7.460,1	99,9
Maranhão	0,0	0,0	0,0
Minas Gerais	1.054.911,0	134.183,1	12,7
Mato Grosso do Sul	258,0	0,0	0,0
Mato Grosso	11.814,0	1.025,0	8,7
Pará	257,0	0,0	0,0
Paraíba	0,0	0,0	0,0
Pernambuco	1.326,0	0,0	0,0
Piauí	0,0	0,0	0,0
Paraná	35.700,0	143,0	0,4
Rio de Janeiro	12.892,0	263,0	2,0
Rio Grande do Norte	0,0	0,0	0,0
Rondônia	72.189,0	43.238,0	59,9
Roraima	0,0	0,0	0,0
Rio Grande do Sul	0,0	0,0	0,0
Santa Catarina	0,0	0,0	0,0
Sergipe	0,0	0,0	0,0
São Paulo	213.685,0	8.782,0	4,1
Tocantins	0,0	0,0	0,0

2.3 Investimentos na irrigação do cafeeiro

Para produzir café, são necessários 30 meses de intenso trabalho de preparo de solo, correção de solo, plantio, tratos culturais, fitossanitários e nutricionais etc., até que seja possível colher a primeira safra. Nestes 30 meses, são gastos em torno de R\$ 25.000,00 por hectare. Porém, se houver problema de falta de água numa fase fenológica crítica, como floração e granação, a safra pendente pode ser muito prejudicada. Aí, todo o investimento fica comprometido. Dependendo do ano e do *deficit* hídrico, o cafeicultor tem prejuízos tão altos que compromete as próximas safras, às vezes promovendo o abandono do cafeicultor da atividade.

A alternativa mais viável para reduzir estes riscos é a irrigação, pois possibilita que a maior causa de queda de produtividade do café seja abolida, conforme Figura 3. Na Figura 1, podemos ver que as principais causas de quebra de produtividade na lavoura cafeeira são decorrentes da falta de chuva ou irrigação (56%) ou do excesso hídrico (17%), o que explica o expressivo aumento nas áreas irrigadas de café no Brasil.

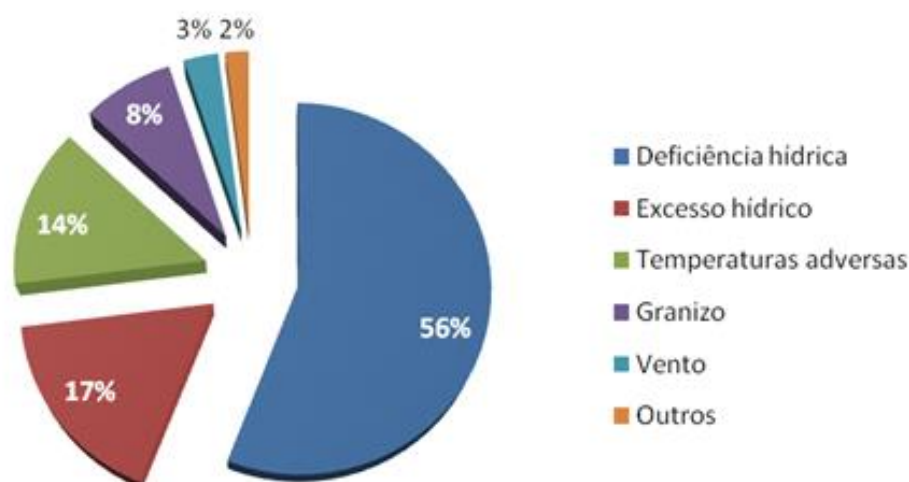


Figura 1. Principais causas de quebra de produtividade na cafeicultura (RODRIGUES *et al.*, 2014).

Os cafezais irrigados estão mais concentrados nos estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia, Goiás e, em menor proporção, em Mato Grosso, Rondônia, São Paulo e Paraná. A irrigação tem sido utilizada mesmo nas regiões consideradas tradicionais para o cafeeiro, como o sul de Minas Gerais, Zona da Mata de Minas Gerais, Mogiana Paulista, Espírito Santo, com resultados excepcionais de produtividade.

Trabalhos de pesquisa desenvolvidos nas regiões de Lavras e Viçosa, em Minas Gerais, consideradas aptas climaticamente ao cultivo do cafeeiro, sem a necessidade de irrigação, demonstram que o aumento de produtividade média com o uso da irrigação (médias de pelos menos três safras) tem sido de 50%, quando comparada com as lavouras de sequeiro.

É importante salientar que, embora a irrigação seja viável nestas regiões, o benefício do uso desta tecnologia é mais evidente em regiões mais quentes, onde a temperatura média mensal dificilmente fica abaixo dos 19° C, como as novas fronteiras do café - Barreiras, Luiz Eduardo Magalhães e Cocos, na Bahia.



Na Tabela 2, é possível verificar a divisão da cafeicultura brasileira em regiões, de acordo com a temperatura. As regiões podem ser classificadas em "frias", "médias" e quentes. A irrigação tem proporcionado melhores resultados de produtividade nas regiões quentes, seguido pelas médias e, por último, nas frias.

Especificamente na região do Triângulo Mineiro (área do cerrado de Minas Gerais), a definição das estações climáticas, com verão quente e úmido e inverno ameno e seco (condições importantes para a produção de excelente qualidade de café), constitui-se no grande trunfo do Cerrado. Esta condição climática ocorre pelo fato de o Cerrado estar em área continental, o que possibilita padrões de chuva diferentes dos que ocorrem em outras regiões produtoras de café, no Brasil, que sofrem influência direta das massas oceânicas (FERNANDES *et al.*, 2012). As médias de produtividade do café do Cerrado ficam entre as maiores do Brasil, especialmente quando se utiliza a irrigação (em 2018, a produtividade das áreas de cerrado do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba foi de 37,73 sacas beneficiadas/hectare, superior à média brasileira, de 31,72 sacas).

Vários experimentos têm sido conduzidos nas diferentes regiões cafeeiras, objetivando, principalmente, avaliar o efeito da irrigação na produtividade e qualidade do cafeeiro, sendo vários deles relacionados ao impacto da imposição de estresse hídrico na produtividade/qualidade do café.

Tabela 2. Classificação das regiões cafeeiras do Brasil de acordo com as temperaturas médias mensais.

Classificação das regiões	Temperatura média mensal (°C)											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Regiões quentes (ano todo > 19°C) Catalão (GO), Brasília (DF), Barreiras (BA)												
Regiões médias (jun. e jul. < 19°) Patrocínio (MG), Araguari (MG), Bonfinópolis (MG), Paracatu (MG), Marília (SP)												
Regiões frias (mai. a ago. < 19° C) Londrina (PR), Franca (SP), Varginha (MG), Carmo do Paranaíba (MG)												

 Temperaturas abaixo de 19°C
 Temperaturas acima de 19°C

Existem diferentes sistemas de irrigação que podem ser utilizados, sendo que a escolha do mais adequado depende de uma série de fatores, destacando-se o tipo de solo, a topografia, o tamanho da área, os fatores climáticos, os fatores relacionados ao manejo da cultura, o *deficit* hídrico, a capacidade de investimento do produtor e o custo do sistema de irrigação.

Além disso, deve-se ter em mente também que é grande o volume de água exigido na irrigação e, por isso, a necessidade de otimizar a utilização deste recurso é um dos aspectos mais importantes que deverá, também, ser considerado no momento de decidir pelo método e pelo sistema de irrigação a ser utilizado.

Em geral, a irrigação do cafeeiro é feita por dois métodos: aspersão e irrigação localizada, conforme será visto no item 4. Os sistemas de aspersão utilizados na irrigação desta cultura são os seguintes: aspersão convencional móvel (com aspersores pequenos, médios e canhões) ou fixa (que inclui o sistema de aspersão em malha), autopropelido e pivô central. Para a irrigação localizada, o sistema mais utilizado é o gotejamento, havendo, porém, regiões que utilizam a microaspersão, na forma de emissores chamados *microjets*. Existem também os sistemas modificados, como os tubos perfurados a laser (popularmente conhecidos como *tripas*), ainda com grande utilização no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, em Minas Gerais.

Em função de aspectos relacionados ao consumo de energia, exigência de mão-de-obra e outros aspectos operacionais, os sistemas mais viáveis de irrigação por aspersão têm sido o convencional (principalmente do tipo malha) e o pivô central. Já com relação à irrigação localizada, os sistemas mais utilizados são o gotejamento, por suas características técnicas que permitem uma irrigação com grande precisão, economia de água e energia, e as fitas de polietileno (sistema também conhecido como "tripa"), principalmente pelo menor custo de implantação.

Na Figura 2 estão dispostos custos de implantação atualizados dos principais sistemas de irrigação para o cafeeiro. Pode-se observar que, para irrigar a lavoura, o produtor tem opções que variam de U\$ 566,00 a 1.800,00/ha.

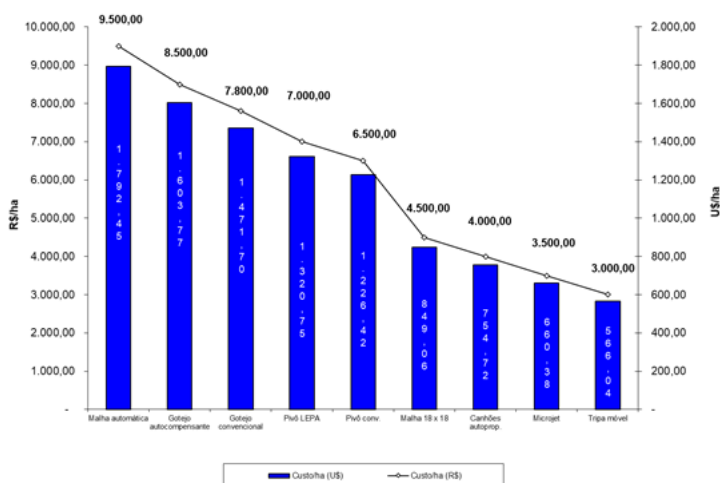


Figura 2. Custos de instalação dos principais sistemas de irrigação do cafeeiro (Conversão fevereiro de 2021 - U\$ 1,00 = R\$ 5,30).

Na Tabela 3, consta uma comparação dos custos de produção e lucratividade em lavouras em produção de café, por ano, irrigadas e sem irrigação, média de 4 safras, na região do cerrado mineiro. O resultado econômico da lavoura irrigada é de quase R\$ 20.000,00 ha⁻¹, comparado com cerca de R\$ 11.000,00 na área de sequeiro. Estes resultados são mais expressivos em regiões médias e quentes, comparando-se com as regiões frias. Mas nas regiões frias, conforme já dito, a irrigação é uma excelente garantia de produtividade em anos com deficits hídricos em fases fenológicas cruciais ao cafeeiro.

Tabela 3. Comparação de custos de produção e lucratividade na cultura do café cultivado no cerrado mineiro, média de 4 safras.

Componentes de custos	Irrigado (R\$)	Sequeiro (R\$)
Administração	1.500,00	1.100,00
Gestão técnica	65,00	40,00
Adução via Solo	2.800,00	2.800,00
Adução via Folha	325,00	365,00
Controle Pragas e Doenças	1.400,00	1.350,00
Controle Plantas Daninhas	600,00	508,46
Tratos Culturais	510,00	92,54
Irrigação	750,00	-
Colheita	1.650,00	1.750,00
Pós-Colheita	870,00	670,00
Comercialização	270,00	340,00
Depreciação	2.150,00	1.750,00
Remuneração	900,00	700,00
C.T.	13.790,00	11.466,00
Produtividade (média de 4 biênios)	55	38
Lucratividade (1 saca de 60 kg = R\$ 600,00)	33.000,00	22.800,00
Resultado (R\$/ha)	19.210,00	11.334,00

A composição dos custos nas lavouras irrigadas e de sequeiro é similar, com pequenas diferenças. Na Figura 3 constam as percentagens dos custos em lavouras irrigadas.

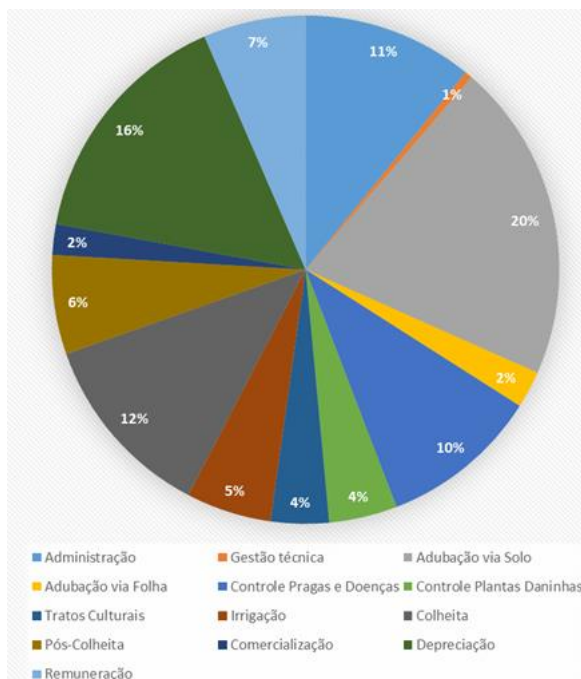


Figura 3. Composição dos custos de produção de lavouras irrigadas (A) e de sequeiro (B).

Até mesmo pelos resultados obtidos, há regiões onde a irrigação ocupa toda a área de café plantada, como Araguari (MG), no Triângulo Mineiro, como Barreiras, São Desidério e Cocos, na Bahia. Em outras regiões, as áreas irrigadas são menores, como Monte Carmelo (cerca de 70%) e Sul de Minas (menos de 10%). Porém, pelos resultados excepcionais obtidos nas últimas safras, o aumento da procura por sistemas de irrigação tem sido expressivo em todas as regiões cafeeiras do Brasil.

2.4 Sistemas de irrigação para o cafeeiro

Basicamente, os sistemas de irrigação para o cafeeiro podem ser divididos em dois grandes grupos: sistemas de irrigação com aplicação da água em área total e sistemas de irrigação com aplicação localizada da água (SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 2008), que molham apenas parte da área onde a cultura está implantada, conforme as Figuras 4 a 10.

2.4.1 Pivô central

Os primeiros pivôs centrais utilizados para café foram adaptados de outras lavouras, com irrigação em área total, ou seja, tanto nas linhas de café quanto nas entrelinhas. Apesar de viabilizar a cafeicultura empresarial nas regiões de cerrado, o sistema pivô central "convencional" ainda apresentava o inconveniente da aplicação de grandes volumes de água e com irrigação das entrelinhas do café, exigindo controle mais intensivo do mato.

A partir dessas dificuldades, surgiu uma inovação, adaptada da irrigação de pomares de citros nos Estados Unidos, com emissores capazes de irrigar somente a faixa de absorção radicular das plantas de citros. A partir desta tecnologia, pesquisadores e consultores brasileiros desenvolveram uma técnica extremamente interessante para a irrigação do cafeeiro com o pivô central, com plantio realizado em círculo, com emissores localizados sobre as linhas de café, denominados LEPA (SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 2002), sigla que representa, em inglês, *Low Energy Precision Application*, ou seja: aplicação precisa de água com baixo consumo de energia, já que a pressão requerida é menor.

2.4.2 Aspersão convencional e em malha

Existem diferentes tipos de sistema de aspersão quanto à manipulação de seus componentes (tubos, conexões e aspersores), sendo eles: portátil, semifixo e fixo. Uma inovação que tem apresentado bons resultados na irrigação do cafeeiro é uma adaptação no sistema convencional de aspersão, o sistema de aspersão em malha (os ramais são conectados em sua extremidade para aumentar a uniformidade da pressão na rede hidráulica).

2.4.3 Autopropelido convencional

Consiste num aspersor tipo canhão montado em um veículo equipado com mecanismo autopropulsor que por meio da movimentação hidráulica de um carretel, enrola um cabo de aço capaz de deslocar o sistema ao longo da faixa de solo a ser irrigada.

2.4.4 Carretel enrolador

Mais moderno que o anterior, irriga uma faixa de terra continuamente, pelo deslocamento de um canhão hidráulico montado sobre rodas, conectado na extremidade de uma mangueira. Neste equipamento, apenas a mangueira é movimentada.

2.4.5 Tubos perfurados a laser ou “tripa”

Trata-se de uma combinação de aspersão convencional com irrigação localizada, onde jatos de água oriundos de pequenos orifícios (menores que 1 mm e perfurados a LASER na mangueira), irrigam as faixas de solo. As “tripas” são colocadas próximas às saias dos cafeeiros (com apenas um orifício de saída) ou no meio da entrelinha (dois orifícios de saída).

Devido ao seu baixo custo de implantação, esse sistema tem sido largamente utilizado em algumas regiões do Brasil, como Araguari, no Triângulo Mineiro. O maior inconveniente desse sistema, apesar do baixo custo de implantação, é a manutenção, pois a grande maioria dos projetos é feita com “tripas móveis”, que requerem uma reposição anual da ordem de 30%. Alguns cafeicultores, para reduzirem esses custos, optaram por sistemas fixos (mangueiras disponíveis em toda área irrigada), mesmo com o maior custo de implantação.

2.4.6 Gotejamento

Efetua a irrigação sobre o solo, na área de maior absorção das raízes do cafeeiro, com gotejadores de pequena vazão (1 a 10 litros/hora), porém, capazes de irrigar com alta frequência (até mesmo várias vezes ao dia), mantendo a umidade do solo na zona radicular próxima à capacidade de campo, condição que facilita a absorção de água pelo cafeeiro (SANTINATO; FERNANDES, 2012).

A água é pressurizada pelo sistema de bombeamento, e, antes que chegue aos gotejadores, passa por um sistema de filtragem, prática essencial para o bom funcionamento desse sistema.



Figura 4. Pivô central convencional para café.



Figura 5. Pivô central em plantio circular do cafeeiro.



Figura 6. Irrigação de café com carretel enrolador.



Figura 7. Irrigação de café com tubos perfurados a laser (tripa).



Figura 8. Irrigação de café com aspersão em malha.



Figura 9. Irrigação por gotejamento em café.



Figura 10. Irrigação por *microjets* em café.

Para evitar problemas de vandalismo, alguns produtores têm adotado a técnica de enterrar os emissores, ação que deve ser cuidadosamente planejada, pois a colocação de gotejadores muito distantes da maior concentração de raízes do cafeeiro pode provocar reduções expressivas de desenvolvimento vegetativo e da produtividade do cafeeiro. Também requer a aplicação periódica de produtos capazes de evitar a intrusão de raízes nos gotejadores.

Como a qualidade da água pode afetar o funcionamento de gotejadores, alguns produtores em regiões de água com alto teor de ferro, tem optado por instalar na mangueira, sob a copa do cafeeiro, pequenos *sprays*, denominados *microjets*.

2.5 Gerenciamento e manejo da irrigação

Em um programa de manejo de uma lavoura de café, deve-se procurar maximizar a produtividade, com eficiência do uso da água e da energia, mantendo-se as condições físicas, químicas e biológicas do solo e de fitossanidade favoráveis ao bom desenvolvimento do cafeeiro.

O manejo correto da irrigação envolve três etapas distintas e complementares: (i) definição correta das datas e das lâminas de água a serem aplicadas (parte básica); (ii) definição das metas de eficiência de aplicação da água para o sistema, e ajuste do funcionamento do mesmo para atingir esses limites; e manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos e sistemas, para que tenham condições adequadas de funcionamento.

As características, funcionamento e potencialidades de um sistema de irrigação são aspectos que não podem ser negligenciados, pois eles influenciam no manejo. Tradicionalmente dividem-se os métodos de manejo da irrigação em três grupos: (i) os que se baseiam unicamente no conhecimento do estado hídrico do solo, ou seja, no manejo da água útil do solo, (ii) os que se baseiam no conhecimento do estado hídrico da planta, e (iii) os que se baseia na variação do clima.

2.5.1 Aspectos básicos do manejo da irrigação

O solo funciona como um reservatório de água para as plantas, retendo água que precipita durante as chuvas ou irrigações para que seja absorvida pelas plantas posteriormente. Na Figura 11 é representada, esquematicamente, a capacidade de armazenamento de água nos poros do solo, usando como símbolo, um reservatório com saídas.

Pode-se afirmar que água disponível para as plantas é a retida entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). Antes de qualquer programa de manejo da irrigação, é altamente recomendável que se retirem amostras de solo, para que em laboratório se elabore a curva de retenção da água no solo, em camadas de 20 em 20 cm, até a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura do café (60 cm). Para a cultura do café, recomenda-se a retirada de amostras em três profundidades para que seja feita a curva de retenção, 20, 40 e 60 cm.

O sistema radicular do cafeeiro é bastante plástico e varia em função da interação de carga genética da planta com várias condições do ambiente, tais como textura, estrutura, arejamento, fertilidade e reação do solo, temperatura, umidade, idade da planta, produção de frutos, sistemas de cultivo, pragas e doenças (RENA; MAESTRI, 1987). Estes autores, observaram que uma planta de cafeeiro arábica com 3 anos de idade pode apresentar, em média, 23 km de raízes absorventes, sendo a maior concentração destas raízes obtida na camada superficial, variando de 30 a 60 cm de profundidade e de 50 a 80 cm de distância do tronco.

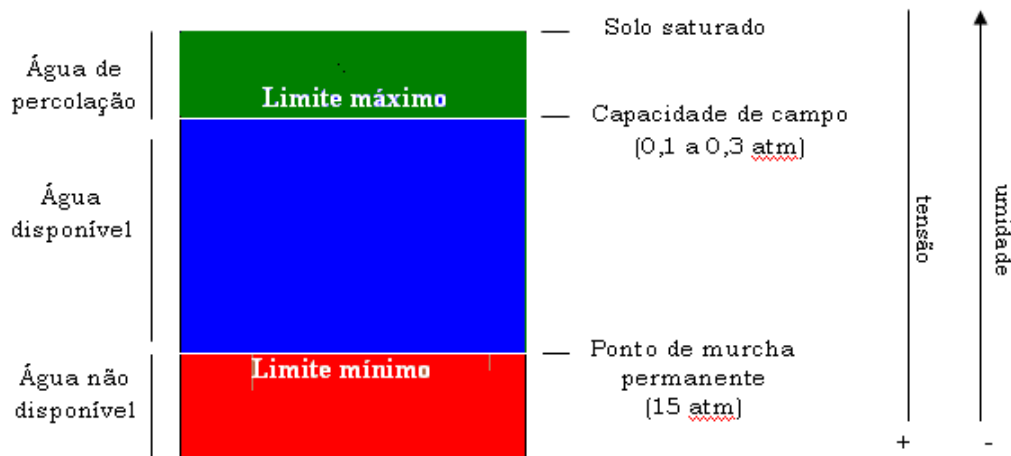


Figura 11. Esquema representativo da capacidade de armazenamento de água nos poros do solo.

O padrão de crescimento das raízes do cafeeiro pode ser afetado pela irrigação e aplicação de cobertura morta sobre a superfície do solo. A irrigação pode reduzir a profundidade de penetração da raiz axial e o desenvolvimento de raízes primárias e secundárias nas camadas mais profundas do solo. A aplicação de cobertura morta pode aumentar o tamanho do sistema radicular como um todo e a profundidade da raiz axial.

Na Figura 12 apresenta-se a distribuição vertical do sistema radicular do cafeeiro adulto irrigado por gotejamento, em camadas de 20 cm até 120 cm de profundidade. Em termos gerais, nas áreas estudadas, existe maior concentração de raízes nas camadas superficiais até a profundidade de 60 cm. Observa-se que a profundidade efetiva variou entre 86 a 94 cm para as lavouras cafeeiras de idade entre 6 a 8 anos.

A partir da determinação da profundidade efetiva do sistema radicular podemos obter informações necessárias para o manejo da fertirrigação, correlacionando a capacidade da planta de resistir a períodos sem irrigações e a capacidade da planta em absorver água e nutrientes em camadas mais distintas.

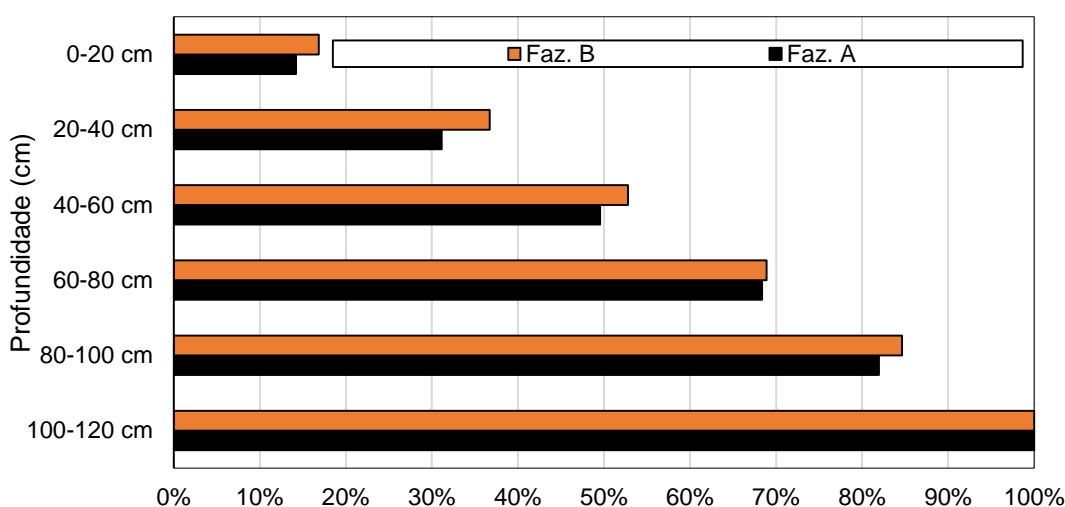


Figura 12. Distribuição vertical acumulada do sistema radicular do cafeeiro irrigado nas áreas estudadas.

Na Figura 13 apresenta-se a distribuição horizontal do sistema radicular do cafeeiro, isto é, ao longo da projeção da copa das plantas. Observa-se que não existe um padrão de distribuição do sistema radicular, existindo grande variabilidade entre as áreas estudadas.

Por se tratar de uma região com período de seco bem definido e a utilização da técnica de irrigação espera-se que a maior concentração de raízes fosse próxima ao tronco das plantas (sob a rua) e a 30 cm de distância, condição observa-se somente em 50% das áreas amostradas. Nas demais áreas, a maior concentração de raízes foi na posição a 60 cm do tronco das plantas, à margem da zona úmida criada pela aplicação do sistema de irrigação.

Destacam-se os resultados da Fazenda B, com expressou elevada concentração de raízes em posição fora da zona de atuação da faixa de umedecimento e nutrição, quando realiza-se fertirrigações.

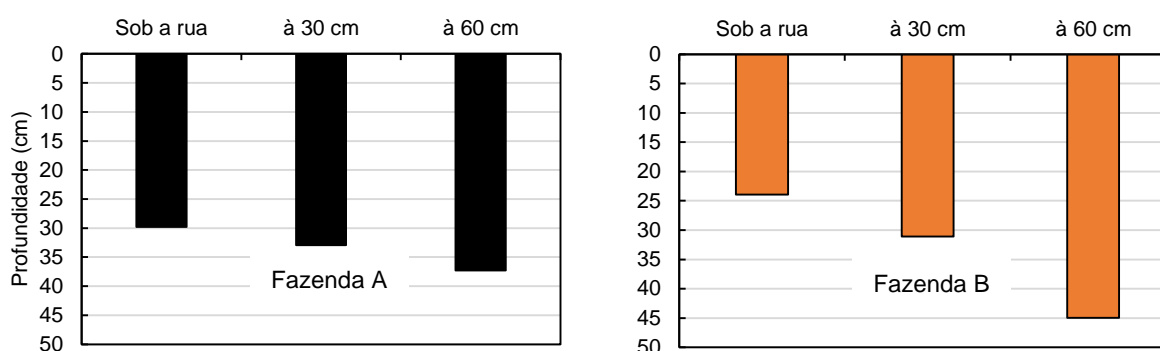


Figura 13. Distribuição horizontal do sistema radicular do cafeeiro irrigado nas áreas estudadas.

2.5.2 Métodos de manejo da irrigação

A determinação da época da irrigação e da quantidade de água a ser aplicada pode ser feita com o monitoramento da planta, do solo ou do clima.

2.5.2.1 Monitoramento do solo

O monitoramento do solo constitui uma metodologia usual para o manejo da irrigação, de modo independente ou associado a outros métodos de controle. Uma vez definidos os limites da CC e do PMP e a estratégia de uso da água disponível, o momento de se irrigar e a quantidade de água a ser aplicada são determinados mediante avaliação do teor de água no solo. Esta determinação pode ser realizada de forma direta, com a retirada de amostras de solo em várias profundidades e locais, definindo, posteriormente, a umidade existente pelo método padrão de estufa. Por questões operacionais, a determinação do teor de água no solo, para efeitos de manejo da irrigação, pode ser de forma indireta, existindo diversos equipamentos disponíveis no mercado. Os mais utilizados são o tensiômetros, os métodos eletrométricos, a sonda de nêutrons, o TDR (sigla do nome em inglês Reflectometria de domínio do tempo), métodos amplamente utilizados na pesquisa e divulgados na literatura sobre irrigação.

No campo, para a cultura do café, têm sido utilizados com mais frequência os tensiômetros (Figuras 14 e 15), que consistem de uma cápsula de cerâmica em contato com o solo, ligada a um vacuômetro, por meio de um tubo de PVC completamente cheio de água. Quando instalado no solo, a água do tensiômetro entra em contato com a água do solo através dos poros da cápsula porosa e o equilíbrio se estabelece. Na prática, o intervalo de medida do tensiômetro é de $\psi_m=0$ (saturação) e $\psi_m=0,8$ atm, aproximadamente. Recomenda-se, por tipo

de solo, a instalação de pelo menos 5 baterias com três tensiômetros cada, em três profundidades (20, 40 e 60 cm), com leituras diárias, interpretadas conforme a curva de retenção de água do solo.



Figura 14. Tensiômetro.



Figura 15. Bateria de tensiômetros para manejo da irrigação de café, em três profundidades.

2.5.2.2 Monitoramento do clima

A metodologia de monitoramento do clima uma das maneiras mais simples e operacionais de manejar a irrigação do cafeeiro. As variáveis meteorológicas são utilizadas para determinar indiretamente as necessidades de água da cultura. Trata-se de um balanço hídrico, onde se avalia a entrada de água (irrigação e chuva) e a saída (evapotranspiração, percolação e escoamento superficial).

A precipitação deve ser medida em pluviômetros instalados em vários pontos da fazenda (Figura 16). Deve-se evitar a utilização dos chamados "pluviômetros agrônômicos", pois tem reduzida área de captação da água da chuva, levando a erros de medida (Figura 17).



Figura 16. Pluviômetro para medição da precipitação.



Figura 17. Pluviômetro "agrônômico".

A evapotranspiração pode ser obtida por meio de medições diretas no campo (lisímetros) ou por estimativas baseada em dados climáticos ou da cultura. As medições diretas

no campo são muito caras e são utilizadas principalmente para calibrar os métodos de estimativa de evapotranspiração baseados em dados climáticos.

Tabela 4. Coeficiente de cultura (Kc) do café (SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 2008).

Idade da planta (anos)	Espaçamento entre ruas (m) x Espaçamento entre plantas (m)	Kc
Lavoura adulta (mais de 3 anos)	> 3,0 x > 1,0 – 2.500 plantas ha ⁻¹	1,0
	> 3,0 x 0,5 a 1,0 – 3.333 plantas ha ⁻¹	1,1
	2 a < 3 x 0,5 a 1,0 – 6.666 plantas ha ⁻¹	1,2
	1 a < 2 x 0,5 a 1,0 – 13.333 plantas ha ⁻¹	1,3
Lavoura nova (de 1 a 3 anos)	> 3,0 x > 1,0 – 2.500 plantas ha ⁻¹	0,8
	> 3,0 x 0,5 a 1,0 – 3.333 plantas ha ⁻¹	0,9
	2 a < 3 x 0,5 a 1,0 – 6.666 plantas ha ⁻¹	1,0
	1 a < 2 x 0,5 a 1,0 – 13.333 plantas ha ⁻¹	1,1
Lavoura nova (até 1 ano)	> 3,0 x > 1,0 – 2.500 plantas ha ⁻¹	0,6
	> 3,0 x 0,5 a 1,0 – 3.333 plantas ha ⁻¹	0,7
	2 a < 3 x 0,5 a 1,0 – 6.666 plantas ha ⁻¹	0,8
	1 a < 2 x 0,5 a 1,0 – 13.333 plantas ha ⁻¹	0,9

Calcula-se a evapotranspiração da cultura do café multiplicando-se a evapotranspiração potencial de referência (ET_o) por três coeficientes: 1) coeficiente de cultura (K_c, Tabela 4), que incorpora os efeitos do tipo de cultura e sua fase de desenvolvimento, frequência e forma de aplicação da água; b) coeficiente de localização da irrigação (K_L) e c) coeficiente de umidade do solo (K_s). Existem vários métodos que podem ser utilizados para a estimativa da evapotranspiração, como os de Camargo, Penman, Penman-Monteith, Radiação Solar, Hargreaves, Linacre, Blaney Criddle, dentre outros.

Apesar da necessidade das informações meteorológicas completas para se obter um nível de precisão aceitável, ainda existem dificuldades operacionais e financeiras para a implantação de uma estação meteorológica automática em muitas fazendas cafeeiras (Figura 18). Assim, de forma provisória, podem-se utilizar metodologias simplificadas, destacando-se aquelas que utilizam a temperatura do ar e a evaporação de tanques, como o tanque classe A (Figura 19).



Figura 18. Estação automática instalada próximo à lavoura de café.



Figura 19. Tanque de evaporação tipo classe A.

2.5.2.3 Monitoramento da planta

Apesar da maior ênfase no monitoramento meteorológico e baseado em medidas do solo, o monitoramento da planta começa a ter destaque para algumas culturas e alguns métodos de medição, a exemplo da temperatura do dossel obtido por termômetros de infravermelho.

Esses métodos por indicarem a condição hídrica da planta são particularmente interessantes no caso da irrigação com *deficit* e para estresse hídrico controlado, na indução de florescimento em fruteiras e maturação da cana, por exemplo.

Medidas de resistência estomática, potencial de água na folha, temperatura do dossel e turgidez do caule (dendômetros), entre outros, há relatos de sucesso, na literatura científica, para definir índices de estresse hídrico em diversas culturas. Entretanto, cada uma dessas técnicas apresenta limitações de uso em campo, sendo a principal limitação a pequena disponibilidade de informações quanto aos limites e índices recomendados para as culturas de interesse econômico.

Cada uma dessas técnicas apresenta limitações de aplicabilidade em campo, em razão da pequena disponibilidade de informações dos limites e dos índices recomendáveis para a maioria das culturas e dos problemas operacionais. Hoje já existem empresas que disponibilizam sensores que fazem medidas em tempo real das medidas nas plantas, porém, ainda estão sendo conduzidos os estudos para aferições no campo.

2.5.2.4 Métodos combinados

Já estão disponíveis métodos de manejo da irrigação que utilizam de medições na planta, no clima e no solo, com excelentes perspectivas para o manejo mais racional da irrigação do cafeeiro. Porém, ainda é necessário que sejam feitos testes no campo para a adoção por parte dos cafeicultores irrigantes.

2.6 Fertirrigação do cafeeiro

A tecnologia da irrigação passou muito rapidamente de uma técnica experimental para uma tecnologia comercialmente significativa. A intensificação da agricultura irrigada abriu as portas para aplicação de fertilizantes via água, sendo nos países onde a agricultura irrigada é mais desenvolvida, a aplicação de fertilizantes, inseticidas e herbicidas, via água de irrigação é uma prática rotineira. O uso da tecnologia da fertirrigação está diretamente associado às

culturas de alto valor comercial e às regiões com bom nível de desenvolvimento da agricultura irrigada.

Porém, muitos produtores de café irrigantes ainda consideram a cafeicultura irrigada como a cafeicultura de sequeiro acrescida de água. Muitos fatores devem ser analisados quando se adota a tecnologia da irrigação e da fertirrigação. Como a planta irrigada apresenta maior desenvolvimento vegetativo-produtivo, desenvolvimento esse maior ou menor dependendo da região, as recomendações de adubação devem ser diferentes das adotadas em áreas de sequeiro.

Para que se possam alcançar elevadas produções no cafezal, capazes de suportar todos os encargos com seu esmerado cultivo e proteção fitossanitária, torna-se imprescindível um bom plano de adubação com macro e micronutrientes, para garantir a manutenção dos cafeeiros em bons estados. O nitrogênio é um dos principais macronutrientes para o cafeeiro, só sendo armazenado em forma orgânica, da qual é lentamente liberado pela decomposição (mineralização). Ele é absorvido do solo principalmente em forma nítrica. Como os teores de matéria orgânica são geralmente baixos (à exceção dos ácidos húmicos) e tendo em vista que as perdas de N ocorrem rapidamente, é preciso repor o nutriente através de adubações parceladas, efetuadas nas épocas de maior necessidade para a vegetação e a produção do ano.

Por exemplo, na avaliação do aproveitamento do nitrogênio do fertilizante, na maioria das pesquisas, o aproveitamento é de 50% ou menos, permanecendo no solo, para efeito residual, 30% ou menos do N-fertilizante. Este baixo aproveitamento causa uma perda de 19,5 bilhões de dólares por ano e essa quantidade perdida não pode ser utilizada pela planta, além de causar a redução da fixação biológica pelos microrganismos e também causar o transporte do elemento pela chuva e água de irrigação, gerando eutrofização de fontes hídricas e acumulando nitrato na água potável, que é potencialmente maléfico para a saúde humana (BRENTROP; PALLIERE, 2011; DI TIAN *et al.*, 2017).

Várias possibilidades têm sido levantadas para justificar as perdas de nitrogênio, como: (i) volatilização de NH_3 , especialmente de fontes amídicas-amoniacais; (ii) lixiviação de NO_3 para fora da zona de exploração das raízes do solo e (iii) desnitrificação, que pode ocorrer em solos com drenagem deficiente ou em sistemas em que há elevada disponibilidade de carbono e anaerobiose, gerando condições favoráveis à redução do nitrato.

Segundo a FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2016), no ano de 2016 foram consumidos 194 milhões de toneladas de fertilizantes, sendo 60% deste total de fontes nitrogenadas. O mau uso dos adubos nitrogenados pode causar danos ambientais. Segundo a Fapesp (FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2008), grande parte do nitrogênio antropogênico se perde no ar, na água e no solo, causando problemas ambientais e de saúde humana em cascata. Ao mesmo tempo, a produção de alimentos em algumas partes do mundo é deficiente em nitrogênio, ressaltando as disparidades na produção de fertilizantes que contêm o elemento químico.

Martinelli (2007) observa que o maior problema relacionado à utilização do nitrogênio na agricultura e pecuária é a ineficiência no seu uso. Como raramente todas as partes das plantas são consumidas, ocorre uma perda de 16 unidades de N advinda da transformação da cultura em produto agrícola. Na transformação do produto em alimento, há uma perda adicional, e do alimento ao consumo, há outra perda devido ao armazenamento, transporte e manipulação do alimento. Assim, de 100 unidades produzidas, somente 14 unidades são consumidas, ou seja, 76 unidades são perdidas para o meio ambiente (Figura 20).

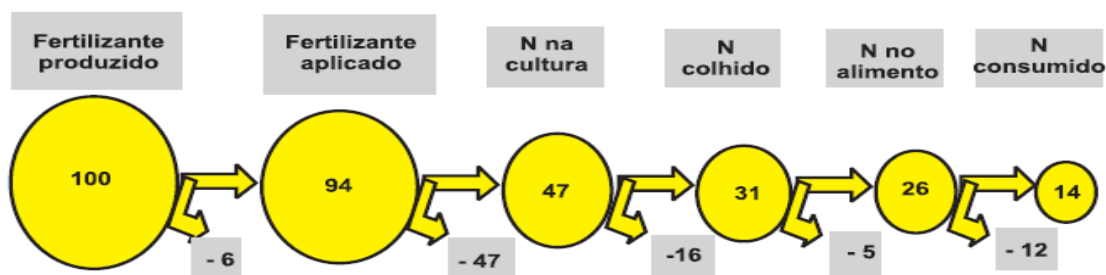


Figura 20. Perdas de nitrogênio ao longo de uma cadeia destinada à produção vegetal (MARTINELLI, 2007).

Ainda segundo os mesmos autores, numa cadeia mais complexa, como a produção de proteína animal a partir de grãos, não de pastagens, as perdas aumentam, pois a cultura é transformada primeiro em ração, que por sua vez é estocada no animal, o qual é transformado em alimento e, finalmente, consumido. Nesse caso mais complexo, das 100 unidades de fertilizantes produzidas, somente 4 unidades são consumidas. Portanto, ocorre uma perda de 96 unidades (Figura 21). E, quanto mais complexo é o sistema de produção, maior é o vazamento. Por exemplo, de 100 unidades de fertilizante produzidas, 6 unidades são perdidas no transporte e na aplicação. Portanto, somente 94 unidades serão utilizadas. Dessas unidades aplicadas no campo, a cultura utiliza, no máximo, a metade, sendo a maior parte perdida para o meio através dos processos de denitrificação, volatilização e lixiviação.

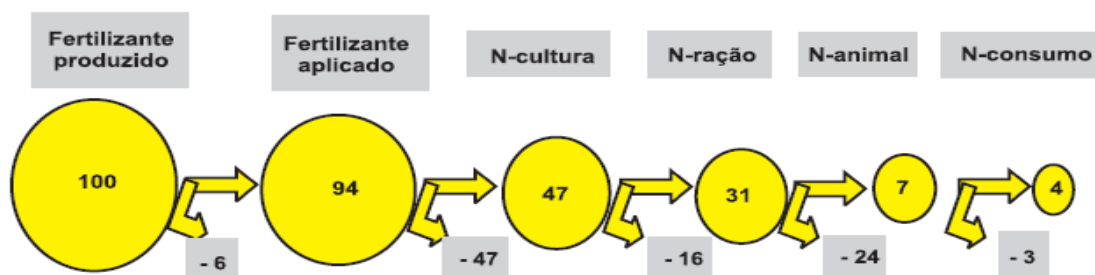


Figura 21. Perdas de nitrogênio ao longo da cadeia pecuária (MARTINELLI, 2007).

2.7 Considerações finais

A cafeicultura brasileira, além de ser a maior do mundo, é uma das mais tecnológicas, pois alia altas produtividades à excelente qualidade do café produzido. Esta superioridade é alcançada devido a vários fatores, dentre os quais se destacam o clima favorável, a mecanização em praticamente todas as etapas de produção, as modernas práticas fitossanitárias, culturais e nutricionais e, também, à irrigação. Este capítulo abordou a irrigação do cafeeiro, que teve grande aumento nos últimos 20 anos, atingindo a expressiva marca de 450 mil hectares irrigados.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas da irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. Brasília: ANA, 2021.

AGRIANUAL 2010. FNP Consultoria e Comércio, São Paulo, 662p., 2009.

AMARASINGHE, U.A.; HOANH, C.T.; D´HAEZE, D.; HUNG, T.Q. Toward sustainable coffee production in Vietnam: more coffee with less water. **Agricultural Systems**, v.136, p.96-105, 2015.

- ANDRADE, C.L.T.; COELHO, E.F.; COUTO, L.; SILVA, E.L. Parâmetros de solo-água para engenharia de irrigação e ambiental, Poços de Caldas-MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., Poços de Caldas. **Resumos**. Poços de Caldas: UFLA/SBEA, p.1-39, 1998.
- ANEJA, V.P.; SCHLESINGER, W.H.; ERISMAN, J.W. Farming pollution. **National Geographic**, v.1, p.409-411, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ngeo236>. Acesso em: 31 mar. 2021.
- ANTUNES, R.C.B.; MANTOVANI, E.C.; COSTA, L.C.; RENA, A.B.; ALVARENGA, A.P. Determinação da evapotranspiração da cultura do cafeeiro em formação, Brasília-DF. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL, Poços de Caldas, MG. **Resumos expandidos**. Brasília: Embrapa Café, v.2, p.810, 2000.
- ANTUNES, R.C.B.; RENA, A.B.; MANTOVANI, E.C.; ALVARENGA, A.P.; COSTA, L. C.; DIAS, A.S.C. Influência da fertirrigação no desenvolvimento do café arábica em formação. In: MANTOVANI, E.C.; SOUZA, L.O.C.; SOARES, A.R. (Ed.). **Energia na agricultura, boletim técnico n.4**, 118 p., p.64-67, 2001b.
- ANTUNES, R.C.B.; RENA, A.B.; MANTOVANI, E.C.; ALVARENGA, A.P.; COSTA, L.C.; DIAS, A.S.C. Influência da fertirrigação em nitrogênio e potássio nos componentes vegetativos do cafeeiro arábica em formação. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1, 2000, Poços de Caldas. **Anais**. Poços de Caldas: Embrapa-Café, 2000.
- ARAÚJO, J.C.A. **Análise do comportamento de uma população de café Icatu (H-4782-7) sob condições de irrigação por gotejamento e quebra-vento artificial**. 87 p., 1982. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.
- ASSIS, G.A. **Irrigação para cafeeiros em diferentes densidades de plantio**. 97p., 2010. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.
- BANZATTO, D.A.; KRONKA, S.N. **Experimentação Agrícola**. 3. Ed. Jaboticabal: FUNEP, 247p., 1995.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 596p., 1996.
- BERTOL, I.; MELLO, E.L.; GUADAGNIN, J.C.; ZAPAROLLI, A.L.V.; CARRAFA, M.R. Nutrient losses by water erosion. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.60, n.3, p.581-586, 2003.
- BONOMO, R.; OLIVEIRA, L.F.C.; SILVEIRA NETO, A.N.; BONOMO, P. Produtividade de cafeeiros arábica irrigados no cerrado goiano. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. Goiânia: UFG. v.38, n.4, p.233-240, 2008.
- BORTOLOTTI, R.P.; BRUNO, I.P.; DOURADO NETO, D.; TIMM, L.C.; NUNES DA SILVA, A.; REICHARDT, K. Nitrate leaching through climatologic water balance in a fertigate coffee plantation. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 6, p. 785-792, 2013.
- BORTOLOTTI, R.P.; BRUNO, I.P.; REICHARDT, K.; TIMM, L.C.; TELMO JORGE CARNEIRO AMADO, T.J.C.; FERREIRA, A.O. Nitrogen fertilizer (¹⁵N) leaching in a central pivot fertigated coffee crop. **Revista Ceres**, Viçosa, v.59, n.4, 2012.
- BOTELHO, C.E.; SOARES, T.L.; OLIVEIRA, A.C.B.; PEREIRA, A.A. Cultivares de café e suas principais características agrônômicas e tecnológicas. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte: Epamig, v.29, n.247, p.31-41, 2008.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Normas Climatológicas 1961-1990**. Brasília, 84p., 1992.
- BRENTROP, F.; PALLIERE, C. Nitrogen Use Efficiency as an Agro-Environmental Indicator. In: OECD WORKSHOP: AGRI-ENVIRONMENTAL INDICATORS: LESSONS LEARNT AND FUTURE DIRECTIONS. 2010. Leysin, Suíça, p. 1-9, 23-26, 2010.
- BRUNO, I.P.; UNKOVICH, M.J.; BORTOLOTTI, R.P.; BACCHI, O.O.S.; DOURADO NETO, D.; REICHARDT, K. Fertilizer nitrogen in fertigated coffee crop: absorption chances in plant compartments over time. **Field Crops Research**, v.124, n.3, p.369-377, 2011.

- BURT, C.M. **Fertigation**: the next frontier. *Irrigation Business and Technology*, San Luis Obispo, CA, v.3, n.4, p.16-19, 1995. Disponível em: http://www.itrc.org/papers/fertigation_nextfrontier.pdf. Acesso em: 15 nov. 2003.
- CADAHÍA, C. **Fertirrigación**: cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, 475p., 1998.
- CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, v.60, n.1, p.65-68, 2001.
- CARRIJO, O.A.; SILVA, W.L.C.; MAROUELLI, W.A.; SILVA, H.R. Tendências e desafios da fertirrigação no Brasil. In: FOLEGATTI, M.V. (Coord.). *Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças*. Ed. Guaíba: **Agropecuária**, 460 p., p.155-169, 1999.
- CARVALHO, G.R.; BARTHOLO, G.F.; MENDES, A.N.G.; NOGUEIRA, A.M.; MAGALHÃES, M.M. Seleção de progênies oriundas do cruzamento entre Catuaí e Mundo Novo em diferentes regiões do Estado de Minas Gerais. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.4, p.583-590, 2006.
- CARVALHO, H.P.; MELO, B.; MARCUZZO, K.V.; TEODORO, R.E.F.; SEVERINO, G.M. Avaliação de cultivares e linhagens de café (*Coffea arabica* L.) nas condições de cerrado em Uberlândia-MG. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.19, n.3, p.59-68, 2003.
- CASTELLANOS, M.T.; TARQUIS, A.M.; RIBASA, F.; CABELLOA, M.J.; ARCED, A.; CARTAGENA, M.C. Nitrogen fertigation: an integrated agronomic and environmental study. **Agricultural Water Management**, v.120, n.31, p.46-55, 2013.
- CLEMENTE, F.M.V.T. **Faixas críticas de teores foliares de macro e micronutrientes em no cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no primeiro ano de formação da lavoura**. 63p., 2005. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.
- CLEMENTE, F.M.V.T.; CARVALHO, J.G.D.; GUIMARÃES, R.J.; MENDES, A.N.G. Faixas críticas de teores foliares de macronutrientes no cafeeiro em pós-plantio - primeiro ano. **Coffee Science**. v.3, n.1, p.47-57, 2008.
- COELHO, A.M. Fertigação. In: COSTA, E.F.; VIEIRA, R.F.; VIANA, P.A. (Ed.). **Quimigação: aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação**. Embrapa-SPI, Brasília, DF, 315p., p.201-227, 1994.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**, 5ª Aproximação. Viçosa, MG, 359p., p.289-302, 1999.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café safra 2019**. Brasília: CONAB. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 21 jul. 2019.
- CORRÊA, J.B.; GARCIA, A.W.R.; COSTA, P.C. Extração de nutrientes pelos cafeeiros Mundo Novo e Catuaí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, **Anais**, v.13, 1986.
- COSTA, E.F.; FRANÇA, G.E.; ALVES, V.M.C. Aplicação de fertilizante via água de irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.129, p.63-68, 1986.
- COSTA, J.O.; COELHO, R.D.; BARROS, T.H.S.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; FERNANDES, A.L.T. Leaf area index and radiation extinction coefficient of a coffee canopy under variable drip irrigation levels. **Acta Scientiarum**, v.41, p.2-8, 2019. Disponível em: 10.4025/actasciagron. v41i1.42703. Acesso em: 21 jul. 2019.
- COSTA, J.O.; COELHO, R.D.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; BARROS, T.H.S.; FERNANDES, A.L.T. Canopy thermal response to water deficit of coffee plants under drip irrigation. **Irrigation and Drainage**, v.1, p.1-11, 2020.
- COTTA, J.A.O.; SALAMI, F.H.; MARQUES, A.R.; REZENDE, M.O.; LANDGRAF, M.D. Validação do método para determinação de Nitrogênio Kjeldahl Total. **Revista Analytica**, Rio de Janeiro, n.26, p.68-75, 2007.

DA SILVA, A.L.; FARIA, M.A.; REIS, R.P. Viabilidade técnico-econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p.37-44, 2003.

DAMATTA, F. Exploring drought tolerance in coffee: a physiological approach with some insights for plant breeding. **Brazilian Journal Plant Physiology**, v.16, n.1, p.1-6, 2004.

DAMATTA, F.M.; LOOS, R.A.; SILVA, E.A.; LOUREIRO, M.E.; DUCATTI, C. Effects of soil water deficit and nitrogen nutrition on water relations and photosynthesis of pot-grown *Coffea canephora* Pierre. **Trees**, v.16, n.8, p.555-558, 2002.

TIAN, D.; ZHANG, Y.Y.; ZHOU, Y.Z.; MU, Y.J.; LIU, J.F.; ZHANG, C.L.; LIU, P.F. Effect of nitrification inhibitors on mitigating N₂O and NO emissions from an agricultural field under drip fertigation in the North China Plain. **Science of the Total Environment**, v.598, p.87-96, 2017. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.03.220.

DONAGEMMA, K.G.; RUIZ, H.A.; ALVAREZ, V.H.; FERREIRA, P.A.; CANTARUTTI, R.B.; SILVA, A.T.; FIGUEIREDO, G.C. Distribuição do amônio, nitrato, potássio e fósforo em colunas de latossolos fertirrigadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.6, 2008.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Technical note, 33. Roma: FAO, 193p., 1979.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPANS, J.W.; PARLANGE, M.B. **Programa SWRC (Version 1.00)**: Soil-Water Retention Curve (Software). Piracicaba: Esalq; Davis: University of California, 1995.

DRUMOND, L.C.D.; FERNANDES, A.L.T.; SANTINATO, R.; MARTINS, C.A.; SOUSA, G.F.; OLIVEIRA, C.B.; TEIXEIRA, M.P. Avaliação da produtividade e qualidade do cafeeiro cultivado em condições de cerrado e irrigado por diferentes sistemas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 8. Araguari, MG. **Anais**. Araguari: Associação dos Cafeicultores de Araguari, p.30-34, 2006.

DZUNG, N.A.; KHANH, V.T.P. Research on impact of chitosan oligomers on biophysical characteristics, growth, development and drought resistance of coffee. **Carbohydrate Polymers**, v.84, p.751-755, 2010.

FAVARIN, J.L.; DOURADO NETO, D.; GARCIA, A.G.Y.; VILLA NOVA, N.A.; FAVARIN, M.G.G.G. Equações para estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.6, p.769-773, 2002.

FEITOSA FILHO, J.C.; CAVALCANTE, L.F.; LOPES, W.F.; SANTOS, C.S.; LEITE JÚNIOR, G.P.; LOPES, W.F.; PINTO, J.M. Estudos de doses de nitrogênio e de potássio aplicadas em banana por fertirrigação em comparação à adubação convencional. In: WORKSHOP DE FERTIRRIGAÇÃO, 2, Piracicaba. **Artigos científicos**. Piracicaba: Esalq/USP, p.48-66, 2001.

FERNANDES, A.L.T.; PARTELLI, F.L.; BONOMO, R.; GOLYNSKI, A. A moderna cafeicultura dos cerrados brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, p.231-240, 2012.

FERNANDES, A.L.T.; SANTINATO, R.; DRUMMOND, L.C.D.; OLIVEIRA, C.B.; SANTOS, W.O. Avaliação da fertirrigação com diferentes fontes de fertilizantes químicos e orgânicos na nutrição do cafeeiro cultivados em condições de cerrado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 8, 2006, Araguari. **Anais**, ACA, p.12-15, 2006.

FERNANDES, A.L.T.; SILVA, R.O.; SALDANHA, L.; BETINI, M.O.; BROETTO, F. Effect of seaweed extract formulation on coffee plants at different irrigation levels. **Asian Academic Research Journal of Multidisciplinary**, v.6, p.60-74, 2019.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, São Carlos. **Anais**. São Carlos: UFSCar, n.45, p.255-258, 2000.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Current word fertilizer trends an outlook to 2018**. Rome, Italy, 66p., 2016.

FOWLER, D.; COYLE, M.; SKIBA, U.; SUTTON, M.A.; CAPE, J.N.; REIS, S.; SHEPPARD, L.J.; JENKINS, A.; GRIZZETTI, B.; GALLOWAY, J.N.; VITOUSEK, P.; LEACH, A.; BOUWMAN, A.F.; BUTTERBACH-

- BAHL, K.; DENTENER, F.; STEVENSON, D.; AMANN, M.; VOSS, M. The global nitrogen cycle in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, B 368, 2013. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>. Acesso em: 31 mar. 2021.
- FRIZZONE, J.A.; ZANINI, J.R.; PAES, L.A.D.; NASCIMENTO, V.M. **Fertirrigação mineral**. Boletim Técnico 2. Ilha Solteira: Unesp, 31p., 1985.
- FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Nitrogênio demais**. Fapesp, 2008. Disponível em: <http://midiaemeioambiente.blogpot.com/2008>. Acesso em: 10 abr. 2010.
- GARCIA, F.H.S.; MATUTE, A.F.M; SILVA, L.C.; SANTOS, H.R.B.; BOTELHO, D.S.; RODRIGUES, M.; JOÃO PAULO RODRIGUES ALVES DELFINO BARBOSA, J.P.R.A.D. Análise fisiológica em mudas de cafeeiro com cercosporiose submetida a diferentes lâminas de irrigação. **Summa Phytopathology**, Botucatu, v.45, p.83-88, 2019.
- GARRIDO, M.A.T. **Respostas do feijoeiro às lâminas de água e adubação nitrogenada**. 205p., 1998. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1998.
- GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.4, p.892-898, 1980.
- GOMIDE, R.L. Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, Poços de Caldas, MG **Manejo de irrigação**. Lavras: UFLA/SBEA, p.133- 238, 1998.
- GROENVELD, T.; KONH, Y.Y.; GROSS, A.; LAZAROVITHC, N. Optimization of nitrogen use efficiency by means of fertigation management in an integrated aquacultura-agriculture system. **Journal of Cleaner Production**, v.212, p.401-408, 2019.
- GUANDIQUE, M.E.G. **Balço hídrico no solo e consumo de água pela cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado**. 94p., 1993. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1993.
- GUIMARÃES, P.T.G.; GARCIA, A.W.R.; ALVAREZ, V.H.; PREZOTTI, L.C.; VIANA, A.S.; MIGUEL, A.E.; MALAVOLTA, E.; CORRÊA, J.B.; LOPES, A.S.; NOGUEIRA, F.D.; MONTEIRO, A.V.C.; OLIVEIRA, J.A. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVARES V.V.H. (Ed.) **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação**. Viçosa, p.289-302, 1999.
- GUO, J.H.; LIU, X.J.; ZHANG, Y.; SHEN, J.L.; HAN, W.X.; ZHANG, W.F.; CHRISTIE, P.; GOULDING, K.W.T.; VITOUSEK, P.M.; ZHANG, F.S. Significant acidification in major Chinese croplands. **Science**, v.80, p.1008-1010, 2011.
- HAGIN, J.; TICKER, B. **Fertilization of dryland and irrigated soils**. New York: Springer-Verlag, 188p., 1982.
- HERNANDEZ, F.B.T. Potencialidades da fertirrigação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE FERTILIZANTES FLUIDOS. Piracicaba. **Anais**. Piracicaba: Esalq, p.199-210, 1993.
- HO, T.Q.; HOANG, V.N.; WILSON, C.; NGUYEN, T.T. Eco-efficiency analysis of sustainability-certified coffee production in Vietnam. **Journal of Cleaner Production**, v.183, p.251-2560, 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Tabela 5457 - Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/ipca/brasil>. Acesso em: 3 fev. 2021.
- KARASAHIN, M.; DUNDAR, O.; SAMANANCI, A. The way of yield increasing and cost reducing in agriculture: smart irrigation and fertigation. **Turkish Journal of Agriculture: Food Science and Technology**, v.6, p.1370-1380, 2018.
- KRAMER, P.J. **Water relations of plants**. New York: Academic Press, 489 p., 1983.
- LAURINDO, V.T. **Interferência da fertirrigação, de lâminas e modos de aplicação localizada de água nos atributos químicos do solo e na produtividade da laranja Valência**. 100p., 2005. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2005.

- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba, 497p., 1999.
- LIBARDI, V.C.M. **Efeitos de diferentes níveis de irrigação e do déficit hídrico na produção do feijoeiro**. 49p., 1996. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1996.
- LIMA, J.V.O.; FERNANDES, A.L.T.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; CRUZ, P.O.H.; CRUZ, J.P.H.; SANTANA, M.J. Irrigation management with IoT sensor in three phenological phases of coffee crop. **Asian Academic Research Journal of Multidisciplinary**, v.6, p.78-96, 2019.
- LIU, X.; FUSHENG, L.; ZHANG, Y.; YANG, Q. Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of Arabica coffee (*Coffea arabica*) under different N rates in dry and hot region of southwest China. **Agricultural Water Management**, n.172, p.1-8, 2016.
- LIU, X.; QI, F.L.; YANG, Q.; YU, L. Impacts of regulated deficit irrigation on yield, quality and water use efficiency of Arabica coffee under different shading levels in dry and hot regions of southwest China. **Agricultural water management**, v.204, p.192-300, 2018.
- LOFTFIELD, E.; CORNELIS, M.C.; CAPORASO, N.; YOU, K.; SINHA, R.; FREEDMAN, N. Association of coffee drinking with mortality by genetic variation in caffeine metabolism. **JAMA International Medicine**, v.178, n.8, p.1086-1097, 2018.
- LOOMIS, R.S.; CONNOR, D.J. **Crop ecology: Productivity and management in agricultural systems**. Cambridge: Cambridge University Press, 520p., 1992.
- LUONG, Q.V.; TAUER, L.W. A real options of coffee planting in Vietnam. **Agricultural Economics**, v.35, p.49-57, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2006.00138x>. Acesso em: 31 mar. 2021.
- MACHADO, P.B. **Efeito de diferentes lâminas de água sobre a produtividade do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 43p., 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.
- MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: **Agronômica Ceres**, 631p., 2006.
- MALAVOLTA, E. **Nutrição e adubação do cafeeiro**. Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, Piracicaba, 224p. 1981.
- MALAVOLTA, E.; YAMADA, T. **Nutrição e adubação do cafeeiro**. Instituto da Potassa e Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 224p., 1983.
- MANTOVANI, E.C.; SOARES, A.R. **Irrigação do cafeeiro: informações técnicas e coletânea de trabalhos**. Boletim Técnico, 8. Viçosa. Associação dos Engenheiros Agrônomos de Minas Gerais. UFV, DEA, 260p., 2003.
- MARTINELLI, L.A. Os caminhos do nitrogênio: do fertilizante ao poluente. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, IPNI, n.118, p.6-10, 2007.
- MATIELLO, J.B.; DANTAS, S.F.A. Desenvolvimento do cafeeiro e do sistema radicular com e sem irrigação em Brejão, PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 14, Campinas. **Resumos**. Campinas, p.165, 1987.
- MATIELLO, J.B.; GARCIA, A.W.R.; ALMEIDA, S.R. **Adubos, corretivos e defensivos para a lavoura cafeeira**. Varginha, Embrapa Café, 89p., 2006.
- MATIELLO, J.B.; GARCIA, A.W.R.; FIORAVANTE, N.E. Efeito da irrigação por aspersão em cafeeiros cultivados em Varginha, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 30, São Lourenço, **Anais**, p.54-55, 2004.
- MENDES, A.N.G.; GUIMARÃES, R.J. **Plantio e formação da lavoura cafeeira**. Lavras: UFLA/FAEPE, 42p., 1998.
- MIRANDA, F.R.; DRUMOND, L.C.D.; RONCHI, C.P. Synchronizing coffee blossoming and fruit ripening in irrigated crops of the Brazilian Cerrado Mineiro Region. **Australian Journal of Crop Science**, v.14, n.4, p.605-613, 2020.

- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Research**, Washington, v.12, n.3, p.513-522, 1976.
- NETO, A.C.F.; MOURA, B.R.; MANTOVANI, E.C.; RENA, A.B.; PALARETTI, L.F. Influência da irrigação e da fertirrigação na produtividade da variedade acaia cerrado (dados de duas safras), em Viçosa - MG, In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 6. Araguari, **Anais**. Araguari, p.141-144, 2002.
- NIKOLSKII, Y.N.; AIDAROV, I.P.; LANDEROS-SANCHEZ, C.; PCHYOLKIN, V.V. Impact of long-term freshwater irrigation on soil fertility. **Irrigation and Drainage**, p.1-9, 2019. DOI 10.1002/ird.2381 IMPACT.
- NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1017p., 2007.
- OLIVEIRA, P.M. **Estimativa da evapotranspiração e do coeficiente de cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**. 90p., 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.
- PAPADOPOULOS, I. Fertirrigação: situação atual e perspectivas para o futuro. In: FOLEGATTI, M.V. (Coord.). Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças. Guaíba: **Agropecuária**, p.11-154, 1999.
- PAPADOPOULOS, I. Fertirrigação: situação atual e perspectivas para o futuro. In: FOLEGATTI, M.V. (Coord.). Workshop de Fertirrigação, 1. Piracicaba. Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças. Guaíba: Ed. **Agropecuária**, p.11-67, 1999.
- PARAMASIVAM, S.; ALVA, A.K.; FARES, A.; SAJWAN, K.S. Estimation leaching in an Entisol under optimum citrus production. **Soil Science Society American Journal**, v.65, p.914-921, 2001.
- PAVANI, L.C. **Evapotranspiração e produtividade do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) sob três níveis de potencial da água no solo**. 171p., 1985. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1985.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: Fealq, 183p., 1997.
- PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4. Londrina, PR. **Anais**. Londrina: Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café, 2005.
- PETEL, M.R.; SERA, T.; RIBEIRO FILHO, C.; SERA, G.H.; CID, C.G. Interação genótipo-ambiente na maturação dos frutos em variedades e cultivares de *Coffea arabica* no Paraná. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4. Londrina, PR. **Anais**. Londrina: Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café, 2005.
- PIMENTA, C.J. **Qualidade de café**. Lavras: Editora UFLA, 304p., 2003.
- POWER, J.F. Role of moisture stress in plant nutritional functions. In: BALIGAR, V.C.; DUNCAN, R.R. **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic Press, p.453-474, 1990.
- PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A.C.; CORRÊA, L.A.; SILVA, A.G.; CANTARELLA, H. Lixiviação de nitrato em pastagem de coastcross adubada com nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.35, n.3, p.683-690, 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982006000300008&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 12 fev. 2021.
- QUAGGIO, J.A.; SOUZA, T.R.; BACHIEGA ZAMBROSI, F.C.; MARCELLI, B.; MATTOS, D. Nitrogen-fertilizer forms affect the nitrogen-use efficiency in fertigated citrus groves. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.177, 2014.
- REICHARDT, K. **Processos de transferências no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 466p., 1985.
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; URQUIAGA, S.C. Fate of fertilizer nitrogen in soil-plant systems with emphasis on the tropics. In: **International Atomic Energy Agency** (Ed.). Agrochemicals: fate in food and the environment. Viena, p.277-290, 1982.
- RENA, A.B.; MAESTRI, M. Ecofisiologia do cafeeiro. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Eds.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: POTAFOS, p.119-147, 1987.

- RODRIGUES, N.A.; REIS, E.A.; TAVARES, M. Influências dos fatores climáticos no custo de produção do café arábica. **Custos e @gronegocio on line**. v.10, n.3, p.216-255, 2014.
- SANTINATO, R.; FERNANDES, A.L.T. **Cultivo do cafeeiro irrigado por gotejamento**. 2. Ed. Uberaba: 388p., 2012.
- SANTINATO, R.; FERNANDES, A.L.T.; FERNANDES, D.R. Cultivo do Cafeeiro Irrigado em plantio circular sob pivô central. Belo Horizonte: **O Lutador**, 1. Ed., 252p., 2002.
- SANTINATO, R.; FERNANDES, A.L.T.; FERNANDES, D.R. Irrigação na Cultura do Café. O Belo Horizonte: **O Lutador**, 2. Ed. 483p., 2008.
- SCALCO, M.S.; RIBEIRO, A.A.S.; COLOMBO, A.; FARIA, M.A.; PAIVA, L.C.; CARVALHO, C.H.M. Diagnóstico da cafeicultura irrigada na região sul de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 6, Araguari, **Anais**. Araguari, p.20-24, 2003.
- SCHICK, J.; BERTOL, I.; BALBINOT JR., A.A.; BATISTELA, O. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico aluminoso submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: II. perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.437-447, 2000.
- SEDIYAMA, C.G.; RIBEIRO, A.; LEAL, B.G. Relações clima-água-planta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, Poços de Caldas. **Resumos**. Poços de Caldas: UFLA/SBEA, p.46-85, 1998.
- SILVA, A.M.; COELHO, G.; SILVA P.A.M.; COELHO G.S.; FREITAS R.A. Efeito da época de irrigação sobre a produtividade do cafeeiro catuaí em 4 safras consecutivas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 5. **Anais**. Araguari, p.144 -149. 2002.
- SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F. **Manejo da irrigação do feijoeiro**: uso do tensiômetro e avaliação do desempenho do pivô central. Brasília: Embrapa - SPI, Circular Técnica, 2746p., 1994.
- SINGANDHUPE, R.B.; RAO, G.G.S.N.; PATIL, N.G.; BRAHMANAND, P.S. Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop. **European Journal of Agronomy**, v.19, p.327-340, 2003.
- SNOECK, J. Essai d'irrigation du caféier robuste. **Café Caçõ Thé**, Paris, v.21, n.2, p.111-128, 1977.
- SOARES, A.R.; MUDRIK, A.S.; SILVA, T.C.; MANTOVANI, E.C. Estudo sobre a utilização de distintas fontes de nitrogênio e potássio na produtividade dos cafeeiros irrigados e fertirrigados (resultado de três colheitas). In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 3, Porto Seguro, **Anais**. 2003.
- SOBREIRA, F.M. **Adubação do cafeeiro fertirrigado em fase de formação no sul de Minas Gerais**. 104p., 2010. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, MG., 2010.
- SOUSA, V.F.; COELHO, E.F.; FOLEGATTI, M.V.; ARAÚJO, W.F.; ALENCAR, C.M. Efeito de diferentes doses de nitrogênio e potássio aplicados via água de irrigação no meloeiro amarelo. In: WORKSHOP DE FERTIRRIGAÇÃO, 1, Piracicaba. **Resumos**. Piracicaba: DER/Esalq/USP, p. 21-22, 1999.
- SOUZA, T.R.; QUAGGIO, J.A.; SILVA, G.O. Dinâmica de íons e acidificação do solo nos sistemas de fertirrigação e adubação sólida na citricultura. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.28, n.3, 2006.
- TALLENS, J.A.M. **Riego Localizado Y Fertirrigación**. Madrid: Ediciones Mundi-prensa, 3. ed., 564p., 2002.
- TIAN, D.; ZHANG, Y.; ZHOU, Y.; MU, Y.; LIU, J.; ZHANG, C.; LIU, P. Effect of nitrification inhibitors on mitigating N₂O and NO emissions from an agricultural field under drip fertigation in the North China Plain. **Science of the Total Environment**, n.598: p.87-96, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.220> PMID: 28437775. Acesso em: 31 mar. 2021.
- TONDELLO BARBOSA, F.T.; BERTOL, I.; VIEIRA LUCIANO, R.; PAZ GONZÁLEZ, A.; VIDA VÁZQUEZ, E. Teor de nitrogênio solúvel na água de erosão hídrica em cultura de aveia e ervilhaca em três formas de semeadura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.2, p.439-446, 2009.
- TVERDAL, A.; SELMER, R.; COHEN, J.M.; THELLE, D.S. Coffee consumption and mortality from cardiovascular diseases and total mortality: does the brewing method matter? **European Journal of**

Preventive Cardiology, p.1-8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/2047487320914443>. Acesso em: 31 mar. 2021.

URQUIAGA, S.; SISTI, C.; SANTOS, H.P.; KOCHHANN, R.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. Influence of crop rotation and soil tillage system in the organic C balance in an oxisol (Typic Haplorthox). In: CONGRESSO MUNDIAL DE CIÊNCIA DO SOLO, 17, Bangkok. **Resumos Expandidos**. Bangkok: Srimuang, 2002.

VICENTE, M.R.; MANTOVANI, E.C.; FERNANDES, A.L.T.; NEVES, J.C.L.; FIGUEREDO, E.M. Development and production of fertigated coffee trees in the West Region of Bahia, Brazil. **Coffee Science**, v.13, p.90-97, 2018.

VILELLA, W.M.C. **Diferentes lâminas de e parcelamento de adubação no crescimento, produtividade e qualidade dos grãos do cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**. 95p., 2001. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

VILLA NOVA, N.A.; FAVARIN, J.L.; ANGELOCCI, L.R.; DOURADO NETO, D. Estimativa do coeficiente de cultura (Kc) do cafeeiro em função de variáveis climatológicas e fitotécnicas. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, Vitória, **Resumos**. Brasília: Embrapa Café, p.582-591, 2001.

VILLAS BOAS, R.L.; ANTUNES, C.L.; BOARETTO, A.E.; SOUZA, V.F.; DUENHAS, L.H. Perfil da pesquisa e emprego da fertirrigação no Brasil. In: FOLEGATTI, M.V. (Coord.). **Fertirrigação: flores, frutas e hortaliças**. Guaíba: Agropecuária, p.71-103, 2001.

VITTI, G.C.; HEIRINCHS, R. Formas tradicionais e alternativas de obtenção e utilização do nitrogênio e do enxofre: uma visão Holística. In: YAMADA, T.; STIPP, S.R.; VITTI, G.C. (Ed.). **Nitrogênio e Enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI, p.109-157, 2007.

VOLSI, B.; TELLES, T.S.; CALDARELLI, C.E.; CAMARA, M.R.G.D. The dynamics of coffee production in Brazil. **PLoS ONE**, v.14, n.7, 2019; Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.02197>. Acesso em: 31 mar. 2021.

ZABINI, A.V.; CARVALHO, M.L.; BARBOSA, C.M. Adubação do cafeeiro com nitrogênio de liberação gradual em lavouras de primeiro ano na região das Matas de Minas, In: CONGRESSO BRASILEIRA DE PESQUISAS CAFEIRAS, 34, Caxambu. **Anais**. São Domingos das Dores: Fundação Procafé, p.226-227, 2008.

CAPÍTULO 3

3 IRRIGAÇÃO DE FRUTEIRAS TROPICAIS (ABACAXIZEIRO, BANANEIRA, MAMOEIRO E MANGUEIRA)

Eugênio Ferreira Coelho, Dionei Lima Santos e Welson Lima Simões

Resumo

O Brasil é o terceiro maior produtor de frutas do mundo. Sua produção em 2019 foi de 44 milhões de toneladas, com valor bruto de R\$ 38 bilhões; a área cultivada nesse período foi de 2,5 milhões de hectares, gerando 5 milhões de empregos com uma resposta a exportação anual média de 650 milhões de dólares (KIST *et al.*, 2018). Desta forma, a atividade apresenta-se como grande potencial de geração de emprego e renda e melhoria da qualidade de vida para a sociedade brasileira. Ainda há que se ressaltar que a produção de frutas é, também, fator importante no setor agroindustrial do Brasil. O aquecimento global e suas consequências na instabilidade climática podem afetar severamente a produtividade das culturas devido ao aumento da temperatura do ar e da evapotranspiração, somado à escassez de recursos hídricos nas regiões agrícolas tropicais (EDENHOFER *et al.*, 2014). Com isso, todas as fruteiras de maior ou menor consumo de água, com maior ou menor sensibilidade à deficiência hídrica, poderão ser afetadas pelos períodos secos na produtividade e na receita dos produtores. Tal fato, aliado à busca de produtos de melhor qualidade, ou mesmo à obtenção da produção em épocas de menor oferta do produto no mercado, justificam o aumento contínuo da irrigação na fruticultura brasileira. Este cenário tem acarretado aumento expressivo da demanda de conhecimentos relacionados à irrigação de fruteiras. Propõem-se, assim, neste capítulo, apresentar os principais conhecimentos científicos e tecnológicos relativos à irrigação das fruteiras tropicais de maior expressão comercial no país.

3.1 Introdução

As oscilações das disponibilidades hídricas nos sistemas de produção de fruteiras proporcionadas pelas mudanças climáticas, bem como a elevada concorrência dos frutos nos mercados nacionais e internacionais tem levado os sistemas de cultivo a serem avaliados pelas suas eficiências de uso da água (EUA), relacionando-se a produção de biomassa ou produção comercial a quantidade total de água aplicada ou evapotranspirada. Assim, técnicas e estratégias para aumentar a EUA, contribuem para melhoria da sustentabilidade das fruteiras.

A irrigação não funciona isoladamente num sistema de produção, ela deve estar integrada aos outros processos agropecuários, tais como adubação, correção da acidez do solo, controle fitossanitário, dentre outros. É necessário, também, o conhecimento dos sistemas de irrigação e suas relações com a cultura, bem como o conhecimento das necessidades hídricas das fruteiras, de aspectos ecofisiológicos e de estratégias de manejo da água de irrigação.

Os métodos de superfície, de aspersão e de irrigação localizada podem ser usados na maioria das fruteiras, sendo o de superfície o menos recomendado pelas maiores perdas de água proporcionadas. A adequação dos sistemas de aspersão ou localizada é, portanto, um ponto importante para o sucesso do empreendimento.

O manejo da água de irrigação requer conhecer o momento da irrigação, ou o limite de redução da água disponível do solo sem prejuízo da produtividade (umidade ou potencial de água críticos), o que é feito por meio de sensores de água e requer determinar a quantidade de água a se repor ao solo para suprir essa redução. Essa quantidade de água pode ser calculada diretamente, pela lâmina correspondente à redução da água disponível do solo; ou

pela evaporação do solo e transpiração das plantas (evapotranspiração) correspondente a esse período de depleção. Outra forma de se avaliar essas reposições é pela evapotranspiração e pela redução da água disponível de forma conjunta, que é o balanço de água na zona radicular.

No manejo da água de irrigação, as sugestões das umidades críticas para diferentes solos muitas vezes não são adotadas, seja pela dificuldade de equipamentos de leituras de umidade ou potencial de água do solo, seja pelas imprecisões consequentes das curvas de retenção de água do solo, feitas com pequenas amostras de solo que, pela variabilidade do mesmo, muitas vezes expressam valores de umidade-tensão que não representam as condições de campo. Quando os produtores não desejam usar a umidade crítica como indicador do momento da irrigação, optam por umidades maiores ou tensões de água do solo menores que os valores críticos, ou optam por intervalos entre irrigações fixos. Nesse caso, a frequência de irrigação é dada pela razão entre a lâmina real necessária à cultura ou a capacidade real de água do solo - CRA (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006) e a evapotranspiração correspondente ao tempo no qual a evapotranspiração máxima ou de referência apresenta baixo coeficiente de variação em relação à média do período. O intervalo entre irrigações (turno de rega) pode ser obtido pela equação 1, em que U_{cc} é a umidade do solo na capacidade de campo, U_c a umidade crítica do solo, ET_c a evapotranspiração da cultura e z_r a profundidade efetiva do sistema radicular.

$$TR = \frac{U_{cc} - U_c}{10 \cdot ET_c} \cdot z_r \quad (1)$$

A definição de quando irrigar determinada fruteira com base na relação solo-água-planta depende do quanto de depleção ou redução da água do solo a cultura tolera sem redução de produtividade que afete a receita líquida esperada pelo produtor. A umidade ou potencial de água do solo correspondente ao limite superior da água disponível é tomada normalmente como equivalente àquela que deve ser atingida no solo após cada irrigação e que proporciona produtividade potencial às culturas.

O uso de métodos de manejo da água de irrigação com uso da evapotranspiração associada aos coeficientes de cultura e de localização (fração da área molhada) isoladamente ou em conjunto com a avaliação do estado hídrico do solo (balanço de água na zona radicular) são usados em todas as fruteiras. Os métodos ou estratégias que envolvem irrigação com *deficit* regulado (RDI) e o secamento parcial da zona radicular (PRD) têm apresentados resultados positivos para diversas fruteiras e constituem solução para mitigar as perdas de áreas plantadas ou perdas de produtividade em épocas de secas prolongadas, cada vez mais comuns atualmente, e em cenários futuros, devido às mudanças climáticas em curso.

A facilidade cada vez maior de acesso a novas tecnologias como de câmeras de alta resolução, de infravermelho ou próximo do infravermelho, adaptadas em drones ou em satélites, tem sido usada em monitoramento de culturas, inclusive fruteiras, com objetivo de determinar o estado hídrico das mesmas, a partir de imagens dos índices da vegetação NVDI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) (BRITO *et al.*, 2015). Algumas fruteiras como abacaxizeiro e mamoeiro já possuem alguma informação, entretanto nem todas ainda foram estudadas quanto ao uso dessas imagens para fins de avaliação do estado hídrico das plantas. A tecnologia tende a ser avaliada e aprimorada para essa finalidade.

Esse capítulo objetiva apresentar as informações sobre a irrigação das fruteiras tropicais mais relevantes dentre as irrigadas no agronegócio, tendo o manejo da água de irrigação como foco, dada a necessidade de aumento da eficiência do seu uso para o presente e o futuro, da sustentabilidade dos recursos hídricos, não somente para a irrigação, como também para os demais setores da sociedade.

3.2 Irrigação do abacaxizeiro (*Ananas comosus*)

3.2.1 Produtividade e ciclo

O abacaxizeiro é considerado uma das quatro fruteiras mais plantadas no Brasil. Sua produtividade média tem variado de 24 a mais de 26 toneladas por hectare. As exportações têm trazido receitas na ordem de 700 mil a 2 milhões de dólares para fruta fresca e na ordem de 4 a 26 milhões de dólares para suco. O aquecimento global e suas consequências na instabilidade climática têm intensificado o aumento da frequência dos períodos secos, afetando negativamente a produtividade e a receita dos produtores, mesmo sendo o abacaxizeiro uma cultura de menor consumo de água.

O ciclo do abacaxizeiro pode variar de 12 a 24 meses (CARVALHO *et al.*, 2005), podendo chegar 30 meses (KIST *et al.*, 2011), conforme as condições ambientais e de temperatura (22-32°C). A irrigação favorece a antecipação da floração natural, bem como a colheita (ALMEIDA *et al.*, 2002). Assim, o cultivo do abacaxizeiro irrigado torna-se uma estratégia de mercado, pois o abacaxicultor pode fazer a indução floral da sua lavoura em períodos pré-estabelecidos, buscando sempre os períodos de entressafra em algumas regiões, ou com melhores preços. Além disso, os produtores de abacaxi irrigado devem evitar que a colheita ocorra na mesma época em que se dá a colheita do abacaxi cultivado sob sequeiro, que também apresenta uma boa qualidade e aceitação nos mercados consumidores do Brasil.

3.2.2 Sistemas de irrigação

Os sistemas de irrigação pressurizados são os mais utilizados nas áreas irrigadas com abacaxizeiro, desde aqueles do método da irrigação localizada bem como do método de aspersão. As indicações são de que os sistemas de aspersão são os mais recomendados para a cultura. As justificativas para essa afirmação estão embasadas na forma de calha das folhas que direcionam a água para o sistema radicular, em que as raízes adventícias respondem por mais de 50% do total das raízes da planta. Os sistemas de aspersão convencional e o mini autopropelido (Figura 1A) são muito utilizados na irrigação do abacaxizeiro, pelo menor custo comparado ao pivô central e aos sistemas de irrigação localizada. O pivô central com tubos de descida próximo da altura da planta e com controle de pressão nos aspersores é o que possui maior eficiência de irrigação em áreas irrigadas com abacaxizeiro. O sistema autopropelido e aspersão convencional possuem eficiência de aplicação da menor mediana entre 60 a 75% e 70-85%, respectivamente (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

O sistema de irrigação localizada mais usado na irrigação do abacaxizeiro é o gotejamento, principalmente em plantios de maior adensamento, com o uso de fileiras duplas, tipo 0,90 m x 0,40 m x 0,40 m, ou espaçamentos próximos. Normalmente, utiliza-se uma linha lateral de gotejadores entre duas fileiras simples. Pode-se, também, trabalhar com uma linha lateral entre fileiras com espaçamento de até 0,50 m, no caso de solo com textura média a argilosa. A linha lateral deve possuir emissores espaçados de 0,30 m, com vazão entre 1,5 e 2,0 L h⁻¹, sendo que quanto mais arenoso o solo, menor deve ser a vazão do emissor. O uso da cobertura sintética do solo (*mulching*) no cultivo do abacaxizeiro sob gotejamento contribui para o aumento da eficiência de irrigação (90%) e da eficiência do uso de água das plantas, principalmente pela redução da evaporação do solo. Além disso, haverá uma redução nos custos com mão de obra de limpeza da área ou com aplicações herbicidas ao longo do ciclo produtivo do abacaxizeiro. Por outro lado, o uso da cobertura sintética apresenta a desvantagem do aumento do custo de produção e a dificuldade de reutilização dessa cobertura em sucessivos plantios.

O uso do gotejamento enterrado ou subsuperficial é uma alternativa que contribui significativamente no aumento da eficiência de irrigação e no uso de água pela cultura. As

perdas por evaporação, que já são reduzidas no sistema por gotejamento quando comparado a outros sistemas de irrigação, tornam-se ainda menores com o sistema subsuperficial. O uso do sistema subsuperficial envolve linhas laterais de fita ou tubo gotejador com emissores no mesmo espaçamento do sistema por gotejamento superficial, com vazão abaixo de $2,0 \text{ L h}^{-1}$, instalados entre 0,10 e 0,20 m, dependendo do tipo de solo. A profundidade pode ser maior em solos argilosos e menor em solos arenosos, levando sempre em consideração a faixa de profundidade recomendada. É necessário ater para o fato de que pode ocorrer intrusão radicular nos emissores. As linhas de irrigação com emissores tipo *'in line'* ou embutidos já são vendidas com propriedades repelentes a raízes.

Na irrigação do abacaxizeiro por microaspersão, necessita-se de hastes (Figura 1B) maiores do que as normalmente utilizadas em outras culturas, pois os emissores devem ficar acima das plantas. Além disso, os microaspersores devem ser espaçados de forma que permita uma sobreposição dos jatos entre as linhas laterais para manter a uniformidade de distribuição das lâminas de água, o que vai depender do seu raio de alcance.



Figura 1. (A) Mini autopropelido sendo utilizado na irrigação do abacaxizeiro, e (B) Haste de elevação do emissor em uma área irrigada de abacaxizeiro com sistema de microaspersão.

3.2.3 Necessidades hídricas do abacaxizeiro

O abacaxizeiro é uma fruteira que utiliza o metabolismo ácido das crassuláceas (CAM). A planta abre os estômatos durante a noite e absorve o CO_2 , transformando-o em ácido málico; esse, então, é armazenado nos vacúolos durante a noite e, na presença da luz, é transportado para fora do vacúolo, voltando à forma de CO_2 , sendo fixado pela RuBisco na fotossíntese. A elevação de sua concentração na folha acarreta o fechamento dos estômatos durante o dia, até meado da tarde (CARR, 2012), conforme o comportamento da condutância estomática ou transpiração (Figura 2). Nesse período a transpiração é mínima, o que demonstra que o abacaxizeiro possui, naturalmente, uma elevada eficiência de uso de água. O abacaxizeiro também possui tecidos armazenadores de água, com potencial osmótico próximo de -1 MPa que permite perdas elevadas de água (CARR, 2012).

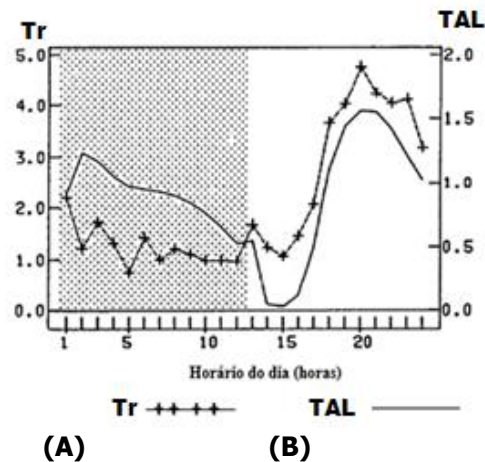


Figura 2. Transpiração (Tr, mL planta⁻¹ h⁻¹) e taxa assimilatória líquida (TAL, mmol planta⁻¹ h⁻¹) das plantas de metabolismo CAM durante (A) a noite e (B) o dia (COTE *et al.*, 1992).

As plantas CAM absorvem água e transpiram na maior parte do tempo à noite. Entretanto, o uso da irrigação pode induzir o abacaxizeiro a se comportar como planta C₃ de forma parcial, com predominância da fixação do CO₂ durante o dia em quase todo o ciclo da cultura (SAN-JOSE *et al.*, 2007). Outra evidência dessa alteração do comportamento da cultura foi verificada em pesquisas conduzidas no Nordeste, onde a evapotranspiração foi mínima durante a noite e apresentou um comportamento crescente no turno da manhã e decrescente no turno da tarde (AZEVEDO *et al.*, 2007; SOUZA *et al.*, 2008). O comportamento do abacaxizeiro como planta CAM pode ser confirmado na literatura por trabalhos de avaliação de lâminas ou volumes de água na produtividade da cultura que não detectaram efeito das lâminas aplicadas no peso médio dos frutos ou na produtividade desses (FRANCO *et al.*, 2014; SOUZA *et al.*, 2009); ou com possibilidades de comportar-se como C₃, com resposta da produtividade ou peso médio dos frutos aos níveis de água aplicados (MELO *et al.*, 2006).

A necessidade hídrica do abacaxizeiro durante seu ciclo produtivo varia conforme as condições climáticas locais, sistema de irrigação utilizado, uso ou não de cobertura do solo e o cultivar plantado. Os cultivares de abacaxizeiro mais avaliados em estudos sobre as necessidades hídricas tem sido a "Pérola" e a "Smoth Cayene". O uso do *mulching* sintético reduz significativamente a evaporação, diminuindo assim a evapotranspiração e o coeficiente de cultura, principalmente nos primeiros meses, quando a evaporação prevalece na evapotranspiração. Da mesma forma, o sistema de irrigação por gotejamento tende a contribuir ainda mais na redução do uso de água na cultura.

O consumo de água na irrigação do abacaxizeiro durante o ciclo reflete basicamente na evapotranspiração da cultura, cujos valores sugeridos variam de 1,3 a 5,0 mm dia⁻¹ (HANAFI *et al.*, 2010); 2,9 a 4,2 mm dia⁻¹ (SANTANA *et al.*, 2013); 3,5 a 4,7 mm dia⁻¹ (AZEVEDO *et al.*, 2007), onde os maiores valores se referem aos primeiros cinco meses da cultura. As necessidades estão na faixa de 600 mm (EVANS *et al.*, 2002; HEPTON, 2003). Há regiões com plantio do abacaxizeiro em condições de sequeiro, onde as precipitações são mais elevadas, com volumes acumulados de 1000 a 1500 mm/ano e chuvas bem distribuídas (CARVALHO, 1998; HUANG; LEE, 1969).

Na fase inicial do abacaxizeiro, correspondente aos dois primeiros meses após o plantio, as raízes das plantas ocupam pequenas profundidades do solo, onde a evaporação do solo ocorre com mais intensidade no perfil. Com isso, apesar das plantas não requererem maiores quantidades de água, é necessário irrigações com maior frequência para manter a camada mais superficial do solo com umidades próximas à capacidade de campo. Do segundo ao quinto mês, em condições em que o solo não se encontra coberto, a evaporação da água do solo

ainda é predominante na evapotranspiração. A maior demanda de água pela cultura ocorre nessa fase (AZEVEDO *et al.*, 2007). Nos demais meses a cultura tende a cobrir toda a área, principalmente em cultivos mais adensados, e não ocorre diferença na demanda hídrica da cultura inclusive na fase de formação do fruto (AZEVEDO *et al.*, 2007; COMBRES, 1983), sendo que essa demanda é inferior à que ocorre até o quinto mês (AZEVEDO *et al.*, 2007). Na fase de colheita ocorre uma redução na demanda hídrica em relação às fases anteriores. Esse comportamento da cultura quanto à necessidade de água é confirmado pela taxa de crescimento relativo da cultura (Figura 3) onde a maior taxa de crescimento ocorre, em média, aos 90 dias após o plantio, a partir de quando reduz de forma constante até o período de floração (LIMA, 2021).

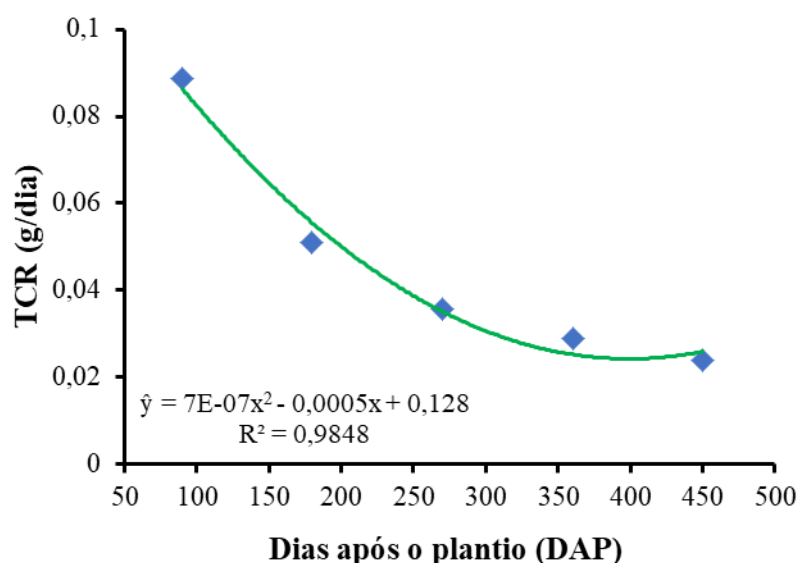


Figura 3. Taxa de crescimento relativo (TCR, g dia⁻¹) do abacaxizeiro (cultivar BRS Imperial) nas condições de Tabuleiros Costeiros da Bahia (LIMA, 2021).

Em termos quantitativos, para efeito de cálculos da lâmina de água necessária pelas plantas, o coeficiente de cultura (k_c) é o imprescindível. O coeficiente de cultura expressa às controvérsias quanto à necessidade de água do abacaxizeiro durante seu ciclo. O abacaxizeiro sendo uma cultura CAM, com baixa transpiração diária, induz a uma baixa evapotranspiração e, conseqüentemente, um baixo coeficiente de cultura. Em alguns trabalhos foram apresentaram resultados que atestam a baixa evapotranspiração da cultura (SANTANA *et al.*, 2013; MELO *et al.*, 2006; ALLEN *et al.*, 1998), enquanto em outros (SANTANA *et al.*, 2013; AZEVEDO *et al.*, 2007; SOUZA; REINHARDT, 2007) os valores de k_c não condizem com baixa evapotranspiração, o que poderia levantar a questão do comportamento da cultura como planta C3, o que não foi mencionado nos trabalhos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes de cultura para o abacaxizeiro em diferentes fases do ciclo da cultura por diferentes autores.

Autores	Fase vegetativa	Fase floração	Fase cresc. de frutos	Fase colheita
Azevedo <i>et al.</i> (2007)	0,89±0,07	0,88±0,09	0,87±0,05	0,89±0,01
Souza e Reinhardt (2007)	0,40-0,60	1,00-1,20	1,00-1,20	0,40-0,60
Santana <i>et al.</i> (2013) ^{1,2}	0,60-0,73	0,62	0,90	0,90
Santana <i>et al.</i> (2013) ^{1,3}	0,57-0,66	0,56	0,71	0,71
Melo <i>et al.</i> (2006)	0,57	0,57	0,57	0,57

Allen <i>et al.</i> (1998) ⁴	0,50	0,30	0,30	0,30
Allen <i>et al.</i> (1998) ⁵	0,50	0,50	0,50	0,50

¹ Gotejamento. ² Superficial. ³ Subsuperficial. ⁴ Com cobertura do solo. ⁵ Sem cobertura do solo.

3.2.4 Manejo da água de irrigação em abacaxizeiro

A definição do momento de irrigar a cultura do abacaxizeiro com base na relação solo-água-planta considera a não influência dos níveis de água aplicados à cultura detectados nas pesquisas e o comportamento referente ao mecanismo ácido das crassuláceas, que permite uma redução maior do nível de água que maximiza a produtividade, em relação às demais culturas. A redução de 50% da água disponível do solo já mencionada (ALMEIDA *et al.*, 2002) pode ser usada, uma vez que a literatura não disponibiliza valores dessas reduções. A umidade crítica, nesse caso, como indicador do momento da irrigação dependerá do tipo de solo (Tabela 2).

Tabela 2. Umidade crítica para o abacaxizeiro para solos de diferentes classes texturais.

Classificação textural	Umidade capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	Umidade ponto de murcha ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	Umidade crítica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
Arenosa	0,1700	0,0847	0,1310
Franco-arenosa	0,2094	0,0807	0,1451
Franco	0,3156	0,1033	0,2095
Franco-Argilo-Siltoso	0,3400	0,1900	0,2650
Argila	0,3600	0,2555	0,3050

O manejo da água de irrigação do abacaxizeiro irrigado por sistemas de aspersão convencional deve considerar um turno de rega fixo e, este, por sua vez, vai depender do tipo solo e da evapotranspiração média da cultura no período conforme sugerido na Tabela 3. Entretanto, o turno de rega pode ser diferente conforme o comportamento da cultura e o regime de umidade do solo, o que é verificado pelas leituras de umidade ou de potencial de água do solo.

O cálculo do tempo de irrigação ou a razão entre a lâmina total (mm) e a intensidade de precipitação do aspersor (mm h^{-1}), deve considerar na lâmina real necessária (CRA) e a profundidade efetiva do sistema radicular de 0,15 m até 90 dias após o plantio (DAP), 0,20 m de 90 a 180 DAP e 0,25 m no restante do ciclo, com base na avaliação de crescimento de raízes de Lima (2021). Se o manejo for com uso da reposição da evapotranspiração da cultura ou pelo balanço de água na zona radicular, deve-se considerar as profundidades do sistema radicular sugeridas.

Tabela 3. Valores do intervalo em dias entre irrigações para o abacaxizeiro considerando diferentes evapotranspirações médias da cultura e tipos de solo.

Textura do solo	Evapotranspiração da cultura (mm dia ⁻¹)				
	2	3	4	5	6
Arenoso	4	3	2	2	1
Franco-arenosa	6	4	3	3	2
Franco	11	7	5	4	4
Franco-argilo-siltoso	8	5	4	3	3
Argila	6	4	3	2	2

O manejo da água em sistemas de irrigação localizada também pode usar o turno de rega fixo, o que torna mais prático e operacional. Nesse caso, onde a área molhada pelos emissores é menor em relação à área molhada na aspersão o turno de rega deve variar de 1 dia (solos arenosos) a 3 dias (solos de textura argilosa) em plantios sem cobertura do solo. O uso de cobertura sintética do solo no gotejamento requer o uso de sensores de umidade ou de tensão de água para determinar o momento de irrigar bem como quantificar a lâmina a ser aplicada na irrigação. O abacaxizeiro reduz significativamente a evapotranspiração principalmente nos primeiros meses após o plantio, quando cultivado sob cobertura do solo. Nesse caso, toda a água que seria evaporada sem a cobertura permanece armazenada, reduzindo a taxa de secagem do solo. Espera-se manter o solo com umidades continuamente próximas do limite superior da água disponível (capacidade de campo), mas com a cobertura sintética do solo é preciso cautela para não manter o solo com excesso de umidade. O cálculo do tempo de irrigação, se feito com base na evapotranspiração, deve considerar o coeficiente de cultura de 0,3 (Tabela 1).

Qualquer sensor que seja usado para avaliação da umidade do solo (tensiômetro, blocos de resistência elétrica de matriz granular, sondas TDR, sondas de capacitância) deve ser colocado na posição de maior concentração de raízes e de maior incidência de absorção de água pelo sistema radicular. O sistema radicular do abacaxizeiro nas condições subúmidas sob irrigação por gotejamento em faixa contínua, com e sem cobertura sintética, possui 64 e 65% de raízes adventícias, entre 18 e 23% de raízes na camada de 0 a 0,10 m, entre 7 e 2% na camada de 0,20 a 0,30 m, e 9% na camada de 0,10 a 0,20 m tanto com, como sem cobertura do solo (LIMA, 2021). A instalação de sensores para determinação da água disponível no solo deve ser a 0,10 m de profundidade e 0,10 m entre a planta e o gotejador, no caso da linha lateral entre duas fileiras de plantas.

O abacaxizeiro, por ser planta CAM, tem elevada eficiência de uso de água (EUA), uma vez que a fotossíntese ocorre durante períodos diurnos de elevada temperatura e sob mínima transpiração. A eficiência de fixação de CO₂ pela transpiração em plantas CAM chega a três vezes a eficiência em plantas C₄ e a seis vezes a eficiência em plantas C₃ (BORLAND *et al.*, 2009). Os valores de EUA obtidos em pesquisas variam de 5,6 kg [frutas] m⁻³ (AZEVEDO *et al.*, 2007) a 11 kg [frutas] m⁻³ (SAN-JOSÉ *et al.*, 2007), valores dentro ou próximo dos propostos por Doorembos e Kassam (1979), entre 5,0 a 10,0 kg de frutas m⁻³.

3.2.5 Indicadores do estado hídrico no abacaxizeiro

O estado hídrico do abacaxizeiro irrigado pode ser expresso por meio de indicadores destrutivos (conteúdo relativo de água - CRA, da folha "D") e não destrutivo ("Normalized Difference Vegetation Index - NDVI" ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; e "Stress Degree Day - SDD" ou Dia de Grau de Estresse). O Dia de Grau de Estresse (SDD) baseia-se nas diferenças de temperatura entre o dossel da cultura e o ambiente, considerando

que sob condições de estresse hídrico, as plantas fecham os estômatos e diminuem a transpiração, aumentando, assim, a temperatura das folhas em relação à temperatura do ar (KIRKHAM, 2005). Na estação fria, o abacaxizeiro 'Smooth Cayenne' cultivado com e sem irrigação, apresentou diferenças significativas do NDVI após 45 dias de restrição hídrica, enquanto que na estação quente, o CRA apresentou diferenças após uma semana do início da restrição hídrica (RÍOS *et al.*, 2020). Ainda nesse estudo, o SDD foi o índice mais sensível, uma vez que aumentou nas duas estações e apresentou diferenças significativas nas fases iniciais. Outra fonte de informação sobre o estado hídrico do abacaxizeiro são as imagens termais, conforme apresentado na Figura 4, em que após 75 dias de cultivo com e sem irrigação, a temperatura do dossel do abacaxizeiro medida às 12 horas durante a estação fria, em média, foi de 20°C para as plantas sob irrigação (Figura 4a) e 29 °C para as plantas cultivadas sem irrigação (Figura 4b). Durante a estação quente, a temperatura das plantas com irrigação foi de 38°C (Figura 4c) e sem irrigação foi de 48 °C (Figura 4d).

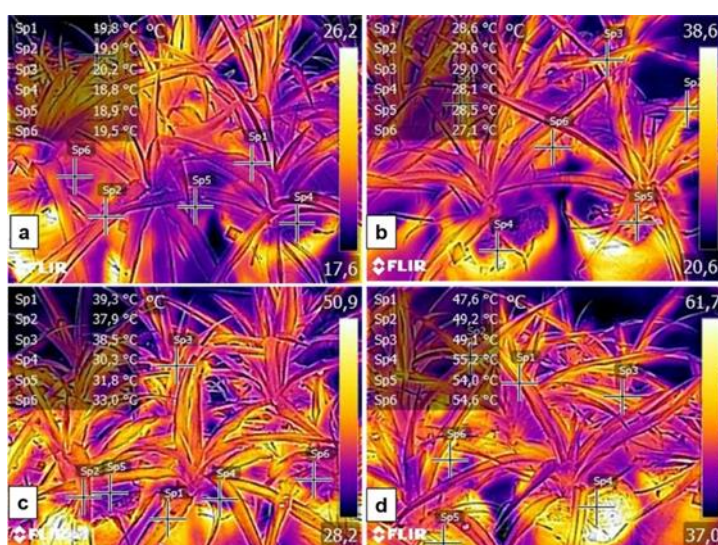


Figura 4. Imagens térmicas de plantas de abacaxizeiro cultivadas sob irrigação (a) e sem irrigação (b) no final da estação fria; e plantas de abacaxizeiro cultivadas sob irrigação (c) e sem irrigação (d) no final da estação quente (RÍOS *et al.*, 2020).

3.3 Irrigação da bananeira (*Musa spp.*)

3.3.1 Área e produção

A bananeira é segunda fruteira com maior área (450 a 490 mil hectares) e produção (entre 6,6 e 7,2 milhões de toneladas) do país, sendo a que apresenta o maior número de produtores envolvidos com a cultura. As regiões do Nordeste e Sudeste são as mais produtoras de banana, com maior expansão de área e produção nos polos de fruticultura irrigada dessas regiões. As regiões Sul, Nordeste e Sudeste são as que mais exportam (KIST *et al.*, 2018). A bananeira, pelo fato de ser uma cultura exigente em água, induz aos produtores a preocupação de manter o solo com umidade elevada, o que implica em perdas, especialmente por percolação profunda. A irrigação dessa cultura deve, portanto, ser embasada nas suas particularidades, dentro das variações ambientais, e ser avaliada dentro do sistema de produção da mesma, considerando-se aspectos dos sistemas de irrigação, do espaçamento da cultura, dos seus tratamentos culturais e do controle fitossanitário.

3.3.2 Sistemas de irrigação para bananeira

O método da aspersão convencional promove uma irrigação em toda a área, isto é, mantém a área molhada em 100%. A zona radicular da bananeira que mais extrai água do solo se encontra no raio de 0,60 m da planta. Essa região do solo, até a profundidade de 0,40 a 0,50 m, é onde as raízes extraem em torno de 80% do total de água utilizada pela planta, não diferindo entre a aspersão convencional e a irrigação localizada (SANT'ANA *et al.*, 2012). A área molhada total do solo pela aspersão não aumenta significativamente a produtividade da bananeira, quando comparada aos sistemas de irrigação localizada. Entretanto, resulta em perda significativa de água no solo fora da zona mais ativa do sistema radicular. Na irrigação da bananeira por aspersão convencional, utiliza-se aspersores de baixa pressão e que devem ficar até 1 m acima do solo, com ângulo de inclinação no máximo de 9 graus.

A irrigação localizada exige um procedimento que deve ser feito no bananal, que é manter o alinhamento das fileiras de plantas, desde a fase vegetativa, mantendo todas as plantas filhas na mesma disposição, de forma que a mudança de posição da planta ativa seja a mesma em todas as touceiras. Esse procedimento assegura a uniformidade da aplicação de água na cultura. Os emissores de água que dão nome aos sistemas de irrigação localizada são os microaspersores, gotejadores, microjatos, microtubos, além de outros.

O gotejamento é mais adequado a solos de textura média a argilosa, sendo um sistema de maior eficiência que a microaspersão, com menor dispêndio de água. Em condições subúmidas ou úmidas, uma linha lateral por fileira de plantas é suficiente para garantir produtividades. No semiárido, no entanto, são necessárias duas linhas laterais de irrigação por fileira de plantas. Dois ou três gotejadores espaçados de 0,40 a 0,50 m entre si, por planta ao longo de uma linha lateral por fileira de plantas são suficientes para a cultura em condições úmidas e subúmidas. Em condições semiáridas deve-se usar quatro a seis gotejadores por planta nos mesmos espaçamentos distribuídos nas duas linhas laterais. O gotejamento, pela disposição dos emissores na região de concentração das raízes da bananeira, contribui para maior crescimento inicial das plantas em relação à microaspersão.

A microaspersão favorece a fase de produção da cultura, mais do que o gotejamento. As produtividades no sistema de gotejamento considerando duas linhas laterais por fileira de plantas com emissores distantes 0,40 a 0,50 m entre si podem se equiparar às obtidas na microaspersão. Em pomares com espaçamentos entre plantas de 3,0 m x 2,0 m ou 3,0 m x 2,5 m, os microaspersores devem ter vazões entre 50 e 70 L/h, devido ao raio de ação do emissor ser entre 3,0 m e 3,5 m. Pode-se usar microaspersores de vazão entre 40 e 50 L/h ou até 60 L h⁻¹ para espaçamentos entre plantas mais adensados como 2,5 m x 2,0 m. Os microaspersores podem ser dispostos um para quatro plantas ou espaçados entre si na linha lateral de 3,5 a 4,5 m. Os sistemas de microaspersão, conforme a vazão do emissor e o espaçamento entre plantas favorecem melhores condições de umidade na zona radicular do que o gotejamento. O gotejamento, quando sob uso de faixa contínua, com emissores dispostos ao longo de duas linhas laterais por fileira de plantas, contribuem para produzir tanto quanto ou mais que a microaspersão, a depender da vazão dos emissores (SANTANA JÚNIOR, 2012).

3.3.3 Necessidades hídricas da bananeira

As variedades de bananeiras mais cultivadas no Brasil são do grupo genômico AAA, subgrupo Cavendish, genótipos Grand, Naine, Nanica, Williams; do grupo AAB, subgrupo Pome, genótipos Prata, Prata Anã, Prata Gortuba, Prata Catarina e subgrupo Maçã, Yangambi número 2, com a Maçã, BRS Tropical e a BRS Princesa, sendo todos os genótipos pouco tolerantes a estresses hídricos. São genótipos cujas raízes se concentram nas camadas mais próximas da superfície do solo, onde as perdas de água por evaporação são maiores, não suportando longos períodos sem água de chuva ou irrigação (RAVI *et al.*, 2013). Os

tetraploides AAAB, por exemplo, 'BRS Platina', 'BRS Tropical' e 'BRS Princesa' expressam tolerância intermediária a estresse hídrico do solo (COELHO *et al.*, 2015).

Os cultivares de bananeira apresentam diferenças na resposta à aplicação de água, isto é, pode haver maior ou menor diferença entre a necessidade hídrica desses cultivares. Quanto à resposta a aplicação de água, levando em consideração a medida da taxa de variação da produtividade em função do volume de água aplicado, o cultivar Grande Naine do subgrupo Cavendish apresenta maior taxa ou responde mais a aplicação de água que os genótipos do subgrupo Pome. O cultivar BRS Princesa, híbrido de Yangambi, tipo maçã, apresenta baixa taxa de variação da produtividade em relação à aplicação de água (COELHO *et al.*, 2015).

A demanda de água da bananeira varia com o cultivar, com a fase fenológica dessa e com as condições meteorológicas que determinam a evapotranspiração máxima ou de referência (ET_o). Um mesmo cultivar pode necessitar de um maior ou menor volume de água em seu ciclo, dependendo principalmente das condições meteorológicas e da cultura durante o ciclo. Quanto maior ou menor a evapotranspiração máxima ou de referência decorrente da radiação líquida, da temperatura relacionada à umidade relativa e da velocidade do vento, associada à resistência aerodinâmica do genótipo, vai haver uma necessidade maior ou menor de água, respectivamente, durante seu ciclo. Os genótipos de bananeira podem usar entre 600 mm a mais de 2000 mm de água, dependendo da ET_o durante o ciclo e do comprimento desse (COELHO *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2007; COELHO *et al.*, 2006; TEXEIRA *et al.*, 2002).

A bananeira apresenta três fases de distintas taxas de aumento de sua massa seca (ARAÚJO, 2008), que indiretamente reflete suas necessidades hídricas. Até o quarto ou sexto mês do plantio, quando apresenta diferentes comportamentos quanto à transpiração; do quinto ou sétimo mês, até 60 dias da emergência da inflorescência, quando a bananeira apresenta a maior área foliar total (TURNER; FORTESCUE; THOMAS, 2010); e a partir daí até o final do crescimento dos frutos. Na primeira fase, a demanda hídrica da cultura é menor que na segunda. O vigor e o crescimento das plantas na segunda fase dependem da primeira, quando o sistema radicular é limitado e a necessidade de aporte hídrico é elevado devido à predominância da evaporação do solo na evapotranspiração. Com isso, a primeira fase requer manutenção da umidade na camada de 0-0,25 m próxima à capacidade de campo.

Nos dois primeiros meses após o plantio, a irrigação por microaspersão requer maiores tempos de irrigação, comparado aos demais meses da primeira fase, devido à baixa uniformidade de distribuição local do microaspersor em relação ao sistema radicular das plantas. A deficiência hídrica no quinto ou sexto mês, até próximo de 60 dias da emissão da inflorescência, influencia na taxa de emissão, no crescimento foliar, no período da iniciação floral, na floração, no número de pencas e na produção de cachos (TURNER; FORTESCUE; THOMAS, 2010; ROBINSON; GALÁN SAÚCO, 2010). A partir desse período que antecede a floração até o final de crescimento dos frutos, a necessidade hídrica aumenta em relação à fase anterior numa taxa constante, com ligeiro aumento nos 60 dias que antecedem o crescimento máximo dos frutos. O aumento da demanda hídrica após a emergência da inflorescência se deve, principalmente, ao crescimento dos frutos.

O manejo da água de irrigação da bananeira requer o uso de indicadores da necessidade hídrica de forma a quantificar o volume de água requerido. A evapotranspiração de um genótipo de bananeira requer o coeficiente médio dessa cultura, sendo esse um indicador da necessidade hídrica da bananeira durante seu ciclo. A literatura mostra diversos valores de coeficiente de cultura médios (K_{cm}) para a bananeira: para a região do Polo Petrolina-Juazeiro os valores de K_{cm} ficaram entre 0,6 e 1,1 e entre 1,1 e 1,3 nos primeiro e segundo ciclos, respectivamente (TEIXEIRA *et al.*, 2002; BASSOI *et al.*, 2004). Nas condições da Chapada do Apodi, os valores de K_c no início (K_{cin}), meio (K_{cmid}) e final (K_{cfinal}) do ciclo foram de 1,09; 1,21 e 0,71 respectivamente (COSTA, 2009). Mesmo fora do Brasil, os valores de K_c permaneceram nas mesmas faixas citadas, tanto para condições tropicais como

subtropicais (CARR *et al.*, 2009). Esses diversos valores de K_{cm} indicam que os coeficientes sugeridos por Doorembos e Kassam (1994) são adequados para os genótipos mais cultivados dos subgrupos Cavendishe e Pome (Tabela 4). O coeficiente de cultura dual, que envolve o coeficiente basal (K_{cb}), considera a evapotranspiração com predominância da transpiração da planta, isto é, com a superfície do solo seca e o coeficiente de evaporação (K_e). O K_e considera a evaporação predominante, imediatamente após a irrigação e, para efeito de aumento da eficiência de uso de água das plantas, é mais indicado (Tabela 5). Esses coeficientes demonstram as taxas de aumento da necessidade de água pela bananeira com estabilidade no máximo da necessidade na fase de crescimento de frutos.

Tabela 4. Coeficientes de cultura médios (K_{cm}) recomendados para a bananeira no primeiro ciclo de produção (DOOREMBOS; KASSAM, 1994).

Meses após o plantio (Primeiro ciclo de produção)											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,40	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,85	1,00	1,10	1,10	0,90	0,80

A evapotranspiração (ET_c) para a irrigação por aspersão considera apenas o K_{cm} conforme as Tabelas 4 e 5, entretanto na irrigação localizada, a ET_c deve ser corrigida em função da área efetivamente molhada, o que pode ser feito considerando a fração da área molhada (KELLER; BLIESNER, 1990) ou pelo coeficiente de localização (K_L) (Tabela 6).

Tabela 5. Coeficientes de cultura basal (K_{cb}) para dois ciclos de produção da bananeira (ALLEN *et al.*, 1998).

Ano (ciclo)	Coeficientes de cultura basal (K_{cb})		
	Fase inicial	Fase de crescimento máximo dos frutos	Fase de estabilização do crescimento dos frutos
1	0,15	1,05	0,9
2	0,6	1,10	1,05

Tabela 6. Equações para determinação do coeficiente de ajuste (K_L) da evapotranspiração.

Equação	Fonte
Se $P_s \geq 0,65 \rightarrow K_L = 1,0$	Feres (1981)
Se $0,20 < P_s < 0,65 \rightarrow K_L = 1,09 P_s + 0,3$	
Se $P_s \leq 0,20 \rightarrow K_L = 1,94 P_s + 0,10$	Keller e Bliesner (1990)
$K_L = 0,1\sqrt{P_s}$	

P_s - fração de área molhada ou sombreada, prevalecendo o maior valor.

A evapotranspiração obtida com uso do coeficiente de cultura é o indicador mais em uso para quantificar a necessidade atual de água dos genótipos de bananeira e depende, principalmente, da condutância estomática que, por sua vez, é influenciada pela radiação líquida, pelo *deficit* de pressão de vapor e pela água disponível do solo. A ET_c dessa forma integra o estado da planta e do solo na quantificação do volume de água necessário às plantas.

3.3.4 Manejo da água de irrigação

O manejo da água de irrigação da bananeira tem sido feito com (i) uso de métodos relativos à redução da disponibilidade de água do solo, com instrumentos de medição de

umidade e de potencial da água do solo; (ii) com uso de dados para determinação da evapotranspiração da cultura, (iii) com uso dos dados do balanço de água na zona radicular, que envolve os dois métodos anteriores. Para a bananeira, apesar da disponibilização dessas ferramentas a determinação do estado hídrico das mesmas, com uso a partir de imagens dos índices da vegetação NVDI e SAVI (BRITO *et al.*, 2015), as informações estão ainda em fase inicial como, por exemplo, a determinação da condição hídrica das plantas pelas folhas mais novas (LEVANON *et al.*, 2015).

O uso de sensores de água no solo precisa da definição da umidade ou do potencial de água do solo referente à redução da água disponível do solo. No caso da bananeira, o limite para a redução é de 30% da água disponível, isto é, a umidade crítica é resultante da diferença da umidade na capacidade de campo é de 30% da água disponível. Essa umidade ou potencial deve ser obtida da curva característica de retenção de água do solo, mas na ausência dessa pode-se utilizar, a princípio, os valores apresentados na Tabela 7 fazendo ajustes posteriormente conforme o crescimento das plantas.

O produtor pode antecipar a irrigação ou diminuir a percentagem de redução da água disponível para 20 ou 25%. As informações das umidades ou potencial de água no solo críticos também são usados para definição da frequência de irrigação (Tabela 8) para os sistemas de aspersão convencional ou mini aspersão.

Tabela 7. Umidade e tensão crítica de solos de diferentes classes texturais para a cultura da bananeira (COELHO *et al.*, 2012).

Classificação Textural	Umidade	Umidade	Umidade	Tensão Crítica (kPa)
	CC ¹ (m ³ m ⁻³)	PMP ² (m ³ m ⁻³)	Crítica (m ³ m ⁻³)	
Arenosa	0,1700	0,0847	0,1374	10
Areia Franca	0,1997	0,0549	0,1563	14
Franco-Arenosa	0,2094	0,0807	0,1708	16
Franco	0,3156	0,1033	0,2519	26
Franco-Argilo-arenosa	0,2355	0,0894	0,1917	19
Argilo-Arenosa	0,1639	0,1508	0,1599	14
Franco-Argilo-siltosa	0,2397	0,0743	0,1901	23
Argila	0,3560	0,2555	0,3111	49

¹ CC: Capacidade de campo. ² PMP: Ponto de Murcha Permanente.

Tabela 8. Valores do intervalo em dias entre irrigações por aspersão para a bananeira para diferentes evapotranspirações médias da cultura em diferentes tipos de solo.

Textura do solo	Evapotranspiração potencial da cultura (ET _c , mm dia ⁻¹)				
	2	3	4	5	6
Arenoso	7	4	3	3	2
Franco-arenosa	8	5	4	3	3
Franco	13	8	6	5	4
Argila	10	7	5	4	3

Em sistemas de irrigação localizada, a recomendação para regiões semiáridas é irrigação diária e com pulsos, ou intervalos menores que 24 horas para solos do tipo arenoso ou areia franca. Em solos de textura argilosa, a irrigação diária em condições semiáridas é mais adequada no gotejamento, para emissores de baixa vazão (entre 1,5 e 2,5 L h⁻¹),

podendo-se estender o intervalo entre irrigações para dois dias independente da vazão dos emissores. Em regiões úmidas e subúmidas, os intervalos entre irrigações para solos de textura média podem ser de até dois dias, e até três dias em solos de textura argilosa, exceto no verão, em condições máximas da evapotranspiração de referência (acima de 4 mm dia⁻¹).

Na instalação dos sensores de água do solo para a bananeira, deve-se levar em consideração a região da zona radicular onde se encontra 80% do comprimento total do sistema em interseção com a zona efetiva de extração de água pelas raízes. A região da zona radicular da bananeira de modo geral encontra-se até 0,83 m de distância efetiva da touceira ou "família" e a profundidades variando de 0,33 a 0,60 m (COELHO *et al.*, 2008; CARR *et al.*, 2009; SANT'ANA *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2016). A extração de água pelas raízes se deve, entre outras razões, aos gradientes de potenciais totais de água ou de umidade entre o solo e as raízes. A localização desses gradientes apresenta variação temporal e espacial no perfil do solo, contudo, para fins de manejo da água de irrigação em campo, os limites onde 80% da extração total no perfil ocorre, encontra-se na profundidade de até 0,40 m, sob o sistema de gotejamento; e de 0,50 m até 0,60 m, sob sistema de microaspersão. A distância efetiva onde ocorre 80% da extração de água na zona radicular está em 0,70 m (COELHO *et al.*, 2008; SANTANA JÚNIOR *et al.*, 2020). Assim, o posicionamento de sensores de umidade ou potencial mais adequado é na distância máxima da planta de 0,50 m para gotejamento e 0,60 m para microaspersão, e profundidades entre 0,20 m e 0,35 m nos dois sistemas de irrigação (COELHO *et al.*, 2016).

O uso do método de manejo de água com base na redução da água disponível do solo é de fácil uso, uma vez que for definido a umidade ou o potencial de água. A lâmina de água a ser repostada ao solo será a diferença do limite superior da disponibilidade da água do solo e a umidade crítica. O tempo de irrigação (h) para sistemas de aspersão convencional será dado pela razão da lâmina a ser repostada (mm) e a intensidade média de precipitação do aspersor (mm h⁻¹). A lâmina de água para o sistema de irrigação localizada (mm) será calculada da mesma forma, apenas considerando a percentagem de área molhada (fração); o volume a ser aplicado deve considerar o produto da lâmina calculada (mm) com a área de ocupação da touceira de bananeira (m²). O tempo de irrigação (h) será a razão do volume de água em litros e a vazão por planta dos emissores (L h⁻¹). O produtor obtendo os cálculos da lâmina de reposição para um valor fixo da umidade crítica conforme a curva de retenção de água do solo ou a Tabela 4, mas mantendo sempre esse critério, um cálculo apenas é necessário.

O manejo da água de irrigação feito apenas a partir da evapotranspiração do genótipo de bananeira é mais adequado para sistemas de maior eficiência de irrigação como a microaspersão e o gotejamento. O método assume que o que entra de irrigação considerando a precipitação efetiva, deve corresponder a lâmina ou volume de água de reposição da água evapotranspirada no período desde a última irrigação. As perdas por percolação e escoamento superficial são negligenciadas. O momento da irrigação pode ser definido pelo turno de rega fixo ou pelas leituras dos sensores de água do solo com base em uma umidade crítica.

O manejo pelo balanço de água do solo ou na zona radicular envolve o acompanhamento da umidade ou do potencial da água do solo e da evapotranspiração do genótipo desde o início da estação de irrigação, quando a umidade do solo deve estar no limite superior da disponibilidade de água ou na capacidade de campo. O momento da irrigação é levado em conta e a irrigação será função da evapotranspiração acumulada levando em consideração a precipitação efetiva no período.

O uso da técnica de regulação do *deficit* de irrigação (RDI) permite uma economia de água durante o ciclo da bananeira de até 25% da lâmina de irrigação. Na fase de crescimento vegetativo da cultura, pode-se reduzir até 21% da lâmina de irrigação. Na fase final de crescimento dos frutos de banana, quando os mesmos atingem o tamanho máximo para

colheita, pode-se reduzir até 25% da lâmina de irrigação com garantia da produtividade potencial da cultura (COELHO *et al.*, 2019).

O manejo de água pela irrigação lateralmente alternada (secamento parcial das raízes) pode ser aplicado à cultura da bananeira tanto para os cultivares com maior eficiência de uso de água como a BRS Princesa e a Grande Naine, como também, para os cultivares tipo Prata. A redução de produtividade é um fator limitante nesse método, mas não excede 7%, 12% e 16% para os cultivares Grande Naine, BRS Princesa e Prata-Anã clone Gorutuba, respectivamente, no primeiro ciclo. As reduções de produtividade dos cultivares são menores nos ciclos subsequentes (COELHO *et al.*, 2019).

O manejo da água de irrigação, além de consistir na definição do momento de irrigar e da quantificação da irrigação, envolve também o horário da irrigação. O menor custo da energia dentro do horário de 21 horas e 30 minutos até as 6 horas leva os produtores a preferirem esse horário para irrigação. A bananeira mantém suas atividades de transpiração e fotossíntese do início até o final do dia. Os estômatos permanecem fechados durante a noite, com interrupção da transpiração e da fotossíntese. Solos de textura arenosa com alta velocidade de infiltração, irrigados nas primeiras horas, ou seja, após as 21 horas e 30 minutos, perdem a maior parte da água aplicada por percolação durante a noite. Isso só não ocorrerá caso haja um gradiente textural na zona radicular ou abaixo dela, de forma que a camada inferior tenha uma condutividade hidráulica muito mais baixa que a da camada superior. Deve-se escolher horários de baixa intensidade de ventos, menor temperatura e alta umidade relativa do ar, o que ocorre nas primeiras horas da manhã, no final da tarde ou à noite. A cultura da bananeira apresenta uma taxa de elevação da transpiração constante a partir das primeiras horas de luz solar até próximo de 11 horas, mantendo seu valor máximo até o período entre 14 e 15 horas. A partir daí tende a reduzir a uma taxa quase constante até o início da noite (LU *et al.*, 2002).

3.4 Irrigação do mamoeiro (*Carica papaya*)

3.4.1 Principais regiões produtoras

As mudanças climáticas favorecem uma redução da disponibilidade hídrica (EDENHOFER *et al.*, 2014) das áreas produtoras de mamão do estado da Bahia, Ceará, Rio Grande do Norte e Espírito Santo, onde estão localizados os maiores polos de produção dessa fruta no Brasil (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019). Levando em consideração os cenários futuros de mudanças climáticas, os maiores riscos para cultura do mamoeiro, nas principais regiões produtoras da Bahia, por exemplo, estariam relacionados aos aumentos térmicos, que poderiam atingir os limites máximos críticos para cultura e, principalmente, à elevação das demandas hídricas, tornando imprescindível o uso contínuo da irrigação para muitas localidades que atualmente a utilizam apenas de forma complementar (COELHO FILHO *et al.*, 2009).

O mamoeiro é considerado uma das plantas frutíferas com maior precocidade de produção (JIMÉNEZ *et al.*, 2014). A partir do terceiro ou quarto mês após o plantio, as fases de crescimento, floração e maturação dos frutos ocorrem simultaneamente. Assim, com base nesse intenso desenvolvimento, em regiões com precipitações anuais inferiores a 1.200 mm, ou até mesmo com volumes acumulados superiores a 1.500 mm, porém com distribuição irregular ao longo do ano, torna-se imprescindível o suprimento adequado e constante de água por meio da irrigação, para manutenção do potencial produtivo da cultura.

Tanto a produção como o crescimento do mamoeiro respondem positivamente ao incremento de lâminas de água aplicadas (MELO *et al.*, 2020, COELHO; SIMÕES, 2010; POSSE *et al.*, 2009; ALMEIDA *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2001), embora a eficiência do uso da água

possa ser reduzida em função das perdas de água no solo por percolação, principalmente em solos arenosos (MELO *et al.*, 2020).

3.4.2 Sistemas de irrigação

Nos pomares de mamoeiro, o método de irrigação localizada e aspersão têm sido os mais utilizados. Dentre esses métodos, os sistemas de irrigação por microaspersão e gotejamento são os mais recomendados e adotados. No sistema por microaspersão, normalmente utiliza-se um emissor para duas ou quatro plantas de mamoeiro, desde que a uniformidade de distribuição de água pelos emissores seja superior a 85%.

Em pomares de mamoeiro, o sistema por gotejamento pode ser usado tanto enterrado quanto superficial. No sistema por gotejamento enterrado, a linha de gotejadores deve ser enterrada de 0,20 a 0,30 m de profundidade, de forma que promova um bom desenvolvimento do sistema radicular. Além disso, recomenda-se o uso de gotejadores de fluxo turbulento com vazão igual ou menor que 2 L h^{-1} , e que o plantio do mamoeiro seja realizado no período chuvoso, com intuito de estabelecer para o período de *deficit* hídrico um sistema radicular capaz de utilizar a água disponível do volume molhado criado pelo emissor.

A configuração do gotejamento superficial pode ser com duas linhas laterais ou apenas uma linha lateral por fileira de plantas. Em pomares de mamoeiro localizados em regiões semiáridas, com solo de textura média argilosa, recomenda-se o sistema de gotejamento superficial com duas linhas laterais por fileira de plantas, com três gotejadores por linha lateral, sendo um gotejador central próximo da planta e os outros dois a 0,40 m desse. Já em pomares localizados em regiões úmidas ou subúmidas, normalmente, recomenda-se uma linha lateral por fileira de plantas com essas mesmas disposições dos emissores.

Dentre os sistemas de irrigação por aspersão, os sistemas do tipo pivô central e autopropelido são os mais utilizados em áreas produtoras de mamão. Nesses sistemas, os jatos de água são direcionados sobre o mamoeiro, o que contribui para o aumento da queda das flores devido ao impacto do jato. A irrigação por aspersão, em períodos e em horários do dia de maior temperatura, reduz a temperatura foliar e o *deficit* de pressão de vapor folha-ar (DPVfolha-ar) por manter os estômatos abertos, favorecendo assim a manutenção da taxa fotossintética líquida, o que reflete na produtividade do mamoeiro (REIS; CAMPOSTRINI, 2011). Apesar dos benefícios da irrigação por aspersão nas relações fisiológicas, a aplicação de água sobre as folhas do mamoeiro pode propiciar o surgimento de pragas e doenças, devido à formação de condições microclimáticas (temperatura e umidade relativa do ar) favoráveis (REIS *et al.*, 2013).

3.4.3 Necessidades hídricas do mamoeiro

O mamoeiro é exigente em água, no entanto não tolera excesso de umidade no solo. A necessidade hídrica do mamoeiro varia de acordo com as condições climáticas locais, com a fase do desenvolvimento vegetativo/reprodutivo da planta e com a variedade cultivada.

Em cultivos de mamoeiro (espaçamento $3,0 \times 1,7 \text{ m}$) submetidos a uma baixa demanda evapotranspiratória, com plantas na fase inicial de crescimento e floração até os sete meses do plantio ou plantas no início da fase de floração/produção, o consumo de água pode variar de 2 a 4 mm d^{-1} . Essa recomendação também é válida para áreas litorâneas (MONTENEGRO *et al.*, 2004). Já nos cultivos submetidos à elevada demanda da evapotranspiração, ou seja, alta temperatura e baixa umidade do ar (região semiárida da Bahia e do Norte de Minas Gerais), com plantas na fase produtiva (acima dos sete meses após o transplante), o consumo de água da cultura (espaçamento $3,0 \times 1,7 \text{ m}$) pode variar de 5,0 a $6,5 \text{ mm dia}^{-1}$. Em pomares com plantas adultas entre o 9º e o 12º mês após o transplante e na fase de produção, a demanda máxima diária de água é de 30 a 35 L planta^{-1} (COELHO *et al.*, 2011).

Por ser uma planta herbácea e com elevada condutividade hidráulica, o fluxo de seiva e a transpiração do mamoeiro acompanham a dinâmica das variações da radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$) ao longo do dia (COELHO FILHO *et al.*, 2006). Em dias sem nuvens e com elevada disponibilidade energética, a transpiração do mamoeiro alcança valores elevados (Figura 5a). Já em dias chuvosos ou nublados e com baixa disponibilidade energética, a transpiração do mamoeiro reduz drasticamente a valores próximos de zero em razão da ocorrência de chuva próxima às 12 horas (Figura 5b).

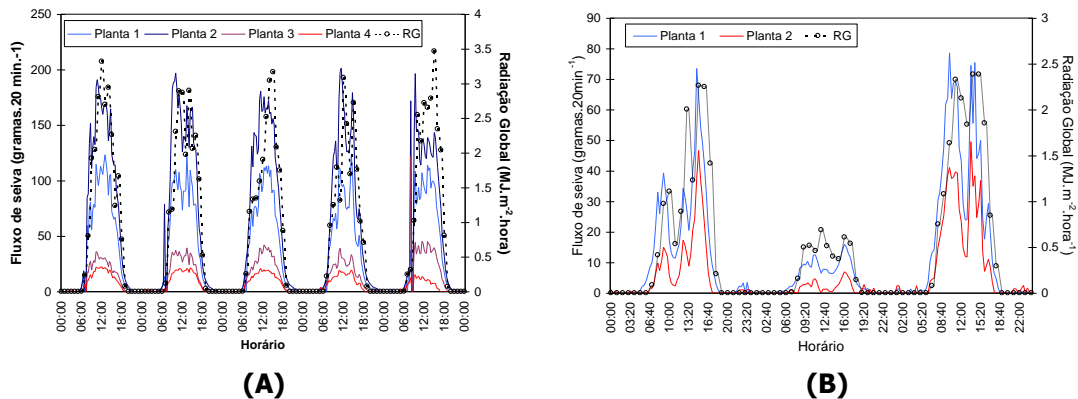


Figura 5. Transpiração máxima de plantas de mamoeiro 'Tainung número 1' em dias sem nuvens e com elevada disponibilidade energética (A) em dias chuvosos e com baixa disponibilidade energética (B) (COELHO FILHO *et al.*, 2006).

O *deficit* hídrico no solo contribui mais para a redução da taxa fotossintética nos dias sem nuvens do que em dias nublados, principalmente devido ao comportamento dos estômatos (REIS; CAMPOSTRINI, 2008). Geralmente, a condutância estomática do mamoeiro sofre reduções significativas quando a tensão de água no solo atinge valores entre -50 a -60 kPa. No caso do mamoeiro com 6 meses de idade, Marler e Mickelbart (1998) verificaram uma redução da taxa fotossintética em 50%, quando a tensão de água no solo passou de -20 para -68 kPa.

3.4.4 Manejo de água de irrigação

O manejo da irrigação do mamoeiro pode ser realizado via solo ou via clima, ou por meio de informações de ambos simultaneamente. No manejo via solo, a umidade/tensão de água no solo é mensurada por meio de sensores (Tensiômetros, Watermarks, Sondas TDR, entre outros) para definir o momento de irrigar ou a quantidade de água a repor ao solo e à planta. A umidade ou tensão de água do solo até a qual a planta é capaz de extrair água de forma a suprir os gradientes de potenciais na rota raiz-planta-atmosfera, ou a umidade/potencial crítico varia com o tipo de solo. Assumindo que essa umidade/potencial de água ocorre quando a água disponível reduz em 30% a partir do seu limite superior (capacidade de campo), pode-se estabelecer os mesmos limites máximos de redução da disponibilidade de água para diferentes texturas do solo usados para a bananeira (Tabela do tópico da bananeira).

Os intervalos entre irrigações para o uso do sistema de aspersão podem ser os mesmos usados para a bananeira. O produtor, entretanto, pode estabelecer a umidade e potencial crítico de forma mais precisa com dados físicos e a curva de retenção de umidade do solo após amostragem e análise em laboratório. O intervalo entre irrigações para o sistema de gotejamento e microaspersão segue os mesmos sugeridos para a bananeira.

Os sensores desempenham um papel fundamental no manejo da água de irrigação, mas desde que localizados de forma que possam atender a necessidade da planta. A região

da zona radicular mais adequada para o sistema de gotejamento em fileira simples com três emissores por planta espaçados de 0,40 m entre si é na direção da fileira de plantas a no máximo 0,65 m da planta e a profundidades entre 0,20 e 0,45 m. No sistema de gotejamento com duas linhas laterais e gotejadores de 4 L h⁻¹, a profundidade de instalação é até 0,35 m, uma vez que o mesmo volume é dividido nas duas linhas laterais com menor tempo de irrigação e portanto, menor profundidade do volume molhado. A instalação dos sensores na microaspersão com uma linha lateral entre duas fileiras de plantas é mais adequada considerando a direção planta-microaspersor na distância de 0,55 m da planta na profundidade entre 0,20 m e 0,40 m (SANTOS, 2020; COELHO; SIMÕES, 2015; COELHO *et al.*, 2005). Essas recomendações consideram de forma segura a região de instalação dos sensores, mesmo considerando a variabilidade das zonas de extração de água, no entanto a zona de maior atividade no sistema radicular é observada até 0,40 m da planta e a profundidades próximas de 0,30 m.

3.4.5 Manejo via clima e balanço de água na zona radicular

No manejo de água de irrigação no mamoeiro, o cálculo da evapotranspiração requer o coeficiente da cultura. Nas condições litorâneas do Norte do Estado do Rio de Janeiro e do Estado do Espírito Santo (clima tropical úmido, com inverno seco e chuvas máximas no verão) esses coeficientes para o mamoeiro Híbrido UENF/CALIMAN01 variam linearmente de 0,63 no transplântio até 1,05 a 206 dias após o transplântio (DAT). Além disso, após esse período, a variação do Kc relaciona-se inversamente com o diâmetro de copa do mamoeiro, reduzindo-se ao valor médio mínimo de 0,81, aos 300 DAT (POSSE *et al.*, 2008). Nas condições dos Tabuleiros costeiros do recôncavo da Bahia (clima tropical quente e úmido), para o cultivar Sunrise Solo, os coeficientes que resultam em maiores produtividades e eficiência no uso da água são de 0,31, 0,42, 0,52 e 0,84 para 0-30 dias após o plantio (DAP), 31-60 DAP, 61-120 DAP e acima de 120 DAP, respectivamente (COELHO *et al.*, 2010). Esses coeficientes para cultivar Tainung número 1 são de 0,38; 0,51; 0,64 e 1,02 para 0-30 DAP, 31-60 DAP, 61-120 DAP e acima de 120 DAP, respectivamente (COELHO; SIMÕES, 2010).

Levando em consideração as áreas foliares do mamoeiro 'Tainung 1' e 'Sunrise Solo', Coelho Filho *et al.* (2006) obtiveram, as curvas de coeficiente de cultura conforme apresentado na Figura 2. O coeficiente de cultivo máximo (1,20) ocorre a 270 dias após o plantio para o cultivar Sunrise Solo e a 225 dias após o plantio para o cultivar Tainung número 1, quando para essas dois cultivares a área foliar média atinge o valor máximo (Figura 6).

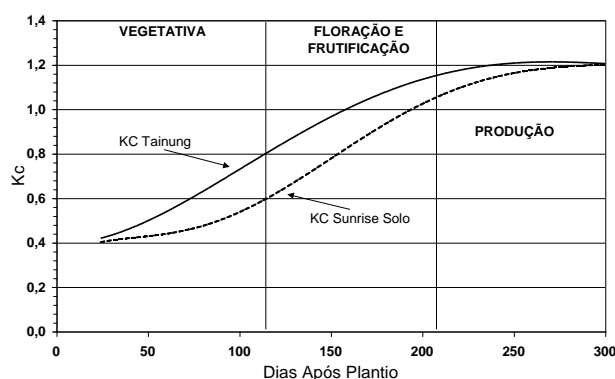


Figura 6. Coeficientes de cultura (Kc) para os cultivares Tainung nº 1 e Sunrise Solo ao longo do tempo, obtidos como função da área foliar (COELHO FILHO *et al.*, 2006).

Os coeficientes de cultura para o mamoeiro Sunrise nas condições do norte do Estado do Ceará variam de 0,64; 1,16 e 1,19 para os estádios fenológicos de crescimento vegetativo, floração frutificação e floração frutificação e maturação, respectivamente (MONTENEGRO *et*

al., 2004). De modo geral, o valor máximo do coeficiente de cultivo do mamoeiro deve ser mantido até pelo menos 370 dias após o plantio, quando pode ocorrer reduções da área foliar total das plantas e da própria produção do mamoeiro de até 35% para cultivar Tainung 1 e de até 50% para o cultivar Sunrise Solo. Nessas situações, será necessário fazer ajustes do coeficiente cultivo para a nova condição, como sugerido por Posse *et al.* (2008).

Em pomares de mamoeiro irrigado por gotejamento ou microaspersão, o KI pode ser considerado de 0,65 até o terceiro mês do plantio; 0,75 no quarto; 0,85 do quinto ao sexto mês e 1,00 a partir do sétimo ou adotar a metodologia proposta por Ferreres (1987).

Vale ressaltar que independente do manejo via solo ou via clima, para que não ocorra redução de produtividade do mamoeiro devido à disponibilidade hídrica do solo, recomenda-se que a água disponível no solo permaneça ao longo do ciclo produtivo superior ou igual a 70%, ou seja, um fator de disponibilidade (f) de redução da disponibilidade de 0,30 (SANTOS, 2020).

3.4.6 Uso de técnicas de manejo de irrigação com *deficit* hídrico

Dentre as técnicas de manejo de irrigação com *deficit* hídrico, a técnica PRD "Partial Root-zone Drying" ou secamento parcial da zona radicular vem sendo apontada como uma estratégia viável e promissora para o aumento da eficiência do uso de água em áreas irrigadas de mamoeiro. O mamoeiro 'Tainung 1' cultivado em condições semiáridas sob PRD com frequência de alternância do lado irrigado de 7 dias e redução de 35% lâmina de irrigação pode aumentar a eficiência do uso de água em 23,2% e gerar uma economia de água de 43,3 litros para cada quilograma de fruto produzido, quando comparada com as plantas submetidas a irrigação plena, ou seja, sem redução da lâmina de irrigação (SANTOS *et al.*, 2021). A técnica PRD não compromete as qualidades químicas dos frutos, isto é, o pH, a acidez titulável (AT), o teor de sólidos solúveis (SS) e a relação SS/AT dos frutos do mamoeiro.

O mamoeiro 'Golden' cultivado sob PRD, com frequência de alternância do lado irrigado de 14 dias associada a uma redução de 30% da lâmina de irrigação, na primeira colheita, o uso da técnica PRD permitiu um ganho de 6,5 kg de frutos por planta e uma redução na pegada hídrica (L de água utilizado por cada kg de fruto colhido) de 47,6% (LIMA *et al.*, 2015). A pegada hídrica com uso da técnica foi de 119 L de água por 1 kg de fruto produzido, enquanto sem a irrigação com *deficit* com uso do PRD, a pegada hídrica foi de 227 L de água por quilo de fruto.

3.4.7 Uso de imagens termais

Apesar dos poucos trabalhos científicos realizados em áreas irrigadas de mamoeiro, as ferramentas do sensoriamento remoto vêm sendo apontada como promissoras na identificação do vigor vegetativo da cultura e os períodos de maior estresse térmico associado ao aumento do *deficit* de pressão de vapor do ar. Por exemplo, por meio do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada foi possível identificar dois cenários em relação ao vigor vegetativo do mamoeiro irrigado (Figura 7) nas condições do projeto Formoso, em Bom Jesus da Lapa - BA (SANTOS *et al.*, 2021). Um cenário de elevada temperatura e *deficit* de pressão de vapor do ar (3,4 kPa), com maior estresse térmico (imagem: 27/01/2017), conseqüentemente, maior taxa de abscisão das folhas basais correspondeu a menores valores do NDVI. Em contraste, outro cenário nas imagens de 20/02/2017, 06/03/2017 e 28/04/2017, de um período com *deficit* de pressão de vapor do ar mais ameno (2,5 kPa), que favoreceu a uma menor taxa de abscisão das folhas basais correspondeu a maiores valores de NDVI (Figura 7).



Figura 7. Imagens de NDVI provenientes da constelação PlanetScope durante o período de condução do experimento com mamoeiro irrigado em Bom Jesus da Lapa, Bahia, Brasil.

3.5 Irrigação da mangueira (*Mangifera indica* L.)

3.5.1 Regiões de cultivo

A manga (*Mangifera indica* L.) se destaca como uma das frutas mais populares e comercializadas no mundo, sendo o Brasil o sétimo maior produtor mundial (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2010) e um dos principais exportadores. Segundo Mouco (2015), o cultivo da mangueira no Brasil iniciou-se com os plantios de forma extensiva, utilizando-se variedades locais e empregando poucas tecnologias. Posteriormente, com a elevação do nível tecnológico, incluindo o uso da irrigação, da capacidade de indução floral e do aparecimento de variedades melhoradas, houve uma expansão da área cultivada com manga, iniciando-se no Estado de São Paulo, com posterior difusão para o restante do País, principalmente nos polos de agricultura irrigada do Nordeste, como no Submédio do Vale do São Francisco (Bahia e Pernambuco), nos Vales do Jaguaribe, Açu-Mossoró, Parnaíba e Platô de Neópolis, nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Piauí e Sergipe, respectivamente.

Em 2017, a manga foi a fruta mais exportada pelo país, sendo a Região Nordeste responsável por 71,78% do total nacional, sendo 80% do volume do Nordeste proveniente do Vale do Submédio São Francisco (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017; KIST *et al.*, 2018). Entretanto, embora as condições climáticas dessa região proporcionem excelentes possibilidades de cultivo, como melhoria na coloração dos frutos e redução dos seus níveis de doenças (MOUCO, 2015), a precipitação pluviométrica do semiárido brasileiro é escassa e mal distribuída, não atendendo à demanda hídrica das culturas, o que torna indispensável o uso da irrigação.

O cultivo de manga na Região Nordeste é diferenciado do das demais regiões do país, pelas suas características climatológicas como, intensa radiação solar, altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar, que contribuem para elevar a evapotranspiração na maioria dos polos de fruticultura da região.

3.5.2 Sistemas de irrigação

Os sistemas de irrigação, de sulco e aspersão, em virtude das suas baixas eficiências, quando comparados com à irrigação localizada (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008), não são recomendados para a mangueira. O uso do sistema de aspersão para o cultivo da mangueira destaca, ainda, como agravante o umedecimento das entrelinhas, que favorece o desenvolvimento de plantas daninhas, aumenta as perdas de água por evaporação e a interceptação do jato d'água pela copa das plantas, no período de floração, podendo causar

redução do número de panículas e afugentar os insetos polinizadores (PINTO *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 1996).

Atualmente, os sistemas de microaspersão e gotejamento são os mais utilizados pelos produtores para o cultivo irrigado da mangueira, uma vez que os mesmos geram uma eficiência de aplicação entre 70 e 95% e apresentam uma menor demanda de energia. A microaspersão deve ter preferência para solos de textura arenosa e sem gradientes texturais em relação ao gotejamento, entretanto pode ser usada em todos os tipos de solo, ao passo que o gotejamento é mais adequado em solos de textura média a argilosa.

A disposição dos emissores nas áreas de cultivo também pode interferir na eficiência de aplicação e na redistribuição da água no solo, mesmo quando se mantém o mesmo tempo de irrigação e volume de água aplicado (SIMÕES *et al.*, 2017). O gotejamento deve ser usado com duas linhas laterais por fileira de plantas (SIMÕES *et al.*, 2020; PINTO *et al.*, 2011). Simões *et al.* (2020a), verificou maior produtividade da mangueira cultivares Palmer e Keitt sob gotejamento com duas linhas laterais em relação a produtividade desses cultivares com uma linha lateral de gotejamento em faixa contínua em formato de anel ao redor da planta. O gotejamento com duas linhas laterais por fileira de plantas interfere positivamente na atividade fotossintética, na condutância estomática, na produtividade e no número e na firmeza dos frutos (SIMÕES *et al.*, 2020a).

No uso da microaspersão em mangueiras, é comum a instalação de um microaspersor a 0,30 m da planta. Nesse caso, o volume molhado, ou parte desse, fica sob a copa da planta, cujo sombreamento reduz a evaporação de água do solo. A vazão do microaspersor instalado dessa forma não precisa ser acima da faixa de 45-55 L h⁻¹, uma vez que vazões maiores acarretam raios de alcance da água acima de 2,50 m, onde o sistema radicular tem menor relevância quanto ao comprimento e densidade de raízes (COELHO *et al.*, 2001; KOTUR *et al.*, 1997), inclusive, de absorção de água e nutrientes para a planta. Outra forma de uso da microaspersão na mangueira é instalando os microaspersores entre plantas ao longo da fileira. Simões *et al.* (2020b) observaram maior produtividade da mangueira (cultivar Kent) com os microaspersores nessa condição, comparada à instalação dos mesmos junto das plantas. Nesse caso, a vazão dos emissores deve ser suficiente para formar uma faixa molhada contínua, o que requer uma sobreposição dos raios de alcance dos seus jatos. O espaçamento entre plantas, nesse caso, não deve exceder a 5,0 m.

3.5.3 Necessidades hídricas da mangueira

Apesar da mangueira ser considerada uma planta tolerante à seca, mesmo com o uso de um sistema de irrigação adequado, estudos têm demonstrado que a baixa disponibilidade hídrica no solo, decorrente do manejo incorreto da irrigação, pode afetar eventos fisiológicos, como o crescimento da parte aérea e do sistema radicular, a produtividade e a qualidade dos frutos (PRAKASH *et al.*, 2015). A deficiência hídrica no solo retarda o crescimento das gemas vegetativas e colabora para o crescimento das gemas florais.

A fase de crescimento de frutos é a fase de maior demanda hídrica do ciclo produtivo, onde a ocorrência de deficiências hídricas pode afetar seriamente a produção. A fase da planta mais crítica à falta de água compreende o intervalo entre a 4ª e a 6ª semana após o estabelecimento dos frutos, quando um período de 30 dias sem irrigação é suficiente para reduzir o tamanho dos frutos em 20% em comparação com a cultura sob irrigação (SCHAFFER *et al.*, 1994).

Na região semiárida do Nordeste Brasileiro a mangueira requer aproximadamente 1370 mm de água por ano (SILVA *et al.*, 1996), ou seja, 13.700 m³.ha⁻¹.ano⁻¹. A evapotranspiração obtida com o balanço de energia (razão de Bowen) de mangueiras de 6 anos de idade na região do submédio São Francisco no período de julho a dezembro de 1998 subestimou a

evapotranspiração da cultura ($3,4 \text{ mm dia}^{-1}$ a $6,1 \text{ mm.dia}^{-1}$) comparada a obtida com o balanço hídrico ($3,6 \text{ mm dia}^{-1}$ a $10,1 \text{ mm dia}^{-1}$) (LOPES, 1999). A demanda hídrica da mangueira pela evapotranspiração nas fases de floração, queda de frutos, crescimento de frutos e maturação nas condições do polo Juazeiro-Petrolina são na ordem de 3,5; 3,8; 4,5 e 4,9 mm dia^{-1} , respectivamente (SILVA, 2000).

A evapotranspiração potencial da cultura de manga (ETc) é o indicador quantitativo da necessidade hídrica da cultura. São poucos os valores de Kc disponíveis aos produtores, o que pode reduzir a eficiência do cultivo, quando são utilizados os dados já existentes para as novas variedades implantadas na região.

Na região de Petrolina (PE), os valores de Kc da mangueira (cv. Tommy Atkins), aos 18 anos de idade irrigadas por microaspersão, com um emissor por planta, com molhamento de 70% da superfície do solo, em dois ciclos de cultivo (2003-2004 e 2004-2005) foram: (i) na fase fenológica de repouso 0,7; na de crescimento vegetativo 0,8; na de maturação dos ramos, indução floral e início da floração 1,0; na correspondente ao fim da floração até o crescimento do fruto 0,9; na de maturação 0,8 e na de colheita 0,6 (TEXEIRA *et al.*, 2008). Outra recomendação de Kc para a mangueira em condições semiáridas é: 0,40 para o primeiro ano do plantio; 0,45 para o segundo ano; 0,50 para o terceiro ano. A partir do quarto ano. Os valores de Kc são: 0,65 na fase vegetativa; 0,80 nos 40 dias a partir do início da floração (DIF); 0,95 no período de 41 a 120 DIF; 1,00 entre 121 e 145 DIF e 0,80 até a colheita (SILVA, 2000). Simões *et al.* (2021) com base variações da ETc determinada usando Kc recomendados por Texeira *et al.* (2008) obtiveram valores de Kc de (i) na fase fenológica de repouso 0,57; na de crescimento vegetativo 0,66; na de maturação dos ramos, indução floral e início da floração 0,82; na correspondente ao fim da floração até o crescimento do fruto 0,66; na de maturação 0,8 e na de colheita 0,49 com produtividades de $36,4 \text{ t ha}^{-1}$ e 31 t ha^{-1} em dois ciclos.

3.5.4 Manejo da irrigação

O manejo da água sob irrigação localizada com reposição da lâmina para elevar a umidade a 100% da disponibilidade de água do solo na zona radicular efetiva da mangueira, quando feito a partir do estado da água do solo, pode considerar o turno de rega fixo ou variável, conforme a umidade ou potencial de água crítico definido pela curva de retenção de água associado à depleção ou à redução da disponibilidade de água de 50% (SOARES; COSTA, 1995), ou de 33% entre o início da floração e a colheita, e de 66% no restante do ciclo (AZZOUZ *et al.*, 1977). Em condições semiáridas, se o intervalo entre irrigações for fixo, deve ser diário em solos de textura média e em solos argilosos com gotejadores de baixa vazão em faixa contínua; deve ser diária e ou com pulsos em solos arenosos. Nos solos argilosos, com gotejadores de vazões de 4 Lh^{-1} ou acima, espaçados até 1,0 m em irrigação tipo ponto fonte o intervalo entre irrigação pode ser maior que um dia. O cálculo da lâmina de irrigação para determinar a lâmina de reposição da água no solo desde a última irrigação pela lâmina, referente à depleção ou à redução de 33 a 66% da água disponível do solo, requer a profundidade efetiva da zona radicular que, para plantas adultas pode ser considerada 0,60 m. Entretanto os cálculos podem resultar em volumes elevados de água, mesmo com menores percentagem de área molhada, o que ocorre para espaçamentos mais largos. Dessa forma, a aplicação mais coerente é para cultivos adensados.

O uso da evapotranspiração para quantificar a lâmina de água para repor ao solo pode ser usada por si só ou associada à redução da água disponível do solo de 33 a 66% (SOARES; COSTA, 1995; AZZOUZ *et al.*, 1977) pelo balanço de água na zona radicular. O cálculo da evapotranspiração considera além da evapotranspiração máxima ou de referência e o coeficiente de cultura a percentagem da área molhada ou o coeficiente de localização, Kr (Tabela 9).

Tabela 9. Percentagem de sombreamento (Ps) e coeficiente de correção (Kr) da ETc para a mangueira em função de diferentes diâmetros de copa e espaçamentos de plantas (COELHO *et al.*, 2005).

Espaçamento das plantas (m x m)	Diâmetro de copa (m)	Sombreamento (%)	Kr (FERERES, 1981)
4 x 7,5	2	10	0,49
4 x 7,5	3	24	0,56
4 x 7,5	4	42	0,76
4 x 7,5	5	65	1,00
4 x 7,5	6	94	1,00
5 x 8	2	8	0,46
5 x 8	3	18	0,65
5 x 8	4	31	0,64
5 x 8	5	49	0,83
5 x 8	6	71	1,00

O objetivo do balanço é acompanhar diariamente a variação do conteúdo de umidade do solo, partindo do solo na capacidade de campo e contabilizando a evapotranspiração e a percolação. A avaliação é diária sendo que todos os componentes da equação do balanço devem também ser diários, ou seja, o mangicultor deve ter à mão os valores diários de ETc, percolação, I, e precipitação efetiva. O produtor pode optar por um balanço mais simples onde despreza na equação do balanço a percolação e a variação de umidade ou a redução da água disponível e vai considerar a ETc subtraída da precipitação efetiva como a lâmina de irrigação.

A mensuração da redução da água disponível do solo é feita pelos sensores de umidade (reflectometria no domínio do tempo - TDR e da frequência - FDR), ou com instrumentos que medem por meio indireto, com a leitura do potencial da água no solo (tensiômetros e blocos de resistência). A instalação desses sensores em relação à planta da mangueira adulta para a irrigação localizada (microaspersão e gotejamento), de forma a representar a condição hídrica do solo no limite superior de sua disponibilidade (capacidade de campo) e na umidade ou potencial crítico para a planta, deve ser feita entre 0,20 e 1,0 m do tronco e a profundidades entre 0,20 e 0,6 m (COELHO *et al.*, 2007).

Uma das formas utilizada pelo produtor para melhorar a eficiência do cultivo irrigado da mangueira, é ofertar suas safras em períodos de maior viabilidade econômica. Neste sentido, para induzir a floração da mangueira, além da aplicação de reguladores vegetais e manejos de poda e adubação, utiliza-se irrigação com *deficit* hídrico, que mantém a árvore em repouso e evita a emissão de fluxos vegetativos, diminuindo os níveis de giberelinas levando, conseqüentemente, à maturação dos ramos (RAMÍREZ; DAVENPORT, 2010). Além de economizar água, o *deficit* hídrico pode manter ou até mesmo aumentar o rendimento das culturas, assim como, melhorar a qualidade dos frutos (LIU *et al.*, 2016).

O *deficit* hídrico deve iniciar em aproximadamente 60 dias após aplicação do indutor de floração PBZ (Paclobutrazol), podendo o efeito desejado ocorrer entre 30 e 70 dias a depender da característica climática da região. A irrigação deve ser reiniciada gradualmente até atingir seu ponto máximo, quando sintomas de brotação floral forem observados em 60% das plantas (MOUCO, 2004). A água não deve ser totalmente suspensa na fase de indução floral, uma vez que a planta deve continuar fotossintetizando e acumulando reservas, sendo

que sua suspensão total torna propícia a ocorrência de surtos vegetativos no caso de chuva (ALBUQUERQUE *et al.*, 2002; MOUCO, 2004).

3.5.5 Irrigação com *deficit*

O *deficit* hídrico aplicado em fases fenológicas isoladas da mangaueira, além de economizar água, pode manter ou até mesmo aumentar o rendimento das culturas, assim como melhorar a qualidade dos frutos (LIU *et al.*, 2016). A fase da floração ao pagamento de frutos é a mais sensível a estresses hídricos do solo pela mangaueira, cultivar Palmer (COELHO *et al.*, 2012), pelo cultivar Tommy Atkins (SANTOS *et al.*, 2013; COELHO FILHO; COELHO, 2005). A redução da lâmina de irrigação em até 25% durante a fase de crescimento dos frutos aumenta a eficiência de uso da água e não afeta a produtividade da mangaueira, cultivar Palmer ou Tommy Atkins (COELHO *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2016), entretanto, pode ocorrer perda de produção de até 16% (COELHO FILHO; COELHO, 2005).

O método do secamento parcial da zona radicular, que pode ser usado em fases ou em todo o ciclo da cultura com reduções da aplicação de água em até 50%, se adapta bem à cultura da mangaueira. O uso de uma frequência de alternância dos lados irrigados da fileira de plantas de 7 ou 14 dias para a Mangaueira cultiva Palmer com aplicação de 50% do volume da água de irrigação calculada resulta em produtividades semelhantes às com a irrigação com volume total calculado nas condições semiáridas do Norte de Minas, com o manejo feito a partir do pagamento de frutos (TEXEIRA *et al.*, 2008). A frequência de alternância de 7 ou 14 dias com aplicação de 50% da lâmina calculada no ciclo também resultam em produtividades semelhantes estatisticamente à produtividade com aplicação da lâmina total de irrigação calculada nas condições da Chapada Diamantina, Bahia (COELHO *et al.*, 2018).

3.6 Considerações finais

A irrigação deve estar integrada aos outros processos agropecuários, tais como adubação, correção da acidez do solo, controle fitossanitário, manejo fitotécnico e, principalmente, a conservação da água no solo. Os sistemas de irrigação já foram bem definidos para as fruteiras, mas suas relações com as mesmas quanto à adequação de fatores como vazão, espaçamento e quantidade de emissores, apesar das recomendações existentes, ainda não são de conhecimento de quem vende ou quem compra, principalmente a nível de pequeno e médios agricultores.

Atualmente existem técnicas de manejo de água de irrigação que se sustentam nas teorias da necessidade de reposição de água com base no estado hídrico do solo e na evapotranspiração das fruteiras tropicais. São técnicas que utilizam de coeficientes das culturas específicos para cultivares e equipamentos para determinação da evapotranspiração ou para avaliação da umidade do solo de forma contínua e automática.

A necessidade de aumentar a eficiência de uso da água tem demandado técnicas que conservem a produtividade potencial das fruteiras com redução do dispêndio atual de água nessas fruteiras. Nesse contexto, tecnologias vêm sendo agregadas para quantificação das demandas de água pelas fruteiras tropicais com o uso de imagens termais de alta resolução, o que consiste em importantes ferramentas para os produtores bem como para as políticas públicas de monitoramento da produção em larga escala.

Referências

ALBUQUERQUE, J.A.S.; MEDINA, V.D.; MOUCO, M.A.D.; GENU, P.J.C.; PINTO, A.C.Q. **A cultura da mangaueira**. Embrapa (informações tecnológicas). Brasília. p.259-276, 2002.

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION of the United Nations, **Irrigation and Drainage Paper**, 56, Rome, Italy. 1998.
- ALMEIDA, F.T. de; BERNARDO, S.; SOUSA, E.F.; SÉRGIO, L. D.; MARIN, S.L.D.; GRIPPA, S. Análise econômica baseada em funções de resposta da produtividade versus lâminas de água para o mamoeiro no Norte Fluminense. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.675-683, Dec. 2004.
- ALMEIDA, O.A.; SOUZA, L.F.S.; REINHARDT, D.H.; CALDAS, R.C. Influência da irrigação no ciclo do abacaxizeiro cv. Pérola em área de Tabuleiro Costeiro da Bahia. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.24, n.2, p.431-435, 2002.
- ARAUJO, J.P.C. de. **Crescimento e marcha de absorção de nutrientes de bananeira (Musa sp. AAA), 'Grande Naine' no primeiro ciclo de produção**. 2008. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- AZEVEDO, P.V.; SOUZA, C.B.; SILVA, B.B.; SILVA, V.P.R. Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment. **Agricultural Water Management**, v.88, p.201-208, 2007.
- AZZOUZ, S.; EL-NOKRASHY, M.A.; DAHSHAN, I.M. Effect of frequency of irrigation on tree production and fruit quality of mango. **Agricultural Research Review**, v.55, n. 3, p59-66, 1977.
- BASSOI, L.H.; TEIXEIRA, A.H.C.; FILHO, J.M.P.L.; MOURA E SILVA, J.A.; GOMES DA SILVA, E.E.; RAMOS, C.M.C.; SEDIYAMA, G.C. Guidelines for scheduling of banana crop in Sao Francisco Valley, Brazil. II - Water consumption, crop coefficient, and physiological behaviour. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.26, p.464-467, 2004.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Viçosa: UFV-Imprensa Universitária, 625p., 2008.
- BORLAND, A.M.; GRIFFITHS, H.; HARTWELL, J.; SMITH, J.A.C. Exploiting the potential of plants with crassulacean acid metabolism for bioenergy production on marginal lands. **Journal of Experimental Botany**, v.60, n.10. p.2879-2806, 2009.
- BRITO, R.R.; FILGUEIRAS, R.; SANTOS, J.E.V.; LEDA, V.C.; ANDRADE JUNIOR, A.S.; ZIMBACK, R.C. Índices de vegetação SAVI, NDVI e temperatura de brilho na caracterização da cobertura vegetativa do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí - DITALPI In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, João Pessoa-PB, INPE, **Anais**, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015.
- CARR, M.K.V. The water relations and irrigation requirements of banana (*Musa* spp.). **Experimental Agriculture**, v.45, p.333-371, 2009.
- CARR, M.K.V. The water relations and irrigation requirements of pineapple (*Ananas comosus* var. *comosus*): a review. **Experimental Agriculture**, v.48, p.1-14, 2012.
- CARVALHO, A.M. **Irrigação no abacaxizeiro**. Informe Agropecuário. Belo Horizonte, v.19, n.195, p.58-61. 1998.
- CARVALHO, S.L.C.; NEVES, C.S.V.J.; BÜRKLE, R.; MARUR, C.J. Épocas de indução floral e soma térmica do período do florescimento à colheita de abacaxi 'Smooth Cayenne'. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.27, n.3, p.430-433, 2005.
- COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A.; OLIVEIRA, S.L. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. Socioeconomia, **Bahia Agrícola**, v.7, n.1, 2005.
- COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A.; SILVA, A.J.P. **Irrigação da mangueira em condições semiáridas do Nordeste**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura. 2007 (Documentos/Embrapa Mandioca e Fruticultura, ISSN 1809-4996; 166).
- COELHO, E.F.; FONSECA, N.; CARVALHO, G.C. Manejo de água de irrigação em mangueira e aceroleira sob cultivo orgânico com uso do secamento parcial do sistema radicular. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura. **Comunicado técnico**, 168, 8p., 2018.

- COELHO, E.F.; LEDO, C.A.S.; SILVA, S.O. Produtividade da bananeira 'Prata-Anã' e 'grande Naine' no terceiro ciclo sob irrigação por microaspersão em tabuleiros costeiros da Bahia. **Revista Brasileira de Fruticultura**. v.28, n.3, p.435-438, 2006.
- COELHO, E.F.; LIMA, D.M.; FARIAS, M.A.; CALDAS, R.C. Crescimento do mamoeiro cultivar Tainung número 1 sob diferentes regimes de irrigação. In: XII CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 2002, Uberlândia. A inserção da agricultura irrigada no ciclo hidrológico com: segurança alimentar, revitalização hídrica e sustentabilidade ambiental, v.1, 2002.
- COELHO, E.F.; OLIVEIRA, A.M.G.; SILVA, J.G.F.; COELHO FILHO, M.A.; CRUZ, J.L. Irrigação e fertirrigação na cultura do mamão. In: SOUZA, V.F.; MAROUELLI, W.A.; COELHO, E.F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A. (Org.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, p.442-472, 2011.
- COELHO, E.F.; OLIVEIRA, F.C.; ARAÚJO, E.C.E.; VASCONCELOS, L.F.L.; LIMA, D.M. Distribuição do sistema radicular da mangaueira sob irrigação localizada em solo arenoso de tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.23, n.2, p.250-256, 2001.
- COELHO, E.F.; SANTOS, M.R.; ALMEIDA, F.P.; DONATO, S.L.; REIS, J.B.R.S. Técnicas de manejo de água de irrigação para reduzir a demanda de água em bananeira. Cruz das Almas: Embrapa CNPMF. **Circular Técnica**, n.128, 14p. 2019.
- COELHO, E.F.; SANTOS, M.R.; COELHO FILHO, M.A. Distribuição de raízes de mamoeiro sob diferentes sistemas de irrigação localizada em Latossolo de Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.27, p.175-178, 2005.
- COELHO, E.F.; SANTOS, M.R.; DONATO, S.L.R.; CRUZ, J.L.; OLIVEIRA, P.M.; CASTRICINI, A. Soil-water-plant relationship and fruit yield under partial root-zone drying irrigation on banana crop. **Scientia Agricola**, v.76, p.362-367, 2019.
- COELHO, E.F.; SILVA, A.J.P. Irrigação da bananeira. In: SILVA, S.O.; FERREIRA, C.F. (Org.). **O Agronegócio da Banana**. 1. Ed. Brasília: Embrapa, v.1, p.443-470, 2016.
- COELHO, E.F.; SILVA, A.J.P.; DONATO, S.L.R.; SANTANA JÚNIOR, E.B.; OLIVEIRA, P.M. Sistemas de irrigação localizada e manejo de água em bananeira. **Informe Agropecuário**, 36: p.62-73, 2015.
- COELHO, E.F.; SILVA, A.J.P.; MAROUELLI, W.A.; COSTA, S.F. Manejo da água de irrigação. In: COELHO, E.F. (Org.). **Irrigação da bananeira**. 1. Ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, v.1, p.196-278, 2012.
- COELHO, E.F.; SIMÕES, W.L. Onde Posicionar Sensores de Umidade e de Tensão de Água do Solo Próximo da Planta para um Manejo mais Eficiente da Água de Irrigação. Cruz das Almas, BA: Embrapa mandioca e Fruticultura. **Circular técnica**. 6p. 2015.
- COELHO, E.F.; SIMÕES, W.L. Produtividade do mamoeiro, cultivar Tainung nº1, sob diferentes manejos de irrigação nos tabuleiros costeiros do Nordeste. **Magistra**, v.22, p.35-40, 2010.
- COELHO, E.F.; SIMÕES, W.L.; CARVALHO, J.E.B. Distribuição de raízes e extração de água do solo em fruteiras tropicais. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 80 p., 2008.
- COELHO, E.F.; SIMÕES, W.L.; LIMA, D.M. Crescimento e produtividade do mamoeiro cultivar Sunrise solo sob irrigação nos tabuleiros costeiros da Bahia. **Magistra**, v.22, p.96-102, 2010.
- COELHO FILHO, M.A.; COELHO, E.F. Uso da regulação do *deficit* de irrigação e produtividade de mangaueira Tommy Atkins em condições semiáridas. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL DE USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA AGRICULTURA IRRIGADA, 2005, Teresina. **Anais...** Teresina: ABID, 2005.1 CD-ROM.
- COELHO FILHO, M.A.; COELHO, E.F.; CRUZ, J.L. Uso da transpiração máxima de mamoeiro para o manejo irrigação por gotejamento em regiões úmidas e subúmidas. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 29 p., 2006. (Documentos; 106).
- COELHO FILHO, M.A.; CRUZ, J.L.; COELHO, E.F.; SILVA, T.S.M.; MARIN, F.R. Aptidão agroclimática do estado da Bahia para o cultivo do mamoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA,

2009, Belo Horizonte. **Resumos...** Mudanças Climáticas, Recursos Hídricos e Energia para uma Agricultura Sustentável, 2009.

COMBRES, J.C. Bilan énemktiaue et hidriaue de l'ananas, utilisation ootimale des wtentiaaiités climaiiaue; ' compte-rendu d'ativités. **Auqu& ddou**: IRFA, p.108, 1983.

COSTA, S.C. **Níveis de irrigação e doses de potássio aplicados por gotejamento na cultura da bananeira para a região da Chapada do Apodi-CE**. Viçosa: UFV, 132p., 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2009.

COTE, F.X.; FOLLIOT, M.; ANDRE, M. Photosynthetic crassulacean acid metabolism in pineapple in pineapple: diel rhythm of CO₂ fixation, water use, and effect of water stress. In: I INTERNATIONAL PINEAPPLE SYMPOSIUM, 1, p.334, 1992.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, FAO. **Irrigação e Drenagem**, 33, 306p., 1994

EDENHOFER, O.; PICHES-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; FARAHANI, E.; KADNER, S.; SEYBOTH, K.; ADLER, A.; BAUM, I.; BRUNNER, S.; EICKEMEIER, P.; KRIEMANN, B.; SAVOLAINEN, J.; SCHLÖMER, S.; VON STECHOW, C.; ZWICKEL, T.; MINX J.C. (Ed.). **Climate Change 2014**: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2014.

ESPINDULA NETO, D.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, J.G.F.; ZAMBOLIM, L.; SILVEIRA, S.F.R.; BERNARDO, S. Resposta do mamoeiro a diferentes lâminas de irrigação. In: Papaya Brasil. **Anais**, p.411-414. 2007.

EVANS, D.O.; SANFORD, W.G.; BARTHOLOMEW, D. P. Growing pineapple. In: BARHOLOMEW, D.P.; ROHRBACH, K.G.; EVANS, D.O. (Ed.). **Pineapple Cultivation in Hawaii**, 4-8, Manoa: HI: Fruits and Nuts 7, Cooperative Extension Service, University of Hawaii. 2002.

FERERES, E. Papel de la fisiologia vegetal em la microirrigación: recomendaciones para el manejo mejorado. In: SEMINARIO LATINOAMERICANO DE MICROIRRIGACIÓN, 4., 1981, Barquisimeto, Venezuela. **Anais...** Barquisimeto: IICA, p.1-23., 1981.

FONSECA, N.; COELHO, E.F.; VIEIRA, R.S. *Deficit* hídrico na indução do florescimento e do aumento da produtividade da mangueira 'Uba' em cultivo orgânico na região da Chapada Diamantina, Bahia. **Comunicado Técnico**, 165 Março de 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 10 jan. 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. 2010. FAO. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. Acesso em: 23 set. 2010.

FRANCO, L.R.L.; MAIA, V.M.; LOPES, O.P.; FRANCO, W.T.N.; DOS SANTOS, S.R. Crescimento, produção e qualidade do abacaxizeiro 'pérola' sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.27, n.2, p.132-140, 2014.

HANAFI, M.M.; SHAHIDULLAH, S.M.; NIAZUDDIN, M.; AZIZ, Z.A.; MOHAMMUD, C.H. Crop water requirement at different growing stages of pineapple in BRIS soil. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v.8, n.2, p.914-918, 2010.

HEPTON, A. Cultural system. Chapter 6. In: BARTHOLOMEW, R.E.P.; ROHRBACH, K.G. (Ed.). **The Pineapple, botany, production and Uses**. Wallingford, UK: CAB International. p.69-107. 2003.

HUANG, C.C.; LEE, C. Effect of irrigation on pineapple. **Taiwan Agricultural Q.**, v.5, n.1, p.50-58, 1969.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sidra**: Produção Agrícola Municipal. IBGE. Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 18 set. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Agropecuário. **Banco de dados agregados**. IBGE. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/>. Acesso em: 10 dez. 2017.

- JIMÉNEZ, V.M.; MORA-NEWCOMER, E.; GUTIÉRREZ-SOTO, M. Biology of the Papaya Plant R. In: MING, R.; MOORE, P.H. (Ed.). **Genetics and genomics of papaya, plant genetics and genomics: crops and models 10**, Springer Science Business Media, New York, 2014.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: VanNostrand Reinhold, 652 p., 1990.
- KIRKHAM, M.B. **Principles of soil and plant water relations**. New Yor: Elsevier Academic Press., 500 p., 2005.
- KIST, B.B.; CARVALHO, C.; TREICHEL, M.; SANTOS, C.E. **Anuário Brasileiro da Fruticultura**. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 90p., 2018.
- KIST, H.G.K.; RAMOS, J.D.; SANTOS, V.A.; RUFINI, J.C.M. Fenologia e escalonamento da produção do abacaxizeiro 'Smooth Cayenne' no Cerrado de Mato Grosso. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, v.46, n.9, p.992-997, 2011.
- KOTUR, S.C.; IYENGAR, B.R.; SHIVANANDA, T.N. Distribution of root activity in young 'Alphonso' mango (*Mangifera indica*) trees as influenced by season and growth. **Indian Journal of Agricultural Sciences**. v.67, n.3, p.113-116, 1997.
- LEVANON, S.; MARKOVICH, O.; GOZLAN, I.; ORTAL BAKHSHIAN, O.; ZVIRIN, A.; HONEN, Y., KIMMEL, R. Abiotic Stress Prediction from RGB-T Images of Banana Plantlets. arXiv, p.11597, 2011.
- LIMA, L.W.F. **Relações hídricas do abacaxizeiro cultivar Imperial**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, 2021.
- LIMA, R.S.N.; FIGUEIREDO, F.A.M.M.; MARTINS, A.O.; DEUS, B.C.S.; FERRAZ, T.M.; GOMES, M.M.A.; SOUSA, E.F.; GLENN, D.M.; CAMPOSTRINI, E. Partial rootzone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity, and water-use efficiency of papaya. **Scientia Horticulturae**, v.183, p.13-22, 2015.
- LIU, X.; LI, F.; ZHANG, Y.; YANG, Q. Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of Arabica coffee (*Coffea arabica*) under different N rates in dry and hot region of southwest China. **Agricultural Water Management**, [S.L], v.172, p.1-8, jul. 2016.
- LOPES, P.M.O. **Evapotranspiração da mangaueira na região do submédio São Francisco**. 104p., 1999. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, UFPB, Campina Grande, 1999.
- LU, P.; WOO, K.C.; LIU, Z.T. Estimation of whole-plant transpiration of bananas using sap flow measurements. **Journal of Experimental Botany**, v.3, p.1771-1779, 2002.
- MARLER, T.E.; MICKELBART, M.V. Drought, leaf gas exchange, and chlorophyll fluorescence of field grown papaya. **Journal for the American Society for Horticultural Science**, v.123, p.714-718, 1998.
- MELO, A.S.; NETTO, A.O.A.; NETO, J.D.; BRITO, M.E.B.; VIÉGAS, P.R.A.; MAGALHÃES, L.T.S.; FERNANDES, P.D. Desenvolvimento vegetativo, rendimento da fruta e otimização do abacaxizeiro cv. 'pérola' em diferentes níveis de irrigação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.93-98, 2006.
- MELO, D.M.; COELHO, E.F.; PEREIRA, B.L.S.; LIMA, L.W.F.; BARROS, D.L. Irrigation of papaya in a sandy loam soil in the semiarid of Bahia, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.15, n.1, e6193, 2020.
- MONTENEGRO, A.A.T.; BEZERRA, F.M.L.; LIMA, R.N. Evapotranspiração e coeficientes de cultura do mamoeiro para a região litorânea do Ceará. **Engenharia Agrícola**, v.24, p.464-472, 2004.
- MOUCO, M.A.C. (Ed.). Cultivo da mangaueira. 3. ed. Petrolina: **Embrapa Semiárido**, 2015. (Embrapa Semiárido. Sistemas de Produção, 2). Disponível em: https://www.spo.cnptia.embrapa.br/listasptema?p_p_id=listaspportemaportlet_WAR_sistemasdeproducao1f6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column- &p_p_col_count=1&p_r_p_619796851_temaId=2106&listaspportemaportlet_WAR_si7. Acesso em: 16 mar. 2021.
- MOUCO, M.A.C. Indução floral da mangaueira. Petrolina, PE: **Embrapa Semiárido**, 9p., 2004.

- PINTO, J.M.; SILVA, D.J.; COELHO, E.F. Irrigação e fertirrigação na cultura da manga. In: SOUSA, V.F.; MAROUELLI, W.A.; COELHO, E.F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A. (Ed.). Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, cap.16, p.473-497, 2011.
- POSSE, R.P.; BERNARDO, S.; SOUSA, E.F.; GOTTARDO, R.D. Evapotranspiração e coeficiente da cultura do mamoeiro. **Engenharia Agrícola**, v.28, p.681-690, 2008.
- POSSE, R.P.; BERNARDO, S.; SOUSA, E.F.; PEREIRA, M.G.; MONNERAT, P.H.; GOTTARDO, R.D. Relação entre a produtividade do mamoeiro e o *deficit* hídrico (ky) na região Norte Fluminense. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.13, n.2, p.158-164, Apr. 2009.
- PRAKASH, K.; VIJAYAKUMAR, R.M.; BALAMOCHAN, T.N.; SUNDHAR SINGH, S.D. Effect of drip irrigation regimes and fertigation levels on yield and quality of mango cultivar 'alphonso' under ultra high-density planting. **Acta horticulturae**, v.1066, p.147-150, 2015.
- RAMÍREZ, F.; DAVENPORT, T.L. Mango (*Mangifera indica* L.) flowering physiology. **Scientia Horticulturae**, Kidlington, v.126, p.65-72, 2010.
- RAVI, I.; UMA, S.; VAGANAN, M.M.; MUSTAFFA, M.M. Phenotyping bananas for drought resistance. **Frontiers in Physiology**, v.4, p.1-15, 2013.
- REIS, F.O.; CAMPOSTRINI E. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica potencial em mamoeiro do grupo 'Formosa' cultivado em condição de campo. **Bragantia**, p.815-822, 2008.
- REIS, F.O.; CAMPOSTRINI, E. Microaspersão de água sobre a copa: um estudo relacionado às trocas gasosas e à eficiência fotoquímica em plantas de mamoeiro. **Revista Brasileira Agrociência**, v.17, p.284-295, 2011.
- REIS, J.B.R.S.; COELHO, E.F.; OLIVEIRA, P.M.; COSTA, E.L.; CARVALHO, G.C. Irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.34, n.275, p.48-57, jul./ago. 2013.
- RÍOS, V.M.; HERRERA, M.D.G.; SUGITA, N.H.; LUACES, P.A. Water status response of pineapple using destructive and non-destructive indicators and their relations in two contrasting seasons. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, p.1-10, 2020.
- ROBINSON, J.C.; GALAN SAUCO, V. **Bananas and plantains**. 2. Ed. Cambridge: CAB, 311p., 2010. (Crop production science in horticulturae series, 19).
- SAN-JOSÉ, J.; MONTES, R.; NIKONOVA, N. Diurnal patterns of carbon dioxide, water vapour and energy fluxes in pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr. cv. Red Spanish) field using eddy covariance. **Photosynthetica**, v.45, p.370-384, 2007.
- SANT'ANA, J.A.V.; COELHO, E.F.; FARIA, M.A.; SILVA, E.L.; DONATO, S.L.R. Distribuição de raízes de bananeira 'Prata-Anã' no segundo ciclo de produção sob três sistemas de irrigação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.34, p.124-133, 2012.
- SANTANA JUNIOR, E.B. **Caracterização solo-água, distribuição radicular e eficiência de uso de água pela cultura da bananeira sob diferentes configurações de irrigação localizada**. 103p., 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2012.
- SANTANA JR, E.B; COELHO, E.F.; CRUZ, J.L.; REIS, J.B.R.S.; MELO, D.M. de; PEREIRA, B.L.S. Trickle irrigation systems affect spatial distribution of roots of banana crop. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, p.326-332, 2020.
- SANTANA, M.J.; SOUZA, O.P.; CAMARGOS, A.E.V.; ANDRADE, J.P.R. Coeficientes de cultura do abacaxizeiro nas condições edafoclimáticas de Uberaba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.6, p.602-607, 2013.
- SANTOS, D.L. **Técnica do secamento parcial do sistema radicular para o mamoeiro no semiárido**. 106p., 2020. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

- SANTOS, D.L.; COELHO, E.F.; CUNHA, F.F.; DONATO, S.L.R.; BERNADO, W.P.; RODRIGUES, W.P.; CAMPOSTRINI, E. Partial root-zone drying in field-grown papaya: Gas exchange, yield, and water use efficiency. **Agricultural Water Management**, v.243, p.1-11, 2021.
- SANTOS, M.R.; DONATO, S.L.R.; COELHO, E.F.; JUNIOR, P.R.F.C.; CASTRO, I.N. Irrigation deficit strategies on physiological and productive parameters of 'Tommy Atkins' mango. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.29, n.1, p.173-182, 2016.
- SANTOS, M.R.; LOURENCO, L.L.; DONATO, S.L.R.; SILVA, B.L.; CASTRO, I.N.; COELHO FILHO, M.A. Root system distribution and vegetative characteristics of Prata type bananas under different irrigation strategies. **African Journal of Agricultural Research**, v.11, p.3806-3815, 2016.
- SILVA, A.J.P.; COELHO, E.F. Evapotranspiração da bananeira sob dois sistemas de irrigação por microaspersão com base no balanço hídrico do solo. In: XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, **Anais...**, 2007.
- SILVA, E.M.; PINTO, A.C.Q.; AZEVEDO, J.A. **Manejo da irrigação e fertirrigação na cultura da mangaueira**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 77p., 1996. (Embrapa-CPAC Documentos, 61).
- SILVA, V.P.R. **Estimativa das necessidades hídricas da mangaueira**. 129p. 2000. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2000.
- SILVA, J.G.F.; FERREIRA, P.A.; COSTA, L.C.; MELENDES, R.R.V.; CECOM, P.R. Efeitos de diferentes lâminas e frequências de irrigação sobre a produtividade do mamoeiro (*Carica papaya* L.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.23, n.3, p.597-601, 2001.
- SILVA, V.P.R. **Estimativa das necessidades hídricas da mangaueira**. 129p., 2000. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba. UFPB, Campina Grande, 2000.
- SIMOES, W.L.; ANDRADE, V.P.; MOUCO, M.A.; SILVA, J.S. Produção e qualidade da mangaueira 'kent' (*mangifera indica* L.) submetida a diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino. RAMA - **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.14, p.1-11, 2021.
- SIMOES, W.L.; ANDRADE, V.P.; MOUCO, M.A.; SILVA, J.S.; SILVA, W.O. Production and post-harvest of 'kent' Mango under different irrigation systems. **Engenharia na Agricultura**, v.28, p.397-404, 2020b.
- SIMÕES, W.L.; COELHO, E.F.; MARTINEZ, M.A.; COELHO FILHO, M.A.; COSTAS, E.L.; GOMES, V.H.F. Produtividade e características físico-químicas dos frutos da lima ácida Tahiti sob diferentes disposições de microaspersores. **Water Resources and Irrigation Management**, 6: p.107-114, 2017.
- SIMÕES, W.L.; FERREIRA, P.P.B.; MOUCO, M.D.C.; GUIMARÃES, M.; SILVA, J.A.B. da. Produção e respostas fisiológicas da mangaueira cv. Keitt sob diferentes sistemas de irrigação no Submédio do São Francisco. **Irriga**, v.23, n.1, p.34-43, 2018.
- SIMÕES, W.L.; MOUCO, M.A.C.; ANDRADE, V.P.M.; BEZERRA, P.P.; COELHO, E.F. Fruit yield and quality of Palmer mango trees under different irrigation systems. **Comunicata Scientiae**, v.11, p.e3254-e3254, 2020a.
- SOARES, J.M.; COSTA, F.F. Irrigação. In: MARQUES, M.E.P.; MENEZES, E.A. (Ed.). **Informações técnicas sobre a cultura da manga no semi-árido brasileiro**. Brasília, DF: Embrapa-SPI; Petrolina: Embrapa-CPATSA, p.41-80, 1995.
- SOUZA, L.F.S.; REINHARDT, D.H. Pineapple. Chapter 10. In: JOHNSTON A.E. (Ed.). **Tropical fruits of Brazil, Horgen, Switzerland**: International Potash Institute (IPI, Bulletin 18), p.179-201 2007.
- TEIXEIRA, A.H.C.; BASSOI, L.H.; COSTA, W.P.L.B.; SILVA, J.A.M.S.; SILVA, E.E.G. Consumo hídrico da bananeira no Vale do São Francisco estimado pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p.4550, 2002.
- TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSEN, W.G.M.; MOURA, M.S.B.; SOARES, J.M.; AHMAD, M.D.; BOS, M.G. Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, n.10, p.1524-1537. 2008.

TURNER, D.W.; FORTESCUE, J.A.; THOMAS, D.S. Bananas and crop physiology. In: DAMATTA, F. (Ed.). **Ecophysiology of tropical tree crops**. New York: Nova Science Publishers, p.7-36. 2010.

WANG, J.; ZHANG, Y.; GONG, S.; XU, D.; JUAN, S.; ZHAO, Y. Evapotranspiration, crop coefficient and yield for drip-irrigated winter wheat with straw mulching in North China Plain. **Field Crops Research**, [S.L], v.217, p.218-228, 2018.

CAPÍTULO 4

4 IRRIGAÇÃO DE FRUTEIRAS SUBTROPICAIS (CITRICULTURA E VITICULTURA)

*Regina Célia de Matos Pires, Marco Antônio Fonseca Conceição e
Maurício Antônio Coelho Filho*

Resumo

Neste capítulo, serão discutidos os aspectos gerais mais relevantes para a prática da irrigação de duas culturas frutíferas subtropicais (citricultura e viticultura), que também são cultivadas em regiões tropicais do Brasil. A sequência da apresentação do tema, para cada cultura, envolverá primeiramente uma abordagem geral a relevância do cultivo irrigado para as diferentes regiões produtoras do Brasil. Depois o capítulo tratará de aspectos voltados ao manejo de irrigação, como as necessidades de água da cultura, indicadores do solo e planta como estratégias para o manejo de água no campo; além de abordagem atual e muito importante ao se buscar o aumento da eficiência de uso de água das culturas, que é uso do manejo de irrigação com *deficit* hídrico controlado. No início da expansão da agricultura irrigada, esse tema não fazia muito sentido, desde que o objetivo era basicamente a maximização da produção. Hoje, com aumento dos riscos de conflitos pelo uso de água, cenários de mudanças climáticas e o conhecimento científico de que a técnica pode ser aplicada, principalmente em fruteiras, sem perdas relevantes de produção, com agregação de outros atributos como os qualitativos de frutos, essa é uma tendência científica e deve ser melhor entendida e aplicada na prática do manejo de irrigação para maximização da produtividade da água ($\text{kg} [\text{fruto}] \text{m}^{-3} [\text{água}]$) no campo.

4.1 Introdução

Apesar do Brasil ser o terceiro maior produtor mundial de frutas, sua participação no mercado internacional ainda é pequena. No entanto, considerando a necessidade de melhoria das condições de saúde com a conseqüente demanda de nutrientes diversos, o consumo mundial de frutas tende a aumentar. Aspecto relevante característico da fruticultura é a demanda de profissionais com diversos níveis tecnológicos que impactam positivamente na geração de emprego, renda com melhoria na qualidade de vida nas regiões onde se desenvolve.

A tecnologia de irrigação é muito aplicada à fruticultura e seus benefícios impactam positivamente desde a melhoria da produção, da qualidade de frutos até o aumento da janela de produção e mitigação dos riscos climáticos. Estes principalmente relacionados aos eventos de deficiência hídrica mais prolongada, que podem ocorrer em fases críticas da planta ou mesmo por eventos curtos de veranicos que possam afetar negativamente a qualidade de produção. Isso explica o grande interesse para adoção da irrigação nos pomares, mesmo em regiões com bons regimes pluviométricos.

A possibilidade de obtenção de produção em épocas distintas agrega valor ao produto, disponibilizando-o ao longo do ano aos consumidores nacionais e internacionais. Independentemente dos objetivos pretendidos pelo uso da irrigação nas fruteiras, esta precisa ser aplicada com eficiência e contribuir para sustentabilidade dos recursos hídricos. A eficiência do uso da água (EUA) na fruticultura irrigada requer a adoção de estratégias de manejo e tecnologias apropriadas à cada cultura.

Diversas são as fruteiras subtropicais cultivadas no Brasil, considerando as características climáticas, avanços em práticas culturais e melhoramento genético das espécies

estas não se localizam apenas nas regiões subtropicais, sendo cultivadas em diversas regiões do país. Dentre as fruteiras subtropicais com plantio em grandes áreas e nas quais a irrigação é prática importante, destacam-se os citros e a videira, as quais serão abordadas neste capítulo separadamente. Serão destacados aspectos básicos e tecnologias de maior relevância aplicados à irrigação nessas culturas.

4.2 Citricultura

4.2.1 Mercado e área de cultivo

O Brasil é o maior produtor de laranjas e produtor e exportador de suco de laranja no mundo, sendo o terceiro país no consumo da fruta fresca (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2020). Segundo estimativas do USDA (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2020) e Fundecitrus (FUNDO DE DEFESA DA CITRICULTURA, 2020) a produção de laranjas no mundo será menor na safra atual devido a clima desfavorável no Brasil e México na safra anterior. No Brasil, esta redução deve atingir 25% e está relacionada a alternância de produção, e, em especial, no cinturão citrícola do Estado de São Paulo, triângulo e sudoeste de Minas Gerais e devido às ocorrências climáticas, com elevadas temperaturas do ar na época de pegamento de flores e frutos e precipitações abaixo da média esperada após as duas primeiras floradas em 2019 (FUNDO DE DEFESA DA CITRICULTURA, 2020). Este cenário evidencia a grande influência da disponibilidade hídrica e da variabilidade climática na produção da cultura. Segundo o IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019) as áreas plantadas com laranjeiras, limoeiros e tangerineiras atingiram 592.814, 56.664 e 52.928 ha, respectivamente, em 2019. Apesar de menores áreas cultivadas para produção de limão e tangerina é importante considerar que estas têm valor agregado importante.

Conforme levantamento da área cultivada com citros pelo IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019) cerca de 70% da área plantada no Brasil concentra-se na região sudeste, seguida de 16% no Nordeste e 10% no Sul, mas há com cultivo em todas as regiões do Brasil. A área de laranjeiras segue aproximadamente a mesma proporção na área plantada. Em relação ao limoeiro, verificou-se que 65%, 16% e 12% as áreas encontram-se nas regiões sudeste, nordeste e norte do país, respectivamente. A área com tangerineiras distribui-se nas regiões sudeste, sul e nordeste, nas proporções de 48%, 40% e 7%, respectivamente.

A irrigação na citricultura no Brasil iniciou na década dos anos 60 para produção de frutas 'in natura' e para produção de mudas. Como benefícios pelo uso da irrigação destacavam-se aumento da produtividade e a qualidade dos frutos e melhoria nas mudas com crescimento, padronização, precocidade, facilidade para enxertia e redução de descartes (PIRES *et al.*, 2005). Na década dos anos noventa, a irrigação na citricultura foi adotada em pomares de frutas destinadas à indústria (produção de suco). Devido aos resultados positivos a adoção da irrigação para produção de frutas para indústria apresentou crescimento superior ao dos pomares de produção de frutas 'in natura' (PIRES *et al.*, 2005). Os benefícios da irrigação na citricultura podem ser diretos e indiretos, destacando-se melhorias como crescimento das plantas, floração, pegamento dos frutos, antecipação da florada, produtividade e qualidade. Apesar de ser cultura perene, Pires *et al.* (2011) verificaram grande aumento de produtividade de laranjeiras Pêra com uso do gotejamento no primeiro ano após a instalação do sistema em pomar de plantas adultas na região sul do Estado de São Paulo. Nesta área é importante ressaltar a importância de adequação do manejo da água e da nutrição associados. Além dos benefícios positivos da irrigação na produção e qualidade é importante destacar a expectativa relacionada à melhoria nas condições das plantas pela

redução de estresses abióticos para evitar o depauperamento das plantas tornando-as menos suscetíveis à ocorrência de pragas e doenças.

O cultivo em regiões áridas e semiáridas não deixa dúvidas sobre a relevância e importância da irrigação nos citros, principalmente para médias e pequenas propriedades. Outro fator relevante associado ao aumento na adoção da irrigação nos citros no Brasil está associado ao uso do porta-enxerto Limoeiro Cravo em grande parte dos pomares no Brasil. Bassanezi *et al.* (2006) reportaram adoção em 80 a 90% dos pomares no Estado de São Paulo. Este porta-enxerto, dentre outras características apresenta boa resistência ao *deficit* hídrico. O surgimento da morte súbita dos citros (MSC) em 1999 associado ao fato das plantas enxertadas em limoeiro Cravo serem susceptíveis à MSC; para conviver com doença foram adotados outros porta-enxertos tolerantes à doença, mas, sensíveis ao *deficit* hídrico quando comparado ao limoeiro Cravo (POMPEU JÚNIOR; BLUMER, 2008). Tal fato também aumentou o interesse pela irrigação na citricultura, em especial, no Estado de São Paulo, triângulo e sudoeste de Minas Gerais.

Além dos fatos relevantes associados ao aumento no uso da irrigação na citricultura há que se destacar os cenários climáticos das regiões de cultivo (PEREIRA *et al.*, 2018). Por meio de abordagem relativista, os autores verificaram, em análise de tendências históricas que mudanças significativas ocorreram nos três primeiros meses da estação chuvosa no Estado de São Paulo (outubro, novembro e dezembro) com aumento do *deficit* hídrico. Este período equivale a fase crítica à deficiência hídrica nos citros nesta região (floração, pegamento de flores e frutos e crescimento de frutos). Diversas pesquisas reportam o aumento de produtividade dos citros pelo uso da irrigação no Brasil e no mundo. A porcentagem de aumento é variável considerando a região, as práticas culturais adotadas, a combinação copa-cavalo, o manejo e o método de irrigação e o clima. Aumentos variáveis de 20% a mais de 100% pelo uso da irrigação foram observados no Brasil em diferentes regiões (COELHO *et al.*, 2006; PIRES *et al.*, 2011; SILVEIRA *et al.*, 2020, dentre outros). Em regiões com precipitações naturais acima de 1000 mm por ano pode se verificar aumentos diferentes dependendo a distribuição das precipitações naturais (SILVEIRA *et al.*, 2020).

De acordo com levantamentos do setor produtivo a área irrigada na citricultura ao final da década de 90 equivalia a apenas 1,5% do total cultivado. Devido aos benefícios diretos e indiretos alcançados pelo uso da irrigação anteriormente abordados e os cenários climáticos o aumento percentual da área irrigada em relação à cultivada foi de 10% para 30% da área cultivada em citros no Estado de São Paulo e triângulo e sudoeste de Minas Gerais no período entre 2000 e 2019 (BASSANEZI *et al.*, 2020). O percentual de 30% foi relatado pelo inventário dos pomares de citros do Estado de São Paulo e Triângulo e sudoeste Mineiro, com área atingindo cerca de 120.000 ha (Fundo de Defesa da Citricultura - Fundecitrus 20/21 Censo). O gotejamento é utilizado em aproximadamente 90% da área sendo o restante irrigado por aspersão. A maior concentração encontra-se na região norte do Estado de São Paulo. Cerca de 80% das plantas irrigadas é em pomares de meia estação e tardias (Pêra Rio, Valência e Natal). Da área irrigada apenas 5,5% concentram-se em pomares de 1 a 2 anos. Assim, verifica-se, nesta região, a concentração da irrigação em plantas em fase de produção. Na região do Triângulo Mineiro há relato de 80% da área cítrica é irrigada. Apesar de acentuado uso de irrigação por gotejamento, a microaspersão também é adotada, em especial em pomares em áreas menores, o pivô central, além do autopropelido na aspersão, e há ainda, viabilidade de irrigação por sulcos, para aplicações em fases específicas em região com disponibilidade de recursos hídricos. Para melhoria da eficiência do uso da água com a utilização do pivô central é necessário o uso de aspersores adaptados à cultura, como a meia altura, entre a superfície do solo e a linha principal, ficando os emissores de 0,3 a 0,9 m da superfície do solo conforme descrito por Coelho *et al.* (2006). A adoção da fertirrigação em pomares cítricos é interessante e contribui para redução dos custos de produção e potencializa a eficiência do uso de nutrientes.

4.2.2 Necessidades hídricas

A necessidade de água das plantas cítricas varia com a combinação copa-cavalo, práticas culturais, estágio de desenvolvimento, uso e manejo das irrigações, idade e condições climáticas, que afetam a absorção e transporte de água na planta, abertura estomática e transpiração (PIRES *et al.*, 2005).

O menor uso de água dos *Citrus spp.* em relação a outras espécies se relacionam a baixa condutância estomática do dossel vegetativo (CARR, 2012) e elevada regulação estomática com aumento do *deficit* de pressão de vapor a do ar (SAMPAIO *et al.*, 2021). A elevada resistência das folhas dos citros à difusão do vapor d'água acarreta maior eficiência do uso da água em relação a outras fruteiras, como a macieira, por exemplo (SHALHEVET; LEVY, 1990). Tal fato, também pode ser evidenciado comparando-se a transpiração das plantas cítricas similares cultivadas em distintas condições de demanda climática (BOMAN *et al.*, 2002).

A floração dos citros ocorre após período de 'repouso aparente'. Em regiões subtropicais, ocorre pelas baixas temperaturas no período de outono-inverno e nos trópicos e em regiões com estação seca pronunciada a floração é desencadeada após reidratação do solo (CARR, 2012). Ainda, em algumas regiões subtropicais a floração pode ocorrer devido a baixas temperaturas e/ou deficiência hídrica dependendo das condições climáticas do ano (RIBEIRO *et al.*, 2006). Em áreas irrigadas, a escolha do momento de retornar à irrigação após período de repouso é fundamental pois afeta a floração, pegamento de frutos e por conseguinte a produtividade. A duração do período de repouso determina a intensidade da floração. Zanini e Pavani (1998) salientam que *deficit* hídrico em excesso é prejudicial, acarretando abortamento de flores e frutos, por outro lado, *deficit* insuficiente, acarreta florescimento pouco vigoroso. Como duração média do período alguns autores citam cerca de dois meses, podendo a indução ocorrer por baixas temperaturas no inverno (cerca de 10°C) nos sub trópicos e por período de *deficit* hídrico (precipitação mensal menor que 50 a 60 mm) nos trópicos (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Após o período de repouso, as irrigações devem proporcionar adequada disponibilidade hídrica para favorecer florescimento, pegamento das flores e frutos. Desta forma, a época de início das irrigações deve considerar o estado hídrico das plantas, as condições climáticas do ano, como a temperatura do ar e/ou a deficiência hídrica. A estratégia adotada para o período de repouso aparente na imposição de *deficits* hídricos, desde que as condições climáticas do ano possibilitem, podem favorecer a indução floral em épocas mais adequadas, seja para produção em período de entressafra, ou promover antecipação da floração e evitar que a fase de pegamento dos frutos ocorra em época com ocorrência de elevadas temperaturas do ar elevadas o que pode acarretar intensa queda de frutos. A antecipação do início das irrigações para promoção da floração tem sido utilizada para redução da queda de frutos conforme relatado por Fundecitrus (FUNDO DE DEFESA DA CITRICULTURA, 2020) na região do triângulo mineiro.

Pavão (2016) e Silveira *et al.* (2020) contabilizaram o número de horas de frio desde 1º de maio até o total acumulado de no mínimo 300 horas abaixo de 13°C para início das irrigações e promoção de floração na região sudoeste do Estado de São Paulo em laranjeiras Valência e Pêra. No período estudado a adoção deste critério resultou em boa floração com valores de produtividade das laranjeiras irrigadas variando de 40,4 a 73,2 t ha⁻¹ em cinco safras da laranjeira Pêra (SILVEIRA *et al.*, 2020) e de 40,8 a 72,8 t ha⁻¹ em três safras de laranjeira Valência (PAVÃO, 2016). A soma de 300 horas de temperaturas abaixo de 13°C foi considerado fator forte de indução forte para floração dos citros em estudo realizado por Ribeiro *et al.* (2006).

Em relação à indução por ocorrência de deficiência hídrica Ribeiro *et al.* (2006) consideraram indução fraca a soma de deficiência hídrica de 10 a 30 mm, indução moderada com *deficits* de 31 a 69 mm e indução forte valores de deficiência acima de 70 mm,

provenientes de balanço hídrico climatológico dos meses de junho, julho e agosto. Os autores adotaram 100 mm como armazenamento de água no solo de 100 mm para diferentes regiões do Estado de São Paulo. Na Itália no cultivo de limoeiro, Barbera *et al.* (1985) relatam que a suspensão da irrigação por 30 dias e a não ocorrência de chuvas impuseram boas condições para floração do limoeiro, momento no qual o potencial de água nas folhas antes do amanhecer atingiu valores de -1,3 MPa (BARBERA *et al.*, 1981, *apud* BARBERA *et al.*, 1985). Valores de potencial de água nas folhas ao meio-dia de -2,25 MPa e -3,5 MPa, indicaram estresse moderado e severo em lima ácida Tahiti, respectivamente (SOUTH TWICK; DAVENPORT, 1986). Pires *et al.* (2008) relacionaram aos melhores resultados na produção, de laranja Valência enxertada em limoeiro Cravo, ao início das irrigações após o período de dormência aparente na região central do Estado de São Paulo com -2 MPa de potencial de água nos ramos ao meio-dia.

Estudos que avaliam o efeito da duração e intensidade do *deficit* hídrico durante o período de repouso na produtividade de plantas cítricas em condições de clima subtropical, são necessários e importantes. Em regiões nas quais o *deficit* hídrico é o principal indutor da floração, ou também pode ser associado à ocorrência de baixas temperaturas, vários produtores utilizam nos pomares áreas de observação em plantas específicas. Nestas áreas realizam coroas ao redor das plantas e aplicam água uma a duas vezes por semana e seguem observando a resposta das plantas em floração. Nas semanas seguintes se inicia aplicação de água em outras coroas de plantas. Isto possibilita o acompanhamento visual das plantas em relação à ocorrência da floração. Com a identificação visual de floração intensa nas plantas das coroas iniciam-se as irrigações.

A inflorescência pode ser acompanhada ou não de folhas nos ramos. Inflorescência sem folhas, em geral, surgem primeiro e tem baixa probabilidade de gerar fruto viável, por outro lado, flores em inflorescências folhosas têm maior probabilidade de pegamento dos frutos, e, ainda quanto menor o número de flores no caule, maior o pegamento dos frutos (CARR, 2012). Apesar do grande número de flores que pode ocorrer na planta pequena porcentagem atinge a maturação. Carr (2012) relata a ocorrência de até 250.000 flores por árvore em laranja, mas, após a abscisão de botões de flores, ovários, frutos em desenvolvimento menos de 1% atinge a maturidade (IGLESIAS *et al.*, 2010 *apud* CARR, 2012). A frutificação e a abscisão de flores e frutos nos citros consistem em processo complexo, regulado por fatores genéticos, metabólicos e ambientais que podem atuar sequencialmente, simultaneamente ou sobrepostos, e ainda não são totalmente compreendidos (IGLESIAS *et al.*, 2010 *apud* CARR, 2012).

Após o florescimento, ocorre a queda natural de frutos, conhecida no hemisfério norte como 'June drop' e, no hemisfério sul, como 'December drop'. *Deficit* hídrico durante a floração reduz a frutificação e acarreta acentuada queda de frutos (DOORENBOS; KASSAM, 1979), e, na fase inicial dos frutos pode aumentar a queda e reduzir a taxa de crescimento. Segundo estes autores para produção de limão a ocorrência de *deficit* hídrico no verão pode ser adotada, se possível, para promover floração e produção ao longo do ano. Nos citros o período crítico ao *deficit* hídrico vai de a floração até o fruto atingir 2,5 cm de diâmetro. *Deficit* hídrico durante a fase de expansão do fruto afeta o tamanho final do fruto, mas pode aumentar o conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) e ácidos (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Outro fator importante a considerar é que *deficit* severo durante a expansão dos frutos pode desencadear a floração, o que é indesejável nesta fase (exceto para limões). Kriedemann e Barrs (1981) relatam que o crescimento de frutos de Satsuma paralisou quando o potencial de água das folhas ao amanhecer atingiu -0,8 MPa. Assim verifica-se a importância de considerar a intensidade e a duração da deficiência hídrica. O tempo decorrido desde a floração até a maturação dos frutos pode levar de 7 a 14 meses.

Frutos de limão tem período de floração mais longo do que outros *Citrus* spp. e podem ser colhidos ao longo do ano (DOORENBOS; KASSAM, 1979). A massa média dos frutos pode ser afetada com a disponibilidade de água no solo, manejo da irrigação (PAVÃO, 2016; SILVEIRA *et al.*, 2020) e número de frutos e porte das plantas. Além da disponibilidade hídrica, a temperatura do ar também afeta a maturação e qualidade dos frutos (POZZAN; TRIBONI, 2005). A concentração de sólidos solúveis totais e a acidez são parâmetros importantes para caracterização da qualidade do fruto e previsão da época de colheita. Neste sentido, Pavão (2016) e Silveira (2019) correlacionaram os graus-dia-acumulados (GDA) ao *Ratio* e apresentam regressões para estimativa do momento de colheita. Para isto adotaram a soma de GDA a partir de 1 de abril e 1 de março, para laranjeiras Valência e Pêra, respectivamente. A deficiência hídrica pode aumentar a concentração de sólidos solúveis no suco, mas esta relação depende muito das condições climáticas do ano e do critério do manejo das irrigações. Há tendência de maior concentração de SST em plantas com maior *deficit*, mas há anos em que este fato não ocorre e plantas adequadamente irrigadas apresentam bons resultados (PAVÃO, 2016; SILVEIRA, 2019). Desta forma, verifica-se a necessidade de estudos em busca da melhor resposta em produtividade e qualidade associado ao manejo da água e da fertirrigação.

A necessidade hídrica dos citros varia de acordo com as condições de solo, clima, condução do pomar, população de plantas, método e manejo da irrigação, dentre outros aspectos. A demanda de água é elevada nos períodos de brotação, emissão de botões florais, frutificação e início de desenvolvimento dos frutos, sendo menor nos períodos de maturação, colheita e período de repouso. Doorenbos e Kassam (1979) citam que o consumo de água na produção do pomelo tende a ser mais elevado que para outras espécies de citros. Valores de consumo anual variando de 750 a 1800 mm são encontrados na literatura considerando a diversidade de locais, combinação copa-cavalo, práticas culturais adotadas e manejo e método de irrigação (DOORENBOS; KASSAM, 1979; PARSONS; WHEATON, 2000; SHIRGURE *et al.*, 2000; GARCIA PETILLO; CASTEL, 2007; JAMSHIDI *et al.*, 2020).

Dependendo da região de cultivo e dos objetivos na condução do pomar as irrigações podem ter caráter complementar às chuvas, eventual quando aplicadas em condições ou épocas e objetivos específicos e ainda caráter essencial como em regiões com precipitação anual reduzida (regiões áridas e semiáridas). Considerando o dinamismo envolvido no processo de transferência da água no sistema solo-planta-atmosfera e as variações no consumo de água das plantas relacionado às condições de cultivo local é necessário o monitoramento, seja esta via clima, solo ou planta ou ainda a associação destes indicadores. Em caráter complementar as chuvas valores totais anuais de irrigação 400 a 600 mm por ano são relatados. Por exemplo, na região nordeste da Bahia o total anual da irrigação de 442 mm alcançou melhor produtividade em laranjeira Pêra com 4 anos de idade (COELHO *et al.*, 2003). Shalhevet e Levy (1990) relataram recomendações para a região central citrícola aplicações semanais - 10, 15, 25, 45 e 65 L dia⁻¹ planta⁻¹ para pomares do primeiro ao quinto ano após plantio, respectivamente. Já a partir do sexto ano, recomendam 100 L dia⁻¹ planta⁻¹ (4,0 a 4,5 mm dia⁻¹).

O consumo de água das plantas ou a evapotranspiração da cultura (ETc) representa a quantidade de água que deve ser repostada ao solo para manter o crescimento em condições ideais. A ETc pode ser medida por diferentes métodos. A partir de estudos que avaliam a ETc e a evapotranspiração de referência (ETo) ou demanda climática, valores de coeficiente de cultura (Kc) são estimados. Assim, com a utilização da relação $ETc = ETo \cdot Kc$ (ALLEN *et al.*, 1998), estima-se o consumo de água das plantas. Desta forma, a variação climática da região é incorporada pela ETo, que depende apenas das variáveis meteorológicas, e expressa o potencial de evapotranspiração para as condições meteorológicas vigentes (ALLEN *et al.*, 1998). O Kc possibilita estimativa de ETc para condições ideais, sem limitações ao desenvolvimento das plantas, integrando as diferenças entre a ETc e a ETo. Assim, o Kc varia

predominantemente com as características da cultura e as práticas adotadas que afetam o desenvolvimento das plantas, com isto é um coeficiente com significado físico e biológico importante. Os valores de K_c podem ser adotados a partir de modelo simples, com valor único, ou por modelo de partição, que considera separadamente as perdas por transpiração das plantas (K_{cb}) e por evaporação (K_e) (ALLEN *et al.*, 1998).

Vários trabalhos de pesquisa realizados com diferentes culturas indicam que valores medidos de K_c são dependentes também do método de estimativa de ETo . A indicação de método único de estimativa de ETo , o método de Penman-Monteith, conforme recomendado pela Food and Agriculture Organization (SMITH *et al.*, 1992) contribuiu bastante para estimativa do consumo de água pelas culturas irrigadas e indicações de valores de K_c e possibilidade de uso em diferentes regiões do mundo. Na literatura encontram-se valores de coeficiente de cultivo (K_c) para citros em diferentes locais e diversidade de combinações copa-cavalo, manejo e método de irrigação e ainda indicações de valores médios obtidos a partir de análises de diversos estudos (DOORENBOS, KASSAM, 1979; BOMAN, SYVERTSEN, 1991; CASTEL, 1996; IAFFE, ARRUDA, 1997; ALLEN *et al.*, 1998; BOMAN, PARSONS, 2002; ALVES JÚNIOR, 2006; GARCÍA PETILLO, CASTEL, 2007; KOBAYASHI *et al.*, 2009; MARIN; ANGELOCCI, 2011; MARTARELLO *et al.*, 2012; PEDDINTI; KAMBHAMMETTU, 2019; JAMSHIDI *et al.*, 2020).

O K_c varia com o desenvolvimento das plantas, e que no cultivo de limão e de pomelo os valores devem ser maiores (cerca de 10 a 15%) em relação aos observados para laranjeiras (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Em pomar de laranjeira Valência sobre porta-enxerto citrumelo Swingle, com cinco anos de idade, na Flórida, Boman e Syvertsen (1991) encontraram valores de K_c para o período que antecede o florescimento de 0,5 (final de outono e inverno) e no período de crescimento dos frutos e amadurecimento K_c de 1,0 (final de primavera e verão). Ainda na região da Flórida, Boman e Parsons (2002) recomendam valores de K_c para pomares de plantas adultas de 0,9 durante o inverno a 1,0 nas demais fases do ciclo. Castel (1996) avaliando K_c de laranjeiras irrigadas por gotejamento também verificou variação sazonal durante o ciclo de cerca de 0,6 a 0,8. O autor avaliou que as perdas de água por evaporação diretamente da superfície do solo representaram diferentes proporções em períodos chuvosos e secos. Nos períodos secos, as perdas por evaporação do solo representaram de 8% a 30% da E_{Tc} , por outro lado, em períodos chuvosos ocorreu aumento, representando de 30% a 50% da E_{Tc} . Iaffe e Arruda (1997) observaram em condições de deficiência hídrica, em plantas de Baianinha e Hamlin nos porta-enxertos laranja 'Caipira' e limão 'Cravo', que o K_c reduziu até próximo de zero. Após período de seca prolongada, não houve pronta recuperação do K_c com reinício das chuvas.

Allen *et al.* (1998) compilaram informações sobre K_c os quais encontram-se na Tabela 1. Os autores apresentam também metodologia para estimativa do consumo de água e de ajuste de K_c para condições de molhamento parcial do solo conforme o método de irrigação; equações para ajuste de acordo com o clima; equações para estimativa do valor diário de K_c ; metodologia para condição de deficiência hídrica; e, valores de K_c por modelo de partição.

Tabela 1. Coeficiente de cultura (Kc), coeficiente de cultura basal (Kcb) e altura máxima das plantas (Hx, m) para condições sem estresse hídrico, para os citros em clima subúmido, com umidade relativa mínima de 45% e velocidade do vento aproximadamente 2 m s⁻¹, considerando a estimativa de ETo pela equação FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (Penman-Monteith), para pomares conduzidos com e sem plantas infestantes, para diferentes porcentagens de cobertura do solo (CS, %) promovida pelo dossel das plantas avaliadas com o sol a pino. Kci: período de repouso e início do florescimento. Kcm: período de floração e desenvolvimento vegetativo pleno até os frutos atingirem 2,5 a 3,0 cm de diâmetro. Kcf: estágio final de formação e maturação dos frutos (ALLEN *et al.*, 1998).

CS	Kci ¹	Kcbi ²	Kcm	Kcbm ²	Kcf	Kcbf ²	Hx
Pomar sem plantas invasoras ³							
70	0,70	0,65	0,65	0,60	0,70		4
50	0,65	0,60	0,60	0,55	0,65		3
20	0,50	0,45	0,45	0,40	0,55		2
Pomar com plantas invasoras ³							
70	0,75	0,75	0,70	0,70	0,75	0,75	4
50	0,80	0,75	0,80	0,75	0,80	0,75	3
20	0,85	0,80	0,85	0,80	0,85	0,85	2

¹ Kci são para condições típicas de manejo de irrigação e de molhamento do solo. Para molhamentos frequentes, como irrigações diárias ou a cada dois dias, estes podem aumentar substancialmente e atingir valores de 1,0 a 1,2.

² Kcb representam situações de superfície de solo seca e devem ser utilizados quando: $Kc = Kcb + Ke$. ³ Kcm é menor do que os de início e final, devido ao fechamento de estômatos durante o período de ETo de pico. Para climas úmidos e subúmidos, onde há menor controle de estômatos pelos citros, valores para Kci, Kcm e Kcf podem ser aumentados de 0,1 a 0,2, conforme Rogers *et al.* (1983).

Alves Júnior (2006) avaliou o Kc em lima ácida Tahiti irrigada por gotejamento, em Piracicaba, em pomar com 357 plantas ha⁻¹, e observou variação de 0,6 a 1,22, e de Kcb entre 0,4 a 1,0. García Petillo e Castel (2007) avaliaram Kc de laranjeiras Valência no Uruguai irrigadas por gotejamento e em média verificaram Kc de 0,69, mas com variação sazonal de 0,60 no verão, outono 0,77, primavera 0,80 e 0,87 no inverno. Kobayashi *et al.* (2009) avaliaram Kc e ETc de laranjeira Pêra irrigada por gotejamento em Casa Branca, Estado de São Paulo. O Kc médio do ciclo foi de 0,71 e foi próximo da umidade na primavera-verão e reduziu no outono. Em Piracicaba, Estado de São Paulo, Marin e Angelocci (2011) avaliaram em pomar de lima ácida Tahiti com 7 anos de idade, com população de plantas de 178 por hectare e obtiveram valores de Kc de 0,24 ± 0,12 (inverno) e 0,65 ± 0,11 (verão). Martarello *et al.* (2012) estimaram o Kc de laranjeira Pêra enxertada em tangerineira Sunki irrigada por gotejamento por balanço hídrico de campo na região central do Estado de São Paulo e verificaram valor médio anual de 0,80. A densidade de plantio era de 588 plantas ha⁻¹.

Peddinti e Kambhammettu (2019) avaliaram Kc de laranjeiras adultas, com altura de 2,5 a 3 m e com as plantas proporcionando 70% de cobertura do solo na Índia, com valores de 0,43, 0,78 e 0,80 para os estádios Kci, Kcm e Kcf de forma similar ao apresentado por Allen *et al.* (1998). Em clima semiárido no Irã, Jamshidi *et al.* (2020) avaliaram Kc como valor único e com modelo de partição em pomar de laranjeiras Washington navel, espaçadas 5 x 5 m (400 plantas ha⁻¹) irrigadas por gotejamento. O valor médio de ETc foi 5,11 mm dia⁻¹ e consumo anual de 1800 mm (85% relacionado a transpiração e 15% a evaporação), e variação de Kc de 0,67 no inverno até 0,96 no verão para plantas sem *deficit* hídrico.

Considerando o dinamismo que envolve o consumo de água das plantas é relevante criteriosa seleção do valor de Kc. De acordo com os valores da literatura verificam-se variações nos valores e também sazonal do Kc. Várias pesquisas apontam redução de Kc no inverno. Tal

fato deve estar associado à variação na condutância estomática dos citros nas diferentes estações do ano, que é menor no período de inverno conforme verificado por Ribeiro e Machado (2007), associado também a redução da temperatura do ar e do solo. Ainda, em alguns locais, verificou-se redução do consumo de água das plantas cítricas no verão, mesmo com irrigações adequadas, denotando a limitação pelo controle estomático. Para seleção do Kc alguns fatores podem ser considerados, tais como a similaridade da área na qual o Kc foi estimado e a do pomar ao qual se fará o manejo da água, a combinação copa-cavalo, as condições edafoclimáticas, a densidade de plantio, práticas culturais, método e manejo das irrigações, dentre outros. Em relação a densidade de plantio é importante considerar que ocorreu grande variação no número de plantas por hectare, passando de 338 plantas por hectare ao final dos anos 70 para 616 plantas por ha em 2019 e para pomares em formação 625 no mesmo ano (Fundecitrus 20/21 censo).

4.2.3 Manejo das irrigações com indicadores do solo e sistema radicular

4.2.3.1 Água disponível

O manejo da água utilizando o solo como indicador monitora direta ou indiretamente o teor de água no solo ou o potencial matricial de água no solo. Para este monitoramento é importante conhecer alguns parâmetros, dentre estes, destacam-se a capacidade de retenção de água do solo, a distribuição e profundidade do sistema radicular e critérios para manejo que auxiliem a tomada de decisão de momento e quantidade de água a ser aplicada.

A capacidade de retenção de água no solo é obtida pela diferença entre o limite superior de retenção de água no solo (capacidade de campo) e o limite inferior de retenção da água no solo (ponto de murcha permanente). Para fins de manejo de água é fundamental conhecer a umidade na capacidade de campo e garantir que após as irrigações este valor não seja ultrapassado, pois caso isto ocorra haverá redução da aeração do solo o que afeta negativamente a absorção de água das plantas cítricas. Por outro lado, a umidade do solo no ponto de murcha permanente representa a condição na qual o solo não pode mais suprir água às plantas e estas entram em murchamento permanente não se recuperando durante a noite. Para fins de manejo das irrigações os critérios adotados ficam distantes do ponto de murcha, mas este auxilia na estimativa da capacidade de retenção da água dos solos. Prado (2013) apresenta a capacidade de retenção de água de diferentes tipos de solos tropicais de acordo com a classificação do solo em mm de água por cm de profundidade do solo (Figura 1). Esta informação auxilia a estimativa inicial da capacidade de retenção de água dos solos até que determinações locais sejam possíveis.

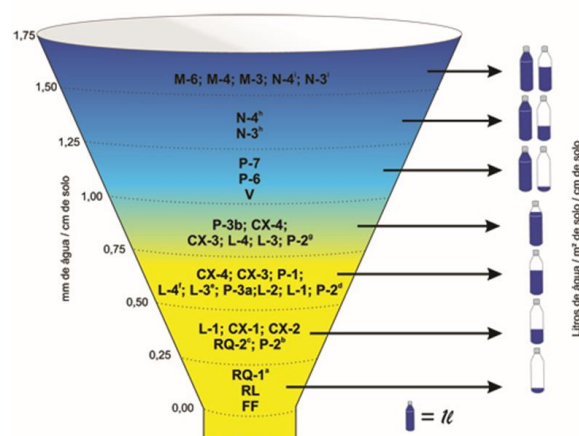


Figura 1. Capacidade de retenção de água no solo para diferentes tipos de solo do Brasil (PRADO, 2013).

Para estimar a capacidade de água disponível do solo para cultura há necessidade de conhecer a profundidade e a distribuição do sistema radicular das plantas. A disponibilidade de água do solo interfere na atividade radicular. Sob excesso de umidade no solo há comprometimento da aeração e sob *deficit* hídrico, redução da atividade radicular. O sistema radicular dos citros se caracteriza por raiz pivotante, que pode ser substituída por raízes de grande porte em condições de campo, e, a partir destas se ramificam densa concentração de raízes laterais nas camadas superficiais do solo (KRIEDEMANN; BARRS, 1981; MEDINA *et al.*, 2005; CARR, 2012). No início da década dos anos 80, Kriedemann e Barrs (1981) reportaram que as interconexões no sistema radicular das plantas poderiam garantir que a água aplicada a determinada parte do sistema radicular é disponível para toda a árvore.

4.2.3.2 Sistema radicular

Para fins de irrigação, a profundidade efetiva e a distribuição das raízes no perfil são importantes para estimativa da água disponível bem como para instalação de sensores para monitoramento. A profundidade desde a superfície do solo até onde se concentram cerca de 75 a 80% das raízes finas responsáveis pela absorção de água e de nutrientes chama-se de profundidade efetiva. A distribuição espacial das raízes ao redor da planta também é importante para escolha de locais para instalação de sensores de umidade ou extratores de solução do solo, melhor posicionamento de emissores (gotejadores e microaspersores) e realização de amostragens de solo. O crescimento radicular depende de vários fatores do solo que o circunda, dentre estes destacam-se aspectos químicos, físicos e biológico, tais como compactação do solo, fertilidade e acidez do solo, presença de elementos tóxicos no perfil do solo, aeração do solo, método e manejo das irrigações, densidade de plantio, porta-enxerto (KRIEDEMANN; BARRS, 1981; MORGAN *et al.*, 2007), idade e porte das plantas (MONTENEGRO, 1960; MORGAN *et al.*, 2007) dentre outros fatores. Desta forma, avaliações locais são importantes.

Avaliações de sistema radicular dos citros tem sido determinada por diversos autores. Em cultivo de Tahiti sobre limão Cravo com 3,5 anos de idade, 74% das raízes finas foram encontradas até 30 cm de profundidade e 50% até 25 cm de profundidade (RIBEIRO, 1993). Com relação à distribuição horizontal das raízes, a maior parte se concentrou entre 0,70 e 1,40 m do tronco da planta. Ainda em cultivo de Tahiti sobre limão Cravo com oito anos de idade, Vieira e Gomes (1999) encontraram 80% das raízes até 50 cm de profundidade, permanecendo 50% até 25 cm, similar ao observado por Ribeiro (1993). Com relação à distribuição espacial, 80% das raízes finas se concentraram até 1,5 m do tronco da planta. Para a mesma combinação copa e porta-enxerto Machado e Coelho (2000) observaram maior concentração até 40 cm de profundidade e a maior parte das raízes situou-se entre 50 e 75% do diâmetro de projeção da copa. Santos (2002) observou em região semiárida em lima ácida 'Tahiti' irrigada por microaspersão a maior absorção de água ocorreu até 1,5 m de distância do tronco das plantas na linha de plantio e até 0,5 m de profundidade. A até 0,5 m de distância do tronco a absorção de água ocorreu até 1,1 m de profundidade. Marin e Angelocci (2011) verificaram maior concentração radicular de lima ácida 'Tahiti' com 7 anos de idade, em porta-enxerto de *C. limonia* nos primeiros 0,4 m de profundidade, apesar das raízes terem atingido 1,5 m de profundidade, em Piracicaba. Simões *et al.* (2019) verificaram que a extração de água pelas raízes de lima ácida Tahiti em região semiárida no norte de Minas Gerais irrigadas por microaspersão foi mais significativa (85 a 90%) ocorreu desde a superfície do solo até 0,625 m de profundidade.

A distribuição do sistema radicular de laranjeiras sob irrigação localizada deve considerar se as irrigações são complementares às chuvas, típicas de regiões úmidas, ou, se em caráter pleno como nas regiões áridas e semiáridas. De acordo com Coelho *et al.* (2003), o uso da irrigação durante 6 meses do ano em laranjeiras resultou maior volume de solo explorado (profundidade e expansão lateral das raízes e com maior densidade) em

comparação ao cultivo sob sequeiro. A máxima concentração radicular situou-se entre 0,5 a 2,0 m do tronco e entre a superfície do solo até 1,5m de profundidade, com maior concentração e uniformidade de raízes na linha de plantio. Pires *et al.* (2011) verificaram que no primeiro ano após a instalação da irrigação por gotejamento em pomar de plantas adultas de laranja Pêra em tangerina Cleópatra houve grande concentração radicular na região do bulbo úmido e que a maior concentração de raízes ocorreu entre 0,1 a 0,3 m de distância do gotejador e até 0,25 m de profundidade. Alves Junior *et al.* (2012) avaliaram sistema radicular de laranjeiras Valência irrigadas por microaspersão e verificaram que nas plantas irrigadas houve maior densidade radicular na camada de 0,15 a 0,3 m de profundidade nas plantas irrigadas em comparação àquelas não irrigadas. Pires *et al.* (2013) verificaram que cerca de 80% das raízes de laranja Natal enxertada em citrumelo *Swingle* irrigadas por gotejamento com e sem irrigação deficitária encontraram-se até 0,6 m de profundidade e grande concentração de raízes de 0,1 a 0,2 m de distância dos gotejadores.

De acordo com os resultados observados em condições de campo, com enfoque nos estudos realizados no Brasil a profundidade efetiva variou de 40 a 60 cm de profundidade, com maior concentração na linha de plantio e com maior concentração até cerca de 1,5 m do tronco das plantas, ou ainda a aproximadamente de 1/3 à 2/3 do diâmetro da copa.

4.2.3.3 Critérios e indicadores para manejo das irrigações pelo solo

O manejo das irrigações via solo pode adotar diversos critérios, dentre estes o que indica que as irrigações devem ser aplicadas até valores críticos sejam atingidos, seja após o consumo de determinada porcentagem da água disponível do solo ou até o valor de potencial matricial crítico da água no solo. Estes valores críticos correspondem a resultados de pesquisas nos quais se observaram como limites para não reduzir a produtividade. A água disponível desde o limite superior de retenção de água no solo até estes valores críticos considera-se que a água no solo está facilmente disponível às plantas. Quando se adota o critério de atingir um limite crítico para fazer a irrigação, de um modo geral, se faz para irrigações com intervalos entre irrigações maiores. Por outro lado, para irrigações por gotejamento, em muitos casos a lâmina de irrigação a ser aplicada, com adoção deste critério, pode ser elevada considerando que a irrigação não resulta em molhamento em 100% da área. Sendo assim, a aplicação de lâminas de irrigação elevadas para gotejamento poderá acarretar perdas por percolação abaixo da profundidade do sistema radicular. Desta forma, ressalta-se a importância de sincronia do critério de manejo adotado com as características do método de irrigação.

A porcentagem da água disponível que pode ser consumida antes das irrigações para não acarretar prejuízo ao crescimento e produção é denominada fator de consumo de água ou fator de depleção (f), e está relacionado à suscetibilidade da cultura ou de cada estágio de crescimento ao estresse hídrico. Como fator de depleção para citros encontram-se recomendações que variam desde 15 a 60% do consumo da água disponível do solo. Para irrigações realizadas com maior frequência, como para gotejamento, pode-se adotar o valor de 15% e para irrigações com intervalos maiores, permitir consumo maior da água disponível do solo. O uso de valor variável do fator de depleção de água ao longo do ciclo da cultura também pode ser realizado com uso de valores menores no período crítico ao *deficit* hídrico (20 a 40%) e maiores (50 a 70%) nos demais períodos (DOORENBOS; KASSAM, 1979; ALLEN *et al.*, 1998). Doorenbos e Kassam (1979) apresentaram recomendação de valores variáveis em função da demanda atmosférica local, variando desde 80%, 70%, 60%, 50%, 45%, 42,5%, 37,5%, 35% e 30% para épocas com valores de evapotranspiração de referência de 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 mm dia⁻¹, respectivamente. Assim, verifica-se que com aumento da demanda climática recomendam-se reduzir o fator de depleção, e, por conseguinte, irrigações com intervalos menores. Para condições de clima quente e seco, com elevada ETC, o valor de "f" deverá ser de 10 a 25% menor que os médios e para baixos valores de ETC, o de "f" pode ser acrescido em 20%.

Allen *et al.* (1998) salientam que expressar a tolerância ao estresse hídrico em função do fator de depleção de água no solo, não é a forma mais correta, pois a taxa de absorção de água pelas raízes é influenciada diretamente pelo estado de energia da água no solo que pode ser obtido pelo potencial da água no solo. O potencial de água no solo possui relação específica com a umidade nos diferentes solos, com isso, o valor do fator de depleção (f) também é função do tipo de solo. Para os argilosos, os valores de " f " podem ser reduzidos de 5 a 10%, e, para os arenosos, devem ser acrescidos em 5 a 10%. Carr (2012) indica como valores adequados para fins de manejo das irrigações para os citros permitir o consumo de 40% da água disponível do solo no período crítico ao *deficit* hídrico dos citros (floração, pegamento de frutos e fase de queda de frutos) e de 60 a 70% nos demais estádios.

A lâmina de irrigação a ser aplicada também pode considerar a umidade do solo no momento da irrigação e com isto estimar quanto é necessário para elevar a umidade do solo à capacidade de campo ou limite superior de retenção de água no solo. Esta umidade do solo pode ser medida por diferentes métodos e ainda pode estar associada ao potencial de água crítico para a cultura. A partir do momento em que o solo atinge esse valor de potencial, determina-se a umidade por meio de uma curva de retenção de água do solo e estima-se a lâmina de irrigação a ser aplicada.

O potencial de água crítico determina o momento em que a irrigação se faz necessária para que produtividades elevadas sejam alcançadas. Um dos primeiros estudos relacionados ao uso e manejo da água em laranjeiras no Brasil foi realizado em pomar de plantas jovens, em Ribeirão Preto, no qual as irrigações foram realizadas sempre que o potencial de água no solo atingisse -150 kPa (BARRETO *et al.*, 1976) e os autores ressaltam que aumentos maiores na produtividade poderiam ser alcançados com uso de intervalos entre irrigações menores, com manejo adotando valores menos negativos de potencial de água no solo.

Para uso em manejo das irrigações dos citros há recomendações de potencial de água no solo variáveis de -10 a -70 kPa (BOMAN; SYVERTSEN, 1991; PARAMASIVAM *et al.*, 2000; SHIRGURE *et al.*, 2000). Critério de manejo com irrigações quando o potencial de água no solo atingia -15 kPa foram adotadas por Boman e Syvertsen (1991). Shirgure *et al.* (2000) encontraram bons resultados com irrigações quando o potencial de água atingiu -50 kPa. Paramasivam *et al.* (2000) utilizaram como potencial de água crítico para a laranjeira Hamlin sobre Cleópatra com 25 anos de idade irrigada por microaspersão valor de potencial de água crítico de -10 kPa e -15 kPa nas fases que antecedem o florescimento até pegamento dos frutos e crescimento e amadurecimento dos frutos respectivamente em solo arenoso na Flórida. Silveira (2019) utilizando irrigações por gotejamento com frequência diária adotou o critério para o solo em questão de após as irrigações deveriam atingir -10 kPa em pomar de laranjeira Pêra na região sudoeste do Estado de São Paulo.

Considerando resultados das pesquisas e a adoção de sistemas que aplicam água com alta frequência, como o gotejamento recomenda-se trabalhar em faixa de variação de potencial de água no solo de -15 a -30 kPa na camada de maior concentração radicular (até 1/3 a 1/2 da profundidade efetiva das raízes). Com irrigações aplicadas em intervalos mais espaçados as irrigações podem ser realizadas quando o potencial de água no solo atingir -50 kPa. De forma, similar ao relatado quando do uso do fator de depleção podem-se adotar a condução das irrigações em faixa menos negativa de potencial no período crítico ao *deficit* hídrico das plantas e nas demais fases admitir manejo em faixa um pouco mais negativa de potencial.

4.2.3.4 Manejo da água com indicadores da planta

Considerando que o desenvolvimento das plantas e a produção são os objetivos fundamentais do cultivo o uso de parâmetros que envolvem medição do estado hídrico das plantas, taxas de crescimento de partes das plantas, trocas gasosas, fluxo de seiva, dentre

outros são relevantes. No entanto, devido aos custos, nível tecnológico envolvido, cuidados necessários e as interações que vários destes parâmetros apresentam com o ambiente, embora relevantes estes métodos têm sido utilizados principalmente em pesquisas. O uso destes métodos em pesquisas é fundamental para entendimento dos processos e efeitos resultantes de critérios de manejo das irrigações ou mesmo em resposta a condições ambientais adversas.

Alguns autores trabalharam com a relação da transpiração por área foliar da lima ácida 'Tahiti' em relação a evapotranspiração de referência (Figura 2). Esta abordagem foi adotada por Marin *et al.* (2001) e Coelho Filho (2002). Aumento na transpiração em função de aumento da área foliar para a mesma evapotranspiração de referência pode ser verificada (Figura 2a). Quanto à relação entre transpiração por unidade de área foliar e evapotranspiração de referência, Coelho Filho (2002) verificou tendência linear (Figura 2b). Tal relação possibilita a estimativa da transpiração das plantas conhecendo-se a área foliar e a demanda climática e o coeficiente que os relacionada por meio de modelo climatológico. A Figura 3 apresenta variação diária do fluxo de seiva e da radiação líquida de lima ácida Tahiti, em Piracicaba em cinco dias consecutivos. Coelho Filho (2002) verificou certa defasagem do fluxo de seiva em relação à radiação líquida e relata que isto está relacionado à capacitância dos ramos das plantas pronunciada em plantas adultas.

Silva *et al.* (2005) verificaram que o consumo de água da lima ácida Tahiti reduziu com consumo de 60% da água disponível do solo, já a condutância estomática, as trocas gasosas, a fotossíntese e o potencial de água das folhas reduziram com a depleção de 40% da água disponível no solo.

O uso de medidas taxas de crescimento e contração do tronco para manejo das irrigações foi avaliado por Velez *et al.* (2007) em pomar de Clementina de Nules (*C. clemantina*) enxertada em citrange Carrizo (*C. sinensis*), na Espanha. Os autores objetivaram que a contração máxima do tronco não excedesse 125% daquela observada na planta controle bem hidratada por três meses após ao "June drop" (no hemisfério norte que equivale ao "December drop" no hemisfério sul). Este limite de contração assegurava que o potencial de água dos ramos não era menor que -1,3 MPa ao meio-dia local. O tratamento com *deficit* reduziu a lâmina de irrigação em 18% e 12% em cada ciclo, respectivamente. A produtividade com a irrigação deficitária não se diferenciou daquela alcançada nas plantas adequadamente irrigadas. Ainda com manejo de água em pomar com irrigação deficitária na Espanha, García-Tejero *et al.* (2011) verificaram o potencial de uso da diferença entre a temperatura do dossel e a do ar como parâmetro sensível do estado hídrico das plantas, indicando a potencialidade do uso de termômetro infravermelho para monitoramento da água das plantas, auxiliar no manejo da água.

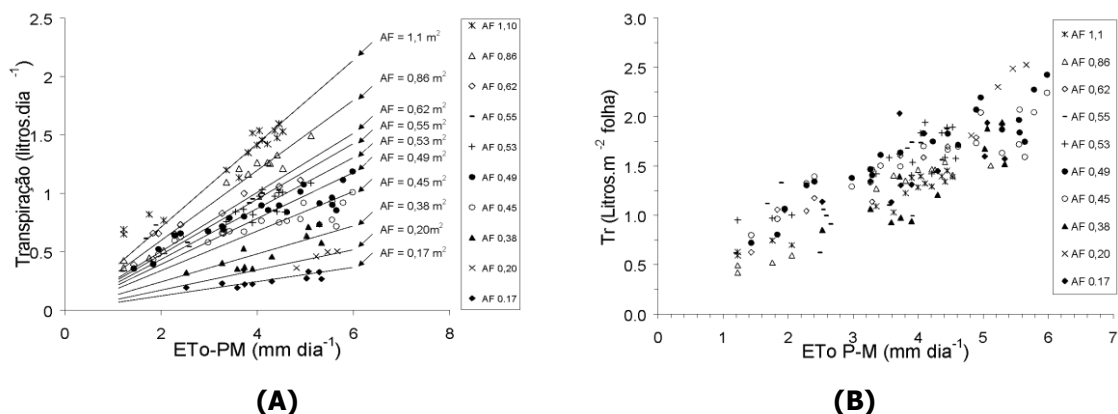


Figura 2. Transpiração máxima de plantas da lima ácida 'Tahiti' por classe de área foliar total (A), e a transpiração máxima por área foliar (Tr) (B) de plantas da lima ácida 'Tahiti'

ambos relacionados a evapotranspiração de referência (Penman-Monteith - ETo-PM) (COELHO FILHO, 2002).

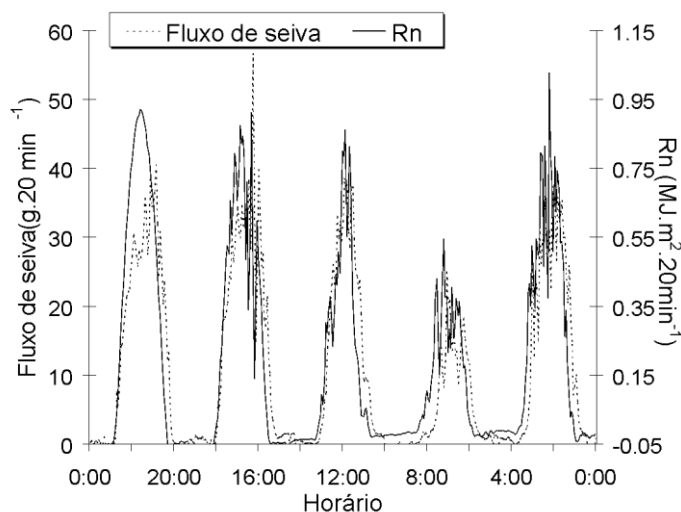


Figura 3. Curso diário do fluxo de seiva (transpiração máxima) de plantas da lima ácida 'Tahiti' e da radiação líquida em plantas com 0,6 m² de área foliar nos dias julianos 337 ao 341 de 2001, Piracicaba, SP (COELHO FILHO, 2002).

Com o objetivo de estabelecer critérios para irrigação baseados no estado hídrico de tangerineiras Satsuma (*Citrus unshiu*) na África do Sul, Dzikiti *et al.* (2010) avaliaram vários parâmetros e horários de medição. Melhor caracterização do estado hídrico das plantas com medição ao meio-dia do potencial hídrico dos ramos foi verificada. Por outro lado, o potencial hídrico das folhas antes do amanhecer não apresentou sensibilidade para indicar a ocorrência de déficit hídrico leve. Dzikiti *et al.* (2011) verificaram a possibilidade de uso da refletância do dossel como indicador de mudanças relativas no estado hídrico de laranjeiras Valência.

Carr (2012) compilando informações relacionadas ao estado hídrico das plantas indica que irrigações deficitárias em citros considerando o potencial de água dos ramos a -1,3 MPa não representa fator limitante da produtividade. O uso do potencial hídrico dos ramos na caracterização do estado hídrico tem sido utilizado na identificação do momento de início das irrigações para promoção de floração (BARBERA *et al.*, 1985; PIRES *et al.*, 2008) conforme reportado no item de relações hídricas.

Em pomar de plantas adultas de mandarina na Espanha, Conesa *et al.* (2018) obtiveram correlação linear da máxima contração do diâmetro do tronco com o potencial de água dos ramos medido ao meio dia de plantas adequadamente hidratadas e daquelas sob irrigação deficitária. Assim, verifica-se também o potencial de uso deste indicador para manejo das irrigações.

Simões *et al.* (2019) avaliaram a transpiração de plantas de lima ácida Tahiti no norte de Minas Gerais irrigadas por microaspersão com diferentes configurações de vazão e posição dos emissores em relação às plantas. Maior transpiração das plantas e eficiência no uso da água ocorreu com um microaspersor ($Q = 70 \text{ L h}^{-1}$) entre duas plantas na linha de plantio.

O uso de indicadores nas plantas tem relevante importância. Alguns equipamentos e possibilidades de uso e aplicações foram relatadas e certamente aumentarão o uso dado o potencial para alcançar a eficiência no uso da água necessária para a agricultura irrigada.

4.2.3.5 Balanço hídrico e manejo da irrigação

O balanço hídrico envolve todas as entradas e saídas de água que envolvem o volume de solo explorado pelas raízes. A irrigação (I), a precipitação (P), escoamento superficial

advindos de áreas contíguas e a ascensão capilar compõem as entradas do balanço hídrico, enquanto o consumo de água pela cultura (ETc) e as perdas por percolação profunda e escoamento superficial compõem as saídas. Todos esses componentes podem ser estimados e acarretam variação do armazenamento da água no solo. Assim a variação do armazenamento da água no solo no perfil do solo reflete o balanço destes fluxos de entrada (positivos) e saída (negativos).

Com adequação do manejo das irrigações as perdas por percolação profunda devem ser minimizadas e as entradas e saídas advindas do escoamento superficial podem desconsideradas para fins de balanço hídrico de campo (LIBARDI, 2012). As entradas de água provenientes da ascensão capilar devem ser consideradas quando o lençol freático é pouco profundo, condição não muito comum na maior parte das áreas cultivadas e irrigadas na citricultura. De forma simplificada, o balanço hídrico de campo pode ser expresso pela relação $\Delta h = P + I - ETc$. A variação do armazenamento de água do solo (Δh), em um dado intervalo de tempo, pode ser conhecida por medidas sequenciais de umidade no perfil do solo. Conhecendo-se as precipitações, as irrigações e a variação do armazenamento de água no solo, pode-se estimar o consumo de água da cultura em condições de campo. A variação do armazenamento de água no solo pode ser estimada em diferentes camadas ao longo do perfil do solo conforme a distribuição do sistema radicular. Informações detalhadas podem ser encontradas em Libardi (2012).

Considerando que o monitoramento da água no solo, seja umidade ou potencial, é realizado de forma pontual para representar as plantas de determinada parcela ou talhão, a escolha do local de monitoramento é importante para garantir representatividade das informações. Considera-se como local com boa representatividade áreas com mesma face de exposição solar, similaridade das condições de solo, plantas sadias e com porte que representem a maior parte da população a que se pretende representar.

O controle e as informações para tomada de decisão da irrigação a partir de dados da água no solo poderão ocorrer de acordo com os critérios adotados, dentre estes: (i): reposição da umidade do solo considerando a umidade do dia ou do momento e aplicando a diferença para que a umidade referente a capacidade de campo seja atingida; (ii): realização, ou não, da irrigação seguindo critério de nível crítico para a cultura, seja pelo consumo da porcentagem de água disponível ou por potencial de água no solo crítico; (iii): realizar as irrigações com objetivo de manter a umidade do solo ou o potencial de água crítico no solo em determinada faixa de variação em profundidade específica considerada para este fim. Neste último caso ressalta-se a importância de se conhecer a faixa de controle e o valor do limite superior de retenção de água no solo com o próprio sensor. Para tanto avalia-se a capacidade de campo em condições de campo com o uso do sensor que será adotado e nas profundidades de interesse.

Com a adoção da irrigação localizada, em especial, há variação da umidade do solo na região do bulbo úmido formado. Portanto, o posicionamento de sensores precisa considerar, além da distribuição do sistema radicular, a distância em relação a planta e também em relação ao emissor. Em grande parte das situações tem-se observado que a distância entre 0,10 e 0,15 m do gotejador tem se mostrado adequada para fins de manejo da água e manutenção de faixa adequada de variação. Ainda, neste caso específico precisa-se selecionar a profundidade que deverá indicar a condução das irrigações na faixa adequada. O sensor deverá ser posicionado na profundidade efetiva das raízes, e, nesta, na região mais ativa e com maior concentração de raízes. De um modo geral, esta profundidade equivale a 1/3 a 1/2 da profundidade efetiva das raízes. Este sensor deverá indicar que após as irrigações este deverá se atingir o valor equivalente ao limite superior de retenção de água do solo (capacidade de campo). Caso este não atinja o valor almejado o tempo de irrigação deverá ser aumentado em pequenos incrementos, ou diminuir o intervalo entre irrigações. Após mais

um período de monitoramento a adequação ou não das irrigações a necessidade de novo ajuste poderá ser verificada. De forma similar, caso após as irrigações o valor da capacidade de campo tenha sido excedido reduz-se o tempo de irrigação com ajustes de pequena variação e prossegue o monitoramento para verificar a adequação.

A partir do monitoramento da água no solo, confecção de planilha e figura com a variação ao longo do tempo nas diferentes profundidades monitoradas faz-se as adequações necessárias para evitar irrigações excessivas ou deficientes. É importante lembrar que a variação na umidade do solo entre as irrigações é esperada e a magnitude dessa flutuação, que será trabalhada pelos critérios técnicos, precisa considerar também o método de irrigação e as características e cuidados relacionados a estes. Com a aspersão sobre a copa, de um modo geral, a superfície do solo é totalmente molhada e o intervalo entre as irrigações é maior que o utilizado com irrigação localizada, em especial se utilizado autopropelido. Já com uso do pivô central o intervalo entre irrigações é menor que no autopropelido. O uso do gotejamento ou microaspersão precisa considerar que as irrigações são mais frequentes e que há molhamento parcial da superfície do solo. No manejo da irrigação com intervalos entre irrigações maiores há possibilidade de uso de lâminas de irrigação considerando os limites críticos ao *deficit* hídrico. Por outro lado, irrigações frequentes demandam estratégia de manejo com a manutenção da umidade do solo em condições adequadas e aplicações de lâminas menores, evitando-se excesso de irrigação, principalmente no gotejamento.

Há grande número de opções de sensores para monitoramento da água no solo no mercado, seja para medição da umidade ou do potencial de água no solo. O uso destes sensores além de auxílio para o manejo da irrigação possibilita conhecer a efetividade das precipitações naturais ocorridas, o quanto e até que profundidade determinada precipitação contribuiu para o balanço hídrico. Há que se considerar que qualquer aporte de chuvas que faça com que o armazenamento da água no solo ultrapasse seu limite de retenção, o excesso deve ser considerado como perda por percolação profunda. Com relação ao número de sensores, recomenda-se instalar de duas a três estações de controle em cada parcela ou talhão a se irrigar e em cada estação de controle, de dois a três sensores nas profundidades de 1/3, 1/2 e no limite da profundidade efetiva ou a 1/2 e no limite da profundidade efetiva das raízes. Se houver a opção de melhorar o número de sensores, aumentar o número de sensores instalado na região mais ativa das raízes (1/3 a 1/2). Em pomares cítricos mais adensados, o posicionamento dos sensores pode ser na distância média entre duas plantas. Em pomares com espaçamentos mais largos, geralmente a bateria de sensores pode ser posicionada entre 0,5 e 1,5 m de distância do tronco da planta, onde há maior concentração radicular (COELHO *et al.*, 2011).

O manejo das irrigações também pode ser realizado com o uso do balanço hídrico climatológico, levando em consideração as características do solo e planta, aos se estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c) por meio da evapotranspiração de referência (ET_o) e o coeficiente de cultura (K_c) (Tabela 1). Neste caso as irrigações devem ser aplicadas de acordo com o consumo de água das plantas diariamente ou variável ao se considerar nas simulações o consumo desde o dia da última irrigação até atingir o limite crítico de porcentagem da água disponível no solo. Quando se associa indicadores há aumento da confiabilidade no processo de tomada de decisão da irrigação. Neste caso pode-se fazer a estimativa do quanto irrigar baseado no clima e nas plantas e adotar o uso de sensores de monitoramento de água no solo para indicar se o valor de K_c adotado está devidamente ajustado para a área em questão.

4.2.3.6 Manejo de irrigação com *deficit* hídrico

Como visto anteriormente, a prática da irrigação deve envolver grande conhecimento técnico para em cada situação específica definir o quanto e quando irrigar, ou seja, o manejo de irrigação é fundamental para que se alcancem maiores eficiências de irrigação e de uso de

água. Mesmo porque, com a mesma lâmina de água aplicada e acumulada num ciclo de produção pode-se submeter ou não a cultura níveis diferenciados de estresse hídricos. Nesse aspecto, mais importante que os totais aplicados é a definição de quando aplicar e qual nível de estresse que a planta pode suportar para não afetar a produção e qualidade dos frutos. Ou quais níveis de estresse deve-se aplicar para que se maximizem os ganhos líquidos. Esse equilíbrio é que vai ser responsável pela manutenção da produtividade em níveis aceitáveis economicamente, garantindo aumento da eficiência de uso de água.

Buscando-se não apenas maximizar a produtividade, mas encontrar caminhos para o uso racional de água no processo de produção, várias pesquisas foram realizadas nas últimas décadas relacionado ao manejo da irrigação com *deficit* hídrico controlado. O principal objetivo do manejo com *deficit* é aumentar a eficiência do uso de água ou a produtividade da água (kg m^{-3}), permitindo a expansão da área irrigada ou mesmo viabilizar a produção em locais com escassez hídrica.

Grande parte dos estudos com o manejo de *deficit* controlado em citros ocorreram em regiões semiáridas, a exemplo da Espanha; e também no semiárido brasileiro e também há resultados positivos no sudeste brasileiro, região de clima subtropical. Resultados alcançados ao longo de vários anos demonstraram a viabilidade da técnica, com economia no uso de água e manutenção da produtividade e qualidade de frutos de laranjeiras, tangerineiras, limas, limões e pomelos.

O conhecimento das respostas das plantas às condições distintas de disponibilidade de água no solo e demanda atmosférica é importante para que estratégias de manejo possam alcançar respostas positivas quando da implementação da irrigação deficitária. Manejo com *deficit* permite, quando bem manejado, controle da indução floral, modelagem do fluxo vegetativo das plantas, aumento da produtividade por volume de copa e qualidade de frutos. Para os citros, as respostas das plantas ao *deficit* de água no solo combinados ou não como estresse salino são dependentes também da combinação copa-cavalo.

Diferentes tipos de estratégias de manejo com *deficit* controlado podem ser aplicados para esse propósito: (i) *deficit* controlado em épocas específicas de desenvolvimento dos frutos, o que se chama de irrigação com *deficit* regulado (RDI); (ii) *deficit* de irrigação fixos ao longo do ciclo produtivo; e (iii) irrigação com *deficit* ao longo do ciclo produtivo, alternando-se a distribuição de água no solo (PRD); ou associação destas estratégias.

4.2.3.7 *Deficit* hídrico controlado em fases do desenvolvimento dos frutos

Este manejo tem por objetivo aplicar *deficit* controlado em fases menos sensíveis da planta e manter a irrigação plena no período crítico, no qual ocorre impacto na produtividade e qualidade de frutos. Para isso, é necessário melhor compreensão de como a fase de produção de citros é dividida. Além do período de floração, o crescimento e o desenvolvimento de frutos cítricos após a antese se dividem em três fases típicas e suas principais características (MEDINA *et al.*, 2005): Fase I (atividade metabólica intensa e divisão celular), Fase II (rápido crescimento) e Fase III (redução das taxas de crescimento e maturação dos frutos). Geralmente o período de maior sensibilidade da planta ao *deficit* hídrico, afetando severamente a produção é a fase de floração e início de frutificação (Fase I), principalmente quando o estresse vem associado a elevadas temperaturas e baixas umidades do ar, provocando abortamento de flores e de frutos além do normal e impactando o número total de frutos por planta no ciclo, que geralmente não é compensada por florações posteriores em cultivos de sequeiro (TONET *et al.*, 2002).

Estratégias de manejo para antecipação de floradas para períodos com temperaturas mais amenas e/ou irrigações mais conservadoras na Fase I, reduzem os riscos de queda de produção. Por outro lado, como verificado por Silva *et al.* (2006) a suspensão da irrigação de

limeira ácida 'Tahiti' a partir da brotação, em diferentes períodos fenológicos reduziu o potencial de água das folhas das plantas não irrigadas; mas sem efeito negativo no crescimento da brotação e dos frutos, na abscisão, produção e qualidade dos frutos formados das plantas. Tal fato pode ter ocorrido devido a cultivo em solo com boa fertilidade e região na qual os picos de temperaturas não são críticos a para planta. Os efeitos do estresse se acentuam na FASE II, impactando a taxa de crescimento de frutos (RUIZ-SÁNCHEZ *et al.*, 2010) e qualidade (GARCÍA-TEJERO *et al.*, 2010), com acúmulo progressivo de sólidos solúveis e redução da acidez do suco; e principalmente quando *deficit* aplicado na FASE III (CARR, 2012). Em geral, o *deficit* afeta especialmente as características organolépticas, aumentando a acidez e sólidos solúveis (GARCÍA-TEJERO *et al.*, 2010).

Em clima semiárido a recomendação se baseia na aplicação de estresse controlado na FASE II. Portanto a técnica parte do conhecimento de que o acúmulo de matéria seca dos frutos durante o estresse hídrico controlado na FASE II é compensado por uma rápida recuperação do status hídrico da planta após o período de estresse e aceleração do crescimento de frutos compensa a menor taxa de crescimento no período de estresse (RUIZ-SÁNCHEZ *et al.*, 2000). Assim, a disponibilidade de água em níveis ótimos ao retornar à irrigação, é importante para compensar o crescimento. É importante salientar que além das características edafoclimáticas da região, as respostas dependem também da combinação copa-cavalo adotada. Efeitos do *deficit* hídrico são menores em porta-enxertos tolerantes à seca, e por exemplo a qualidade dos frutos, especialmente a acidez, pode não ser tão afetada (ROMERO-TRIGUEROS *et al.*, 2020).

A aplicação da estratégia de irrigação em uma das fases ou em todas, promove respostas fisiológicas variáveis e deve ser bem planejada e monitorada para que o estresse não comprometa a produção e qualidade final de frutos. O monitoramento pode ser baseado em respostas fisiológicas das plantas como o potencial da água nas folhas ou ramos (GARCIA-TEJERO *et al.*, 2011), variações espectrais do dossel das plantas (JORGE; INAMASU, 2014) ou do solo, como a disponibilidade de água na zona radicular ou potencias de água (PIRES *et al.*, 2005). Os valores críticos dos indicadores de estresse dependem do clima da região, época do ano, fertilidade do solo, combinação copa e porta-enxerto utilizado, dentre outros aspectos.

É importante o conhecimento das respostas fisiológicas das plantas no ambiente de produção para correto manejo do *deficit* de irrigação, estabelecendo-se os limites críticos dos índices de estresse adotados indicando necessidade da irrigação. Como índices, avaliações dos potenciais da água folha/ramo em torno próximos de -1,2 MPa, como limiares máximos para leituras realizadas antes do amanhecer; ou valores que podem superar -1,7 MPa ao meio dia avaliados em tangerineiras irrigadas por gotejamento (GONZÁLEZ ALTOZANO; CASTEL, 2000); limiar de -1,3 MPa para não haver efeitos no tamanho de frutos de tangerineiras (GONZÁLEZ ALTOZANO; CASTEL, 2003) e de -1,4 MPa (BALLESTER *et al.* 2011); limiar máximo de -2 MPa (leituras ao meio dia) para laranjeira irrigada por gotejamento (GASQUE *et al.*, 2016) e irrigação superficial (GARCIA-TEJERO *et al.*, 2011). O tamanho final dos frutos, bem como a produtividade dependem da duração e da intensidade do estresse aplicado (BALLESTER *et al.*, 2011).

Para limeira ácida 'Tahiti' enxertada em limoeiro 'Cravo' no semiárido brasileiro, resultados evidenciaram a possibilidade de aplicação de deficits aplicados nas três fases de desenvolvimento de frutos em solos profundos, de textura arenosa do perímetro irrigado de Jaíba-MG (COELHO FILHO *et al.*, 2006). O estudo avaliou a aplicação deficits hídricos de 15%, 30% e 45% em cada fase de desenvolvimento de frutos, e de *deficit* de 50% ao longo de todas as fases. As reduções das irrigações foram em relação a irrigação plena (ETc) e avaliados separadamente nas três fases de desenvolvimento de frutos. Nesse estudo também foram avaliadas as respostas do *deficit* regulado de irrigação (RDI) aplicados com gotejamento, duas linhas de gotejadores por planta e microaspersão, um emissor por planta.

As distintas configurações da irrigação localizada promoveram diferenças nas respostas alcançadas em função de interação manejo e sistema de irrigação no ambiente avaliado (Figura 4). A maior variabilidade de resposta ocorreu com as lâminas aplicadas na Fase I, principalmente com a microaspersão, indicando maior sensibilidade principalmente nessa fase, sendo as respostas compatíveis às alcançadas com *deficit* fixo aplicado em todas as FASES (T50). Isso pode estar relacionado a heterogeneidade de distribuição de água no solo, nos dois anos de avaliação, em especial no segundo quando as condições de demanda atmosférica foram mais elevadas na Fase I, impactando mais severamente o abortamento floral e número de frutos colhidos. Maior estabilidade de produção entre os tratamentos e valores médios de produtividade foi observado nas plantas irrigadas por gotejamento.

No segundo ano de avaliação, é interessante observar que a produção nos tratamentos que receberam as maiores lâminas de água apresentou maior abortamento floral e de frutos (Figura 4b). Esta tendência também foi verificada para os tratamentos aplicados na Fase III. Esses resultados corroboram com outras observações que mostram ganhos em produção ao se utilizar *deficit* com RDI em comparação com ausência de estresse, devido ao maior número de frutos por planta, ou seja, menor abortamento de flores e frutos, que pode estar ligado a possível resposta a *deficit* na estação anterior ou *deficit* não programado (GASQUE *et al.*, 2016). Isto pode se relacionar com a possibilidade de efeito de memória genética do estresse anterior. Respostas epigenéticas a eventos de estresse induzindo fortes respostas bioquímicas e influenciadas por diferentes porta-enxertos de citros (NEVES *et al.*, 2018) podem explicar os resultados em campo. Esse certamente é um dos desafios para evolução do manejo de irrigação do futuro com maior entendimento das respostas biológicas às interações entre plantas, ambiente e manejo da irrigação deficitária.

Estudos realizados com laranja Pêra, sendo o porta-enxerto o limoeiro 'Cravo', na principal região produtora do Estado da Bahia, também evidenciaram a possibilidade de uso da irrigação com *deficit* controlado. Nesse estudo, Amorim *et al.* (2021) verificaram grandes impactos na produção quando os deficits foram aplicados nas Fases I e II, ao se suspender completamente a irrigação. Tanto a produtividade quanto aspectos qualitativos do fruto foram afetados quando a planta foi submetida ao estresse programado na Fase II.

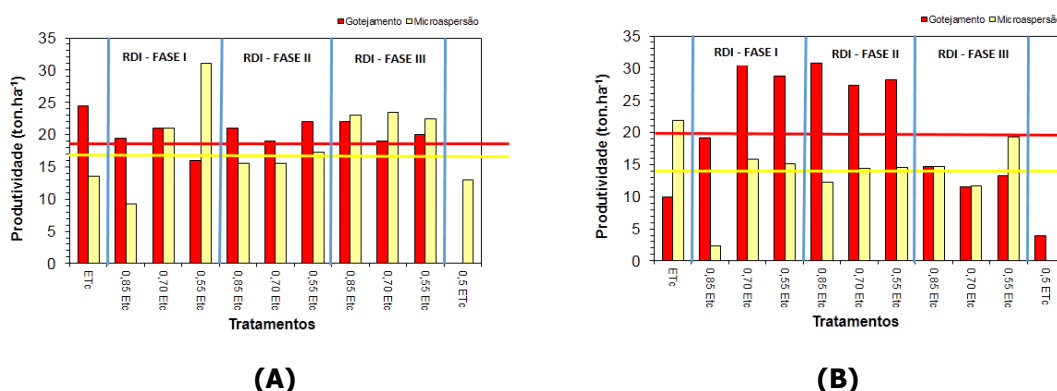


Figura 4. Produtividade de limeira ácida 'Tahiti' enxertada em limoeiro 'Cravo' nas condições semiáridas de Jaíba (MG), submetidas a diferentes níveis de irrigação com *deficit* controlado nas fases de desenvolvimento dos frutos (RDI): Fases I, II e III; e irrigado por microaspersão e gotejamento. (A) ano de 2005, e (B) ano de 2006 (COELHO FILHO *et al.*, 2006).

Com relação à qualidade de frutos, verificou-se manutenção de valores elevados de acidez, afetando a relação sólidos solúveis e acidez, que acabou sendo menor nas plantas sob maior *deficit* (RDI - Fase II e sequeiro). Esses resultados corroboram com diversos estudos de irrigação com *deficit* e mostram efeito na qualidade de frutos, efeito este dependente da intensidade do *deficit* aplicado e duração (BALLESTER *et al.*, 2011). Nos estudos de Amorim

et al. (2021), os valores acidez dos frutos observados no RDI - FASE II foram compatíveis ao tratamento sequeiro e estratégias de irrigação com *deficit* fixo, aplicando-se 50% água. Interessante pontuar que para os citros no semiárido ou regiões quentes ao longo do ano, há indução de baixa acidez dos frutos, e que o manejo de irrigação com *deficit* pode ser trabalhado estrategicamente para o aumento da qualidade do fruto, e atuar na qualidade.

A queda de produção observada no tratamento de RDI para laranjeiras cultivadas em clima subúmido, ligada a suspensão completa da irrigação na FASE II, foi pelo esgotamento completo da água disponível do solo na zona radicular da planta por longo período, similar às plantas não irrigadas, resultando em valores altos de temperatura foliar e de resistência estomática em período de elevado *deficit* de pressão de vapor da atmosfera. Tal fato resultou em produtividades similares ao tratamento sequeiro ao longo dos três anos de estudo ($73 \text{ kg planta}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e eficiência de uso de água de 8 kg m^{-3} . Estas produtividades foram inferiores ao verificado com plena irrigação ($110,4 \text{ kg planta}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e eficiência de uso de água ligeiramente superior, mas não estatisticamente ($7,37 \text{ kg m}^{-3}$). Mesmo em clima subúmido há necessidades de irrigação ao longo da Fase II, tendo como base índice que indique o limite superior de estresse.

O *deficit* fixo ao longo do ano é também pode ser adotada e nesse aspecto, resultados obtidos por Silveira *et al.* (2020) na principal região produtora de citros do Brasil, em experimento de longa duração, mostraram ser possível a aplicação de 50% da lâmina recomendada ao longo do período de produção sem efeitos significativos na produtividade das plantas, mantendo-se a qualidade de frutos sem diferenças grandes na eficiência de uso de água em comparação aos alcançados com as plantas que irrigadas sem *deficit*. Há que se ressaltar que na região sudeste, em especial no Estado de São Paulo e triângulo e sudoeste de Minas Gerais, há interesse em avaliar o efeito do *deficit* nas diferentes fases de desenvolvimento dos frutos pois esta época coincide, em geral, com o período de estiagens no qual a redução no uso da água é fundamental. A irrigação deficitária com aplicação de 75, 50 ou 25 % da ETc apresentaram produtividade e qualidade dos frutos de laranjeira Pêra-IAC compatíveis com a reposição de 100% da ETc em 3 dos 5 anos avaliados. Comparando-se às plantas não irrigadas a adoção de irrigações deficitárias aumentaram a produtividade e vários dos atributos qualitativos. Considerando os resultados relacionados à produção e qualidade dos frutos, o crescimento da copa ao longo do tempo, bem como a tendência ao longo do experimento e a eficiência do uso da água os autores recomendam a estratégia de irrigação deficitária de 50% da ETc. Interessante ressaltar que comparando a produtividade média dos tratamentos irrigados nos 5 anos de produção com o obtido em cultivo sob sequeiro, houve aumento de produtividade equivalente a 1,5 safras com a adoção da irrigação. Ainda há que se ressaltar que nos anos de baixa produtividade associada ao *deficit* hídrico há valorização da laranja com a redução da oferta, e, o aumento da receita deverá ser mais acentuado que o verificado na produtividade.

O efeito positivo do uso da irrigação deficitária em pomar de plantas adultas de laranjeira Valência no Estado de São Paulo foi verificado por Pavão (2016). A irrigação favoreceu a produtividade quando aplicada a lâmina de irrigação de 100, 75 e 50% da ETc em três anos de produção. A estratégia de aplicação de 50% da ETc apresentou também maiores valores de kg de sólidos solúveis por hectare, importante parâmetro para frutas destinadas à produção de suco. Assim a aplicação da irrigação com 50% de *deficit* mostrou-se interessante considerando-se economia no uso da água e produção.

Em condições semiáridas do Brasil, o *deficit* fixo está sendo aplicado com o objetivo de avaliar as interações de porta-enxertos em lima ácida 'Tahiti' e lâminas de água aplicadas para avaliar o manejo que proporcione aumento da eficiência de uso de água e eficiência produtiva (kg de fruto m^{-3} de copa) em sistemas mais adensados de produção (5 x 2,5 m). Nessas condições, busca-se plantas mais compactas e produtivas, seja pelo uso de novos porta-

enxertos que induzem o nanismo às copas, seja pela plasticidade induzida pelas interações entre porta-enxerto e lâminas aplicadas. Essa resposta é fundamental nas receitas do produtor, pois permite menores intervenções com podas e facilidade de colheita. Costa *et al.* (2019) e Jesus *et al.* (2019), trabalhando com gotejamento com irrigações diárias no semiárido de Bom Jesus da Lapa-BA, verificaram não haver interações copa e porta-enxerto de limeira ácida nos primeiros anos de cultivo. Mesmo assim, observaram efeitos dos porta-enxertos no vigor de plantas, expresso pelo volume de copa e respostas leves das lâminas aplicadas no volume de copa no terceiro ano de cultivo (Figura 5).

O volume de copa da lima ácida 'Tahiti' enxertada em híbrido TSKC x TRFD-06, Citrumelo Swingle e HTR-069 apresentaram valores similares estatisticamente e intermediários, comparados aos resultados obtidos com plantas enxertadas em limoeiro 'Cravo' e Flying Dragon, este com menor vigor. Os resultados encontrados impactam a eficiência produtiva das plantas (Figura 6), superiores para os porta-enxertos com copas mais compactas, como foi o caso do porta-enxerto *Flying Dragon* e seu híbrido com Tangerineira 'Sunki comum' (TSKC x TRFD - 06). O TSKC x TRFD-06 com eficiência produtiva de 2,82 kg m⁻³, seguido do *Flying Dragon* que apresentou eficiência produtiva de 1,87 (kg m⁻³), sendo superior ao limoeiro 'Cravo' e ao Citrumelo 'Swingle', porta-enxerto muito utilizados no cultivo da limeira ácida 'Tahiti'.

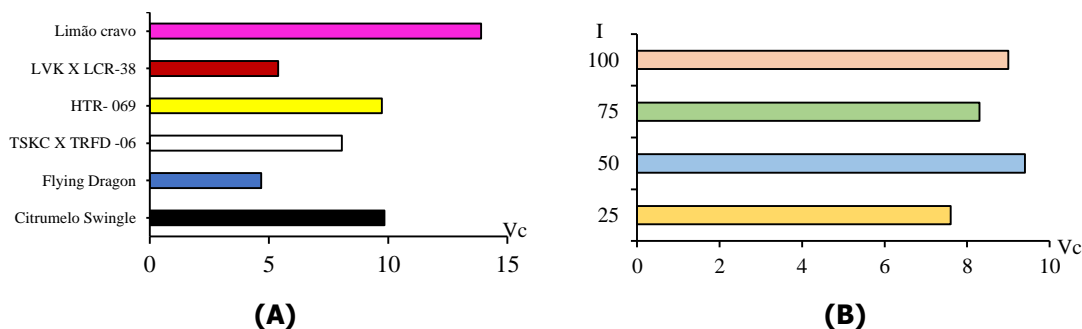


Figura 5. Volume de copa de plantas jovens de limeira ácida, enxertadas em 6 porta-enxertos: (1) Citrumelo *Swingle*, (2) *Flying Dragon*, (3) TSKC x TRFD-06, (4) HTR-069, (5) LVK x LCR-038 e (6) Limoeiro 'Cravo' (A), e plantas submetidas (volume de copa – Vc, m³) a 4 níveis de lâminas de irrigação (I, %) ao longo do ciclo em pomar irrigado por gotejamento e frequência diária (B). Bom Jesus da Lapa (BA). Ano de 2019.

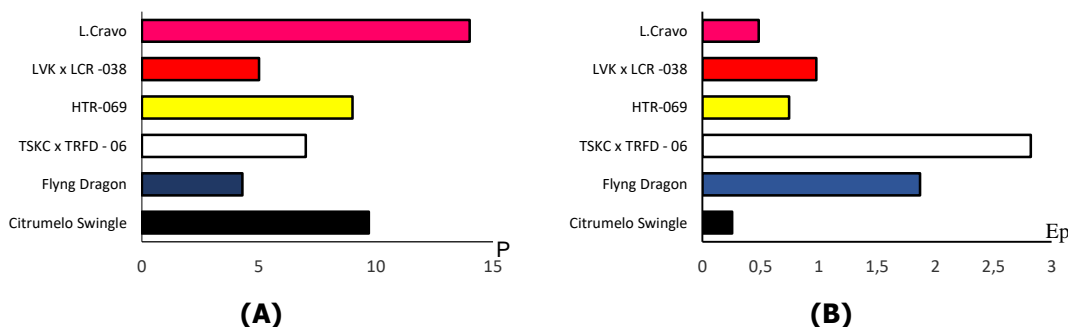


Figura 6. Produtividade (P, kg planta⁻¹) (A) e eficiência produtiva (Ep, kg m⁻³) (B) de pomar jovem de limeira ácida 'Tahiti', em plantas enxertadas em 6 porta-enxertos e submetidas a 4 níveis de irrigação ao longo do ciclo em pomar irrigado por gotejamento com frequência diária. Bom Jesus da Lapa, BA. Ano 2019.

4.2.3.8 Irrigação com secamento parcial e alternado do sistema radicular das plantas

Nesse tipo de manejo, as plantas são irrigadas apenas com fração da água recomendada, geralmente 50%, alternando-se a zona irrigada do solo em períodos que variam

em função da sensibilidade da planta ao *deficit*, distribuição radicular e demanda atmosférica e capacidade de armazenamento de água no solo. O método se baseia na sinalização química de ácido abscísico (ABA) produzido no sistema radicular da planta submetido ao *deficit* que translocado para copas, que afeta a abertura de estômatos e crescimento das plantas. Assim, o controle da produção de ABA com a prática do PRD tem como objetivos direcionar os fluxos de crescimento da planta e aumento da eficiência do uso de água, desde que o fechamento dos estômatos, controlados pelos teores de ABA seja apenas parcial permitindo a conservação da água na planta, efeitos leves nas taxas fotossintéticas (KANG; ZHANG, 2004), aumento da eficiência de uso de água (A/E) e a manutenção do status hídrico da planta. Para tal propósito é necessário irrigar alternadamente/heterogeneamente em zonas do solo com sistema radicular umedecido pela irrigação, permitindo a manutenção vital da planta e seu status hídrico; e outra parte do sistema radicular, na zona seca do solo, seja responsável pela sinalização de ABA afetando as trocas gasosas com consequências diretas no fechamento de estômatos, redução do crescimento foliar e aumento da eficiência de uso de água. Em outras palavras, é possível separar as respostas bioquímicas do estresse hídrico dos efeitos hidráulicos do estresse da redução da disponibilidade de água (LOVEYS *et al.*, 2000).

Inicialmente, visando o controle do vigor de ramos de videiras e melhor balanço com fluxos reprodutivos, pensou-se que o efeito do secamento parcial fosse duradouro (DRY; LOVEYS, 1998), mas foi observado que é transiente e algum tempo após o início do estresse, as plantas reduzem a produção de ABA, com taxas de crescimento e condutância estomática retornando aos níveis das condições pré-estresse. A alternativa para este fato que dificultava o uso dessa estratégia surgiu com a alternância regular do secamento nas zonas irrigadas (DRY *et al.*, 1999) e a possibilidade de manutenção da produção de ABA em níveis elevados, sempre se mantendo nível de transporte de água nas raízes expostas ao *deficit* para garantir sinalização para os ramos (DODD *et al.*, 2008). Essa é a base do manejo PRD que depois foi estudado em diversas culturas, dentre estas para os citros (HUTTON; LOVEYS, 2011; CONSOLI *et al.*, 2014; PÉREZ-PÉREZ *et al.*, 2018).

O manejo com PRD também foi estudado com a cultura dos citros no Brasil. Em clima semiárido e solo arenoso, Jaíba-MG, pomar adulto de limeira ácida 'Tahiti' enxertada em limoeiro 'Cravo' irrigada por gotejamento foi submetido a diferentes tratamentos envolvendo o manejo de irrigação PRD envolvendo reduções de 25 a 50% da ETC e alternâncias de secamento/molhamento do solo de 7, 14, 21 e 28 dias. Foi verificada a possibilidade de economia de 50% da irrigação, com ganhos em eficiência de uso de água e produtividade em relação a plantas irrigadas sem estresse (Figura 7). As frequências de alternâncias de molhamento do solo devem ser avaliadas e aplicadas com critério em pomares irrigados por PDR. Neste estudo foi verificado que mais importante que o volume irrigado são as frequências de alternâncias das zonas molhadas. Baixas frequências resultaram em quedas de produção e eficiência de uso de água, como pode ser verificado para frequências de 14, 21 e 28 dias, resultando em produtividades inferiores à plena irrigação (100 ETC): redução de 36% irrigando com 50% lâmina recomendada e de 27% ao se irrigar com 85% da lâmina recomendada. Por outro lado, frequências alternadas de irrigação de 7 dias viabilizaram produtividades e EUA superiores à irrigação plena, independente da lâmina aplicada (Figura 7).

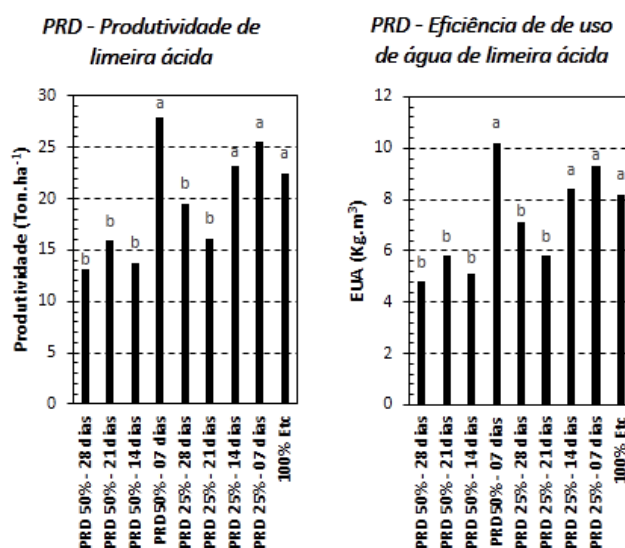


Figura 7. Produtividade (t ha⁻¹) e eficiência de uso de água (kg m⁻³) de limeira ácida 'Tahiti' enxertado em limoeiro 'Cravo' em condições semiáridas, Jaíba (MG) (COELHO *et al.*, 2012).

Sampaio *et al.* (2012) em pomar irrigado por microaspersão e tratamentos de PRD aplicados continuamente por dois anos, em solo arenoso e com impedimento físico a aproximadamente 1 m de profundidade, não verificaram benefícios do PRD em relação ao *deficit* fixo de 50% ETC, apesar dos ganhos nesses dois tratamentos em relação a eficiência de uso de água (9,4 kg m⁻³), comparado aos alcançados no manejo sem *deficit* (6,30 kg m⁻³). Foi comprovada a possibilidade de aplicação de lâmina de 75% da ETC (PRD - 21 dias) para garantias de produtividades compatíveis com a irrigação plena (22,5 t ha⁻¹), com ganhos expressivos em EUA (8,16 kg m⁻³). Nesse estudo ficou comprovada a importância do monitoramento do potencial da água da planta e temperatura foliar na estratégia da irrigação por PDR, que refletiram o maior controle estomático (Figura 8).

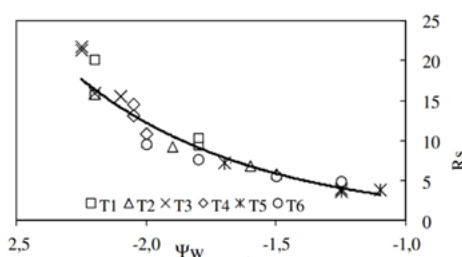


Figura 8. Relação entre potencial hídrico dos ramos (Ψ_w , MPa) e resistência estomática (R_s , s cm⁻¹) de folhas em pomar de lima ácida 'Tahiti', fazenda Boa Vista, Iaçú, BA. (T₁) PRD 7 dias e 50% da ETC, (T₂) PRD 14 dias e 50% da ETC, (T₃) PRD 21 dias e 50% da ETC, (T₄) Irrigação fixa e 50% ETC, (T₅) irrigação fixa e 100% da ETC, e (T₆) PRD 21 dias 75% da ETC (SAMPAIO *et al.*, 2014)

Plantas cítricas são muito responsivas ao aumento do *deficit* de pressão de vapor e temperatura do ar, geralmente elevados nos meses secos no semiárido, regulando a abertura estomática e aumentando a temperatura foliar, principalmente em condições de PRD (LOVEYS *et al.*, 2004). Essas respostas ainda foram mais significativas em plantas em PRD submetidas a alternâncias de irrigação de 7 dias, com reflexos no balanço total de água na planta expresso pelo fluxo de seiva, mas que não implicaram em ganhos produtivos. Levando em consideração o tratamento PRD com redução de 25% da lâmina alternada a cada 21 dias, os valores de potenciais ficaram em -1,6 MPa em média, não superando - 2 MPa, o que parece ser um limite para o manejo de irrigação com *deficit*. Valores médios de potencial da água na folha para os tratamentos PRD ficaram entre -1,6 e -2,2 MPa e -1,2 MPa para irrigação plena. Faixas

geralmente encontradas em trabalhos com *deficit* de irrigação, como verificado anteriormente. As quedas de produção ao se reduzir 50% da lâmina podem ser explicadas pela maior variabilidade de lâmina aplicada no solo, pelo sistema de microaspersão, ponto a ser melhor estudado; agravado pelo solo com baixa capacidade de armazenamento e pouco profundo.

Certamente o conhecimento dos níveis ótimos de secamento do solo para promover a sinalização química, alterações nas relações hídricas foliares, status hídrico da planta e alocação de biomassa, influenciados pelas frequências de alternâncias e consequente proporções da massa radicular exposta ao solo seco, é ponto chave a ser investigado para o sucesso da técnica do PRD (PÉREZ-PÉREZ *et al.*, 2018).

Evidências da importância de se estabelecer os períodos de alternâncias de irrigação PRD com critérios científicos foram observados por Amorim *et al.* (2021), em estudos realizados em condições subúmidas do litoral Norte da Bahia, com laranjeira 'Pêra'. Existiu uma boa relação entre produtividades das plantas e períodos de alternâncias estudados (15 e 30 dias). Plantas submetidas a alternâncias de 15 dias foram mais produtivas, mesmo assim 10% a menos que o tratamento sem *deficit*, e permitindo acréscimos de 56% na eficiência de uso de água, 12,21 kg m⁻³ em relação a irrigação plena, 7,7 kg m⁻³. Interessante que a queda de produção em relação a irrigação plena foi de 24% para o tratamento com alternâncias a cada 30 dias e com eficiência de uso de água de 11,1 kg m⁻³. Esses resultados sugerem que os ganhos poderiam ser melhores com o uso do PRD com alternâncias menores aos estudados.

4.3 Viticultura

4.3.1 Região

A irrigação de videiras no Brasil tem sido adotada, principalmente, nas regiões tropicais do país, como no semiárido nordestino, no norte de Minas Gerais ou na região noroeste de São Paulo, onde todas as áreas vitícolas são irrigadas. Nas regiões de clima temperado ou subtropical do Brasil, como nos estados do Sul, na região sudeste de São Paulo e no sul de Minas, a irrigação, em geral, não é adotada, embora haja um crescente interesse para a implantação de sistemas irrigados nessas áreas, em função da ocorrência mais frequente de estiagens durante os períodos de desenvolvimento da cultura. Nessas regiões de clima temperado ou subtropical, a produção de uvas de mesa é mais favorecida pelo uso da irrigação, uma vez que critérios como produtividade e tamanho de cachos e bagas apresentam vantagens competitivas no mercado. Além disso, as uvas de mesa apresentam, normalmente, preço maior por kg, em relação às uvas para processamento. No entanto, em algumas áreas do sul do país tem havido interesse na irrigação de vinhedos destinado à produção de uvas para vinho, visando melhor formação das plantas e evitando a ocorrência de deficits hídricos mais severos, o que poderia comprometer a qualidade final dos produtos. Também há interesse, nessas regiões, pela irrigação em áreas que utilizam cobertura plástica impermeável, empregada para proteger os vinhedos das precipitações pluviais, que favorecem a incidência de doenças fúngicas. Embora a cobertura reduza, normalmente, a demanda hídrica da cultura, ela impede, muitas vezes, o umedecimento adequado do sistema radicular das plantas.

4.3.2 Métodos de irrigação

Os métodos mais empregados na irrigação da cultura são a microaspersão e o gotejamento, que apresentam, normalmente, alta uniformidade de aplicação e evitam o molhamento foliar, reduzindo o risco de ocorrência de doenças fúngicas, como o míldio (*Plasmopara viticola*) e as podridões de cachos (*Glomerella cingulata*, *Botrytinia fuckeliana*). Na microaspersão, os emissores são, normalmente, fixados no aramado do parreiral, operando de modo invertido e umedecendo toda a área cultivada, inclusive as entrelinhas. Uma das

vantagens desse método, em relação ao gotejamento, é a sua menor suscetibilidade ao entupimento, inclusive em decorrência de águas com alta concentração de ferro, reduzindo a necessidade de investimento em sistemas de filtragem mais onerosos. Ele também possibilita melhor aplicação e incorporação da matéria orgânica ao solo, prática bastante comum em algumas regiões produtoras de uvas. Por outro lado, o consumo de água costuma ser maior, em relação ao gotejamento, em função da maior área molhada pelos microaspersores e, conseqüentemente, das maiores perdas por evaporação da água do solo (TEIXEIRA *et al.*, 2007). A irrigação por gotejamento permite, por sua vez, o manejo com molhamento parcial do sistema radicular, prática que tem sido empregada em algumas áreas, principalmente em regiões semiáridas. Além disso, no gotejamento, as práticas culturais (poda, condução de ramos, etc.) não precisam ser interrompidas durante a aplicação de água, o que não ocorre na microaspersão.

4.3.3 Necessidades hídricas da videira

As necessidades hídricas do vinhedo irão depender das condições meteorológicas do local e de fatores específicos relacionados à cultura. A demanda será maior quanto maiores forem a radiação solar (R_s), a temperatura do ar (T) e a velocidade do vento (V_v) e quanto menor for a umidade relativa do ar (UR). Em relação à cultura, diferentes fatores irão afetar a necessidade hídrica, como o sistema de condução do parreiral, o desenvolvimento vegetativo das plantas, o uso de cobertura plástica, o manejo da irrigação e a cobertura vegetal do solo, entre outros.

A presença de cobertura vegetal sobre o solo poderá afetar a demanda hídrica ou evapotranspiração do vinhedo, principalmente no período após a poda, quando ainda é restrita a área foliar das videiras (CONCEIÇÃO *et al.*, 2012). Quanto menor for o intervalo entre irrigações, maiores serão as perdas por evaporação da água do solo. O uso de cobertura plástica sobre o parreiral tende, por sua vez, a diminuir a demanda hídrica do vinhedo em função, principalmente, da redução da radiação solar incidente e da velocidade do vento (HOLCMAN *et al.*, 2018). Já a evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) tende a aumentar com o desenvolvimento vegetativo das plantas, apresentando redução no final do ciclo, principalmente em regiões que apresentam senescência das folhas. Por fim, a influência do sistema de condução do parreiral está relacionada à área foliar interceptada pela radiação solar, ou a fração de cobertura ou porcentagem da área sombreada pelo dossel (PAS). Isso porque a E_{Tc} tende a apresentar valores maiores para plantas que com maior PAS, mesmo que apresentem mesmo índice de área foliar (WILLIAMS; AYARS, 2005). Dessa forma, vinhedos com sistemas de condução horizontal do tipo latada apresentam, normalmente, maior demanda hídrica do que aqueles que adotam sistemas de condução vertical do tipo espaldeira (Figura 9).



Figura 9. Videiras conduzidas no sistema latada (A) e no sistema espaldeira (B). Fotos: Marco A. F. Conceição.

4.3.4 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação em vinhedos tem sido realizado, normalmente, com base na estimativa da demanda hídrica ou evapotranspiração diária da cultura (ETc). A estimativa da ETc é feita, geralmente, multiplicando-se a evapotranspiração de referência (ETo) pelo coeficiente de cultivo (Kc). A ETo representa a demanda hídrica da atmosfera, sendo função das variáveis meteorológicas registradas no local. Quando todas as variáveis estão disponíveis, pode-se calcular a ETo pelo método padrão de Penman-Monteith. No entanto, quando só estiverem disponíveis dados de temperaturas máxima e mínima do ar, a ETo poderá ser estimada pelo método de Hargreaves, que foi ajustado para algumas regiões vitícolas do país (CONCEIÇÃO, 2017).

Já os valores do Kc são, muitas vezes, obtidos experimentalmente em diferentes condições de clima, solo e práticas culturais. Teixeira *et al.* (1999) obtiveram valores de Kc entre 0,65 e 1,15, para videiras para mesa do cultivar Itália (*Vitis vinifera*), em Petrolina (PE). Na mesma localidade, Nascimento (2010) obteve valores de Kc entre 0,31 e 1,17, para videiras para vinho do cultivar Syrah (*Vitis vinifera*). Já para as condições do noroeste paulista, Conceição *et al.* (2012) obtiveram valores de Kc entre 0,23 e 0,93, para videiras para mesa do cultivar Niágara Rosada (*Vitis labrusca*), cobertas com tela plástica de 18% de sombreamento. Essa tela é utilizada, na região, para proteção dos frutos contra o ataque de pássaros e morcegos.

Modelos matemáticos também podem ser empregados para a estimativa de Kc em função dos diversos fatores que afetam seu valor (CONCEIÇÃO, 2016b), entre eles a porcentagem da área sombreada (PAS) pelo dossel. Williams e Fidelibus (2016), com base em dados obtidos na Califórnia empregando-se lisímetro de pesagem, obtiveram a relação entre PAS e Kc expressa na equação 2. Os autores registraram um valor máximo da PAS igual a 82%, correspondendo a um valor máximo de Kc igual a 1,40. Modelos como esse, no entanto, necessitam ainda ser ajustados para as condições brasileiras.

$$Kc = 0,017 \cdot PAS \quad (1)$$

A determinação da PAS pode ser efetuada por meio de imagens digitalizadas, ou empregando-se equipamentos específicos, que podem ser simples ou mais sofisticados (Figura 10).

Uma vez obtidos os valores da ETc, pode-se efetuar o balanço hídrico no vinhedo, incluindo-se os dados da precipitação pluvial diária e da taxa de aplicação de água do sistema de irrigação. Deve-se considerar que em áreas com um manejo adequado do solo o escoamento superficial é desprezível, e que o plantio de videiras deve ser realizado em locais onde não haja ascensão capilar. Para facilitar o cálculo diário do balanço hídrico, podem ser utilizados aplicativos ou planilhas eletrônicas (CONCEIÇÃO, 2017). Para avaliar se os critérios adotados estão adequados, deve-se realizar o monitoramento hídrico do solo e, ou, das plantas.



Figura 10. Equipamentos para estimativa da porcentagem de área sombreada pelo dossel das videiras. Fotos: Marco A. F. Conceição.

4.3.5 Monitoramento hídrico do solo e da planta

O monitoramento hídrico do solo pode ser realizado empregando-se sensores de umidade ou de tensão da água no solo. Para a determinação da tensão podem ser utilizados tensiômetros, ou sensores do tipo Irrigás[®], que foram desenvolvidos pela Embrapa Hortaliças para irrigação de olerícolas, mas que têm sido utilizados, também, em outras culturas, inclusive em videiras (CONCEIÇÃO, 2016c). Os sensores, em geral, devem ser instalados na região central do sistema radicular, para avaliar as condições hídricas das plantas; e abaixo das raízes, para avaliar se estão ocorrendo perdas por percolação. Apesar das videiras apresentarem, muitas vezes, raízes profundas, a maior parte do sistema radicular da cultura se concentra até 0,60 m de profundidade, sendo essa a camada que deve ser monitorada (PIRES *et al.*, 1997; BASSOI *et al.*, 2002; BASSOI *et al.*, 2003).

Para cultivares de uvas de mesa, pode-se admitir uma redução de até 35% da água disponível no solo, enquanto para cultivares de uvas para vinho, esse valor pode chegar a 45% (ALLEN *et al.*, 2006). Os limites de tensão da água no solo para a produção de uvas de mesa devem ficar entre 10 kPa e 30 kPa, até o final da formação das bagas; e de 30 kPa a 80 kPa, no período de maturação e após a colheita (CONCEIÇÃO, 2016a), sendo que os valores mais baixos devem ser utilizados em solos de menor capacidade de retenção de água. Esses limites também podem ser empregados em cultivares de uvas destinadas à elaboração de sucos e vinhos de mesa, uma vez que para esses cultivares, assim como para as uvas de mesa, também são desejadas altas produtividades, com vistas a um maior retorno econômico do vinhedo. Já para uvas destinadas à elaboração de vinhos finos, os valores limites da tensão poderão ser maiores, já que o uso de *deficit* hídrico controlado pode melhorar a qualidade e o preço final dos vinhos, embora reduza, muitas vezes, o rendimento da cultura (OJEDA, 2007).

Para o monitoramento hídrico das plantas é comum o uso da câmara de Scholander, que possibilita a determinação do potencial hídrico foliar (ψ_f). Podem ser recomendados os seguintes valores de ψ_f para a cultura da videira, determinados antes do amanhecer (DELOIRE *et al.*, 2006; OJEDA, 2007): (i) $\psi_f \geq -0,2$ MPa, estresse hídrico ausente ou moderado, (ii) $-0,2 \text{ Mpa} > \psi_f \geq -0,4$ MPa, estresse leve a moderado, (iii) $-0,4 \text{ Mpa} > \psi_f \geq -0,6$ MPa, estresse moderado a severo, e (iv) $-0,6 \text{ MPa} > \psi_f$, estresse severo.

De acordo com Ojeda (2007), para vinhedos em formação e para a produção de uvas de mesa, ou destinadas à elaboração de sucos e vinhos de mesa, o estresse hídrico deve ser ausente ou moderado: (i) para a obtenção de vinhos finos jovens, leves e frutados pode-se

admitir um estresse leve a moderado durante a maturação dos frutos, (ii) já para vinhos de guarda, admite-se um estresse leve a moderado durante o desenvolvimento das bagas, (iii) e um estresse moderado a severo durante a maturação, e (iv) esses valores servem como uma primeira referência, uma vez que devem ser realizadas pesquisas para cada local e cultivar a fim de se estabelecer os limites mais adequados em cada condição.

4.3.6 Manejo da irrigação com *deficit* hídrico e secamento parcial do sistema radicular

O uso do manejo da irrigação com *deficit* hídrico controlado (RDI, da sigla em inglês) é mais comum em uvas para processamento, principalmente naquelas destinadas à elaboração de vinhos finos, visando ao incremento da qualidade e do preço dos produtos finais. Isso porque o *deficit* hídrico favorece a concentração de açúcares e a redução da acidez nos frutos (BASSOI *et al.*, 2011), levando à obtenção de vinhos com maior concentração alcoólica, melhores intensidades de cor e aroma, melhor estrutura, harmonia e persistência (COSTA, 2009). Além disso, permite economia de água (BASSOI *et al.*, 2015), recurso escasso, principalmente nas regiões semiáridas do Brasil.

Essa estratégia também pode, no entanto, ser adotada em cultivares de uvas de mesa com o objetivo, principalmente, de reduzir uso da água, sem alterar a produtividade ou a qualidade final dos frutos (PERMANHANI *et al.*, 2016). Nesses cultivares, o *deficit* hídrico moderado pode ser adotado durante todo o ciclo produtivo da cultura (ANDRADE *et al.*, 2017), ou suspendendo-se a irrigação no período de maturação dos frutos (BASSOI *et al.*, 1999; MARINHO *et al.*, 2009; ZEOLI *et al.*, 2011; CONCEIÇÃO *et al.*, 2014).

O manejo com secamento parcial do sistema radicular (PRD, da sigla em inglês) visa umedecer parcialmente a região das raízes de forma alternada, levando as plantas à redução da transpiração, em função do fechamento parcial dos estômatos. Essa prática, contudo, pode, muitas vezes, afetar o tamanho dos cachos e o rendimento da cultura (BASSOI, 2011). Novos estudos necessitam ser empreendidos com a utilização dessa técnica, principalmente na região semiárida, uma vez que ela pode reduzir o consumo hídrico da cultura, aumentando a eficiência do uso da água no vinhedo (BASSOI *et al.*, 2005).

4.4 Considerações finais

A irrigação das videiras é imprescindível nas regiões tropicais do Brasil. O incremento do seu uso está, assim, relacionado à expansão da própria viticultura nessas regiões. O lançamento de novos cultivares, mais adaptadas às condições brasileiras, tem contribuído de maneira expressiva para essa expansão. Já em regiões de clima temperado ou subtropical, a irrigação deverá ser cada vez mais demandada em função das estiagens que deverão ocorrer com maior frequência, como consequência das mudanças climáticas globais.

Referências

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo**: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, Riego y Drenaje, 56, 298p., 2006.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, n.56, 300p. Roma: FAO, 1998.
- ALVES JÚNIOR, J. **Necessidade hídrica e resposta da cultura de lima ácida "Tahiti" a diferentes níveis de irrigação**. 100p., 2006. Tese (Doutorado em Agronomia, Área de Concentração em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, Piracicaba, 2006.

- ALVES JUNIOR, J.A.; BANDARANAYAKE, W.; PARSONS, L.R.; EVANGELISTA, A.W.P. Citrus root distribution under water stress grown in sandy soil of central Florida. **Engenharia Agrícola**, v.32, n.6, p.1109-115, nov./dez., 2012.
- AMORIM, M.S.; TOYOSUMI, I.S.; AMORIM, W.S.; CAMILLO, L.S.R.; FERREIRA, L.N.; ROCHA JUNIOR, D.S.; SOARES FILHO, W.S.; GESTEIRA, A.S.; COSTA, M.G.C.; COELHO FILHO, M.A. Partial rootzone drying and regulated deficit irrigation can be used as water-saving strategies without compromising fruit yield and quality in tropically grown sweet orange. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v.98, n.2, p.1-10, 2021.
- ANDRADE, V.P.M.; SILVA, J.A.B.; SOUSA, J.S.C.; OLIVEIRA, F.F.; SIMÕES, W.L. Physiological characteristics of grapevine under irrigation and fertilization management. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.47, n.4, p.390-398, 2017.
- BALLESTER, C.; CASTEL, J.; INTRIGLIOLO, D.; CASTEL, J. Response of Clementina de Nules citrus trees to summer deficit irrigation. Yield components and fruit composition. **Agricultural Water Management**, 98.6, p.1027-1032, 2011.
- BARBERA, G.; FATTA DEL BOSCO, G.; LO CASCIO, B. Effects of water stress on lemon summer bloom: The "forzatura" technique in the Sicilian citrus industry. **Acta Horticulturae**, v.171, p.391-397, 1985.
- BARRETO, G.B.; RODRIGUEZ, O.; REIS, A.J.; ARRUDA, F.B. **Irrigação de citros**. Campinas: Instituto Agrônomo, 17p., 1976. (Boletim Técnico, 35).
- BASSANEZI, R.B.; FERNANDES, N.G.; MASSARI, C.A. Progresso da morte súbita dos citros no Estado de São Paulo no período 2002-2005. **Laranja**, v.27, n.1, p.13-29, 2006.
- BASSANEZI, R.B.; LOPES, S. A.; MIRANDA, M.P.; WULFF, N.A.; VOLPE, H.X.L.; AYRES, A.J. Overview of citrus huanglongbing spread and management strategies in Brazil. **Tropical Plant Pathology**, v.45, p.251-264, 2020.
- BASSOI, L.H. Irrigation management on wine grapes in the Tropical zone. **Acta Horticulturae**, v.910, p.83-88, 2011.
- BASSOI, L.H.; ASSIS, J.S.; LIMA FILHO, J.M.P.; RIBEIRO, H.A.; SILVA, M.R.; MIRANDA, A.A. Interrupção da irrigação no período de maturação da uva cv. Itália. Petrolina: **Embrapa Semiárido**, 5p., 1999. (Embrapa Semiárido. Comunicado Técnico, 79).
- BASSOI, L.H.; CORREIA, J.S.; SANTOS, A.R.L.; SILVA, J.A.; COSTA, B.R.S. Deficit irrigation in grapevine e cv. Syrah during two growing seasons in the Brazilian semiarid. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.3, 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**, v.754, p.275-282, 2007.
- BASSOI, L.H.; GONÇALVES, S.O.; SANTOS, A.R.L.; SILVA, J.A.; LIMA, A.C.M. Influência de manejos de irrigação sobre aspectos de ecofisiologia e de produção da videira cv. Syrah / Paulsen 1103. **Irriga**, v.16, n.4, p.395-402, 2011.
- BASSOI, L.H.; GRANGEIRO, L.C.; SILVA, J.A.M.; SILVA, E.E.G. Root distribution of irrigated grapevine root stocks in a coarse texture soil of the São Francisco valley, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.24, n.1, p.35-38, 2002.
- BASSOI, L.H.; HOPMANS, J.W.; JORGE, L.A.C.; ALENCAR, C.M.; SILVA, J.A.M. Grapevine root distribution in drip and microsprinkler irrigation. **Scientia Agricola**, v.60, n.2, p.377-387, 2003.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Viçosa: UFV, 2006. 611p.
- BOMAN, B.; PARSONS, L. Evapotranspiration. In: BOMAN, B.J. **Water and Florida Citrus**. Gainesville: University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences, p.163-174, 2002.

- BOMAN, B.; PARSONS, L.; OBREZA, T.; STOVER, E. Citrus water use and irrigation scheduling. In: BOMAN, B.J. **Water and Florida Citrus**. Gainesville: University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences, p.175-191, 2002.
- BOMAN, B.; SYVERTSEN, J.P. Drainage lysimeters for high water table citros studies. In: ALLEN, R.G. (Ed.). **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, p.318-325, 1991.
- BRITO, R.R.; FILGUEIRAS, R.; SANTOS, J.E.V.; LEDA, V.C.; ANDRDRADE JUNIOR, A.S.; ZIMBACK, R.C. Índices de vegetação SAVI, NDVI e temperatura de brilho na caracterização da cobertura vegetativa do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí - DITALPI. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, João Pessoa-PB, **Anais**, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.
- CARR, M.K.V. The water relations and irrigation requirements of citrus (*Citrus spp.*): a review. **Experimental Agriculture**, v.48, n.3, p.347-377, 2012.
- CASTEL, J.R. Evapotranspiration of drip irrigated Clementine citrus tree in a weighing lysimeter. In: CHARTOZULAKIS, K.S. PROCEEDINGS OF THE SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IRRIGATION AND HORTICULTURAL CROPS, v.1, p.91-98, 1996.
- COELHO FILHO, M.A. **Determinação da transpiração máxima em um pomar jovem de lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia* Tan) e sua relação com a evapotranspiração de referência**. 91p., 2002. 91p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- COELHO FILHO, M.A.; COELHO, E.F.; SIMÕES, W.L.; COSTA, E.L. Uso regulado do *deficit* de irrigação nas fases de crescimento de frutos de lima ácida Tahiti irrigado por gotejamento. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 16, 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ABID. CD ROM, 2006.
- COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A.; MAGALHÃES, A.D.J.; OLIVEIRA, A.S. In: SOUSA, V.F.; MAROUELLI, 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, cap.14, p.413-439, 2011.
- 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.
- COELHO, E.F.; COELHO, Y.S.; SANTOS, M.R. Produtividade da laranja 'Pêra' sob diferentes níveis de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13, 2003, Juazeiro. **Anais...** CD-ROM. Juazeiro: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 2003.
- COELHO, E.F.; OLIVEIRA, F.C.; ARAÚJO, E.C.E.; VASCONCELOS, L.F.L. Sistema radicular da laranja 'pêra' não-irrigada e irrigada por gotejamento em solo arenoso dos tabuleiros costeiros. **Magistra**, Cruz das Almas, v.15, n.1, p.45-53, 2003.
- CONCEIÇÃO, M.A.F. **IRRIVITIS-T: manual da planilha eletrônica para manejo da irrigação de videiras com base na temperatura do ar**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 8p., 2017. (Embrapa Uva e Vinho. Comunicado Técnico, 198).
- CONCEIÇÃO, M.A.F. **Limites de tensão da água no solo para a produção de uvas de mesa**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 22p., 2016a. (Embrapa Uva e Vinho. Comunicado Técnico, 198).
- CONCEIÇÃO, M.A.F. **Modelos para estimativa dos coeficientes de cultivo (Kc) de videiras irrigadas**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 13p., 2016b (Embrapa Uva e Vinho. Circular Técnica, 132).
- CONCEIÇÃO, M.A.F. **Uso de sensores Irrigas® para o manejo da água na produção de uvas de mesa no noroeste paulista**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2016c. 6p. (Embrapa Uva e Vinho. Comunicado Técnico, 183).
- CONCEIÇÃO, M.A.F.; SAVINI, T.C.; SOUZA, R.T.; SANTOS, C.P. Suspensão da irrigação durante a maturação de uvas 'Niágara Rosada'. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 2. 2014, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI: INCTSAL: INI, 2014. p.2896-2901.

- CONCEIÇÃO, M.A.F.; SOUZA, R.T.; ZEOLI, J.J.S.; PAULA, M.V.B. Coeficiente de cultura (Kc) para videira com e sem cobertura vegetal no solo. **Irriga**, Edição Especial, p.234-249, 2012.
- CONESA, M.R.; LA ROSA, J.M.; FERNÁNDEZ-TRUJILLO, J.P.; DOMINGO, R.; PÉREZ-PASTOR, A. Deficit irrigation in commercial mandarin trees: water relations, yield and quality responses at harvest and after cold storage. **Spanish Journal of Agricultural Research**, n.16, v.3, 1201, 15p., 2018.
- CONSOLI, S.; STAGNO, F.; ROCCUZZO, G.; CIRELLI, G.L.; INTRIGLIOLO, F. Sustainable management of limited water resources in a young orange orchard. **Agricultural Water Management**, v.132, p.60-68, 2014.
- COSTA, A.L.C. **Manejo da irrigação com restrição hídrica sobre a fisiologia, produção e qualidade da uva e do vinho da cultivar *Chenin Blanc* no Vale do São Francisco**. 70p., 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- COSTA, J.; SANTOS, G.G.; JESUS, J. F.; SAMPAIO, A.; COELHO FILHO, M.A. Crescimento de lima ácida 'Tahiti' em diferentes porta-enxertos e manejo de irrigação em clima semiárido. In: Embrapa Mandioca e Fruticultura. Anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 26, 2019, Juazeiro, BA/Petrolina, PE. Fruticultura de precisão: desafios e oportunidades. **Anais**. Petrolina: Embrapa Semiárido: UNIVASF: SBF, 2019.
- DELOIRE, A.; CARBONNEAU, A.; WANG, Z.; OJEDA, H. Vid y agua: una breve revisión. **Enología**, v.5, p.36-42, 2006.
- DODD, I.C.; EGEA, G.; DAVIES, W.J. ABA signaling when soil moisture is heterogeneous: decreased photoperiod sap flow from drying roots limit ABA export to the shoot. **Plant Cell Environ**, v.31, p.1263-1274, 2008.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Yield response to water. Rome: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. FAO. **Irrigation and drainage paper**, 33, 179p., 1979.
- DRY, P.R.; LOVEYS, B.R. Factors influencing grapevine vigor and the potential for control with partial rootzone drying. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, n.4, v.3, p.140-148, 1998.
- DRY, P.R.; STOLL, M., Mc CARTHY, M.G.; LOVEYS, B.R. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops. In: III INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IRRIGATION OF HORTICULTURAL CROPS, n.537, p.187-197, 1999.
- DZIKITI, S.; VERREYNNE, J.S.; STUCKENS, J.; STREVER, A.; VERSTRAETEN, W.W.; SWENNEN, R.; COPPIN, P. Determining the water status of Satsuma mandarin trees (*Citrus unshiu Marcovitch*) using spectral indices and by combining hyperspectral and physiological data. **Agricultural and Forest Meteorology**, n.150, p.369-379, 2010.
- DZIKITI, S.; VERREYNNE, J.S.; STUCKENS, J.; STREVER, A.; VERSTRAETEN, W.W.; SWENNEN, R.; THARON, K.I.; COPPIN, P. Seasonal variation in canopy reflectance and its application to determine the water status and water use by citrus trees in the Western Cape, South Africa. **Agricultural and Forest Meteorology**, n.151, p.1035-1044, 2011.
- FUNDO DE DEFESA DA CITRICULTURA. Fundecitrus. Inventário de árvores do cinturão citrícola de São Paulo e Triângulo/Sudoeste Mineiro: retrato dos pomares em março de 2020. Araraquara, SP: **Fundecitrus**, 105p., 2020. Disponível em: https://www.fundecitrus.com.br/pdf/pes_relatorios/2020_06_25_Invent%C3%A1rio_e_Estimativa_do_Cinturao_Citricola_2020-2021.pdf. Acesso em: 16 mar. 2021.
- GARCIA PETILLO, M.; CASTEL, J.R. Water balance and crop coefficient estimation of a citrus orchard in Uruguay. **Spanish Journal of Agricultural Research**, n.5, v.2, p.232-243, 2007.
- GARCÍA-TEJERO, I.; DURÁN-ZUAZO, V.H.; MURIEL-FERNÁNDEZ, J.L.; JIMÉNEZ-BOCANEGRA, J.A. Linking canopy temperature and trunk diameter fluctuations with other physiological water status tools for water stress management in citrus orchards. **Functional Plant Biology**, n.38, p.106-117, 2011.
- GARCÍA-TEJERO, I.; JIMÉNEZ-BOCANEGRA, J.A.; MARTÍNEZ, G.; ROMERO, R.; DURÁN-ZUAZO, V.H.; MURIEL-FERNÁNDEZ, J.L. Positive impact of regulated deficit irrigation on yield and fruit quality in a commercial citrus orchard [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck, cv. salustiano]. **Agricultural Water**

Management, n.97, p.614-622, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.12.005>. Acesso em: 16 mar. 2021.

GASQUE, M.; MARTI, P.; GRANERO, B.; GONZÁLEZ-ALTOZANO, P. Effects of long-term summer deficit irrigation on 'Navelina' citrus trees. **Agricultural Water Management**, v.169, p.140-147, 2016.

GONZÁLEZ-ALTOZANO, P.; CASTEL, J.R. Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. II: Vegetative growth. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v.75, n.4, p.388-392, 2000.

GONZÁLEZ ALTOZANO, P; CASTEL, J.R. Riego deficitário controlado em 'Clementina de Nules'. I. Efectos sobre la producción y la calidad de la fruta. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.1, n.2, p.81-92, 2003.

HOLCMAN, E.; SENTELHANS, P.C.; CONCEIÇÃO, M.A.F.; COUTO, H.T.Z. Vineyard microclimate and yield under different plastic covers. **International Journal of Biometeorology**, v.62, p.925-937, 2018.

HUTTON, R.J.; LOVEYS, B.R. A partial root zone drying irrigation strategy for citrus-effects on water use efficiency and fruit characteristics. **Agricultural Water Management**, n.98, v.10, p.1485-1496, 2011.

IAFFE, A.; ARRUDA, F.B. Avaliação do consumo de água em pomar de laranjas em Pindorama, SP, em período de inverno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro Cidade: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, n.26, p.407, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal - Sistema IBGE de recuperação automática - Sidra**, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#resultado>. Acesso em: 16 mar. 2021.

JAMSHIDIA, S.; ZAND-PARSA, S.; KAMGAR-HAGHIGHI, A.A.; SHAHSAVAR, A.R.; NIYOGI, D. Evapotranspiration, crop coefficients, and physiological responses of citrus trees in semi-arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, n.227, p.105838, 2020.

JESUS, J.F.; COSTA, J.; SANTOS, G.G.; SAMPAIO, A.; COELHO FILHO, M.A. Eficiência produtiva de limão Tahiti sobre diferentes porta-enxertos e quatro lâminas de irrigação no semiárido baiano. In: Embrapa Mandioca e Fruticultura-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 26, 2019, Juazeiro, BA/Petrolina, PE. Fruticultura de precisão: desafios e oportunidades. **Anais**. Petrolina: Embrapa Semiárido: UNIVASF: SBF, 2019.

JORGE, L.C.; INAMASU, R.Y. **Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão**. Embrapa Instrumentação. capítulo em livro científico (ALICE), 2014.

KANG, S.; ZHANG, J. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. **Journal of Experimental Botany**, n.55, p.2437-2446, 2004.

KOBAYASHI, E.S.; PIRES, R.C.M.; BODINE JUNIOR, D.; VILLAR, H.L.; SAKAI, E.; SILVA, T.J.A. Coeficiente de cultura e consumo de água da laranjeira com irrigação localizada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38, 2009, Juazeiro-Petrolina. **Anais...**CD-ROM. Juazeiro-Petrolina: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2009.

KRIEDEMANN, P.E.; BARRS, M.D. Citrus orchards. In: **Water deficit and plant growth**. Ed. T.T. KOZLOWSKI. New York: Academic Press, v.6, p.325-417, 1981.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2012

LOVEYS, B.R.; STOLL, M.; DAVIES, W.J. Physiological approaches to enhance water use efficiency in agriculture: exploiting plant signaling in novel irrigation practice. **Water Use Efficiency in Plant Biology**, p.113-141, 2004.

MACHADO, C.C.; COELHO, R.D. Estudo da distribuição espacial do sistema radicular do limão 'Cravo' enxertado com lima ácida Tahiti. **Laranja**, v.21, p.359-380, 2000.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R. Irrigation requirements and transpiration coupling to the atmosphere of a citrus orchard in southern Brazil. **Agricultural Water Management**, n.98, p.1091-1096, 2011.

- MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SENTELHAS, P.C. Sap flow and evapotranspiration in an irrigated citrus orchard. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.2, p.219-226, 2001.
- MARINHO, L.B.; RODRIGUES, J.J.V.; SOARES, J.M.; LIMA, M.A.C.; MOURA, M.S.B.; BRANDÃO, E.O.; SILVA, T.G.F.; CALGARO, M. Produção e qualidade da videira 'Superior Seedless' sob restrição hídrica na fase de maturação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1682-1691, 2009.
- MARTARELLO, V.D.; PIRES, R.C.M.; QUAGGIO, J.A.; SILVA, A.L.B.O.; LIMA, M.A.F. Evapotranspiração e coeficiente de cultura de pomar de laranjeiras irrigadas. In: CONGRESO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE DE INGENIERIA AGRÍCOLA, 10 e CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 41. 2012, Londrina. **Anais...CD-ROM**. Londrina: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2012.
- MEDINA, C.L.; RENA, A.B.; SIQUEIRA, D.L.; MACHADO, E.C. Fisiologia dos citros. In: MATTOS JUNIOR, D.; DE NEGRI, J.D.; PIO, R.M.; POMPEU JUNIOR, J. **Citros**. Campinas: Instituto Agronômico e Fundag, p.147-195, 2005.
- MONTENEGRO, H.W.S. **Contribuição ao estudo do sistema radicular das plantas cítricas**. 143p., 1960. Piracicaba. Tese (Cátedra) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, Piracicaba, 1960.
- MOREIRA, C.S. Manejo de solo em pomar cítrico. **Laranja**, v.9, p.423-436, 1988.
- MORGAN, K.T.; OBREZA, T.A.; SCHOLBERG, J.M.S. Orange tree fibrous root length distribution in space and time. **Journal of the American Society of Horticultural Science**, v.2, n.132, p.262-269, 2007.
- NASCIMENTO, E.F. **Desenvolvimento e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração em videira de vinho cv. Syrah (*Vitis vinifera* L.)**. 68p., 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidad Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2010.
- NEVES, D.M.; SANTANA-VIEIRA, D.D.S.; DÓRIA, M.S.; FRESCHI, L.; FERREIRA, C.F.; SOARES FILHO, W.S.; COSTA, M. G. C.; COELHO FILHO, M.A.; MICHELI, F.; GESTEIRA, A.S. Recurrent water deficit causes alterations in the profile of redox proteins in citrus plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.132, p.497-507, 2018.
- OJEDA, H. Riego cualitativo de precisión en la vid. **Revista Enologia**, v.1, p.14-17, 2007.
- PARAMASIVAM, S.; ALVA, A.K.; FARES, A. An evaluation of soil water status using tensiometers in a sandy soil profile under citrus production. **Soil Science**, v.165, n.4, p.343-353, 2000.
- PARSONS, L.R.; WHEATON, T.A. Irrigation management and citrus tree response in a humid climate. **HortScience**, v.35, p.1043-1045, 2000.
- PAVÃO, G.C. **Produtividade e qualidade de frutos de laranjeira Valência fertirrigadas sob déficit hídrico controlado na região centro-sul do Estado de São Paulo**. 54p., 2016. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico, Campinas, 2016.
- PEDDINTI, S.R.; KAMBHAMMETTU, B.V.N.P. Dynamics of crop coefficients for citrus orchards of central India using water balance and eddy covariance flux partition techniques. **Agricultural Water Management**, v.212, p.68-77, 2019.
- PEREIRA, V.R.; BLAIN, G.C.; AVILA, A.M.H.; PIRES, R.C.M.; PINTO, H.S. Impacts of climate change on drought: changes to drier conditions at the beginning of the crop growing season in southern Brazil. **Bragantia**, Campinas, v.77, n.1, p.201-211, Mar. 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052018000100201&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 2 dez. 2020.
- PÉREZ-PÉREZ, J.G.; NAVARRO, J.M.; ROBLES, J.M.; DODD, I.C. Prolonged drying cycles stimulate ABA accumulation in *Citrus macrophylla* seedlings exposed to partial rootzone drying. **Agricultural Water Management**, v.210, p.271-278, 2018.

- PERMANHANI, M.; COSTA, J.M.; CONCEICÃO, M.A.F.; SOUZA, R.T.; VASCONCELLOS, M.A.S.; CHAVES, M.M. Deficit irrigation in table grape: eco-physiological basis and potential use to save water and improve quality. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v.28, p.85-108, 2016.
- PIRES, R.C.M.; BODINE JUNIOR, D.; SAKAI, E.; VILLAR, H.L.; SILVA, T.J.A.; ARRUDA, F.B. Effect of trickle irrigation on root development of the wet bulb and 'Pêra' orange tree yield in the State of São Paulo, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.6, p.1096-1103, 2011.
- PIRES, R.C.M.; LIMA, M.A.F.; SILVA, A.L.B.O.; OHASHI, A.Y.P.; QUAGGIO, J.A. Orange root system distribution under controlled deficit irrigation. In: ASABE ANNUAL MEETING, Kansas. **Anais...** St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2013.
- PIRES, R.C.M.; LUCHIARI, D.J.F.; ARRUDA, F.B.; MOSSAK, I. Irrigação. In: MATTOS JUNIOR, D.; DE NEGRI, J.D.; PIO, R.M.; POMPEU JUNIOR, J. **Citros**. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundag, p.369-408, 2005.
- PIRES, R.C.M.; SAKAI, E.; FOLEGATTI, M.V.; PIMENTEL, M.H.L.; FUJIWARA, M. Distribuição e profundidade do sistema radicular da videira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, 1997, Campina Grande. **Anais...** CD-ROM. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997.
- PIRES, R.C.M.; SILVA, A.L.B.O.; BODINE JUNIOR, D.; SAKAI, E.; GIACOMELLI, V.J.; GIROTTO, E.J.; SILVA, J.A.; KOBAYASHI, E.S. Duration of imposed water deficit periods on irrigated Orange productivity. In: CIGR INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING, CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 37, 2008, Foz do Iguaçu. **Anais...**CD-ROM. Foz do Iguaçu: CIGR, Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2008.
- POMPEU JÚNIOR, J.; BLUMER, S. Morte súbita dos citros: suscetibilidade de seleções de limão-cravo e uso de interenxertos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.30, n.4, p.1159-1161, 2008.
- POZZAN, M.; TRIBONI, H.R. Colheita e qualidade do fruto. In: MATTOS JÚNIOR, D.; DE NEGRI, J.D.; PIO, R.M.; POMPEU JÚNIOR, J. **Citros**. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundag, p.799-822, 2005.
- PRADO, H. **Pedologia fácil**: aplicações em solos tropicais. 4. Ed. Piracicaba: Hélio do Prado, 284p., 2013.
- RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C. Some aspects of citrus ecophysiology in subtropical climates: re-visiting photosynthesis under natural conditions. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, n.4, p.393-411, 2007.
- RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C.; BRUNINI, O. Ocorrência de condições ambientais para a indução do florescimento de laranjeiras no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.28, n.2, p.247-253, 2006.
- RIBEIRO, T.A.P. **Estudo dos parâmetros básicos de irrigação por microaspersão para a cultura do limão Tahiti (*Citrus limonia*, Osbeck)**, 148p., 1993. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas, 1993.
- ROMERO-TRIGUEROS, C.; CABAÑERO, J.J.; TORTOSA, P.A.; GAMBÍN, J.M.; MAESTRE-VALERO, J.F.; NICOLÁS, E.N. Medium-long term effects of saline reclaimed water and regulated deficit irrigation on fruit quality of citrus. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.100, n.3, p.1350-1357, 2020.
- SAMPAIO, A.H.R.; SILVA, R.O.; BRITO, R.B.F.; SANTOS SOARES FILHO, W.; SILVA GESTEIRA, A.; SOUZA, L.D.; COELHO FILHO, M.A. Sweet orange acclimatization to water stress: a rootstock dependency. **Scientia Horticulturae**, v.276, p.109727, 2021.
- SANTOS, D.F. **Extração de água pela cultura do limão 'Tahiti' com porta-enxerto citrumelo 'Swingle' sob microaspersão nas condições semiáridas da Bahia**. 112p. 2002. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2002.
- SHALHEVET, J.; LEVY, Y. Citrus trees. In: STEWART, B.A.; NIELSEN, D.R. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: Series Agronomy, USA, p.951-986, 1990.

- SHIRGURE, P.S.; MARATHE, R.A.; LALLAN, R.; SINGH, S. Irrigation scheduling in acid lime (*Citrus aurantifolia*) as affected by different soil moisture regimes. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v.70, p.173-176, 2000.
- SILVA, C.R.; FOLEGRATTI, M.V.; SILVA, T.J.A.; JUNIOR, J.A.; SOUZA, C.F.; RIBEIRO, R.V. Water relations and photosynthesis as criteria for adequate irrigation management in 'Tahiti' lime trees. **Scientia Agricola**, v.62, p.415-422, 2005.
- SILVA, C.R.R.; ROCHA, F.J.; ALVES JÚNIOR, J.; SILVA, T.J.R.; FOLEGATTI, M.V.; MASCHIO, R. Respostas de limeira ácida 'Tahiti' à suspensão da irrigação em diferentes períodos fenológicos. **Laranja**, Cordeirópolis, v.27, p.321-339, 2006.
- SILVEIRA, L.K. **Produtividade e qualidade de frutos de laranjeira Pêra-IAC fertirrigada com déficit hídrico**. 51p., 2019. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônomo, Campinas, 2019.
- SILVEIRA, L.K.; PAVÃO, G.C.; DIAS, C.T.S.; 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.; COELHO, E.C.; COELHO FILHO, M.A.; GUIMARÃES, M.J.M.; SANTOS, M.R.; COSTA, E.L.C. Transpiration, water extraction, and root distribution of Tahiti lime (*Citrus latifolia* Tanaka) plant under different micro-sprinkler placements. **African Journal of Agricultural Research**, v.14, n.31, p.1369-1378, 2019.
- SMITH, M.; ALLEN, R.G.; MONTEITH, J.L.; PERRIER, A.; PEREIRA, L.S.; SEGEREN, A. **Report of expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Rome: FAO, 54p., 1992.
- SOUTHWICK, S.M.; DAVENPORT, T.L. Characterization of water stress and low temperature effects on flower induction in Citrus. **Plant Physiology**, v.81, p.26-29, 1986.
- TEIXEIRA, A.H.C.; AZEVEDO, P.V.; SILVA, B.B.; SOARES, J.M. Consumo hídrico e coeficiente de cultura da videira na região de Petrolina, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.3, p.413-416, 1999.
- TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; BASSOI, L.H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the São Francisco river basin, Brazil. **Agricultural Water Management**, v.94, p.31-42, 2007.
- TONET, R.M.; LEITE, I.C.; STUCHI, E.S.; SANCHES, F.R. **Florescimento e frutificação da laranjeira 'Pêra' em bebedouro (SP)**. 2002.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Foreign Agricultural Service**. Citrus: World Markets and Trade. USDA. 11p., Jul. 2020. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/citrus.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2021.
- VELEZ, J.E.; INTRIGLIOLO, D.S.; CASTEL, J.R. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily shrinkage. **Agricultural Water Management**, v.90, p.197-204. 2007.
- VIEIRA, D.B.; GOMES, E.M. Determinação da profundidade efetiva do sistema radicular do limão 'Cravo' com copa de lima ácida 'Tahiti'. **Laranja**, v.20, p.419-431, 1999.
- WILLIAMS, L.E.; FIDELIBUS, M.W. Measured and estimated water use and crop coefficients of grapevines trained to overhead trellis systems in California's San Joaquin Valley. **Irrigation Science**, v.34, p.431-441, 2016.
- WILLIAMS, L.E.; AYARS, J.E. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.132, p.201-211, 2005.
- ZANINI, J.R.; PAVANI, L.C. Irrigação em citros. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL EM CITROS: Tratos culturais, 5, 1998. Bebedouro. **Anais**. Campinas, Fundação Cargill, p.409-442, 1998.

ZEOLI, J.J.S.; PAULA, M.V.B.; CONCEIÇÃO, M.A.F. Suspensão da irrigação durante o período de maturação de frutos em videiras 'BRS Morena'. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 21, 2011, Petrolina. **Anais...** Petrolina: ABID, 2011. p.1-6. 1 CD-ROM.

CAPÍTULO 5

5 MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM PLANTAS MEDICINAIS, AROMÁTICAS E/OU CONDIMENTARES

Patricia Angélica Alves Marques e Catariny Cabral Aleman

Resumo

Nesse capítulo será discutido o impacto do manejo da irrigação na produção de plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares. Essa cadeia produtiva tem despertado crescente interesse nos agricultores devido ao aumento do uso de fitoterápicos e da procura de matéria prima de qualidade pelas indústrias farmacêuticas e de alimentos. O Brasil apresenta grande potencial para participação expressiva neste mercado que cresce ano a ano, principalmente para os produtores familiares. Entretanto, ainda são poucos os estudos sobre o efeito de diferentes regimes hídricos sobre o crescimento e desenvolvimento dessas culturas. Muitos aspectos precisam ser esclarecidos, visando uma relação custo-benefício vantajosa. Alguns estudos de caso foram utilizados com a finalidade de estabelecer uma relação agrônômica e econômica de cultivo irrigado. O orégano e o manjeriço são considerados plantas com grande potencial de mercado e que podem ser um ponto de partida para o desenvolvimento de outras espécies a serem introduzidas de acordo com as necessidades do mercado. A calêndula e camomila, são culturas populares para medicamentos, cosméticos e chás de cultivo tradicional no Sul e Sudeste do País. Observa-se que a deficiência hídrica tem influência na produtividade da parte vegetal de interesse econômico das plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares (folha, fruto, flor e/ou óleo essencial), podendo ser positiva ou negativa de acordo com a cultura e variáveis edafoclimáticas. Sendo necessário um estudo direcionado. O manejo de irrigação eficiente é fundamental para garantir a produtividade das plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares e produtos finais de qualidade para indústria farmacêutica e fitoterápica.

5.1 Introdução

A irrigação é uma importante tecnologia para garantir o aumento da produtividade agrícola e tornar o processo produtivo mais eficiente. Justifica-se como recurso tecnológico indispensável ao aumento da produtividade das culturas em regiões onde a insuficiência ou má distribuição das chuvas inviabiliza a exploração agrícola. Atrelado ao uso da tecnologia é imprescindível o manejo adequado dos recursos hídricos, objetivando atender a demanda hídrica da cultura, evitando, assim, condições de reduzida umidade, que podem acarretar *deficit* hídrico às plantas. Ou seja, o manejo da irrigação deve ter como objetivo maximizar a produção vegetal com o menor consumo de água, agregando sustentabilidade aos recursos naturais, ao menor custo possível.

O uso de plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares tem despertado crescente interesse aos agricultores devido ao aumento do uso de fitoterápicos e da procura de matéria prima de qualidade pelas indústrias farmacêuticas e de alimentos. Além de contribuir para o desenvolvimento agrícola sustentável. Por outro lado, o manejo adequado das espécies medicinais não tem sido satisfatório devido à falta de padronização durante o cultivo, colheita e/ou armazenamento. Essas culturas apresentam potencial de renda, mas sua comercialização requer produtos com alta qualidade e constância no fornecimento aos interessados. É de grande importância que se estabeleçam linhas de ação voltadas para o desenvolvimento de técnicas de manejo ou cultivo (pesquisas fitotécnicas) dessas plantas, considerando-se a sua

utilização pelo homem e a manutenção do equilíbrio dos ecossistemas, respeitando-se as condições edafoclimáticas regionais.

Os estudos sobre o efeito de diferentes regimes hídricos sobre o crescimento e desenvolvimento de plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares, ainda são poucos. Muitos aspectos precisam ser esclarecidos, visando uma relação custo-benefício vantajosa. Assim antes de se iniciar o cultivo em escala comercial, faz-se necessário conhecer o comportamento da espécie em relação às características climáticas da região de plantio, aos tratos culturais e aos fatores bióticos que são responsáveis pelo desenvolvimento da planta. Assim, é fundamental conhecer a influência da deficiência hídrica na produtividade da parte vegetal de interesse econômico destas plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares.

5.2 Recursos hídricos frente a produção de planta medicinal, aromática e condimentar

Os agricultores não possuem a informação sobre o manejo da irrigação adequado e, ao irrigarem, aplicam água em quantidades menores que as necessárias para a produtividade potencial da cultura ou em demasia, levando ao desperdício do recurso hídrico, perdas de nutrientes por lixiviação e, em alguns casos, a perdas de produtividade. Assim, são necessárias pesquisas neste campo do conhecimento e que seus resultados sejam utilizados para gerar ou adaptar tecnologias que atendam às demandas existentes de matéria prima de qualidade.

A Agricultura Irrigada é responsável pelo uso de aproximadamente 69% da água consumida no mundo, sendo um recurso limitado que vem se tornando escasso em várias regiões agrícolas. Dessa maneira, a pesquisa, o desenvolvimento tecnológico e a transferência de tecnologia de irrigação devem ter como objetivos o aumento da eficiência de uso de água na agricultura. Tais fatos têm fomentado a utilização do manejo de irrigação com diferentes lâminas, considerando o manejo como um uso criterioso dos recursos disponíveis para se atingir um determinado objetivo. Em outras palavras, a água aplicada deve ser efetivamente utilizada para a produção, com o mínimo de perdas.

Entre as condições ambientais desfavoráveis às plantas, a deficiência hídrica destaca-se como fator adverso ao crescimento e à produção vegetal, sendo o fator climático aquele que exerce influência direta sobre o desenvolvimento da planta e a produção de princípios ativos. A seca é considerada um estresse ambiental, no qual a demanda de energia pela planta para sua manutenção (sobrevivência) é maior que a produção, o que leva a uma desestabilização inicial das funções da planta, seguida por uma normalização e indução dos processos fisiológicos de adaptação. Além disso, hoje em dia, as mudanças climáticas criam novos desafios para a adaptação de culturas em ambientes estressantes. Os efeitos da seca, ou *deficit* hídrico, nas plantas são bastante variáveis em função de sua intensidade, duração e da fase fenológica de desenvolvimento da planta, sendo a emergência, a floração e a fase inicial de frutificação os estádios mais sensíveis ao *deficit* hídrico. A fase vegetativa e a fase de maturação do órgão colhido constituem-se, geralmente, nos estádios menos sensíveis ao *deficit* hídrico. Os principais processos afetados pelo *deficit* hídrico são bioquímicos e fisiológicos, induzindo a respostas metabólicas e fisiológicas, como fechamento estomático, declínio na taxa de crescimento, acúmulo de solutos e de substâncias antioxidantes, expressão de genes específicos de estresse e de ajuste osmótico (KALAMARTZIS *et al.*, 2020; TAIZ *et al.*, 2017).

A produtividade das plantas dependerá da disponibilidade hídrica e da eficiência de seu uso pelo vegetal. Na maior parte do território brasileiro, a irrigação é uma prática suplementar, isto é, os totais anuais de precipitação pluvial são suficientes para satisfazer as necessidades hídricas da cultura. Todavia, a distribuição irregular das chuvas propicia a ocorrência de períodos de estresse hídrico às plantas, acarretando quebras de produção. Atualmente a questão do uso da água na irrigação tem estado presente em praticamente todos os trabalhos

de Engenharia de Água e Solo no mundo. Assim, os profissionais do ramo utilizam ferramentas variadas para otimização do uso e da aplicação da água na irrigação.

Uma das formas de manejo da irrigação para a economia do uso da água é a inclusão da irrigação com *deficit*. O *deficit* hídrico pode ser um fator desfavorável ao crescimento e produção das culturas, pois exerce influência direta sobre o desenvolvimento da maioria das plantas. Contudo, o *deficit* hídrico controlado pode ser utilizado, como forma de manejo de plantas medicinais, aromáticas ou condimentares, sem afetar a quantidade e a qualidade da produção final.

Atualmente há uma demanda crescente por produtos naturais que podem ser obtidos a partir das floras nativas (extrativismo) ou por meio de campos agrícolas cultivados, seguindo as técnicas agrônômicas de sistema de produção. Neste contexto, as plantas medicinais vêm se tornando uma alternativa de renda a pequenos produtores rurais, e o incremento no uso da fitoterapia, tanto para o tratamento como para a cura de doenças tem criado maior demanda para comunidade científica na realização de pesquisas visando o maior desenvolvimento e produtividade das plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares.

O uso de plantas medicinais e aromáticas tem origem muito antiga. Seu uso, coleta e cultura, são vinculados aos hábitos social, religioso e terapêutico. Os primeiros indícios do uso foram encontrados em uma escavação em Shanidar, Iraque e datam cerca de 60.000 anos. No início, os medicamentos à base de plantas, em geral, eram utilizados oralmente na forma de pó, infusão (chá) ou cozimento, via tópica, na forma de preparações à base de água ou óleo para unguentos e cataplasmas. Na sociedade moderna são utilizados de forma direta (frescos, secos, congelados ou conservados) ou indiretamente, para a extração de princípios ativos. Assim, o mercado tem se tornado mais exigente e demanda maiores quantidades de produto de qualidade superior, o que leva ao extrativismo (TORRES-CARRERAS *et al.*, 2010; VIEIRA *et al.*, 2010).

O cultivo de plantas medicinais se transformou em uma nova fonte de renda para os produtores rurais. Sua inserção como uma opção do agronegócio ocorreu de forma lenta, mas mostra-se em gradativa expansão em razão do aumento da demanda por produtos naturais com potenciais terapêuticos. Pois a partir dos anos 2000, ocorreu aumento no interesse, pela humanidade, por plantas medicinais e seus respectivos produtos, acarretando a abertura de mercados nacionais e mundiais na área de fitoterápicos e plantas.

A utilização da fitoterapia movimentou um mercado de bilhões de dólares, que amplia o interesse pelo cultivo das plantas medicinais. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), milhões de pessoas em todo o mundo dependem de plantas medicinais e aromáticas para seu bem-estar (cerca de 80% da população mundial) e no Brasil pesquisas demonstram que mais de 90% da população já fez uso de alguma planta medicinal. O uso dos produtos à base de plantas medicinais surge como uma forte tendência mundial, 30% dos medicamentos vendidos em todo o mundo contêm compostos derivados de materiais vegetais. Esse setor é considerado um mercado promissor com números expressivos, tornando-se um ambiente de negócio atrativo com aumento da oferta e demanda de plantas medicinais; entretanto, o sistema produtivo encontra-se deficiente e despreparado para atender a esse novo mercado (PANDEY *et al.*, 2020; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2008).

O mercado internacional de produtos de plantas medicinais está em expansão e ainda não existem sinais de enfraquecimento com crescimento anual do mercado mundial de fitoterápicos estimado em 10 a 20%, e uma estimativa de mercado mundial de fármacos de US\$ 300 bilhões em 2010, sendo US\$ 20 bilhões derivados de substâncias ativas de plantas medicinais (cerca de 5% do mercado mundial de produtos farmacêuticos) e em 2011, o mercado mundial de fitoterápicos movimentou US\$ 26 bilhões. O mercado específico de fitoterápicos no Brasil obteve uma movimentação nesse mesmo ano de R\$ 1,1 bilhão. No âmbito nacional, a estimativa do mercado de medicamentos é de US\$ 8 bilhões ano⁻¹, com

US\$ 1,5 bilhão ao ano derivado de plantas medicinais (CASTRO; ALBIERO, 2016; VIEIRA *et al.*, 2010). Os produtos comercializados englobam desde a planta seca para chás, extratos vegetais, plantas frescas para culinária e óleos essenciais.

Óleos essenciais naturais são misturas de várias substâncias químicas biossintetizadas pelas plantas obtidas por hidrodestilação, utilizados pela indústria de produtos naturais, aromaterapia, entre outras (TORRES-CARRERAS; LÓPEZ-GONZALES, 2010). O mercado internacional de óleos essenciais expandiu-se, sendo responsável pela negociação de US\$ 1,8 bilhão. A participação do Brasil é de 0,1%, dos quais 72% são adquiridos por empresas dos EUA, da Europa e do Japão (SANTOS, 2011). Os principais países exportadores mundiais são EUA, França, Reino Unido e Brasil.

O Brasil apresenta grande potencial para participação expressiva nesta fatia de mercado que cresce ano a ano. A agricultura familiar é tida como prioridade na produção de fitoterápicos, pois apresenta vantagens que podem impulsionar a sua cadeia produtiva, como a disponibilidade de terra e mão de obra, conhecimentos tradicionais, experiência com a biodiversidade e práticas agroecológicas e o atendimento de mercados locais e regionais. O setor de plantas medicinais é uma grande oportunidade para os produtores familiares pois oferta uma oportunidade de agregar valor e renda, além da possibilidade de se manter no mercado agrícola com pouca tecnificação e sem a necessidade de alto investimento inicial (BRASIL, 2016; FERNANDES; BOFF, 2017).

O conhecimento dos aspectos relacionados à produção de matéria-prima em quantidade e qualidade deve ser estudado, estabelecendo uma base de atuação nacional forte, alicerçada em pesquisas científicas que facilitará a posterior busca de mercados internacionais. O uso dessas plantas medicinais, aromáticas e condimentares, na manipulação dos fitoterápicos ou uso na indústria e culinária, traria vantagens para o país, como redução da importação e autossuficiência. No caso específico da fitoterapia proporcionaria à população medicamentos mais baratos e de maior valorização das tradições populares. O orégano e o manjeriço são considerados plantas com grande potencial de mercado e que podem ser um ponto de partida para o desenvolvimento de outras espécies que podem ser introduzidas de acordo com as necessidades do mercado.

O Brasil é o país de maior biodiversidade do planeta que, associada a uma rica diversidade étnica e cultural detém um valioso conhecimento tradicional associado ao uso de plantas medicinais. Essas características promovem o potencial necessário para desenvolvimento de pesquisas com resultados em tecnologias e terapêuticas apropriadas. Grande parte da produção brasileira de plantas medicinais não é tecnificada e sim obtida por extrativismo pela agricultura familiar e por pequenos produtores rurais (CORRÊA JÚNIOR; SCHEFFER, 2014). Essas culturas geralmente são conduzidas de forma pouco padronizada, sujeita a variações das condições ambientais, o que pode afetar a produção de biomassa, qualidade e quantidade de óleo essencial.

Devido a sua grande extensão territorial, o país apresenta também características edafoclimáticas peculiares a cada região, que podem interferir de modo positivo ou negativo no desenvolvimento das espécies nativas ou introduzidas, mesmo que as condições sejam semelhantes ao local de origem. Para um cultivo em escala comercial de plantas medicinais, aromáticas ou condimentares, faz-se necessário conhecer o comportamento da espécie com relação aos efeitos climáticos da região de plantio, os tratamentos culturais e os fatores bióticos que são responsáveis pelo seu desenvolvimento, pois a falta de domínio tecnológico de todas as etapas de desenvolvimento levará, provavelmente, a baixa qualidade da biomassa, de rendimento e dos teores dos principais constituintes químicos do óleo essencial.

O *deficit* hídrico pode, além do desenvolvimento, afetar o teor e rendimento desse óleo essencial. Para algumas plantas medicinais, a menor disponibilidade de água pode aumentar a produção de óleo essencial; no entanto isto não ocorre em todas as espécies. Diversas

plantas medicinais, aromáticas e condimentares são produzidas com o uso de irrigação suplementar, porém, são poucos os trabalhos referentes ao efeito do estresse hídrico nessas plantas. O efeito sobre tais produtos parece variar bastante com o tipo, a intensidade e a duração do estresse, podendo aumentar ou diminuir o teor de óleos essenciais.

Plantas irrigadas podem compensar o baixo teor de princípios ativos com maior produção de biomassa, o que resulta em maior rendimento final de princípios ativos por área (PANDEY *et al.*, 2020). Como exemplo de estudos temos em pimenteira, Azevedo *et al.* (2005) observaram o aumento da produtividade com uso de lâminas crescentes de irrigação. Em *Thymus vulgaris* L., *Salvia officinalis* L. e *Rosmarinus officinalis* L., Mamei *et al.* (2011) observaram queda de produção de biomassa com imposição de estresse hídrico. Já Abbaszadeh, Farahan e Morteza (2009) verificaram que o estresse hídrico moderado beneficiou o acúmulo de óleo essencial em *Melissa officinalis* L. Khazaie, Nadjafi e Bannayan (2008) observaram no Irã que a variação dos intervalos de irrigação de 7 a 21 dias não alterou a produção de biomassa e de óleo essencial para tomilho (*Thymus vulgaris* Linn.) e hissopo (*Hyssopus officinalis* Linn.). Também no Irã, Ghamarnia, Khosravy e Sepehri (2010) observaram maior eficiência do uso da água para Cominho preto (*Nigella sativa*) com 50% da evapotranspiração de referência (ET₀).

5.3 Manejo de irrigação de plantas medicinais de importância econômica

5.3.1 Orégano (*Origanum vulgare* L.)

O orégano é um condimento obtido por meio de desidratação de suas folhas, que são colhidas na época do florescimento. Trata-se de uma especiaria utilizada principalmente como tempero de massas, na culinária latino-anglo-americana e europeia; é também uma das principais plantas medicinais cultivadas na Alemanha (HONERMEIER *et al.*, 2013). Nos últimos anos o potencial do óleo essencial do orégano tem sido utilizado em síntese de fármacos, fitoquímicos ou como suplemento nutricional de rações (AYALA *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2010). Como planta medicinal é utilizada para como antibacteriano e antiinflamatório (CUI *et al.*, 2019; DUTRA *et al.*, 2019). Vários outros usos dessa planta já foram estudados como por exemplo o efeito inseticida em larvas de coleóptera (CLEMENTE *et al.*, 2003) e o efeito antioxidante do extrato de orégano visando à prevenção da rancidez, mantendo a qualidade organoléptica e nutricional dos alimentos (LEYVA-LÓPEZ *et al.*, 2017).

É uma planta perene, originária das regiões montanhosas do sul europeu, apresenta mecanismo fisiológico C₃, é alógama e pertencente à família Lamiaceae. Trata-se de uma planta condimentar e oleaginosa de porte pequeno, de caule ereto, por vezes corado de vermelho, com quatro ângulos, apresentando-se ramoso na extremidade superior, podendo atingir até 0,80 m de altura; entretanto, em geral não passa de 0,25 a 0,40 m. As folhas são pequenas, inteiras, pecioladas, ovais, pontiagudas e quase sem pelos. As flores são numerosas, cor de rosa púrpura; o rizoma é rastejante, escuro e com raízes fibrosas (Figura 1). A colheita dos ramos e folhas deve ser realizada antes da floração. As flores são zigomorfas e protegidas por brácteas, que após a polinização cruzada dão origem a minúsculos aquênios (CASTRO; RAMOS, 2002; LORENZI; MATOS, 2008). O produto comercial é composto de folhas secas com umidade de 8 a 12%. Teramoto *et al.* (2009) estimaram um consumo de 4 toneladas de orégano ao dia nas pizzarias do Estado de São Paulo, e que seriam necessários 584 ha de orégano para suprir esta demanda. Comentam, ainda, que esta área é quase três vezes maior que a área plantada de alho para o Estado de São Paulo. Os autores ressaltam que os valores de importação englobam o uso do orégano fresco e seco para fins culinários, perfumaria e medicinal. O mercado brasileiro de orégano forma-se basicamente pela importação da matéria-prima com valores crescentes ao longo dos anos.

Trata-se de um condimento recém-cultivado no Brasil. Até o final do século XX esta especiaria era importada de países latino-americanos, como o Peru e o Chile. A produção de orégano no Brasil começou depois da percepção da alta demanda do tempero na gastronomia brasileira e dos altos preços pagos nas importações. Os principais exportadores do orégano são Chile, Peru, Turquia, Bolívia, México, Síria, Espanha, Itália, Polônia, França e Alemanha (TERAMOTO *et al.*, 2009).

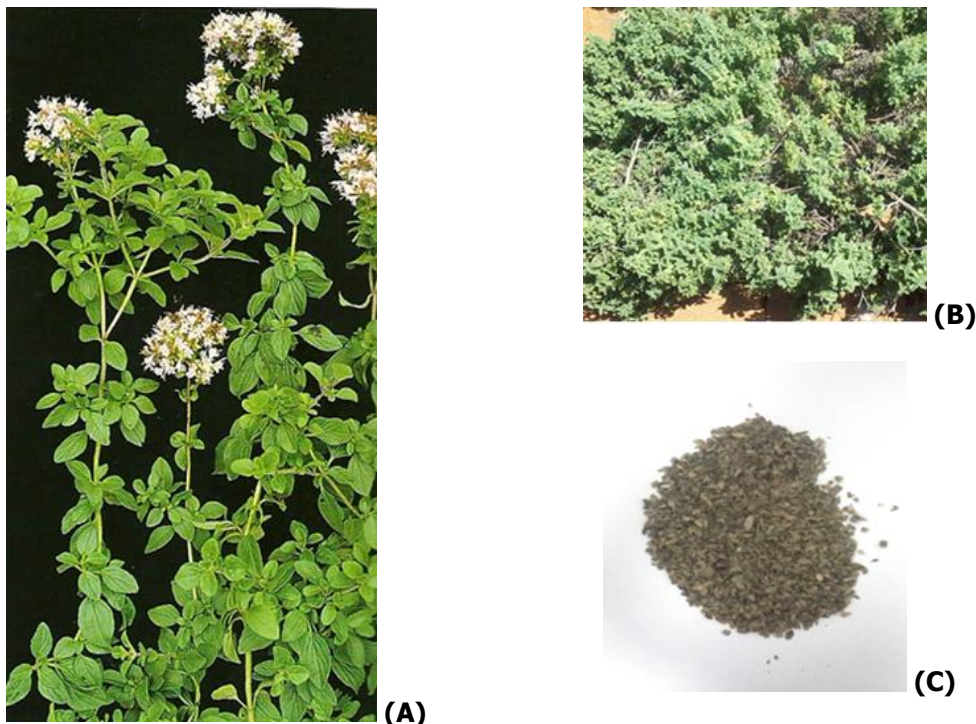


Figura 1. Planta de orégano (A) individual; (B) no campo e (C) seca para comercialização (LORENZI; MATOS, 2008).

Na região oeste do estado da São Paulo, em solo arenoso, Marques, Bernardi Filho e Santos (2009b) constataram que o manejo de irrigação via clima, com lâmina de irrigação de 216,82 mm (100% ECA), promoveu incremento de produtividade do orégano quando comparado as plantas não irrigadas. A ausência de uso de irrigação reduziu cerca de 64,5% da produtividade de matéria vegetal fresco. As variações da umidade do solo, quando a precipitação é insuficiente ou a irrigação é manejada de forma inadequada, contribuem para resultados insatisfatórios no orégano não irrigado. Um solo com baixo conteúdo de água terá elevada sua resistência ao fluxo de água para as raízes, devido a sua condutividade hidráulica estar baixa; à medida que ocorre o secamento do solo, o contato entre este e a raiz decresce, dificultando a reposição de água pela planta. Em situações de *deficit* não muito severo, o sistema radicular explora o solo em locais que ainda apresentam água passível de ser absorvida.

O orégano é uma planta que em ambientes mais úmidos tem a produção de folhas favorecida (AZIZI; YAN; HONERMEIER, 2009; GERAMI *et al.*, 2016). O teor de óleo essencial também é um parâmetro afetado pela disponibilidade hídrica (MARQUES; BERNARDI FILHO; SANTOS, 2009a; HANCIOGLU *et al.*, 2020). Alguns autores observaram aumento da produção de óleo essencial do orégano com a maior disponibilidade hídrica (MARQUES; BERNARDI FILHO; SANTOS, 2009b; GIANNOULIS *et al.*, 2020) e outros observaram melhores rendimentos do óleo com *deficit* moderado (AZIZI; YAN; HONERMEIER, 2009).

Em Piracicaba (SP) a melhor produção de biomassa seca de orégano foi alcançada usando o potencial matricial -91,2 kPa no manejo de irrigação no pré-florescimento de

orégano. A restrição hídrica no solo ao longo de todo o ciclo fenológico favoreceu a produção de óleo essencial, enquanto a restrição hídrica na fase de pré-florescimento possibilitou uma alta produção de biomassa seca de orégano. Os maiores valores para produção de biomassa e óleo essencial foram alcançados para as plantas de orégano cultivadas na primavera/verão (SANTOS *et al.*, 2020).

5.3.2 Manjeriço (*Ocimum basilicum* L.)

O manjeriço (*Ocimum basilicum* L.), originário da bacia do Mediterrâneo, pertence à família Lamiaceae; é encontrado na Ásia Tropical, na África, na América Central e na América do Sul, apresentando importância econômica no Brasil. Porém, as informações quanto à qualidade aromática dessas plantas em função das técnicas de cultivo, são escassas (FERNANDES *et al.*, 2004). No Brasil, é cultivado principalmente por pequenos produtores rurais para a comercialização da planta como condimento (FEIJÃO TEIXEIRA *et al.*, 2002).

Além do uso in natura o manjeriço é muito utilizado para a obtenção de óleo essencial, importante na indústria de perfumaria e na aromatização de alimentos e bebidas, sendo esta forma a que apresenta maior valor agregado (MAY *et al.*, 2019; PEREIRA; MOREIRA, 2011). O manjeriço tem grande potencial agrônomo para extração do linalol, pelo teor de óleo apresentado e por ser uma planta de ciclo curto. O óleo essencial de manjeriço também apresenta propriedades inseticidas e repelentes.

O manjeriço é uma planta herbácea, podendo ser arbustiva, com altura entre 0,30 a 1,00 m, caule lenhoso ou sublenhoso, de aparência tenra e ramificada. É uma planta que permite vários cortes dependendo dos tratamentos culturais. Possui folhas ovaladas ou elípticas simples, membranáceas, com margens onduladas e nervuras salientes, de 4 a 7 cm de comprimento, com coloração verde a verde clara (Figura 2). Pode apresentar grande variação na forma das folhas e no tamanho das plantas. As flores possuem cor branca, rosa ou lilás, reunidas em ráceros terminais curtos; são sésseis, com apenas 1,0 cm de comprimento em média, apresentando de 6 a 100 flores na inflorescência, com pólen alaranjado. O fruto é um tetraquênio, com sementes oblongas, pretas azuladas e pequenas. Um grama possui 800 sementes aproximadamente. A raiz primária caracteriza-se por ser relativamente delgada, hialina, vilosa com pelos grandes, hialinos e finos. Multiplica-se por sementes e estacas (LORENZI; MATOS, 2008; MINAMI *et al.*, 2007).

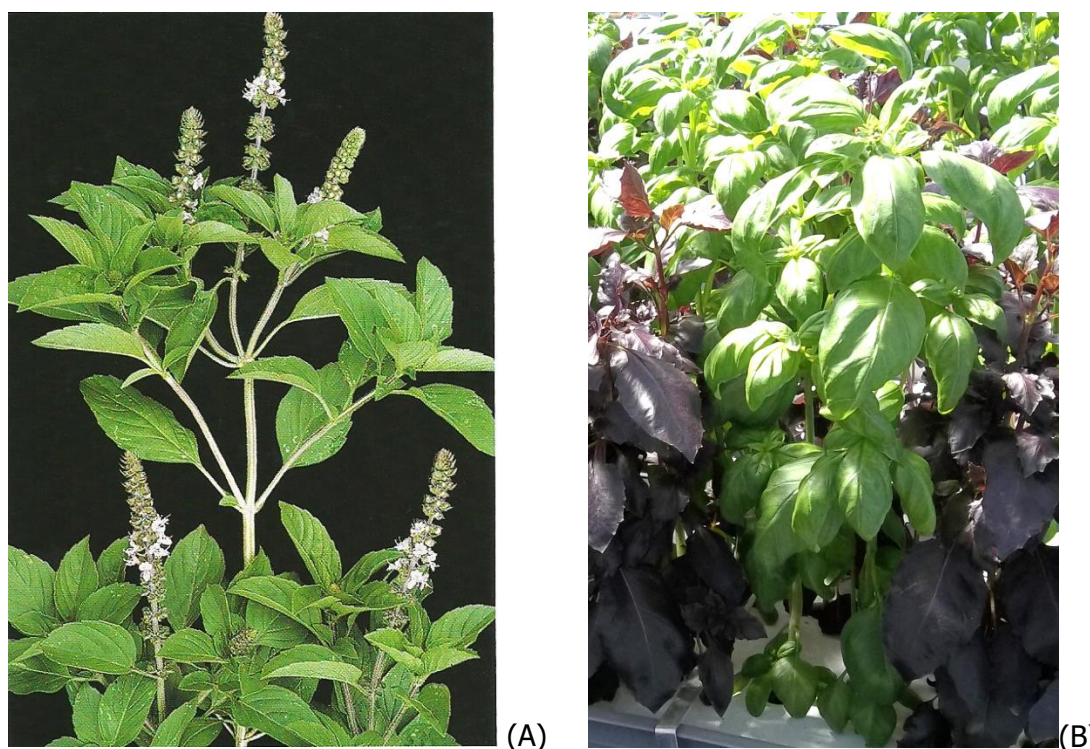


Figura 2. Planta de manjeriço (A) individual e (B) no campo (LORENZI; MATOS, 2008).

O valor econômico do manjeriço encontra-se na exportação do óleo essencial alcançando níveis significativos de comercialização no mercado nacional e internacional. Estudos recentes têm demonstrado ser possível produzir manjeriço com óleo essencial rico em linalol (MAY *et al.*, 2019; PEREIRA; MOREIRA, 2011). A implantação da cultura de manjeriço pode ser uma atividade promissora e rentável aos produtores no Brasil. Os EUA, provavelmente, constituem o maior mercado para óleo de manjeriço, seguido dos países europeus (Alemanha, França, Reino Unido e Países Baixos).

O manjeriço é uma planta que responde ao *deficit* hídrico com queda de produção das folhas. Para Pravuschi *et al.* (2010) a lâmina de irrigação de 100% ECA, em cultivo no oeste paulista, em solo arenoso, promoveu a máxima produtividade de matéria seca e o máximo acúmulo de óleo essencial em manjeriço. A produtividade de massa da matéria seca em kg ha^{-1} do manjeriço somente apresentou influência das lâminas de irrigação nas segunda e terceira colheitas devido à ocorrência de precipitações bem distribuídas no período do transplante até a primeira colheita. A partir da segunda colheita, o tratamento irrigado proporcionou o melhor desenvolvimento vegetativo do manjeriço, resultando em maior produção de biomassa, estes resultados são semelhantes aos encontrados em manjeriço por Biesiada e Kus (2010), em artemísia por Carvalho *et al.* (2003) e Alvarenga *et al.* (2012) para alecrim-pimenta.

O estresse hídrico é geralmente associado à deficiência de umidade no solo, sendo o murchamento de folhas o sinal mais evidente. Na célula, o suprimento de água em níveis inferiores aos requeridos baixará o componente de potencial de pressão do protoplasto sobre a parede da célula, resultando em diminuição do turgor e afetando o crescimento celular (TAIZ *et al.*, 2017). Na terceira colheita deste ensaio as plantas sob estresse hídrico apresentaram uma taxa de mortalidade 75%. O excesso hídrico também causou alta mortalidade de plantas (70%) provavelmente devido ao excesso de água no solo diário ter causado redução imediata na troca de gases entre a planta e o ambiente, reduzindo o suprimento de oxigênio às raízes, o que em troca limita a respiração, a absorção de nutrientes e outras funções das raízes. Kalamartzis *et al.* (2020) observaram que o manjeriço responde ao *deficit* hídrico de formas

diferentes em função dos cultivares, sendo uma cultura possível de lucratividade com *deficit* moderado. Por exemplo, em Piracicaba, José *et al.* (2016) observaram que a supressão da irrigação na pré-colheita promoveu um aumento do teor de óleo essencial das plantas de manjerição.

5.3.3 Calêndula (*Calendula officinalis* L.)

A *Calendula officinalis* L., pertence à família Asteraceae (Compositae) conhecida como mal-me-quer ou maravilha dos jardins, é uma planta anual. É originária de áreas temperadas do Mediterrâneo e encontra-se amplamente adaptada às regiões Sul e Sudeste do Brasil. Desenvolve-se sob luz plena e apresenta um ciclo de 90 a 120 dias, variando de acordo com a estação de ano em que é cultivada. Locais de clima ameno e boa exposição ao sol favorecem seu desenvolvimento. Apresenta propriedades químicas e morfológicas que garantem sua importância econômica para a indústria alimentícia, ornamental e fitoterápica. Dentre os diversos usos medicinais da planta estão os tratamentos de processos febris, tratamento de cânceres e inflamações de pele. Pode ser empregada na forma de extratos, tinturas e bálsamos produzidos principalmente das flores, as quais apresentam elevada concentração dos princípios ativos. A calêndula começa a florir aos 90 dias após a semeadura e atinge o pico de produção aos 120 dias. O período de colheita pode durar até 60 dias, aproximadamente, após o qual a planta entra em declínio. A produção esperada na safra fica em torno de 720 kg ha⁻¹ de inflorescências secas, podendo chegar a 2000 kg ha⁻¹ (MAZARO *et al.*, 2013).

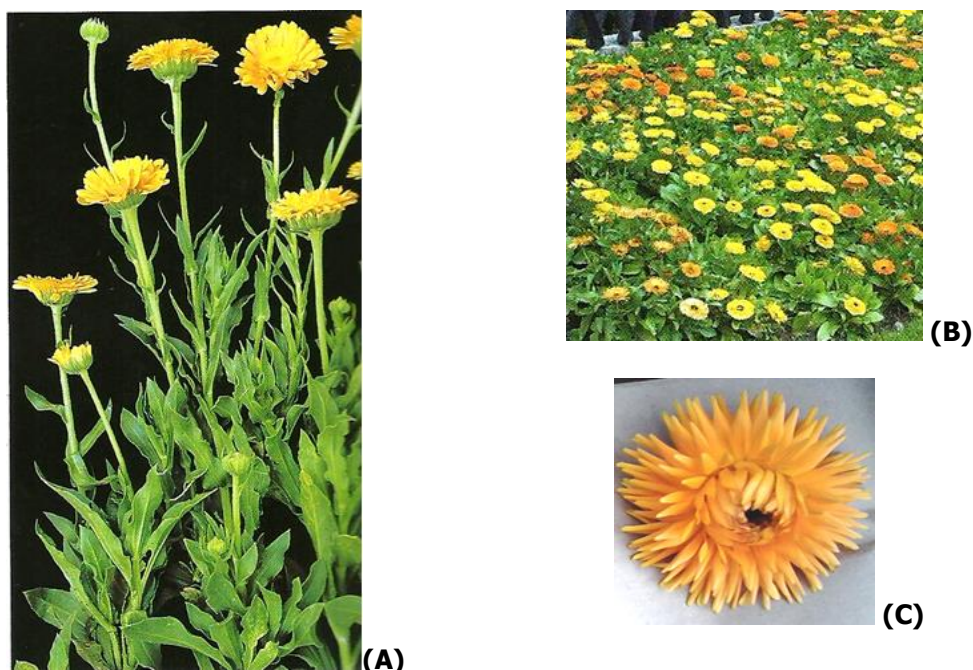


Figura 3. Planta de calêndula (A) individual, (B) no campo e (C) capítulo colhido para processamento (LORENZI; MATOS, 2008).

Sua inflorescência é a parte da planta mais usada para fins terapêuticos como ação cicatrizante, anti-inflamatória e antisséptica. Esta espécie vem sendo estudada em relação aos flavonoides presentes em suas inflorescências com fins terapêuticos como ação cicatrizante, anti-inflamatória e antisséptica. Na indústria cosmética, é utilizada para a composição de xampus, cremes e sabonetes e na indústria alimentícia como corante natural, além de fazer parte na composição de preparações de medicamentos para eritemas solares, queimaduras e dermatoses secas (CITADINI-ZANETTE; NEGRELLE; BORBA, 2012).

Entre as plantas medicinais, a calêndula possui importância econômica no Brasil, pois além da utilização ornamental, tem uso culinário e terapêutico tradicionais. Encontra-se na lista das 66 plantas medicinais liberadas para a comercialização e o emprego na fitoterapia do SUS (Sistema Único de Saúde) (RELAÇÃO NACIONAL DE PLANTAS MEDICINAIS DE INTERESSE AO SUS, 2010). Estudos dirigidos ao seu valor comercial ainda não estão disponíveis. De maneira geral, a calêndula representa fonte alternativa econômica, principalmente para a agricultura familiar. Nas indústrias de perfumes há aproximadamente 200 formulações constituintes de extratos de *Calendula officinalis* que entram na fabricação de cosméticos, devido aos diversos princípios ativos da planta, que são responsáveis pelos eficientes efeitos no tratamento de pele e cabelos (ADEEL *et al.*, 2017).

Dentre os principais compostos ativos que classificam a calêndula na Farmacopeia Brasileira estão os flavonoides presentes nos capítulos florais, que são compostos fenólicos que compõem uma ampla classe de substâncias com elevada aplicabilidade farmacológica. O principal flavonoide acumulado nas flores da calêndula é a quercetina (BORTOLO *et al.*, 2009; MARQUES; BORTOLO, 2011; MAZARO *et al.*, 2013).

Alternativas para promover a redução do número de frequências de irrigação e em alguns casos, aplicar lâminas de irrigação com *deficit* são necessárias para aumentar a eficiência do uso da água. O cultivo de calêndula irrigada associado ao uso de adubação orgânica pode ser uma alternativa para aumentar a produtividade de inflorescências. Estudos apontam que o cultivo de calêndula no oeste do estado de São Paulo (ALEMAN *et al.*, 2010) foi potencializado com uso de adubação orgânica e *deficit* hídrico controlado. Isso se deve a adubação orgânica promove melhoria na estrutura do solo aumentando a retenção de água e redução das perdas dos nutrientes como nitrogênio, potássio e fósforo. Assim, o uso da adubação orgânica evitou possíveis perdas por lixiviação e/ou percolação ocorridas durante o ensaio devido à alta precipitação (240,6 mm) ocorrida durante todo o período da colheita. Condé *et al.* (2012) e Oliveira *et al.* (2011) comentaram que os resíduos orgânicos podem ser vistos como um complemento da adubação, citam também como vantagem da adubação utilizando esterco de curral, a reciclagem de nutrientes promovendo melhor produção vegetal. O provável aumento da capacidade de retenção favorece, inclusive, o aproveitamento das precipitações quando não é realizada irrigação.

O teor e rendimento de flavonoides é diretamente proporcional a produtividade de inflorescências. Dessa forma, o uso de adubação orgânica com *deficit* controlado determinado através no manejo via clima pode ser uma alternativa eficaz para essa planta medicinal. Meira *et al.* (2013) com melissa e Marques, Bernardi Filho e Oliveira (2009a) com orégano, também observaram incremento na produção de fitomassa fresca e seca com o aumento da irrigação. Em relação ao teor de flavonoides nas plantas, Pacheco *et al.* (2011) comentaram que são poucos os estudos a respeito da influência da disponibilidade hídrica sobre a sua produção.

Com o incremento da disponibilidade água no solo, Aleman *et al.* (2010) observaram aumento da produção dos princípios ativos para os tratamentos sem adubação orgânica e queda na produção de princípios ativos, quando do uso da adubação orgânica indicando provável excesso hídrico. O excesso de água no solo causa redução imediata na troca de gases entre a planta e o ambiente, conhecido como anoxia ou hipoxia, sofrido pelo sistema radicular, altera o metabolismo celular, provocando queda imediata na respiração das raízes, tanto em plantas tolerantes como nas intolerantes ao excesso de água (YU *et al.*, 2018). De acordo com Gutiérrez (2006), este estresse ambiental promove a formação de etileno devido à privação de O₂, levando a sintomas morfológicos e fisiológicos de situação de estresse. Alvarenga *et al.* (2012) comentam ainda que a produção de flavonoides é sensível ao *deficit* hídrico para a planta, pois o estresse hídrico é considerado um dos fatores limitantes para o desenvolvimento das plantas.

Existem alguns polímeros que são indicados como condicionadores de solo. O hidrogel é um polímero hidro-retentor derivado do amido (natural) ou do petróleo (sintético) o qual é utilizado principalmente na produção de mudas para aumentar a capacidade de retenção de água no solo. O uso de condicionadores de solos pode ser uma alternativa para potencializar o armazenamento de água no solo. Esses produtos promovem melhorias físico-hídricas do solo favorecendo a redução da quantidade de água em cultivos agrícolas tendo em vista sua capacidade absorviva. A capacidade de retenção pode promover a redução de irrigação e aumentar a eficiência do uso da água (MARQUES; BORTOLO; SANTOS, 2010; MARQUES; CRIPA; MARTINEZ, 2013).

Santos *et al.* (2015) destacam que a utilização do hidrogel melhora a retenção de água proporcionando redução nas frequências de irrigação. Dentre os benefícios do hidrogel destacam-se: desenvolvimento do sistema radicular, crescimento e desenvolvimento das plantas, menores perdas de água de irrigação por percolação, melhoria na aeração e drenagem do solo, e diminuição na perda de nutrientes por lixiviação. Divincula *et al.* (2020) identificaram que o uso de hidrogel pode atuar como um mitigador do estresse hídrico e contribuir para o aumento da produção de capítulos florais da calêndula.

5.3.4 Camomila (*Chamomilla recutita* [L.] Rauschert)

A camomila (*Chamomilla recutita* (L.) Rauschert) é uma planta herbácea, anual, aromática, de até um metro de altura e pertencente à família Asteraceae. Também é conhecida como camomila-comum, matricária ou maçanilha. As flores são reunidas em capítulo compacto, agrupados em corimbos, com as flores centrais amarelas e as marginais de corola ligulada branca. É nativa dos campos europeus, aclimatada na região da Ásia e nos países latino-americanos. Amplamente cultivada em quase todo mundo, inclusive nas regiões sul e sudeste do Brasil (LORENZI; MATOS, 2008). Trata-se de uma planta medicinal com a maior área de cultivo na região do Sul do Brasil, onde é cultivada como cultura de inverno. O Paraná destaca-se como o maior produtor. É uma cultura semeada no período de março a maio. É recomendada utilização de adubação orgânica como requisito da agricultura orgânica. As doses entre 3 a 5 kg m⁻² de esterco de curral curtido proporcionam maior incremento no rendimento do óleo essencial. Sua colheita é realizada quando os capítulos florais estiverem com suas flores totalmente abertas, o que ocorre aproximadamente três a quatro meses após a semeadura (NALEPA; CARVALHO, 2007).

A camomila é uma planta medicinal com elevada demanda hídrica dependendo das condições edafoclimáticas. Em solo arenoso, a irrigação combinada a adubação orgânica pode potencializar a produtividade de inflorescência (ALEMAN *et al.*, 2016). Solos arenosos apresentam elevada taxa de infiltração e reduzida capacidade de retenção. Nessas condições a presença de adubação orgânica, como discutido anteriormente, pode melhorar as características físico-hídricas do solo e contribuir para disponibilização de água, o desenvolvimento radicular, crescimento e a produtividade de plantas medicinais.



Figura 4. Planta de camomila no campo (Catariny Cabral Aleman).

Para a camomila, condições de estresse hídrico podem afetar o crescimento, desenvolvimento e metabolismo secundário dependendo da fase de desenvolvimento em que ocorrem. Em situações de *deficit* hídrico, processos fisiológicos são afetados negativamente, como a fotossíntese, expansão e divisão celular, acumulação e transferências de nutrientes, síntese de metabólitos secundários, entre outros (SALEHI *et al.*, 2016). Aleman (2011) verificou, no oeste do estado de São Paulo, que as condições edafoclimáticas são fundamentais para identificar qual será o comportamento da camomila quanto a produtividade e síntese de óleo essencial. E conclui-se que a lâmina de irrigação de 150% da evapotranspiração da cultura associado a adubação orgânica resultou maior produtividade de capítulos florais e rendimento de óleo essencial.

5.4 Considerações finais

A deficiência hídrica tem influência na produtividade da parte vegetal de interesse econômico das plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares (folha, fruto, flor e/ou óleo essencial), podendo ser positiva ou negativa de acordo com a cultura e variáveis edafoclimáticas. Sendo necessário estudo direcionado.

O manejo de irrigação eficiente é fundamental para garantir a produtividade das plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares e produtos finais de qualidade para indústria farmacêutica e fitoterápica.

Referências

ABBASZADEH, B.; FARAHAN, H.A.; MORTEZA, M. Effects of irrigation of levels on essential oil of balm (*Melissa officinalis* L.). **American-Eurasian Journal of Sustainable Agricultura**, v.3, n.1, p.53-56, 2009.

ADEEL, S.; GULZAR, T.; AZEEM, M.; UR-REHMAN, F.; SAEED, M.; HANIF, I.; IQBAL, N. Appraisal of marigold flower based lutein as natural colourant for textile dyeing under the influence of gamma radiations. **Radiation Physics and Chemistry**, v.130, p. 35-39, 2017.

ALEMAN, C.C. **Efeito da adubação orgânica utilizando esterco de aves e esterco bovino curtido associado com lâminas de irrigação em *Chamomilla recutita* (L.) Rauschert**. 58 p., 2011. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade do Oeste Paulista, 2011.

ALEMAN, C.C.; MARQUES, P.A.A.; PACHECO, A.C. Chamomile production using supplementary irrigation and organic fertilization in sandy soils. **Revista Caatinga**, v.29, n.2, p.313-319, 2016.

- ALEMAN, C.C.; MARQUES, P.A.A.; SANTOS, A.C.P. Produção de biomassa e capítulos florais da *Calendula officinalis* L. cultivada em viveiro telado, submetida a lâminas de irrigação e diferentes tipos de adubação. **Horticultura Brasileira**, v.28, n.2, suplemento, p.S3287-S3291, 2010.
- ALVARENGA, I.C.A.; LOPES, O.D.; PACHECO, F.V.; OLIVEIRA, F.G.; MARTINS, E. R. Fator resposta do alecrim-pimenta a diferentes lâminas de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, n.4, p.462-468, 2012.
- AYALA, L.; SILVANA, N.; ZOCARRATO, I.; GÓMEZ, S. Utilización del orégano vulgar (*Origanum vulgare*) como fitobiótico em conejos de ceiba. **Revista Cubana de Ciencia Agrícola**, v.45, n.2, p.159-161, 2011.
- AZEVEDO, B.M.; CHAVES, S.W.P.; MEDEIROS, J.F.; AQUINO, B.F.; BEZERRA, F.M.L.; VIANA, T.V.A. Rendimento da pimenteira em função da lâmina de irrigação. **Revista Ciência Agronômica**, v.36, n.3, p.268-273, 2005.
- AZIZI, A.; YAN, F.; HONERMEIER, B. Herbage yield, essential oil content and composition of three oregano (*Origanum vulgare* L.) populations as affected by soil moisture regimes and nitrogen supply. **Industrial Crops and Products**, v.29, p.554-561, 2009.
- BIESIADA, A.; KUS, A. The effect of nitrogen fertilization and irrigation on yielding and nutritional status of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). **Acta Scientiarum Polonorum-Hortorum Cultus**, v.9, n.2, p.3-12, 2010.
- BORTOLO, D.P.G.; MARQUES, P.A.A.; SANTOS, A.C.P. Teor e rendimento de flavonoides em calêndula (*Calendula officinalis* L.) cultivada com diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v.11, n.9, p. 435-441, 2009.
- BRASIL. Política e Programa Nacional de Plantas Medicinais e Fitoterápicos. Ministério da Saúde, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos, Departamento de Assistência Farmacêutica. Brasília: Ministério da Saúde, 190 p., 2016. Disponível em: http://bvsm.sau.gov.br/bvs/publicacoes/politica_programa_nacional_plantas_medicinais_fitoterapicos.pdf. Acesso em: 1 abr. 2021.
- CARVALHO, L.M.; CASALI, V.W.D.; SOUZA, M.A.; CECON, P.R. Disponibilidade de água no solo e crescimento de artemísia. **Horticultura Brasileira**, v.21, n.4, p.726-730, 2003.
- CASTRO, L.O.; RAMOS, R.L.D. Descrição botânica, cultivo e uso de *Origanum majorana* L. - manjerona e de *Origanum vulgare* L. - orégano (Lamiaceae). Porto Alegre: Fepagro, Circular Técnica, 22, 15p., 2002.
- CASTRO, R.A.; ALBIERO, A.L.M. O mercado de matérias primas para indústria de fitoterápicos. **Revista Fitos**, v.10, n.1, p.1-93, 2016.
- CITADINI-ZANETTE, V.; NEGRELLE, R.R.B.; BORBA, E.T. *Calendula officinalis* L. (Asteraceae): aspectos botânicos, ecológicos e usos. **Visão Acadêmica**, v.13, n.1, p.6-23, 2012.
- CLEMENTE, S.; MAREGGIANI, G.; BROUSSALI, I.A.; MARTIN, S.V.; FERRARO, O.G. Insecticidal effects of Lamiaceae species against stored products insects. **Boletim de Sanidad Vegetal Plagas**, v.29, n.3, p.1-8, 2003.
- CONDÉ, M.S.; HOMEM, B.G.C.; ALMEIDA NETO, O.B.; MAGNO, A.; SANTIAGO, F. Influência da aplicação de águas residuárias de criatórios de animais no solo: atributos químicos e físicos. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v.2, n.1, p.99-106, 2012.
- CORRÊA JUNIOR, C.; SCHEFFER, M.C. As plantas medicinais, aromáticas e condimentares e a agricultura familiar. **Horticultura Brasileira**, v.32, n.3, p.376, 2014.
- CUI, H.; ZHANG, C.; LI, C.; LIN, L. Antibacterial mechanism of oregano essential oil. **Industrial Crops and Products**, v.139, n.1, 11498, 2019.
- DIVICULA, J.S.; ALEMAN, C.C.; SOUZA JUNIOR, E.P.; MORAIS, J.E.F.; RIBEIRO, S.O.; CECON, P.R.; SANTOS, M.A.L. Manejo sustentável de irrigação utilizando hidrogel no cultivo de *Calendula officinalis* L. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.4, p.19175-19188, 2020.

- DUTRA, T.V.; CASTRO, J.C.; MENEZES, J.L.; RAMOS, T.R.R.; PRADO, I.N.; MACHINSKI JUIOR, M.; GRATON, J.M.; ABREU FILHO, M.B.A. Bioactivity of oregano (*Origanum vulgare*) essential oil against *Alicyclobacillus* spp. **Industrial Crops and Products**, v.129, n.1, p.345-349, 2019.
- FEIJÃO TEIXEIRA, J.P.; MARQUES, M.O.M.; FURLANI, P.R.; FACANALI, R. Essential oil contents in two cultivars of basil cultivated on NFT-hydroponics. **Acta Horticulturae** (ISHS), v.569, p.203-208, 2002.
- FERNANDES, P.; BOFF, P. Medicinal plants in the family farms of rural areas in Southern Brazil: Ecological and ethnobotanical aspects. **Boletín Latinoamericano y Del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas**, v.16, n.5, p.493-505, 2017.
- FERNANDES, P.C.; FACANALI, R.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; MARQUES, M.O.M. Cultivo de manjeriço em hidroponia e em diferentes substratos sob ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v.22, n.2, p. 260-264, 2004.
- GERAMI, F.; MOGHADDAM, P.R.; GHORBANIM, R.; HASSANI, A. Effects of irrigation intervals and organic manure on morphological traits, essential oil content and yield of oregano (*Origanum vulgare* L.). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.88, n.4, p.2375-2385, 2016.
- GHAMARNIA, H.; KHOSRAVY, H.; SEPEHRI, S. Yield and water use efficiency of *Nigella sativa* L. under different irrigation treatments in a semi-arid region in the West of Iran. **Journal of Medicinal Plants Research**, v.4, n.16, p.1612-1616, 2010.
- GIANNOULIS, K.D.; KAMVOUKOU, C.A.; GOUGOULIAS, N.; WOGIATZI, E. Irrigation and nitrogen application affect Greek oregano (*Origanum vulgare* ssp. *hirtum*) dry biomass, essential oil yield and composition. **Industrial Crops and Products**, v.150, n.112392, 2020.
- GUTIÉRREZ, G.C. Muerta celular programada como respuesta al estrés ambiental. **Revista Chapingó**, v.12, n.2, p.93-99, 2006.
- HANCIOGLU, N.E.; KURUNC, A.; TONTUL, I.; TOPUZ, A. Growth, water use, yield and quality parameters in oregano affected by reduced irrigation regimes. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.8, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jsfa.10703?af=R>. Acesso em: 1 abr. 2021.
- HONERMEIER, B.; ALI, S.; LESCHHORN, B.; MAHMOOD, A.; IJAZ, M.; RUSSO, M.; SHAFIEE-HAJIABAD, M.; ULLAH, M.; ZELLER, S. Cultivation of medicinal and spice plants in Germany - A review. **International Journal of Agriculture and Biology**, v.15, p.1379-1388, 2013.
- JOSÉ, J.V.; MARQUES, P.A.A.; ALVES, D.A.; ROCHA, H.S.; SANTOS, O.N.A.; LENA, B.P.; FOLEGATTI, M.V. Essential oil content of basil under controlled water deficit during pre-harvesting. **Water Resources and Irrigation Management**, v.5, n.2, p.31-39, 2016.
- KALAMARTZIS, I.; DORDAS, C.; GEORGIU, P.; MENEXES, G. The use of appropriate cultivar of basil (*Ocimum basilicum*) can increase water use efficiency under water stress. **Agronomy**, v.10, n.1, p.1-16, 2020.
- KHAZAIE, H.R.; NADJAFI, F.; BANNAYAN, M. Effect of irrigation frequency and planting density on herbage biomass and oil production of thyme (*Thymus vulgaris*) and hyssop (*Hyssopus officinalis*). **Industrial Crops and Products**, v.27, n.3, p.315-321, 2008.
- LEYVA-LÓPEZ, N.; GUTIÉRREZ-GRIJALVA, E.P.; VAZQUEZ-OLIVO, G.; HEREDIA, J.B. Essential oils of oregano: biological activity beyond their antimicrobial properties. **Molecules**, 2017, v.22, 989p.
- LIAO, C.T.; LIN, C.H. Physiological adaptation of crop plants to flooding stress. **Proceedings of the National Science Council**, v.25, p.148-157, 2001.
- LORENZI, H.; MATOS, F.J.A. **Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 544 p., 2008.
- MAMELI, M.G.; ZUCCA, L.; MAXIA, M.; MANCA, G.; SATTI, M. Effects of different irrigation management on biomass and essential oil production of *Thymus vulgaris* L., *Salvia officinalis* L. and *Rosmarinus officinalis* L., cultivated in the southern Sardinian climate (Italy). **Acta Horticulturae (ISHS)**, v.889, p.469-474, 2011.

- MARQUES, P.A.A.; BASTOS, R.O. Uso de diferentes doses de hidrogel para produção de mudas de pimentão. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, v.3, n.2, p.53-57, 2010.
- MARQUES, P.A.; BORTOLO, D.P.G.; SANTOS, A.C.P. Produtividade de inflorescências de calêndula sob irrigação suplementar na região do Oeste Paulista. **Irriga**, v.16, n.2, p.153-162, 2011.
- MARQUES, P.A.A.; BERNARDI FILHO, L.; OLIVEIRA, R.B. Oregano production under various water depths estimated by means of the class A pan evaporation. **Horticultura Brasileira**, v.27, n.1, p.59-63, 2009a.
- MARQUES, P.A.A.; BERNARDI FILHO, L.; SANTOS, A.C.P. Crescimento, produção de óleo essencial e trocas gasosas em orégano influenciados por diferentes lâminas de irrigação. **Revista Ciência Rural**, v.39, p.1888-1892, 2009b.
- MARQUES, P.A.A.; CRIPA, M.A.M.; MARTINEZ, E.H. Hidrogel como substituto da irrigação complementar em viveiro telado de mudas de cafeeiro. **Ciência Rural**, v.43, n.1, p.1-7, 2013.
- MAY, A.; PINHEIRO, M.Q.; SACCONI, L.V.; JESUS, J.P.F. **Manjeriço (*Ocimum basilicum* L.)**. Instituto Agrônomo - IAC; Centro de Análise e Pesquisa Tecnológica do Agronegócio de Horticultura, 2019. Disponível em: www.iac.sp.gov.br/imagem_informacoestecnologicas. Acesso em: 1 abr. 2021.
- MAZARO, S.M.; FOGOLARI, H.; WAGNER JÚNIOR, A.; CITADIN, I.; SANTOS, I. Potencial de extratos à base de *Calendula officinalis* L. na indução da síntese de fitoalexinas e no efeito fungistático sobre *Botrytis cinerea*, *in vitro*. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v.15, n.2, p.208-216, 2013.
- MEIRA, M.R.; MELO, M.T.P.; MARTINS, E.R.; PINTO, M.J.S.; SANTANA, C.S. Crescimento vegetativo, produção de fitomassa e de óleo essencial de *Melissa officinalis* L. sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Ciência Rural**, v.43, n.5, p.779-785, 2013.
- MINAMI, K.; SUGUINO, E.; MELLO, S.C.; WATANABE, A.T. **A cultura do manjeriço**. Piracicaba: Esalq, 25p., 2007. (Série produtor rural 36).
- NALEPA, T.; CARVALHO, R.I.N. Produção de biomassa e rendimento de óleo essencial em camomila cultivada com diferentes doses de cama-de-aviário. **Scientia Agraria**, v.8, n.2, 2007.
- OLIVEIRA, T.S.; PEREIRA, J.C.; REIS, C.S.; QUEIROZ, A.C.; CECON, P.R.; GOMES, S.T. Composição químico-bromatológica do capim-elefante submetido à adubação química e orgânica. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.12, n.1, p.32-42, 2011.
- PACHECO, A.C.; CAMARGO, E.; CASTRO, P.R.; SOUZA, G.M. Deficiência hídrica e aplicação de ABA nas trocas gasosas e no acúmulo de flavonoides em calêndula (*Calendula officinalis* L.). **Acta Scientiarum Agronomy**, v.33, n.2, p.275-281, 2011.
- PANDEY, A.K.; KUMAR, P.; SAXENA, M.J.; MAURYA, P. Distribution of aromatic plants in the world and their properties. Aromatic Plants and Herbs in Animal Nutrition and Health. Cap.6. In: FLOROU-PANERI, P.; CHRISTAKI, E.; GIANNENAS, I. **Aromatic Plants and Herbs in Animal Nutrition and Health**, p.89-114, 2020.
- PEREIRA, R.C.A.; MOREIRA, A.L.M. **Manjeriço: cultivo e utilização**. Brasília: Embrapa Agroindústria Tropical, 31p., 2011.
- PRAVUSCHI, P.R.; MARQUES, P.A.A.; RIGOLIN, B.H.M.; SANTOS, A.C.P. Efeito de diferentes lâminas de irrigação na produção de óleo essencial do manjeriço (*Ocimum basilicum* L.). **Acta Scientiarum Agronomy**, v.32, n.4, p.687-693, 2010.
- RELAÇÃO NACIONAL DE PLANTAS MEDICINAIS DE INTERESSE AO SUS (RENISUS). 2p. 2010. Disponível em: http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/RENISUS_2010.pdf. Acesso em: 1 abr. 2021.
- SALEHI, A.; TASDIGHI, H.; GHOLAMHOSEINI, M. Evaluation of proline, chlorophyll, soluble sugar content and uptake of nutrients in the German chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) under drought stress and organic fertilizer treatments. **Asian Pacific Journal and Tropical Biomedicine**, v.6, n.10; p.886-891, 2016.
- SANTOS, A.S. **Óleos essenciais: Uma abordagem econômica e industrial**. Ed. Interciencia. São Paulo, 374p., 2011.

- SANTOS, H.T.; ALCARDE, R.S.; MORENO-PIZANI, M.A.; MARQUES, P.A.A. Effects of irrigation management and seasonal stages on essential oil content and biomass of *Origanum vulgare* L. **Notulae Scientia Biologicae**, v.12, n.1, p.42-56, 2020.
- SANTOS, H.T.; CARVALHO, D.F.; SOUZA, C.F.; MEDICI, L.O. Lettuce growing under automated irrigation and hydrogel application. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.5, p.852-862, 2015.
- SILVA, J.P.L.; DUARTE-ALMEIDA, J.M.; PEREZ, D.V.; FRANCO, B.D.G.M. Oregano essential oil: influence of the chemical composition on the inhibitory activity against Salmonella Enteritidis. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.30, n.1, p.136-141, 2010.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 6. Ed., 854p., 2017.
- TERAMOTO, J.R.S.; FABRI, E.G.; PANTANO, A.P.; MINAMI, K.; SUGIO, P.A.; PACHECO, S.G.A. **Produção de orégano: do plantio à comercialização**. Campinas: IAC, 20p., 2009.
- TORRES-CARRERAS, R.L.; LÓPEZ-GONZÁLES, J. Las plantas aromáticas y medicinales: futuro y potencialidad en extremadura. In: COLETO-MARTÍNEZ, J.M.; MUSLERA-PARDO, E.; GONZÁLES-BLANCO, R.; PULIDO-GARCIA, F. (Ed.) **La agricultura y la ganadería extremeñas: Informe 2010**. Badajoz: Caja de Badajoz, p.139-152, 2010. Disponível em: <http://www.unex.es/conoce-la-ue/estructura-academica/centros/eia/archivos/iag/2010>. Acesso em: 1 abr. 2021.
- VIEIRA, S.C.H.; SÓLON, S.; VIEIRA, M.C.; ZÁRATE, N.A.H. Levantamento de fitoterápicos manipulados em farmácias magistrais de Dourados-MS. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v.20, n.1, p.28-34, 2010.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Bulletin of the World Health Organization**. v.86, n.8, p.577-656, WHO, 2008. Disponível em: <https://www.who.int/bulletin/volumes/86/8/07-042820/en/>. Acesso em: 1 abr. 2021.
- YU, Y.Y.; TURNER, N.C.; GONG, Y.H.; LI, F.M.; FANG, C.; GE, L.J.; YE, J.S. Benefits and limitations to straw- and plastic-film mulch on maize yield and water use efficiency: A meta-analysis across hydrothermal gradients. **European Journal of Agronomy**, v.99, p.138-147, 2018.

CAPÍTULO 6

6 IRRIGAÇÃO PARA GRAMADOS E PAISAGISMO NO BRASIL

Jose Giacoia Neto

Resumo

A Irrigação para paisagismo e gramados esportivos, sem dúvida é um segmento que ainda tem muito que ser desenvolvido em nosso país, porém já é nítida uma conscientização de várias regiões do valor que o paisagismo irrigado traz ao urbanismo, integração humana e turismo. Este segmento possui uma grande variedade de emissores para as diversas aplicações, desde um campo de golfe a um vaso de flores. A automação do sistema é parte integrante e em constante evolução. O segmento possui subdivisões: residencial, pública, comercial e esportiva. Cada segmento possui linha específica de produtos e tecnologia específicas de instalação e projeto. O profissional desta área deve interagir com arquitetos, engenheiros e outros profissionais do segmento. Temos um mercado pulsante no Brasil e já existem profissionais altamente qualificados.

6.1 Introdução

A irrigação para jardins e gramados, possui várias aplicações e segmentos. Praticamente é instalada sempre com acionamento automatizado. Devido à falta de cultura e parâmetros de avaliação de preços, quando citamos o termo "automatizado" muitas vezes ainda verifica-se um preconceito em relação ao preço. Isso gerou, durante muito tempo, uma ideia errônea de que a irrigação para jardins é muito cara. Porém, o sistema é muito mais acessível do que se imagina, e pode ser instalado em jardins de qualquer tamanho e até mesmo em vasos. A irrigação sempre possui valores menores do que o custo do paisagismo, sendo que em algumas obras representa apenas 20%.

A irrigação para Paisagismo e Gramados se divide nas seguintes áreas: (i) residencial - jardins de qualquer tamanho em casas e edifícios, jardineiras de apartamentos, vasos em varandas, jardins de inverno, coberturas, áreas comuns de condomínios, etc.; (ii) pública - jardins de avenidas, praças e parques; (iii) comercial - universidades, shoppings, complexos de negócios e jardins em empresas, em especial fábricas e indústrias; e (iv) esportiva - campos de futebol, quadras de tênis e campos de golfe.

Verificamos que a abrangência de aplicação deste tipo de irrigação é grande, sendo que para cada segmento de aplicação há séries de produtos específicos, que se adequam conforme as necessidades, com custo em função da aplicação e do paisagismo da área a ser contemplada.

A água é um dos fatores mais importantes para a manutenção da beleza de um jardim. A irrigação pode manter um jardim bonito e vistoso durante todo o ano, desde que bem projetado e instalado.

A irrigação automatizada tem garantido a existência de jardins em locais onde antes não poderia existir. Temos como exemplos os apartamentos de veraneio em praias, que permanecem fechados e só recebem os moradores durante feriados e período de férias. Com um simples sistema de irrigação podemos ter um lindo jardim na varanda, onde antes não havia nada. O mesmo ocorre para casas de sítios, chácaras e fazendas.

É muito importante ressaltar que a irrigação pode também ser instalada em jardins formados. Portanto, podemos implantar o sistema mesmo em jardins mais antigos. O importante é ter-se onde buscar água.

Devidamente projetados e instalados, os sistemas de irrigação automatizados para paisagismo, juntos com a formação da cultura da irrigação na população de nossas cidades, podem otimizar em pelo menos 50% o consumo de água utilizada para a irrigação de áreas verdes.

Em alguns países, como EUA e Espanha, já existem cidades que necessitam de uma aprovação, junto a órgãos governamentais, para o licenciamento de se estabelecer um gramado ou um projeto paisagístico. Em contrapartida, é cobrada ao proprietário uma irrigação eficiente da área. O proprietário de uma casa ou empresa pode receber uma citação e ser punido por estar permitindo a ocorrência de desperdício de água na irrigação do jardim.

Muito importante também é saber que a irrigação para paisagismo é completamente diferente da irrigação agrícola. Os métodos de projetos, equipamentos, instalação, manejo e conservação são específicos. Muitas vezes nos deparamos com excelentes empresas de Irrigação Agrícola projetando sistemas de irrigação para paisagismo de forma equivocada, resultando, muitas vezes, em sistemas sem eficiência e, conseqüentemente, clientes insatisfeitos. Portanto, é muito importante verificar se a empresa contatada possui histórico neste tipo de serviços e se recebe suporte técnico dos produtos que utiliza. No início, a irrigação para áreas verdes era até levada em pouca consideração e muitas vezes tratada como um sistema muito simples. Porém, ao longo dos anos este conceito tem-se modificado, e cada vez mais se verifica a maior complexidade na elaboração dos projetos. Em contrapartida, a instalação do sistema é muito simples e de fácil assimilação. Em questão de dias podem-se treinar equipes de montagem para instalação dos sistemas.

6.2 História da irrigação para paisagismo e gramados esportivos

A invenção do primeiro aspersor de impacto foi um fato de extrema importância para o mundo da irrigação paisagística. Na época a invenção foi comparada a lâmpada de Thomas Edison e o telefone de Alexandre Gram Bell. Orton Englehart foi um cultivador de cítricos residente no sul da Califórnia que inventou o primeiro aspersor de impacto em 1933 e revolucionou a história da produção de alimentos e a iniciou uma nova era na irrigação mundial.

O segundo cliente para este invento foi o Country Club de Los Angeles.

Paralelamente ao desenvolvimento dos sistemas e equipamentos de irrigação de Agricultura tivemos também o nascimento e a evolução da Irrigação para atender áreas paisagísticas.

É muito difícil definir quem e como iniciou a irrigação e a produção de produtos específicos para irrigação de áreas verdes de paisagismo. Durante a evolução da irrigação, muitos produtos agrícolas foram sendo utilizados enquanto os produtos de paisagismo ainda não tinham sido inventados. A única afirmação precisa, é que o berço da irrigação de paisagismo foi na Califórnia nos EUA.

Ao final dos anos 50, finalmente, houve a invenção dos dois produtos mais revolucionários e mais populares para a irrigação de áreas paisagísticas: a invenção dos aspersores plásticos escamoteáveis *sprays* e rotores.

No Brasil o mercado de Irrigação para Paisagismo iniciou-se no ano de 1990, exatamente quando se liberou as importações para nosso país e nasceram as primeiras empresas de Irrigação para Jardins e Gramados esportivos.

O crescimento deste segmento é nítido nos últimos anos e tem-se espalhado por todo país. Hoje já temos empresas internacionais sediadas no Brasil com funcionários especializados.

A partir de 1999, um trabalho incessante de divulgação via palestras, seminários e cursos foi iniciado em universidades, prefeituras, escolas de paisagismo e entidades de classe com o intuito de levar o conhecimento dos sistemas de irrigação. Os eventos técnicos de treinamento e divulgação da tecnologia e seu benefício gerou uma rede sólida de profissionais aptos a projetar e instalar sistemas de irrigação para gramados. O Brasil tem hoje um grande acervo técnico e gente competente em todo o território nacional.

Mas o grande momento de popularização da irrigação para gramados foi a na copa de 2014. O Brasil e o mundo inteiro assistiu os sistemas de irrigação antes e nos intervalos dos jogos. Isso foi um divisor de água e a irrigação passou a ser considerada uma necessidade real que deve ser projetada e instalada com critério e com profissionais qualificados.

A preocupação com o meio ambiente e a utilização de otimizada de água tornaram os sistemas de irrigação automatizados para gramados de extrema importância para o uso racional de água e melhoria da qualidade de vida nas áreas urbanas.

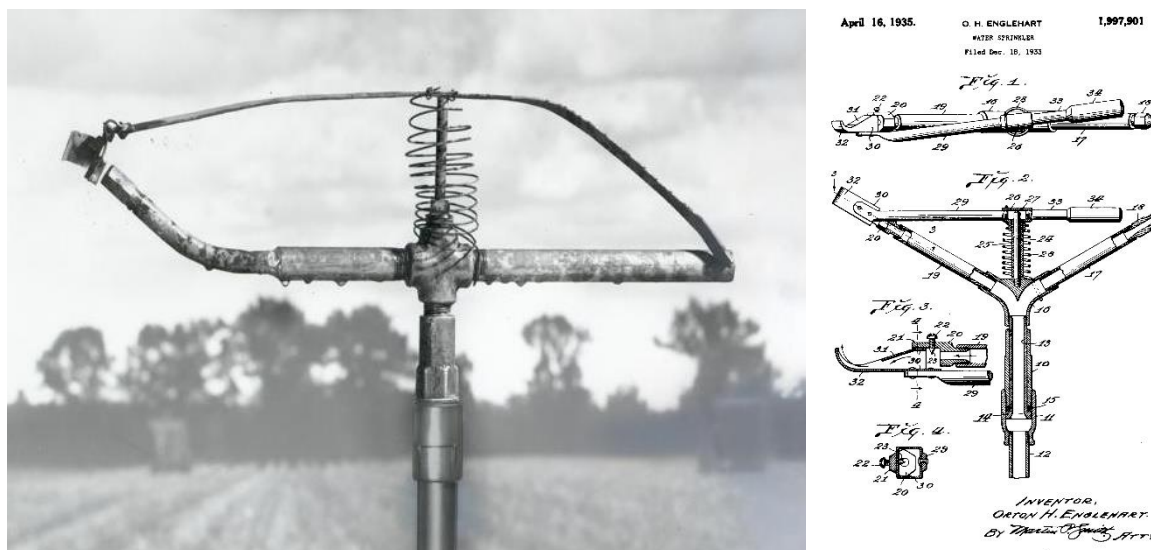


Figura 1. Primeiro aspersor de impacto.

Porém mesmo com 30 anos de existência em nosso país este mercado, infelizmente, a cultura ainda é primária. Em vários pontos do país ainda não se conhece e não temos nenhuma cultura de irrigação. Basta verificarmos o número de caminhões pipa irrigando áreas públicas enquanto que a irrigação é comprovadamente mais econômica e oferece um resultado muito melhor.

6.3 Emissores de água

Existem vários tipos e modelos de dispositivos para irrigação. Cada tipo de aspersor possui uma faixa de aplicações para que cada projetista possa especificá-lo. Os principais tipos de equipamentos são: (i) aspersores *sprays*: para arbustos e escamoteáveis, (ii) aspersores rotores: aspersores de impulso ou de impacto ou rotores, e (iii) emissores para irrigação de baixo volume: borbulhadores, microaspersores tipo micro-sprays, gotejadores e tubos gotejadores.

Quando estamos selecionando aspersores para um projeto, vários fatores devem que ser considerados. Alguns deles são: (i) tipos de emissores apropriados, (ii) tamanho e forma das áreas a serem irrigadas, (iii) pressão e vazão disponíveis, (iv) condições ambientes, tais como vento, temperatura, radiação, umidade e sombreamento, (v) tipo de solo e taxa de aplicação aceitável, (vi) compatibilidade entre os aspersores e quais podem ser agrupados juntos.

A forma e o tamanho da área a ser irrigada sempre determinam o tipo de aspersor a ser utilizado. O objetivo é selecionar o tipo de aspersor que irá cobrir a área adequadamente utilizando o menor número possível de aspersores. O tipo de paisagismo a ser irrigado também define qual o tipo de aspersor que deverá ser utilizado. Gramados, arbustos, árvores e maciços de plantas podem exigir diferentes tipos de aspersores.

A pressão e a vazão disponíveis são critérios importantes para seleção de aspersores. Cada aspersor possui uma faixa de trabalho necessária para uma própria operação e estas faixas devem ser adequadas para a vazão e pressão disponíveis.

Áreas com condições climáticas especiais irão necessitar de aspersores especiais. Áreas com alta incidência de ventos necessitarão de aspersores com bocais de ângulo baixo para manter a água próxima ao solo, onde temos uma resistência maior ao arraste de gotas. Locais com altas temperaturas e clima seco ou árido podem necessitar de aspersores com maior vazão, ou ciclos múltiplos de irrigação para manter o paisagismo sempre saudável e recebendo água de acordo com o necessário.

A taxa de aplicação do aspersor não pode exceder a capacidade de absorção do solo. Aspersores (com baixa taxa de precipitação) podem ser necessários para ajustar a taxa de aplicação de água no solo. Aspersores com baixa taxa de precipitação também são necessários em taludes, reduzindo a erosão e o escoamento potencial.

A compatibilidade entre aspersores é particularmente importante quando estamos confeccionando layouts de laterais ou dividindo aspersores em setores ou estações que irão ser comandados pela mesma válvula.

Uma das mais importantes regras para projetos de paisagismo é: "Nunca misturar categorias ou tipo de aspersores dentro de um mesmo setor de irrigação".

Aspersores com diferentes taxas de aplicação devem ser separados em setores diferentes.

Vamos apresentar em detalhe os principais emissores e suas respectivas aplicações e onde devemos selecioná-los dentro de um projeto de paisagismo.

6.3.1 Aspersores *sprays*

Iniciando uma abordagem mais detalhada sobre os emissores, teremos como início os aspersores *spray*. Sem dúvida eles são os emissores mais populares nos sistemas de irrigação para jardins e gramados. Podemos afirmar que 90% dos projetos utilizam aspersores *spray*.

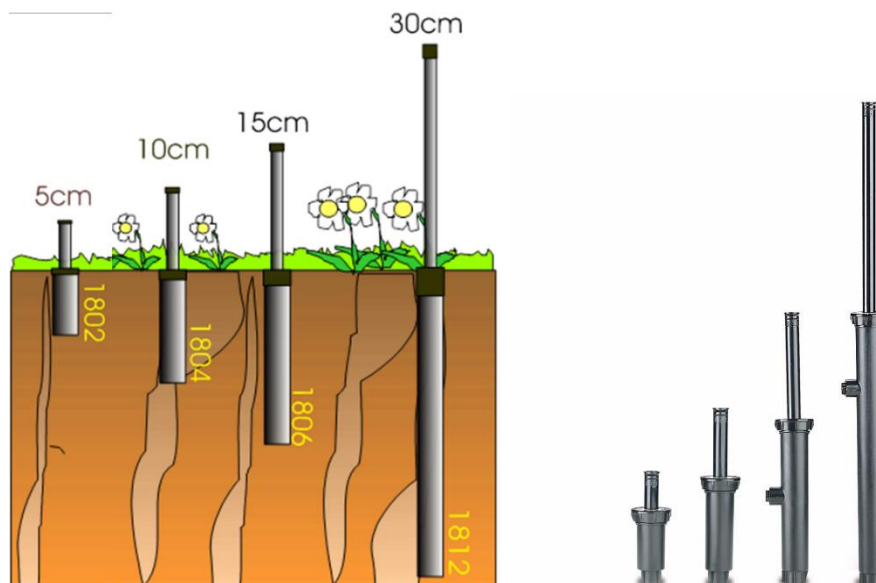


Figura 2. Modelos de aspersores *sprays* e diferentes alturas de elevação.

Estes aspersores podem ser aparentes ou escamoteáveis. Sua utilização e instalação mais frequente são feitas com o modelo escamoteável.

Os aspersores *sprays* lançam água em forma de leque com ângulo pré-definido, de acordo com o projeto. Ou seja, são estacionários, portanto, não giram (Figura 3).

Devido ao fato destes aspersores emitirem água em forma de leque, no ângulo projetado, a irrigação é rápida e uniforme e possuem taxa de precipitação de 16 a 98 mm/h. O projetista deve ter sempre isto em mente, pois eleição do bocal e sua taxa de precipitação depende da textura do solo, da declividade da área e do tipo de planta.

Dentro da série dos aspersores *sprays* existem, basicamente, quatro alturas de elevação do *pop-up* (pistão interno dos aspersores que se eleva quando inicia o seu funcionamento). Estas diferentes alturas de elevação atendem várias situações dentro de um projeto de paisagismo.

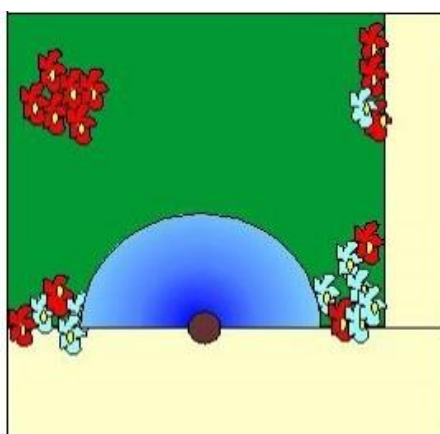


Figura 3. Ângulo do aspersor *spray*.

Existem no mercado aspersores com 5 cm, 10 cm, 15 cm e 30 cm de elevação do *pop-up* (Figura 2), sendo que os aspersores de 5 cm de altura de elevação não devem ser utilizados em nosso País (apesar de algumas empresas insistirem em trabalhar com estes modelos), devido ao fato de nossos gramados sempre estarem com altura acima de 8 cm, o que atrapalha a emissão de água do emissor, prejudicando sua *performance* e promovendo uma irrigação

inadequada, causando problemas de crescimento do jardim. Isto se agrava mais ainda com certas espécies de gramas como Esmeralda e Santo Agostinho, e onde temos formação de "tacht".

O aspersor de 10 cm de elevação do *pop-up* é o mais utilizado em gramados e forrações de pequeno porte (altura inferior a 15 cm); o modelo de 15 cm de altura de *pop-up* é utilizado em pequenas forrações e maciços de plantas (altura inferior a 20 cm) e o modelo de 30 cm de altura para pequenos arbustos e maciços de plantas (altura superior a 35 cm).



Figura 4. Aspersores *sprays* em funcionamento.

Devido ao fato de termos modelos específicos, de acordo com o paisagismo implantado, e estes modelos possuírem preços diferentes, começamos a concluir que o preço do sistema de irrigação varia de acordo com o paisagismo implantado ou a ser executado.

Outro ponto muito importante na instalação dos aspersores é que, como mostra a Figura 2, eles devem estar nivelados com a superfície do solo. Portanto, no caso de um gramado o aspersor deve ser instalado no nível do solo do tapete de grama. Quando se vê um aspersor acima no nível do gramado sabe-se que a instalação do sistema não foi bem-feita.

Os aspersores escamoteáveis devem ser instalados de forma a: (i) não ferir a estética do paisagismo; (ii) Permitir o trânsito de pessoas sobre o jardim; (iii) permitir a poda de grama com máquinas, sem interferência e danos; (iv) somente serem visualizados em gramados quando o sistema de irrigação estiver em funcionamento; e (v) evitar a ação de vandalismo.

Do exposto até o momento enumeramos abaixo algumas regras básicas sobre a utilização e instalação de aspersores do tipo *spray*: (i) os modelos de altura de elevação do *pop-up* menores que 10 cm não devem ser utilizados em nossos gramados; (ii) os aspersores devem ser instalados no nível do solo para evitar problemas, já que temos diferentes alturas de elevação do *pop-up* para adequar as necessidades específicas de acordo com a altura das plantas dos projetos paisagísticos; e (iii) são utilizados em áreas de dimensões menores. Aplicados em áreas com bordas fechadas e que requerem um direcionamento de água muito preciso, áreas com alta densidade de vegetação que atrapalham significativamente a superposição de cobertura de rotores e áreas com grande variedade de plantas que necessitam de diferentes quantidades de água.

6.3.2 Opcionais e dispositivos técnicos

6.3.2.1 Válvula Antidreno

O primeiro opcional que temos é a válvula antidreno, chamada por alguns fabricantes de *check valve* ou simplesmente de válvula SAM, que é a abreviatura de "selo de vedação automático", em inglês, termo mais utilizado no Brasil.

Esta válvula antidreno é um dispositivo instalado na base do *pop-up* do aspersor com a função de vedá-lo, ou seja, ela impede que a água contida na tubulação, após o funcionamento da irrigação, saia pelo aspersor nos pontos mais baixos da rede hidráulica do sistema. Normalmente vemos em alguns projetos, após o término da operação do sistema, os aspersores localizados nos pontos mais baixos da área vazando água. A válvula SAM suporta uma coluna de água (diferença de elevação) de até 3 metros, dependendo do modelo do aspersor.

Na Figura 5 temos o primeiro aspersor, instalado no ponto mais baixo, com válvula antidreno e o segundo sem válvula antidreno, ilustrando o vazamento de água que se dá pelo esvaziamento da tubulação.

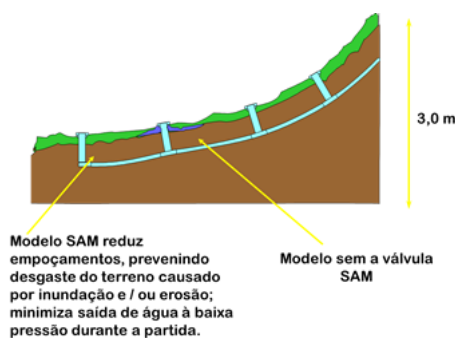


Figura 5. Representação gráfica de aspersor com válvula SAM.

Como podemos concluir, este dispositivo é de suma importância num sistema de irrigação em que temos desníveis dentro da área. Infelizmente, são poucas as empresas que utilizam este recurso como um critério de qualidade. Muitas vezes, pode-se imaginar que a utilização deste dispositivo venha a encarecer o sistema - o que é um pensamento errado, pois não altera 1% do preço final do projeto.

Geralmente, para áreas com declividades de até 10% utiliza-se 10% do total de aspersores com o modelo SAM. Acima deste valor o número salta para 20%.

Logicamente, o ideal seria uma análise das elevações do projeto, mas infelizmente muitos projetos vêm sem esta informação, o que leva a estas estimativas para garantir a qualidade final do sistema.

Nas montagens, a aplicação dos aspersores com válvula antidreno vai pela observação dos pontos mais baixos dos setores. Montadores experientes não necessitam de indicação da localização de onde instalar aspersores com válvulas SAM nos projetos.

A válvula antidreno é também um opcional existente também nos aspersores rotores, que são emissores que iremos abordar posteriormente.

Portanto, esta é uma indagação que sempre podemos tecer quando alguém está oferecendo uma proposta para fornecimento e implantação de um sistema de irrigação para o nosso jardim.

6.3.2.2 Regulador de pressão interno

O segundo opcional, em importância, é um regulador de pressão interno.

Antes de detalharmos este opcional vamos entender um pouco sobre o conceito de pressão da água.

A pressão de trabalho do aspersor *spray* com bocais tradicionais (pressão na base do aspersor *spray*) é de 20m. Portanto, quando não temos pressão (reservatório enterrado, lagos e rios) ou temos uma pressão insuficiente (exemplo: caixa d'água a 15 metros de altura ou pressão de água da rua de 18 m), necessitamos de fonte extra de força para termos a situação de pressão desejada. Esta força é fornecida, geralmente, por um conjunto motobomba.

Quando o aspersor trabalha a uma pressão abaixo da ideal diminui seu raio de alcance, perde a uniformidade de aplicação de água e aumenta o diâmetro das gotas. Como consequência, o jardim "sofre" e o gramado fica manchado e com pontos secos.

E quando temos uma situação inversa? Ou seja, pressão maior do que a necessidade do aspersor. Isto pode ocorrer por vários motivos, como coluna de água muito grande ou projeto superdimensionado (com bombas maiores que a necessidade ou cálculos hidráulicos errados). O aspersor quando está com uma pressão maior que a ideal forma muita névoa (Figura 6) e o tamanho das gotas fica muito pequeno, comprometendo sua *performance*. Em locais com alta incidência de ventos isto é extremamente prejudicial, uma vez que as gotas vão cair em locais diferentes do que o projetado, além de termos uma perda maior por evaporação.

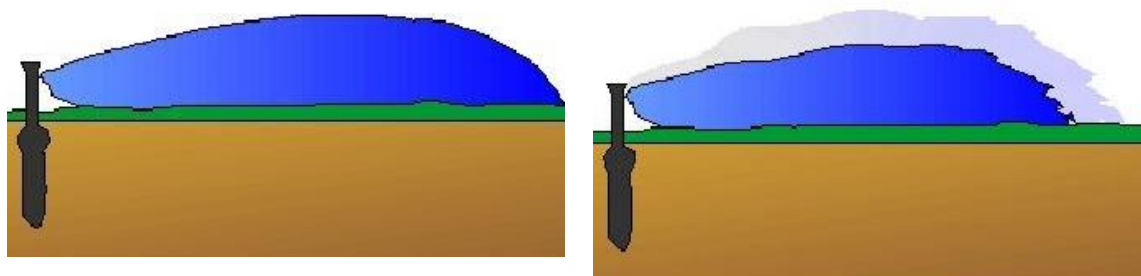


Figura 6. Aspersor operando na pressão ideal (esquerda) e com pressão baixa (direita escura) ou excessiva (direita clara).

Para corrigir o erro devido ao excesso de pressão há um dispositivo que alguns fabricantes trazem em seus aspersores - um regulador interno - que reduz a pressão no aspersor e a mantém a 20 m para os bocais tradicionais e um outro modelo que regula a pressão para 30 m quando utilizamos os bocais rotativos.

No caso de instalação em áreas públicas, na ocorrência de vandalismo (quebra de bocal ou furto) o ponto tende a "roubar" água do sistema, com consequente comprometimento do funcionamento do setor onde o aspersor está instalado. Com a utilização de aspersores *sprays* com reguladores de pressão pode-se evitar até 70% do desperdício de água que este dano provocaria.


6.3.3 Bocais para aspersores *sprays*

A seleção de bocais para atender à arquitetura da área e o paisagismo instalado é um "grande quebra-cabeça". Infelizmente, alguns projetistas optam pela padronização, utilizando poucas opções e o projeto fica deficiente. Para ilustrar temos hoje em torno de 56 opções de bocais, todos acompanhados de um filtro de proteção contra entupimento. Os projetistas arrojados fazem uso do máximo de possibilidades possíveis.

O raio de alcance de um bocal de aspersor *spray* pode variar de 1,2 m a 7,3 m. Os bocais para aspersores *sprays* são divididos em três categorias: (i) bocais de ângulo fixo MPR, (ii) bocais de ângulo fixo MPR e (iii) bocais rotativos.

6.3.3.1 Bocais de ângulo fixo MPR

Bocais de ângulo fixo MPR (Figura 7) são bocais que possuem ângulo fixo de atuação, ou seja, se o ângulo de atuação é 180° ele não varia. Estes bocais possuem várias séries de raios e, dentro de cada série, vários ângulos de atuação. Por exemplo, o bocal da série 12 de vários fabricantes tem 3,6 metros de raio de alcance e possui, dentro da série, bocais com ângulos de 90°, 120°, 180°, 240°, 270° e 360°. Além destes ângulos existem os ângulos de trajetória, que alteram a altura do jato de água. Existem ainda séries especiais de bocais, como os de forma quadrática, que podem operar em faixas para atender áreas com canteiros centrais de avenidas, rampas de garagem, taludes estreitos, jardins em faixas e várias outras aplicações. O importante é verificar se a vazão do bocal é proporcional ao ângulo, ou seja, a vazão do bocal de 90° tem que ser metade da vazão do bocal de 180° e assim por diante. Deve-se observar que nem todos os bocais encontrados no mercado possuem esta característica.






Serie 12 MPR						
Trajectory de 30°						
Tobera	Presión bar	Radio m	Caudal m ³ /h	Caudal l/m	Precip. mm/h	Precip. mm/h
12F 	1,0	2,7	0,40	6,8	55	63
	1,5	3,2	0,48	8,3	47	54
	2,0	3,6	0,59	9,7	46	53
	2,1	3,7	0,60	9,8	44	51
12H 	1,0	2,7	0,20	3,4	55	63
	1,5	3,2	0,24	4,2	47	54
	2,0	3,6	0,30	4,9	46	53
	2,1	3,7	0,30	4,9	44	51
12Q 	1,0	2,7	0,10	1,7	55	63
	1,5	3,2	0,12	2,1	47	54
	2,0	3,6	0,15	2,4	46	53
	2,1	3,7	0,15	2,5	44	51

Figura 7. Bocal MPR para aspersor *spray* e exemplo de Tabela de seleção de bocais.

6.3.3.2 Bocais de ângulo fixo MPR

Bocais de ângulo fixo MPR, comumente chamados de bocais VAN (Figura 8) - são bocais que admitem ajuste do ângulo de atuação, utilizados em locais com ângulos diferentes aos dos bocais MPR e/ou limites curvos de áreas. Alguns são facilmente ajustados manualmente e outros precisam de ferramentas especiais, o que dificulta a manutenção. Alguns bocais VAN são ajustáveis de 0 a 360°.



Figura 8. Bocal de ângulo variável VAN para aspersor spray.

A distribuição de água e a uniformidade de aplicação são as características mais importantes de um bocal. Áreas com alta incidência de ventos e taludes íngremes (inclinação $> 45^\circ$) exigem bocais especiais. Estes bocais são idênticos aos bocais MPR, porém com mais orifícios para garantir maior uniformidade e aplicação de água próxima ao aspersor.

Portanto, a escolha do bocal é um passo decisivo em um projeto, sendo a experiência e versatilidade do projetista um fator crucial.

6.3.3.3 Bocais rotativos

Os bocais rotativos foram lançados no mercado brasileiro em 2005, consagrados em 2006 e hoje estão presentes em todo Brasil. Todos projetistas atualizados e arrojados já utilizam esta tecnologia.

Os Bocais Rotativos possuem jatos múltiplos e com diferentes alcances e ângulo de trajetória para distribuir água de forma uniforme. Possuem uma taxa de precipitação baixa ($14-18 \text{ mm h}^{-1}$) e foram projetados para serem instalados nos aspersores da série spray.

O produto é um testemunho no compromisso com o uso inteligente da água, pois os Bocais Rotativos economizam água, reduzem a erosão e o escoamento superficial, ao mesmo tempo em que aumentam a homogeneidade e diminuem o tempo de instalação de um projeto.

A baixa taxa de precipitação dos Bocais Rotativos e sua baixa vazão (aproximadamente 60% menor que a dos bocais *sprays* convencionais) permitem maior número de aspersores por setor. Por aplicarem água de forma mais lenta, são ideais para irrigar taludes e solos altamente compactados.

Em situações de alta incidência de vento, onde os bocais convencionais de *sprays* têm seu desempenho comprometido, os Bocais Rotativos trabalham bem, devido às suas gotas grandes e ângulo de trajetória baixo de seus jatos. Este é um ponto importante a avaliar no bocal rotativo adquirido.

Apesar de estarem instalados em aspersores *sprays*, os Bocais Rotativos possuem pressão de trabalho e precipitação semelhantes aos aspersores rotores. Os bocais podem ser instalados no mesmo setor de aspersores rotores de alguns modelos. Portanto, não é necessário acrescentar uma nova tubulação e uma nova válvula para criar um novo setor quando as dimensões da área diminuem.

Os bocais rotativos estão disponíveis em modelos de acordo com o raio real de alcance. O raio de alcance real encontrado no mercado varia de 4 m a 10 m em ângulos de atuação fixos. O alcance é regulado manualmente ou através de ferramentas. Esta regulação permite

a acomodação do mesmo bocal em várias situações, de acordo com o paisagismo e a arquitetura do jardim.



Figura 9. Bocais rotativos.

6.3.4 Opcionais de instalação

Em alguns casos os aspersores não necessitam ou não podem ser instalados na forma escamoteável. Por exemplo, uma vegetação densa com altura superior a 60 centímetros (lembrando a máxima elevação de altura do *pop-up* é de 30 cm). Nestes casos há a alternativa de realizar a instalação do bocal do aspersor *spray*, através de um adaptador (Figura 10), diretamente em um tubo de subida. Assim, temos uma instalação mais econômica e podemos instalar os bocais na altura mais conveniente.

A opção de instalação aparente tem várias aplicações práticas, como o uso em hortas, resfriamento de telhados, estufas, casas de vegetação, viveiros de plantas e até mesmo na produção agrícola, visto que podemos utilizar toda a versatilidade e variedade de situações que os bocais dos aspersores *sprays* nos proporcionam.

Portanto, para áreas menores e de formas variadas, onde precisamos de aspersores aparentes ou até mesmo instalados aéreos, este adaptador é uma excelente opção.



Figura 10. Adaptador para arbustos e extensor para aspersores.

Como mencionado no início da abordagem sobre os aspersores *sprays*, são utilizados na grande maioria dos sistemas de irrigação, portanto é de suma importância o detalhamento de todas as características, aplicações e formas de instalação deste equipamento. Os sistemas de irrigação para gramados esportivos são os únicos em que estes aspersores raramente têm utilidade.

O acessório de instalação mais importante são os flexíveis que são instalados entre o aspersor e a tubulação. A função é facilitar a instalação e proteger a tubulação de ruptura por

impacto ou sobrepeso acima do aspersor. O sistema flexível é considerado acessório obrigatório de instalação em vários países.



Figura 11. Imagem de aspersor *spray* com flexível conectado a um "T" de PVC.

Devidamente instalados, são equipamentos que raramente necessitam de manutenção, necessitando de limpeza somente quando há problemas com qualidade de água e/ou alguma quebra de tubulação que tenha permitido a entrada de sujeira na rede hidráulica.

Infelizmente, para sistemas mal projetados e instalados, o aproveitamento e a recuperação do que já foi feito é muito difícil. Nestas situações o ideal é aproveitar apenas os emissores e equipamentos em bom estado e refazer o projeto.

6.3.5 Aspersores rotores

Os aspersores rotores, após os aspersores *sprays* são os equipamentos mais populares em irrigação para jardins e gramados.

A utilização e a aplicação destes aspersores se iniciam exatamente onde termina a aplicação dos aspersores *sprays*, ou seja: (i) áreas de dimensões maiores (largura superior a 7,5 m), (ii) paisagismo de menor estatura e densidade, (iii) gramados livres, (iii) grandes taludes, (iv) gramados esportivos, (v) quadras de tênis, e despoeiramento.

Como o próprio nome sugere, são aspersores que giram, portanto, não possuem uma aplicação estática e em ângulos fixos de trabalho como os aspersores *sprays*. São equipamentos mais robustos e mais complexos.

A classificação dos aspersores rotores é relativa ao mecanismo que faz com que eles girem e estão discriminadas a seguir: (i) aspersor rotor de impacto – gira através do impacto de um braço oscilante. Para melhor entendimento, é como os aspersores utilizados em agricultura, em que se vê um braço batendo no jato de água, produzindo um barulho característico, e (ii) aspersor rotor de engrenagens – este modelo gira por meio de uma turbina de engrenagem que se movimenta quando a água passar por ele, resultando na rotação do aspersor. Este modelo é o mais popular e o mais utilizado.

Os aspersores rotores para paisagismo possuem uma ampla faixa de vazões, variado de $0,12 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $8,24 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ($0,03 \text{ L s}^{-1}$ a $2,29 \text{ L s}^{-1}$), e também uma ampla faixa de raios de alcance que variam de 4,6 m a 24,6 m.

Vale salientar que existem ainda os aspersores rotores para campos de golfe, pertencentes a uma classe muito específica de utilização devidos às diferenças de operação, características e aplicações. Somente para ilustrar, o raio de alcance de aspersor rotor para campos de golfe pode atingir até 35 metros.

Os rotores que iremos tratar são divididos em duas categorias: (i) aspersores rotores de médio alcance - raio de alcance variando de 4,6 m a 15 m, e (ii) aspersores rotores de longo alcance - raio de alcance variando de 12 m a 24,6 m.

Os aspersores da primeira categoria são utilizados em residências, hotéis, fábricas e indústrias, parques, e até mesmo em alguns gramados esportivos. Já os rotores da segunda categoria são utilizados, principalmente, para grandes gramados e campos de futebol.

Estão disponíveis nas versões escamoteável e aparente. A versão aparente deve ser utilizada em grandes áreas de arbustos ou com alguma cobertura vegetal de alta densidade de plantio. A versão escamoteável é mais utilizada em gramados e coberturas de pequeno porte (até 30 cm).



Figura 12. Aspersores rotor.

Estes aspersores possuem várias formas para utilizar a vazão e a pressão no acionamento do mecanismo de rotação.

Geralmente, os aspersores rotores possuem um único ou um par de bocais, que gira para distribuir a água em sua área de cobertura. Os de ângulo regulável possuem um mecanismo de reversão para fixar sua rotação dentro do ângulo estabelecido. Existem alguns aspersores que podem ajustar o ângulo em até 360° na mesma unidade, mas existem modelos que possuem duas versões: círculo cheio e círculo parcial.

Necessitam de maiores pressões para operação, sendo que a faixa dentro dos diversos modelos pode variar de 20 m até 70 m.

Os aspersores rotores geralmente aplicam água mais lentamente do que os *sprays*. Isto é devido ao fato de terem a mesma vazão para atender áreas muito maiores. A taxa de aplicação de água destes aspersores varia de 6 mm h⁻¹ a 25 mm h⁻¹ esta característica também faz com que sejam apropriados para áreas de taludes, solos pesados e outras onde necessitamos de menores taxas de aplicação de água.

Instalações com aspersores de longos raios de alcance são bem mais econômicos que aspersores *sprays*. Teremos poucos aspersores, conseqüentemente poucas conexões e poucas valas a serem abertas.

Alguns detalhes gerais dos aspersores rotores de médio alcance são idênticos aos dos aspersores *sprays*. Eles também podem ser escamoteáveis ou aparentes e também podem possuir o opcional da válvula antidreno (válvula SAM), que impede que a água dentro dos tubos "vaze", logo após o término da irrigação, para os pontos mais baixos da área, provocando alagamentos e/ou erosão no solo.

6.3.6 Aspensor rotor de impacto

Este modelo de aspensor, na sua versão escamoteável, nada mais é que o tradicional aspensor agrícola, que vemos nas plantações, dentro de um casulo, de forma que fique somente escamoteável. Como o próprio nome diz, ele funciona através do impacto de um braço oscilante que, além de fazer o aspensor girar, promove a dispersão do jato d'água para uniformizar a aplicação de água.

O raio de alcance deste aspensor vai de 6,8 m até 14 m.

Como não possui nenhum mecanismo interno, é recomendado para aplicação com águas residuais ou bombeadas diretamente de lagos, represas e/ou rios. Como a água passa diretamente sem contato com nenhuma peça interna, temos um equipamento menos susceptível ao entupimento. Outra vantagem importante é o fato deste aspensor ter sido o primeiro com ângulo de bocal "baixo", que é o fato do mesmo lançar água, com raio de até 10 metros, próximo ao solo. Esta característica é extremamente importante em situações de ventos fortes e crista de taludes.

As desvantagens deste produto são bem específicas e algumas têm feito sua utilização diminuir em todo o mundo. Primeiramente, é muito fácil de regular seu ângulo de ação, que é uma vantagem, mas também é fácil de ser desregulado pelo contato humano. Portanto, não é indicado para áreas públicas, onde poderemos ter problemas com vandalismo. Outro problema crucial diz respeito à cobertura do gramado com areia, pois quando ele se eleva para efetuar a irrigação, a areia pode entrar em seu casulo até o ponto de causar seu travamento, perdendo sua rotação e retração. Importante frisar que isto não danifica o aspensor, sendo que o problema é ter de desmontá-lo para limpeza.



Figura 13. Aspensor rotor de impacto.

6.3.7 Aspensor rotor de engrenagens

Este modelo de aspensor rotor é, hoje, o mais popular e utilizado no mercado brasileiro e em várias partes do mundo. Encontramos algumas regiões, como alguns países da América Latina, em que outros modelos são mais populares e mais utilizados.

Dentro dos tipos de rotores existentes é, sem dúvida, onde temos a maior tecnologia e estudos envolvidos. É a melhor opção para gramados esportivos de campos de futebol, campos de golfe e quadras de tênis de saibro e de grama.

Este aspersor é de funcionamento silencioso, o que agrada muito os clientes, e seu giro é efetuado através da passagem da água por uma turbina de engrenagens, que ao se movimentarem provocam a rotação do aspersor.

Estes aspersores possuem raios de alcance de 6,8 m a 24,6 m dentro dos modelos para áreas paisagísticas, mas podem chegar até 36 m de raio em rotores próprios para campo de golfe.

Um dos principais detalhes e cuidados importantes na instalação destes equipamentos é a verificação da qualidade da água, pois são os mais susceptíveis a problemas de entupimento e de perda de rotação devido a impurezas sólidas dentro do "motor" de engrenagens. Portanto, uma boa limpeza na rede hidráulica, antes da instalação dos rotores, e a verificação da necessidade de filtragem são essenciais para um bom funcionamento de um sistema de irrigação com rotores de engrenagem.



Figura 14. Modelos de Aspersores rotores de engrenagem.

Um detalhe interessante é o fato de encontrarmos pessoas acusando algum problema de funcionamento do aspersor ao fabricante e/ou ao próprio tipo de aspersor, quando na maioria das vezes o problema está na instalação e na limpeza do aspersor.

Hoje temos alguns modelos que, como os aspersores por rotação por meio de turbina de esferas, possuem a característica que chamamos de "memória de arco" que descrevemos em nosso último artigo.

Uma grande vantagem que este equipamento possui é a versatilidade de aplicação, em modelos de três alturas diferentes de elevação do *pop-up*. Assim, como nos *sprays*, temos aspersores que possuem 4" (10 cm), 5" (12,5 cm), 6" (15 cm) e 12" (30 cm) de elevação para atender as diferentes situações dentro do projeto de paisagismo.

Geralmente, as regulagens dos ângulos de atuação são obtidas por ajustes simples na parte superior do aspersor, sem a necessidade de ferramentas especiais.

Em locais onde não temos a necessidade de aspersores escamoteáveis há a opção do modelo aparente, assim como o adaptador para arbustos que mostramos em nosso capítulo para *sprays*.

6.3.8 Bocais para aspersores rotores

Aqui, sem dúvida, é onde temos a maior tecnologia nestes produtos. Temos alguns fabricantes que mesmo com bons produtos, em termos de mecanismo de rotação, deixam a desejar na *performance* do bocal. Os bocais têm que ser meticulosamente estudados e projetados para termos a melhor uniformidade de aplicação de água possível. A melhor tecnologia existente é conhecida como "Cortina de Chuva", onde a água é aplicada de forma a garantir precipitação suave e uniforme ao longo de todo o jato de água.

Existem também outros bocais especiais, como os de ângulo baixo, muito utilizados em locais com alta incidência de ventos e/ou crista de taludes.



Figura 15. Rotores em funcionamento em um estádio de futebol.

6.3.9 Emissores de baixo volume

A irrigação de baixo volume é o segmento da irrigação para paisagismo que mais cresce no mundo. As construções sustentáveis e a entrada das paredes verdes e tetos verdes no paisagismo é uma realidade que veio para ficar.

O primeiro emissor de baixo volume inventado foi o gotejador. Ele foi concebido em Israel e sua primeira aplicação foi para irrigação agrícola. Os gotejadores foram inventados no início dos anos 60.

Como o próprio nome diz, trata-se de um emissor que emite gotas para realizar a irrigação. Sua instalação é realizada de forma a aplicar água diretamente na zona radicular das plantas. No nosso caso aplicamos água diretamente em uma planta podendo ela estar fazendo parte de um jardim ou isolada em um vaso.

Como em irrigação para jardins, procura-se sempre a discrição nas instalações, temos diversas formas de instalar os emissores. Sendo assim, serão apresentados os modelos existentes de gotejadores: (i) Gotejador unitário ou de botão, (ii) tubo gotejador, (iii) tubo gotejador para uso aparente, e (iv) tubo gotejador para uso enterrado.

6.3.9.1 Gotejador unitário ou de botão

Produtos comercializados separadamente ou vendidos inseridos nas tubulações. É o modelo de gotejador mais indicado para irrigação de vasos e/ou plantas isoladas (arbustos e árvores) dentro de um projeto de paisagismo. São comercializados em vários modelos e fabricantes e possuem vazão específica de trabalho, ou seja, são autocompensantes. Por exemplo: temos modelos de vazão de 2 litros por hora ($L h^{-1}$), $4 L h^{-1}$, $8 L h^{-1}$, etc.

Estes emissores, quando vendidos separadamente, são inseridos diretamente na tubulação de polietileno que conduz a água, ou levado até os locais de irrigação através de microtubos.



Figura 16. Gotejador de botão autocompensante com diferentes vazões, inseridos em tubo de polietileno.

6.3.9.2 Tubo gotejador

Tubo de polietileno gotejador, no qual o gotejador foi inserido no interior do tubo através de uma tecnologia própria. Ou seja, no processo de fabricação já se instala o gotejador na tubulação, podendo ser no interior do tubo ou já fazendo parte da própria parede da tubulação, como no caso das fitas gotejadoras. Este tipo de emissor é mais utilizado para irrigação de maciços de pequenos arbustos e forrações vegetais. Um exemplo típico é a irrigação de cercas vivas.

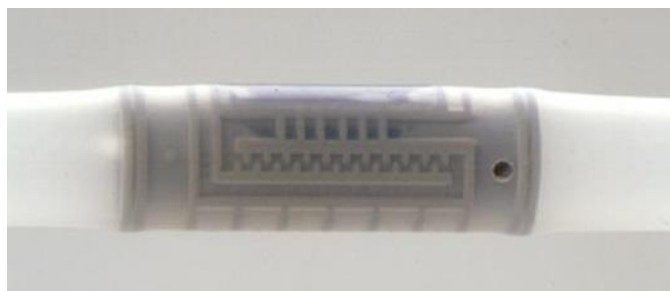


Figura 17. Tubo gotejador com emissor inserido.

São fabricados em diversos espaçamentos entre emissores e vazões diferenciadas. Para paisagismo são mais recomendados os de espaçamento de 20 cm e 30 cm entre emissores. A vazão por emissor pode variar de 1 L h⁻¹ a 4 L h⁻¹.

O motivo do pequeno espaçamento está relacionado à densidade de plantio que encontramos em paisagismo o que nos leva a necessitar de menores espaçamentos e também de menores tempos de irrigação.

Dentro destes dois modelos temos também duas variedades básicas: (i) tubos gotejadores para uso aparente, e (ii) tubos gotejadores para uso enterrado.

6.3.9.3 Tubo gotejador para uso aparente

No caso de jardineiras e/ou pequenos maciços podemos utilizar gotejadores regulares, que funcionam com pressões menores, pois é uma situação comum encontrada em pequenos jardins.

O gotejador é uma excelente solução para a irrigação de pequenos espaços, maciços de plantas, plantas isoladas, paredes verdes e vasos. Podemos viabilizar a irrigação em áreas onde jamais poderíamos imaginar antes. Exemplo: irrigação em vasos em um poste.

6.3.9.4 Tubo gotejador para uso enterrado

Em 2010, foi lançado a mais revolucionária tecnologia para utilização de gotejamento enterrado. Se trata de um sistema chamado de "Barreira de Cobre", incorporado ao gotejador. Esta tecnologia patenteada protege os emissores da intrusão de raízes, criando um sistema de longa vida útil e baixa manutenção para os jardins.

Resultando num sistema que não necessita manutenção, uso, ou reposição de produtos químicos para a prevenção a entupimento. Os gotejadores são autocompensantes e o tubo é feito em dupla camada (cor cobre sobre preto), garantindo grande resistência a produtos químicos, crescimento interno de algas e aos danos causados por radiação Ultravioleta.

Como funciona exatamente esta tecnologia? (i) as raízes das plantas exsudam, naturalmente, ácidos orgânicos, que em contato com as placas de cobre dos emissores, liberam íons de cobre, (ii) os íons de cobre ficam localizados na "solução do solo" próximos aos orifícios de saída dos emissores/gotejadores, (iii) esses íons enfraquecem e inibem o crescimento das radículas junto aos emissores, (iv) o cobre não é absorvido pelas radículas e transferido para outras partes das plantas, mantendo-as saudáveis e livres de produtos tóxicos, e (v) tecnologia usada há mais de 10 anos no controle de raízes em diversos outros tipos de aplicações.

Os dados que temos é que assumindo uma média de funcionamento de 45 min dia⁻¹, 4 dias por semana; a expectativa de vida do tubo ultrapassa os 16 anos.



Figura 18. Imagem ilustrativa tubo gotejador para uso enterrado com escudo de cobre.

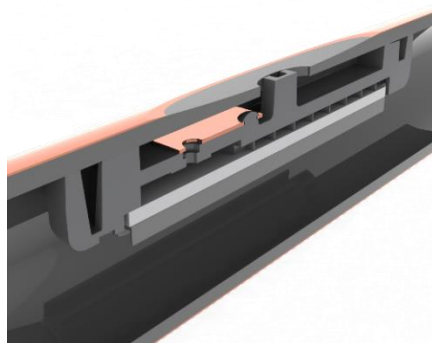


Figura 19. Foto em corte do gotejador com placa de cobre.

6.3.9.5 Borbulhadores e micro-sprays

Agora iremos apresentar os dois mais simpáticos e populares emissores de baixo volume: Os borbulhadores e os micro-sprays.

A água pode cair bem próxima ao emissor ou pode ser aspergida a poucos centímetros na forma de *spray* ao redor, numa forma de “guarda-chuva”. Os borbulhadores podem ser utilizados para irrigar áreas estreitas e de pequenas dimensões e podem ser ajustados para emitir baixas vazões.

São equipamentos que produzem raios bem pequenos. O tipo de borbulhador mais comum tem uma vazão de funcionamento de $0,13 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $0,80 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e podem ser utilizados em áreas estreitas e pequenas. Uma de sua principal vantagem é que pode irrigar uma planta específica sem atingir outras que estão próximas.

Os borbulhadores são emissores extremamente versáteis e permitem um grande número de aplicações e modos de instalação. Eles podem ser pontuais e/ou abrangentes, com aplicação principal em jardins pequenos, vasos e jardineiras, podendo irrigar plantas isoladas ou em maciços. Geralmente disponíveis em modelos de 180° e de 360° . Lançam a água na forma de pequenos jatos, com gotas de maior diâmetro que os *sprays*. Ideal para uso em jardineiras suspensas, vasos e pequenos jardins. Possuem raio de alcance e vazões reguláveis. O raio pode ser ajustado de 0 a 80 cm e a vazão de 0 a 49 L h^{-1} (litros por hora).



Figura 20. Imagem de Borbulhadores de respingo e tipo "sombrinha".

Esta regulagem é que permite sua aplicação nos jardins e vasos das mais variadas formas e dimensões. Eles possuem a vantagem de formarem vários bulbos, disponibilizando água para as raízes das plantas.

Os micro-sprays também possuem possibilidade de ajuste de raios e também são versáteis, possuindo as mais diversas aplicações. Podem ser utilizados em pequenos jardins, casas de vegetação, pequenos gramados, pomares e plantios densos. São viáveis em jardins de dimensões maiores de onde são aplicados os borbulhadores, uma vez que possuem maiores raio de alcance (até 4 m) e podem ser instalados com maiores espaçamentos entre emissores.



Figura 21. Micro-spray em funcionamento.

6.4 Válvulas e estações

Fazendo a comparação de válvulas solenoides com o corpo humano elas seriam o coração. Se elas param de funcionar todo o sistema para. A teoria de operação das válvulas é a mesma para todos os fabricantes.

Costumo sempre usar a comparação que as válvulas são iguais impressoras jato de tinta. Não importa o quanto de modelos e aplicações existem, elas sempre possuíram o mesmo princípio mecânico de funcionamento e operação. As diferenças que temos são em resistência, configurações e outros.

A Figura 22 possui o descritivo dos componentes internos de uma válvula.

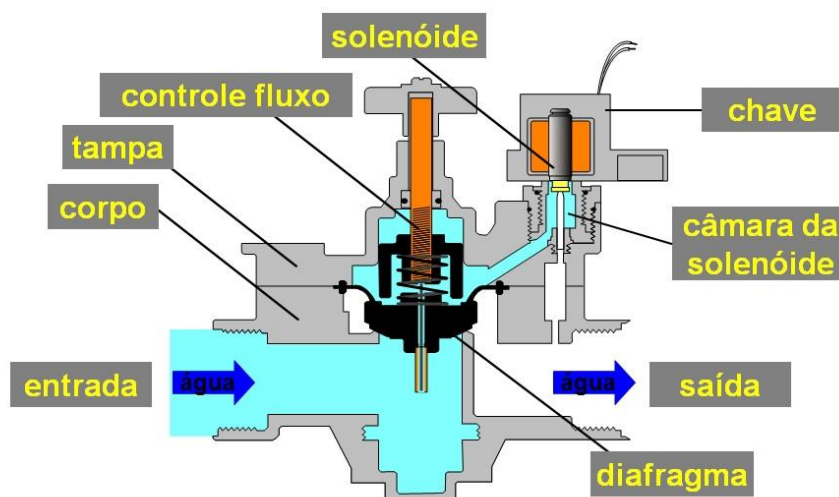


Figura 22. Válvula elétrica e seus componentes.

As válvulas solenoides são nada mais que um registro (torneira) com acionamento automático através de um contato elétrico, enviado por um controlador. A sua operação é simples: o solenóide recebe um contato elétrico e se abre, permitindo que a água se encaminhe aos aspersores.

Elas são responsáveis pela setorização do sistema de irrigação, que é uma decisão muito importante dentro da confecção de um projeto.

Como já apresentado, a divisão em setores é feita com análise em vários itens hidráulicos e paisagísticos.

As válvulas possuem vários tamanhos, dados em polegadas. O tamanho mais comum em projetos de irrigação residencial é o de 1". O que limita o tamanho da válvula é a vazão do projeto, que é a quantidade de água que vai passar em seu interior em um intervalo de tempo. Temos também modelos específicos para trabalhar com diferentes qualidades de água e situações.

A instalação das válvulas deve ser feita dentro de caixas plásticas apropriadas, enterradas de forma que a tampa fique ao mesmo nível do gramado e/ou da superfície do solo, não ferindo a estética do paisagismo implantado.

Outro detalhe é de como fazer a conexão dos fios. Ela tem que ser feita com conectores apropriados e nunca com fitas isolantes.

Um projeto de paisagismo contempla uma série de tipos de plantas diferentes e que, conseqüentemente, exigem diferentes quantidades de água. Outro ponto é o sombreamento. Avaliar a incidência de sol no jardim é importantíssimo, sendo que áreas sombreadas exigem até 30% menos água. Infelizmente, vemos erros grosseiros na escolha de plantas em vários projetos paisagísticos. Portanto, temos a seguinte conclusão e regra básica: jardins a partir de 200 m² de área necessitam de pelo menos dois setores. O importante é frisar bem que estamos falando de jardins residenciais e não de gramados livres, ou seja, desconfie de projetos de irrigação residencial com apenas um setor.

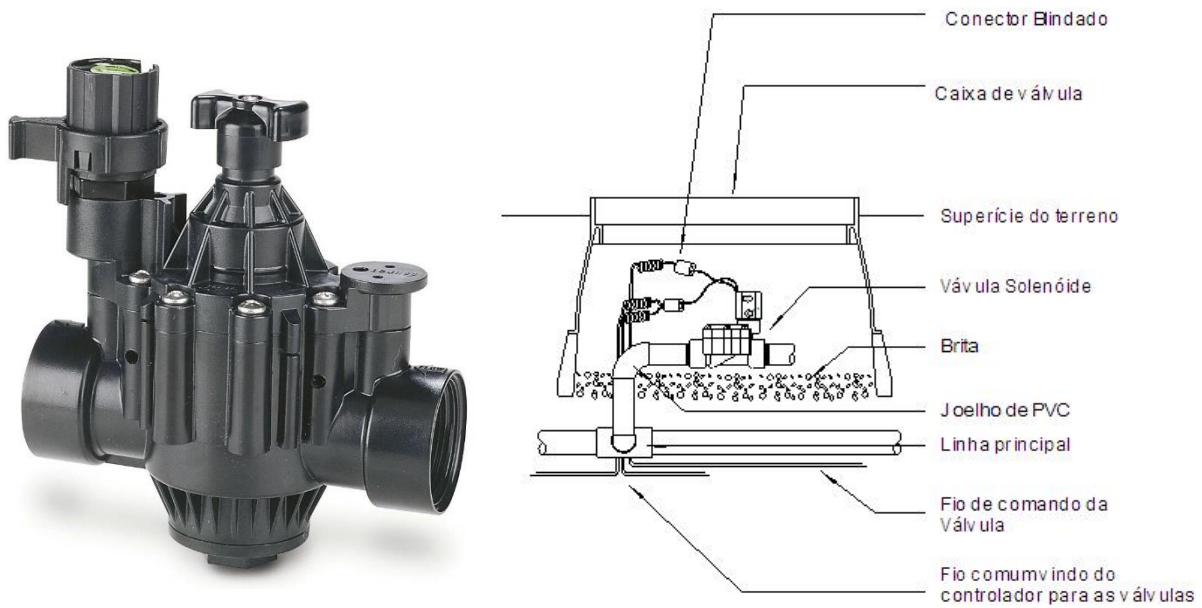


Figura 23. Válvula solenoide e detalhe de sua instalação.

6.5 Automação

6.5.1 Controladores para irrigação

Primeiramente, temos que definir o que é um controlador para irrigação. Ele pode ser definido como um microcomputador, onde programamos o funcionamento da irrigação. Não importa o modelo e marca, pois os controladores possuem, basicamente, a mesma lógica de programação, incluindo: (i) horário no qual queremos que a irrigação seja iniciada, (ii) o tempo de funcionamento de cada setor (válvulas solenoides), (iii) o número de vezes que o sistema deverá funcionar por dia, e (iv) quais os dias da semana em que o sistema deverá funcionar.



Figura 24. Controladores de irrigação.

Geralmente são programáveis por teclas. Os resultados dos comandos selecionados são projetados em uma tela de cristal líquido.

6.5.2 Monitoramento remoto

De forma avassaladora, nos dois últimos anos os telefones celulares se tornaram o principal ponto de conexão das pessoas com o mundo. Hoje, uma pessoa sem um celular inteligente está, literalmente, desconectada do mundo e com limitações de produtividade.

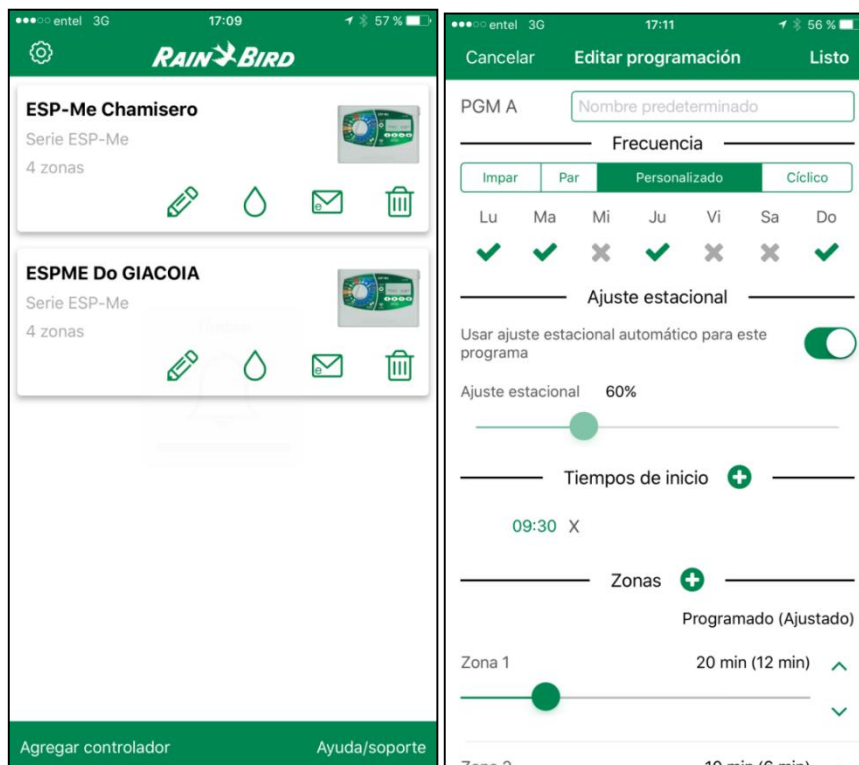


Figura 25. Exemplo da tela de acesso aos controladores e tela de programação de um controlador.

Com essa evolução veio também a avalanche de aplicativos móveis “Apps”, muitos para lazer mas muitos também trazendo controles e ajudando usuários de equipamentos e sistemas a monitorar, controlar, operar, interceder e tomar decisões remotas nas mais diversas áreas. Na irrigação não poderia ser diferente.

Com isso podemos permitir que um técnico de irrigação ou um consultor tenha acesso ao controlador. Podemos solicitar a outras pessoas que operem o sistema se estivermos impossibilitados de fazer o mesmo.

Podemos personalizar o controlador fotos de cada setor para facilidade de identificação e todos o acesso é intuitivo e interativo e o aplicativo guia o usuário em como navegar pela programação do controlador.

O controlador e cada setor podem ser ter nomes para facilitar a identificação de onde e qual é o setor dentro do projeto.

6.5.3 Controles centrais

Um controle central para sistemas de irrigação pode simplesmente ser definido como um sistema computacional que opera múltiplos controladores, sensores e outros dispositivos utilizados em sistemas de irrigação através de único ponto. Os controles centrais de hoje podem monitorar condições dentro de um projeto e então controlar os equipamentos a responder dentro de ações programadas para aquelas condições. Este monitoramento e controle, permite uma automação completa do sistema de acordo com quaisquer parâmetros

definidos para a operação do sistema. O sistema pode operar totalmente sem intervenção humana se programado para tal. Temos como fazer uma grande

A cada ano são incorporadas mais tecnologias e capacidades aos controles centrais.

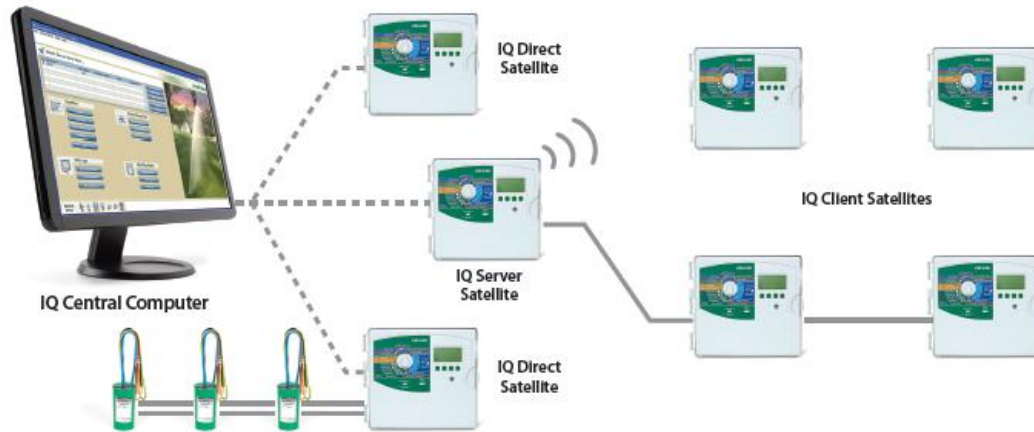


Figura 26. Esquema funcional de controles centrais.

6.6 Considerações finais

O crescimento da construção sustentável exige controles e medições precisas, tomadas de decisão em tempo real e gerenciamento de sistemas.

A tendência da Irrigação paisagística é seguir com o desenvolvimento de emissores eficientes e a automação sofisticada, porém com fácil operação e também mais baixo custo.

Referências

- DUBLE, R.L. **Water management on turfgrasses**. Texas Cooperative Extension, 1999.
- GIACOIA, J. Projetos e equipamentos de irrigação para Paisagismo. Apostila Módulo IV: **Academia Rain Bird**, Brasil, 2013.
- LANDSCAPE IRRIGATION PRODUCTS. 2020 Catalog, Rain Bird, Azusa, 2020.
- TURF IRRIGATION DESIGN MANUAL, Rain Bird, Glendora, CA, 1995.
- VOIGT, T.; BRANH, B. **Turf water use rates and irrigation management**. Illinois Turfgrass Foundation and University of Illinois Turfgrass Group, 2001.

CAPÍTULO 7

7 SISTEMA IRRIGADO DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL: HISTÓRIA, MITOS E DESAFIOS

Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira

Resumo

No setor sucroenergético, os termos irrigação e fertirrigação não estão associados ao Sistema Irrigado de Produção, com irrigações ao longo de todo ciclo da cultura, sempre que necessário, mas à prática de distribuir vinhaça e água residuária ou, ainda, ao salvamento – aplicação, imediatamente após a colheita, de uma única lâmina de 40 a 60 mm de água pura, ou com algum grau de mistura com vinhaça e água residuária, visando melhor brotação dos canaviais colhidos no período seco. Nas últimas quatro décadas, sobretudo na última, uma grande transição tecnológica ocorreu no setor sucroenergético. Adicionalmente, houve importante transição geográfica, e a produção que se concentrava no bioma Mata Atlântica migrou gradativamente para o Bioma Cerrado. Entre 1975 e 2015, a área colhida de cana-de-açúcar no Cerrado aumentou de 490 mil hectares para cerca de 5 milhões de hectares, ou seja, de 25% para 49% (BOLFE *et al.*, 2020). Em 2017, mais da metade da produção sucroenergética já estava no Cerrado. Apesar das vantagens que impulsionaram a cana-de-açúcar para o Cerrado, a concentração do período chuvoso em poucos meses e a baixa capacidade de retenção de água de seus solos implicam em baixa chuva efetiva e reduções da evapotranspiração frequentemente superiores a 50% do potencial. As crises hídrica e econômica da última década levaram à falência dezenas de usinas e, dentre as que sobreviveram, acelera-se o interesse e investimentos em sistema irrigado de produção. Apesar disso, o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar ainda não ocupa área expressiva no setor sucroenergético brasileiro. Do universo de quase 400 usinas e destilarias operando no país, menos de 2% possuem alguma fração expressiva e, menos de 1% possuem a maior fração de seus canaviais sob sistema irrigado de produção. No entanto, a acentuação dos efeitos negativos das secas, cada vez mais frequentes e mais severas tem gerado uma grande onda de interesse no sistema irrigado de produção. São inúmeras as vantagens técnicas, sociais, financeiras e ambientais da verticalização promovida pelo sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar. E não há, por enquanto, nenhum outro novo sistema de produção ou manejo agrônomo que possa trazer, em curto e médio prazo, impactos tão substanciais na lucratividade, competitividade e sustentabilidade do setor sucroenergético brasileiro. Por essas razões cresce o consenso de que o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar será, muito em breve, a nova realidade brasileira, ocupando grande fração da área produtiva. Para acelerar o ganho de escala do sistema irrigado de produção no país, duas frentes precisam ser trabalhadas. A primeira diz respeito à desconstrução de alguns mitos e, a segunda, ao avanço da inovação tecnológica para o estabelecimento de premissas e protocolos cada vez mais sólidos para assegurar ganhos de sustentabilidade econômica, social e ambiental para o setor sucroenergético.

7.1 Introdução

Além de explicar o diferente significado dos termos irrigação e fertirrigação no setor sucroenergético, esse capítulo ainda pretende tratar da história do uso da irrigação de cana-de-açúcar no Brasil, e de como a transição tecnológica e geográfica, associada ao agravamento dos efeitos negativos das mudanças climáticas globais, e de crises hídricas e econômicas culminaram numa nova tendência – a migração de parte substancial da produção de cana-de-açúcar do Brasil para o sistema irrigado de produção.

7.2 Alinhando conceitos

No setor sucroenergético, os termos irrigação e fertirrigação ganham conotação distinta da utilizada para outras culturas, pois são empregados para distribuição da vinhaça e água residuária, resíduos da indústria, visando fornecimento de nutrientes e solução do passivo ambiental.

No sentido estrito, empregado em outras culturas e lugares do mundo, a irrigação, ou sistema irrigado de produção, significa a alteração do sistema de produção de sequeiro através da redução da deficiência hídrica ao longo do ciclo da cultura, utilizando equipamentos de irrigação para não mais depender exclusivamente da chuva. E, a fertirrigação, diz respeito ao fornecimento fracionado da demanda nutricional da cultura, ao longo do ciclo, utilizando a água da irrigação como veículo para adubação. O objetivo é buscar ganhos de eficiência na absorção de nutrientes, ganhos de produtividade, e redução dos custos de adubação.

Há ainda outro tipo de operação muito característica do setor sucroenergético que, se não for bem compreendida, pode também ser confundida com um sistema irrigado de produção. Essa operação é chamada de **salvamento**.

7.2.1 Irrigação-fertirrigação com vinhaça e água residuária

Os volumes aplicados são calculados, geralmente, em função da necessidade de suprimento anual de potássio. Como resultado, aplica-se uma única lâmina de aproximadamente 15 mm ($150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) imediatamente após a colheita do canavial.

O momento de aplicação da vinhaça e água residuária raramente obedecem a uma lógica de redução do *deficit* hídrico, dado que é definida pela demanda de descarte do resíduo produzido pela indústria, faça chuva ou faça sol. Normalmente, quando se decide por aplicar uma lâmina maior que 15mm, a razão não costuma estar associada à identificação de áreas com maior deficiência hídrica, mas a falhas de gestão ou falta de infraestrutura para distribuição uniforme em maiores áreas. Configuram-se assim as chamadas áreas de sacrifício, que recebem descarte de vinhaça e água residuária em excesso. Hoje a legislação ambiental inibe a existência dessas áreas de sacrifício.

A água que compõe a vinhaça e a água residuária é, majoritariamente, oriunda da própria cana, que é composta por, aproximadamente, 72% de água. Além da água da própria cana, a indústria também capta diretamente de cursos d'água cerca de $0,5$ a $1,5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ de cana processada para uso em seus processos. Os processos de reciclagem e reúso de água na indústria são muito eficientes, com ciclos praticamente fechados, e estão em constante aprimoramento. Ainda assim, a água captada, somada à da própria cana, é alvo de reúso nas lavouras através da distribuição da vinhaça e água residuária.

Visando aumentar a fração de seus canaviais que recebem nutrientes da vinhaça, as usinas têm investido em concentradores de vinhaça e aplicação localizada tratorizada. Como resultado, a área que recebe vinhaça é ampliada. Mas, ao invés de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, os canaviais recebem de 5 a $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, uma fração ainda menor da demanda hídrica da cana, distanciando ainda mais essa prática do conceito intrínseco de irrigação ou sistema irrigado de produção.

7.2.2 Salvamento

Trata-se da aplicação, imediatamente após a colheita, de uma única lâmina de 40 a 60 mm de água pura, ou com algum grau de mistura com vinhaça e água residuária, visando melhor brotação dos canaviais colhidos no período seco. Por isso, o objetivo do salvamento não é fazer a suplementação da deficiência hídrica ao longo do ciclo da cultura e sim garantir seu estabelecimento na fase inicial.

Semelhantemente à aplicação de vinhaça e água residuária, o salvamento é realizado com equipamento de aspersão tipo autopropelido, também chamado de carretel enrolador, e infraestrutura móvel de adutoras e motobombas à diesel.

Comparada à demanda hídrica total de um ciclo de 12 meses da cana, a lâmina de salvamento é maior do que a entregue na aplicação de vinhaça, mas ainda representa menos de 2% da demanda hídrica da cana-de-açúcar no Cerrado, por exemplo. Portanto, não se deve caracterizar o canavial que recebe salvamento como se estivesse sob sistema irrigado de produção.

7.2.3 Sistema irrigado de produção

No **Sistema Irrigado de Produção**, faz-se a suplementação da chuva com irrigações ao longo do ciclo da cultura visando a redução da deficiência hídrica. Mas é fundamental compreender que o **sistema irrigado de produção** não se trata da simples adição de água sobre um sistema de produção de sequeiro. Aqui, provavelmente, reside a razão de algumas experiências mal sucedidas com irrigação de cana no passado. Quando a água deixa de ser o fator mais limitante da produção, outros fatores assumem essa condição. Por isso, um sistema irrigado de produção propriamente dito, ajusta todos os outros aspectos agronômicos para otimizar e verticalizar a produção. Caso contrário, o padrão agronômico de sequeiro se tornaria limitante para o potencial produtivo da área irrigada.

Sistemas irrigados de produção de cana-de-açúcar podem ser implantados com pivô central (fixo ou rebocável), pivô linear, e gotejamento subsuperficial, sempre buscando redução considerável da deficiência hídrica ao longo do ciclo produtivo.

Atualmente, o sistema irrigado de produção não ocupa fração significativa do setor sucroenergético brasileiro, apesar do crescente interesse.

7.3 Transição tecnológica e geográfica para produção irrigada

Por séculos, a produção de cana-de-açúcar brasileira se concentrou nas regiões litorâneas, sobretudo nas várzeas e tabuleiros costeiros da Mata Atlântica, na região Nordeste do Brasil. Entre as décadas de 1930 e 1970, a produção canavieira migrou lentamente para o interior de São Paulo, mas ainda em ambiente de Mata Atlântica (RODRIGUES; ROSS, 2020). Esses ambientes ofertavam disponibilidade hídrica adequada para produção de sequeiro, sobretudo considerando o baixo padrão agronômico e níveis de produtividade almejados à época (ANDRADE, 1958; EISENBERG, 1977; PERRUCCI, 1978; ANDRADE, 2005). Em meados da década de 1950, nos tabuleiros costeiros de Alagoas, a irrigação começou a ser adotada, de maneira ainda modesta, para mitigação da deficiência hídrica em meses secos (ANDRADE, 2005).

Nas décadas de 1960 a 1980, com a expansão da produção para os estados do Rio de Janeiro e São Paulo, o significado da palavra irrigação no setor passou a se desviar do objetivo intrínseco da tecnologia – reduzir a deficiência hídrica, passando a significar então a distribuição de vinhaça e água residuária, antes descartados diretamente nos rios (SZMRECSÁNYI, 1988; MELO, 2009).

Entre as décadas de 1970 e 1990, o uso da irrigação em cana-de-açúcar para redução da deficiência hídrica ganhou espaço no Nordeste. Mas isso ocorreu ao mesmo tempo em que o setor iniciava seu declínio na região. Nesse período, apesar da irrigação continuar ganhando espaço, o uso de vinhaça e água residuária já representava a principal razão da utilização dos equipamentos de irrigação na região Nordeste (CARVALHO, 2002).

A partir da década de 1970, nas principais regiões produtoras, o aumento da pressão demográfica causou elevação do custo e da fragmentação das terras em propriedades

menores (COSTA; MONDRADO, 2013). Além disso, ciclos de achatamento de margens de lucro de *commodities* e pressão por ganho de escala produtiva e competitividade, motivaram a busca por módulos rurais maiores, menor fragmentação das propriedades, melhor topografia e redução do custo da terra (BACCHI; VALDES, 2013). Ou seja, o cenário econômico e social pressionou a expansão da cana-de-açúcar para ambientes com maior deficiência hídrica e menor fertilidade de solos no Cerrado (VIANNA; SENTELHAS, 2014; MARQUES *et al.*, 2020). Além disso, a partir da década de 1970, o governo federal também vinha implementando programas de incentivo para a produção e ocupação do Cerrado (PIRES, 2000). Por essas razões, gradualmente, e sobretudo na década de 1990, aumentou o interesse de desenvolvimento da agroindústria canavieira na região central do Brasil.

O Cerrado apresenta um clima típico de savana tropical úmida, com estação seca distinta entre abril e outubro e precipitação média anual entre 750 e 2000 mm. Apesar do volume anual de chuvas não ser tão distinto do bioma Mata Atlântica, podendo ser até maior em alguns lugares, sua distribuição é irregular, concentrada majoritariamente entre os meses de novembro e março (OLIVEIRA-FILHO; RATTER, 2002; MARCUZZO *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2012). Como na produção de sequeiro, entre eventos de chuva, a planta se sustenta somente através da água armazenada no solo (BERNARDO *et al.*, 2019), o risco de *deficit* hídrico também varia conforme a capacidade de retenção de água de cada solo (VIANNA; SENTELHAS, 2014). No Cerrado os solos são mais intemperizados e, por isso, além dos arenosos, solos com elevado teor de argila, como os ácidos, também apresentam baixa capacidade de retenção de água (PRADO, 2013).

Um conceito muito importante para compreender a maior deficiência hídrica no Cerrado é o de precipitação efetiva (Pef), aquela fração da chuva que é, de fato, absorvida e utilizada pelas plantas (TONELLO *et al.*, 2014). Nesse bioma, o percentual da precipitação que se torna efetiva é pequeno, em virtude da grande concentração da precipitação em poucos meses do ano, resultando numa grande fração dessa chuva que escoia diretamente para rios e lagos, e percola para o lençol freático, abaixo da zona radicular, antes que a planta consiga utilizá-la.

A combinação entre a maior demanda hídrica da planta adulta com os meses mais secos, baixa capacidade de retenção de água dos solos, e baixa Pef, faz do Cerrado um ambiente de *deficit* hídrico limitante para a cana-de-açúcar, com reduções da evapotranspiração frequentemente superiores a 50% do potencial (RODRIGUES *et al.*, 2014).

No início da expansão para o Cerrado, sobretudo para o interior de São Paulo, a migração ocorreu para regiões de transição com Mata Atlântica, onde a distribuição das chuvas e os solos eram semelhantes aos encontrados nessa região (ANDRADE, 1994; VIAN, 2007; RODRIGUES; ROSS, 2020). Contudo, ao final da década de 1990, intensificou-se a expansão para o interior do Cerrado (FILOSO, 2015; CHERUBIN, 2016). Neste momento, apostava-se que a rusticidade da cana-de-açúcar lhe conferiria o mesmo padrão de desempenho das lavouras em bioma Mata Atlântica, mesmo migrando para regiões de maior deficiência hídrica. A expansão do bioma Mata Atlântica para o bioma Cerrado ocorria com pouco ou nenhum ajuste do sistema de produção para absorver os impactos desse maior *deficit* hídrico. O emprego da irrigação para redução da deficiência hídrica representava uma fração irrisória da área produtiva de cana-de-açúcar no Brasil – uma exceção. E a pesquisa para o desenvolvimento de um sistema de produção irrigado para cana-de-açúcar caminhava no mesmo ritmo.

Na década de 2000, em novo momento de expansão do setor sucroenergético brasileiro, *greenfields* se espalharam aceleradamente pelo Cerrado em um movimento que ainda priorizava a velocidade da expansão em detrimento da qualidade de implantação e manutenção dos canaviais. Logo, os efeitos da maior deficiência hídrica começaram a afetar destacadamente o desempenho do setor sucroenergético brasileiro. A baixa qualidade de operações de implantação, condução e colheita dos canaviais que, ocasionalmente, pelo

melhor regime hídrico, ainda permitiam níveis aceitáveis de produtividade e longevidade em ambiente de Mata Atlântica, agora desafiavam a sustentabilidade do setor sucroenergético no Cerrado. A produtividade caía e a longevidade dos canaviais, frequentemente, recuava dos convencionais 6 a 8 cortes em bioma Mata Atlântica para 4, 3, ou até 2 anos. Junto com crises financeiras e os desafios da transição para plantio e colheita mecanizados, a deficiência hídrica resultava em estagnação ou declínio da produtividade média e competitividade do setor sucroenergético nacional (GOUVÊA *et al.*, 2009).

Nesse momento, sobretudo em usinas com maior experiência de produção no Cerrado, intensificou-se o aperfeiçoamento dos projetos de distribuição de vinhaça e água residuária, além da adoção do salvamento. No entanto, ainda eram raras as iniciativas de adoção de sistema irrigado de produção. Por vezes, algumas iniciativas exploratórias de implantação de equipamentos de irrigação em canaviais com manejo agrônômico de sequeiro indicavam potencial de resposta à irrigação. Mas a inexperiência e ausência de tecnologia desenvolvida para sistema irrigado de produção de cana no Brasil conduziam os resultados para ganhos não tão expressivos de produtividade, sobretudo quando contrastados com os custos ainda muito elevados de aquisição dos equipamentos de irrigação.

7.4 Crises hídrica e econômica

Na década de 2010, o Cerrado já representava, aproximadamente, metade da área de cana-de-açúcar brasileira, e o ritmo de expansão nesse bioma ainda é substancialmente superior aos demais. (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017; CASTILLO, 2015; GAROFALO *et al.*, 2020). Mas o *deficit* hídrico dessa região tem se agravado com a redução do volume precipitado e o encurtamento da estação chuvosa (MACENA *et al.*, 2009; CAMPOS; CHAVES, 2020). Além disso, há evidências de que as mudanças climáticas globais podem aumentar ainda mais a deficiência hídrica da cana-de-açúcar no Cerrado (CARDOZO; SENTELHAS, 2013; SANTOS; SENTELHAS, 2014; DIAS; SENTELHAS, 2019), o que, além de reduzir o potencial produtivo, encurtaria ainda mais a janela adequada de plantio (VIANNA; SENTELHAS, 2014) e elevaria os custos de produção.

Essa intensificação da expansão para o Cerrado e o agravamento do *deficit* hídrico motivaram a Embrapa Cerrados, em 2008, a iniciar seus trabalhos de pesquisa para o setor. Sua ampla experiência em aprimoramento e desenvolvimento de sistemas de produção para o Cerrado, aliado à visão de que havia grande potencial genético não explorado nas variedades de cana existentes, direcionou os esforços para o aprimoramento e desenvolvimento de novos sistemas de produção de cana para este bioma. Nesse contexto, acreditava-se que não haveria outro fator de produção, além da água, capaz de impactar tão fortemente em médio e longo prazo a verticalização da produção, competitividade e sustentabilidade ambiental da produção sucroenergética brasileira.

A pesquisa para o desenvolvimento de um sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar para o Cerrado brasileiro ganhou força. O interesse e incentivo no setor vinha de alguns poucos produtores de regiões de maior deficiência hídrica do Cerrado, ou que tinham alguma experiência com outras culturas irrigadas, ou mesmo de produtores tradicionais do bioma Mata Atlântica com perfil mais inovador. Mas a maior parte dos produtores ainda se mostravam muito relutantes em acreditar no potencial ou viabilidade econômica da tecnologia. Esse fenômeno é muito semelhante ao identificado nos primórdios da produção irrigada de diversas outras culturas, como café e laranja. Mas, atualmente, são raros os empreendimentos de produção dessas culturas que não são concebidos sob sistema irrigado de produção.

No início, mesmo em instituições de pesquisa, muitas das iniciativas de produção irrigada de cana ainda estavam associadas à simples adição de água sob um sistema de sequeiro, que acabavam por reforçar os resultados economicamente ainda pouco expressivos.

Mas também já começavam a surgir alguns resultados que mostravam um potencial muito diferente de tudo que já se havia experimentado no setor.

Após 2013, as crises hídrica e econômica vivenciadas pelo setor levaram à falência dezenas de usinas e, dentre as que sobreviviam, acelerava-se o interesse e investimentos em sistema irrigado de produção. Evidenciava-se que, num horizonte muito próximo, este novo sistema seria considerado uma trajetória tecnológica irreversível. Contudo, a pouca disponibilidade de informação técnica, a incerteza quanto ao futuro político e econômico do Brasil, a dificuldade de acesso ao crédito e, os poucos exemplos de áreas sob o sistema com longo histórico de sucesso, ainda limitavam os investimentos.

7.5 Sistema irrigado de produção: a nova realidade do setor

7.5.1 Potencial e vantagens

São inúmeras as vantagens técnicas, sociais, financeiras e ambientais da verticalização promovida pelo sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar. E não há, por enquanto, nenhum outro novo sistema de produção ou manejo agrônômico que possa trazer, em curto e médio prazo, impactos tão substanciais na lucratividade, competitividade e sustentabilidade do setor sucroenergético brasileiro. Por essa razão cresce o consenso de que o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar será, muito em breve, a nova realidade brasileira, ocupando grande fração da área produtiva.

7.5.1.1 Produtividade

O sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar confere maior produtividade tanto em toneladas de colmo por hectare (TCH) quanto em quilos de açúcar por tonelada de colmo (ATR). Conseqüentemente, também confere maior produtividade em termos de toneladas de açúcar por hectare (TAH).

7.5.1.2 Longevidade

Um dos principais fatores de redução da produtividade de canaviais está associado à perda de população de colmos (INMAN-BAMBER, 1994), que é resultado, além da deficiência hídrica, do pisoteio, abalo e arranquio de soqueiras, do aumento da infestação de pragas e doenças, do aumento da pressão de ervas-daninhas, e da degradação da fertilidade do solo (MANHÃES *et al.*, 2015).

A longevidade de um canavial é, frequentemente, definida por uma produtividade mínima aceitável (TCH ou TAH). As usinas costumam definir esse patamar mínimo empiricamente, ou com uma matriz de decisão composta exclusivamente de parâmetros técnicos, ou associando parâmetros técnicos com alguma métrica financeira como, por exemplo, fluxo de caixa descontado. A produtividade mínima aceitável também oscila em função da capacidade financeira para custear a reforma e do custo de oportunidade de deixar uma área sem produção, mesmo que baixa, em ano de bom preço do açúcar e álcool. Mesmo quando se decide o momento de renovação do canavial através de uma matriz de decisão multivariada, a produtividade atual e a produtividade potencial, caso o canavial fosse renovado, sempre tem grande peso na decisão.

Em uma usina com nível de produtividade inferior, esse limite pode ser um TCH de 40 ou 50. Já nos melhores canaviais do país a produtividade mínima aceitável pode ser um TCH de 80 ou 90. Contudo, todas essas referências têm como base um canavial de sequeiro. Se mantivermos esses mesmos níveis para áreas irrigadas, certamente a longevidade do canavial irrigado aumentará substancialmente. Primeiramente, porque, comparado às áreas de

sequeiro, a melhor condição hídrica e nutricional do canavial irrigado favorecerá a rebrota e reduzirá suas falhas (RUIZ-CORRÊA *et al.*, 2013; CAMPOS *et al.*, 2014; MONTEIRO; SENTELHAS, 2014). Segundo, porque, sob condição irrigada, a fração dos perfilhos que se tornam colmos é superior (ALMEIDA *et al.*, 2008). Ou seja, a melhor condição hídrica e nutricional de um canavial sob sistema irrigado mantém maior população de colmos e o declínio populacional ao longo dos anos é desacelerado em comparação com o canavial de sequeiro. Além de maior população de colmos, o sistema irrigado oferece melhores condições para o crescimento desses colmos ao longo do ciclo (DIAS; SENTELHAS, 2019). Finalmente, diante da ocorrência de falhas, o sistema irrigado permite que a touceira imediatamente ao lado da falha explore melhor a radiação adicional disponível e reduza o impacto da falha adjacente.

Contudo, ao observarmos o sistema irrigado de produção como um negócio individualizado, e analisarmos seu fluxo de caixa, percebemos que haverá um grande custo de oportunidade se aguardarmos de 12 a 15 anos para que uma área irrigada atinja as mesmas produtividades mínimas estabelecidas como referência de reforma para uma área de sequeiro.

Por exemplo, considere que a produtividade de colmos de uma área irrigada atingiu, após alguns ciclos, 110 t ha^{-1} . Será mais interessante, financeiramente, aguardar mais alguns anos para que essa produtividade chegue a 80 t ha^{-1} determinada como ponto de reforma para uma área de sequeiro? Ou será melhor renovar o canavial e retornar à produtividade dessa área para patamares acima de 200 t ha^{-1} ? Enquanto negócio, qual seria a melhor estratégia? E se considerarmos que a vida útil de equipamentos de irrigação, com boas práticas de manutenção, pode atender a dois ou três ciclos de 8 a 10 anos mesmo no gotejamento, pode-se optar por trocar apenas as linhas gotejadoras em dois ou três ciclos, dado que representam, aproximadamente, 30% do custo de um sistema novo e, com a troca, poderá operar por mais dois ou três ciclos de 10 anos.

Enfim, comparado a um sistema de sequeiro, é fato que a longevidade do canavial irrigado é maior. Mas enquanto estratégia de negócio, acreditamos que, financeiramente, poderá ser mais interessante estabelecer uma produtividade mínima aceitável mais elevada para o canavial irrigado. Na prática, isso pode significar um aumento de longevidade ligeiramente menor do que os 12 a 15 anos comumente preconizados.

7.5.1.3 Renovação de canavial

O aumento da longevidade do canavial reduz o percentual da área que precisa ser renovada anualmente, reduzindo o tamanho da infraestrutura de preparo de solo e plantio, seja da frota de máquinas, de mudas, insumos, ou de mão-de-obra. Adicionalmente, a renovação anual de uma área menor reduz significativamente o risco de plantios mal conduzidos e fora da janela climática ótima, que impactam negativamente a produtividade e longevidade de todo o ciclo do canavial.

7.5.1.4 Janela de operações

A qualidade e custo de diversas operações agrícolas dependem da umidade do ar e solo. No Cerrado, a janela ideal para plantio em sistema de produção de sequeiro ocorre apenas no mês de março. A estreita janela de plantio também reduz a janela de preparo do solo. Ainda assim, o plantio acaba não se restringindo à janela ideal. Isso ocorre porque, para viabilizar o plantio em toda a área necessária em apenas 30 dias, seria preciso um investimento substancialmente elevado de mão-de-obra e maquinário. Como consequência, abre-se a janela de plantio para os meses que antecedem e sucedem março, assumindo impacto negativo na qualidade do plantio, produtividade e longevidade da área.

Plantios realizados antes de março resultam em um canavial chegando no período seco com muita biomassa para ser sustentada. Como não haverá disponibilidade hídrica suficiente, esse canavial sofrerá com a seca. Plantios realizados depois de março correm o risco de não receberem chuva suficiente para germinação e estabelecimento adequado da população de colmos, também comprometendo permanentemente a produtividade e longevidade da área.

A janela estreita de plantio também dificulta o uso de rotação de culturas como a soja, sobretudo em canaviais colhidos no final de safra. Ou limita a utilização de variedades de soja muito precoces, com potencial de produção inferior. Frequentemente se abre mão do uso de cultura de rotação temendo atrasar o plantio e sofrer as consequências permanentes de uma germinação ruim da cana que sucede a soja.

Quando sob sistema irrigado de produção, não há limitação de janelas de preparo e plantio ocasionada por deficiência hídrica. Pode-se irrigar para elevar a umidade do solo para condições adequadas de preparo e plantio. Ou seja, pode-se plantar durante todo o ano. Com isso, ganha-se por diminuir a demanda de maquinário e mão-de-obra, ampliando a janela de plantio, e ganha-se na qualidade do plantio, gerando ganhos adicionais de produtividade e longevidade.

O sistema irrigado de produção também oferece vantagens nas janelas de operações de tratamentos culturais que demandam condição adequada de umidade do solo ou dossel, como herbicidas, adubação, inseticidas, etc. Esse sistema de produção também estende o período de colheita, dado que possibilita planejar e manejar água, nutrientes e maturadores para entregar, já em março, níveis mais elevados de TCH e ATR. Adicionalmente, por não depender exclusivamente da oferta de chuva, usinas que dispõem de boa fração de sua área sob sistema irrigado não precisam reduzir demasiadamente a fração de área colhida nos períodos de maior deficiência hídrica, dado que a irrigação garantirá excelente brotação após a colheita.

7.5.1.5 Tratos fitossanitários

Quanto maior a produtividade da área, menores serão os custos operacionais (Opex) e de capital (Capex) de operações agrícolas por tonelada de cana produzida.

Para executar operações de preparo de solo, adubação e tratamentos fitossanitários em uma determinada área e em determinada janela de tempo, a distância percorrida e a quantidade de maquinário necessária não serão afetadas pela produtividade que a área entregará. Portanto, aumentar a produtividade significa diluir esses custos por tonelada de cana produzida.

7.5.1.6 Colheita, transbordamento e transporte

Os custos de corte, transbordamento e transporte (CTT) são substancialmente reduzidos no sistema irrigado de produção. Apesar da tecnologia atual das colhedoras não permitir operar com a mesma velocidade nos canaviais irrigados, a quantidade de cana colhida por hora em áreas de alta produtividade aumenta, reduzindo o custo de corte por tonelada de colmo ou de açúcar (MACHADO *et al.*, 2002; YADAV *et al.*, 2003; CAMPOS *et al.*, 2017). Com a evolução das colhedoras, essa vantagem em canavial irrigado só aumentará. Além disso, por causa da maior produtividade de TAH, a distância que se caminha com os transbordos para receber cada tonelada de ATR diminui. Consequentemente, diminui-se o custo de transbordamento por tonelada de colmo ou de açúcar. Finalmente, a maior produtividade do sistema irrigado, permite verticalizar a produção da usina como um todo, e atender à moagem com menor área de cana plantada, menor raio médio e maior proximidade à usina. Dessa forma, haverá redução do custo por tonelada de colmo ou de açúcar transportado. Ou seja, a verticalização das áreas com sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar resulta na redução acentuada de um dos principais custos do setor, o CTT.

7.5.1.7 Custo de insumos

O custo de diversos insumos está associado à área plantada, e não a produtividade. Por exemplo, o custo com herbicidas não aumenta proporcionalmente à produtividade. Ao contrário, áreas sob sistema irrigado, pelo menor índice de falhas, maior cobertura de palha e maior velocidade de crescimento e sombreamento da entrelinha, possuem menor pressão de ervas-daninhas. Custos com monitoramento de pragas e doenças, inibidores de florescimento, corretivos, maturadores e diversos outros insumos são pouco ou nada influenciados pela produtividade do canavial. Dessa forma, aumentar a produtividade da área reduz o custo por tonelada de colmo e açúcar. Ainda, em função do ganho de eficiência de absorção de nutrientes em áreas sob sistema irrigado, também poderá haver redução adicional da demanda de fertilizantes por tonelada de colmo e açúcar.

7.5.1.8 Palhada

A produção de palha é proporcional à produtividade de colmos (BUFON *et al.*, 2016; BARBOSA *et al.*, 2020; SOUSA *et al.*, 2020). Um sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar pode produzir até 40 t ha⁻¹ (base seca) de palha, ao passo que uma área sob produção de sequeiro produz de 5 a 10 t ha⁻¹ (BUFON *et al.*, 2016). A maior cobertura de palha do sistema irrigado de produção impacta diretamente na redução de evaporação da água do solo, reduzindo a demanda hídrica da cultura ao longo do ciclo (OLIVER; SINGELS, 2007; BUFON *et al.*, 2016; NG CHEONG; TEELUCK, 2016; CARVALHO *et al.*, 2019). Essa maior quantidade de palha, concomitante à maior velocidade de decomposição do palhicho sob condição irrigada (BARBOSA *et al.*, 2020; SOUSA *et al.*, 2020) também aumenta a disponibilidade de matéria orgânica do solo. Mais matéria orgânica também implica em maior atividade e qualidade biológica do solo (MENDES *et al.*, 2020). O maior volume de palha também aumenta a proteção do solo, reduzindo além dos efeitos erosivos da chuva, a lixiviação de nutrientes e a perda de água para além do sistema radicular (SÁ *et al.*, 2015). Por aumentar a micro rugosidade da superfície do solo e retardar o escoamento superficial, o maior volume de palha da produção irrigada também melhora a infiltração de água, melhorando o aproveitamento da chuva e reduzindo o *deficit* hídrico (BUFON *et al.*, 2016; SATIRO *et al.*, 2017). Considerando que, pelo menos, 5 a 8 t ha⁻¹ (base seca) da palhada devem ser mantidas sobre a superfície para garantir boa conservação, infiltração e redução da evaporação de água do solo (SÁ *et al.*, 2015; CASTIONI *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2018), quanto maior a produtividade de palha, maior o percentual que poderá ser recolhido para produção de energia elétrica ou etanol de segunda geração.

7.5.1.9 Demanda e custo da terra

A verticalização promovida pelo sistema irrigado de produção reduz a quantidade de terra necessária para atender a capacidade instalada de moagem da usina. Como resultado, ganha-se com a redução do raio médio.

Por isso, ao investir no sistema irrigado, a usina pode abrir mão de suas áreas mais distantes e de solos com menor fertilidade e capacidade de armazenamento de água. Da fração restante, a usina ainda pode direcionar solos e janelas de plantio e colheita mais restritivos para o sistema irrigado, dado que a oferta de nutrientes e água não é limitação para esse sistema. E por fim, direcionar os melhores solos e janelas de plantio e colheita para o sistema de produção de sequeiro. Ou seja, o investimento em produção irrigada gera impacto indireto, mas substancial no custo, produtividade e longevidade da área de sequeiro, abrindo ainda mais espaço para a redução de áreas e custo da terra para atender a moagem da usina.

A redução da demanda por terra também gera a oportunidade de abrir mão das áreas mais declivosas e recortadas, o que confere maior eficiência operacional e menor custo com

maquinário. Favorece ainda, o atendimento da moagem da usina com menor número de fornecedores e arrendatários, reduzindo o custo de gestão de contratos e risco de litígio.

Esse efeito “poupa terra” do sistema irrigado de produção que se estende indiretamente para as áreas de sequeiro gera ainda um efeito formidável na sustentabilidade ambiental do setor sucroenergético, dado que também reduz a pressão de expansão de área plantada de cana sob áreas de grãos, pastagem ou de vegetação nativa. O ganho de eficiência ambiental também pode ser convertido em aumento das receitas com a venda de mais CBIOS - créditos de carbono (KLEIN *et al.*, 2019), com a manutenção e ganho de mercados através de novas e melhores certificações ambientais. E ainda pode reduzir os custos de investimento e manutenção de áreas de preservação permanente e reserva legal.

7.5.1.10 Quebra de safra e previsibilidade de produção

Uma característica intrínseca da agricultura é o risco da dependência das condições climáticas (GOUVÊA *et al.*, 2009; SANTOS; SENTELHAS, 2014; SILALERTRUKSA; GHEEWALA, 2018; CAMBRAIA NETO *et al.*, 2021). A quebra de safra por questões climáticas, além da redução de margem de lucro na safra corrente, gera impactos na brotação e no custeio da lavoura do ano seguinte, impactando a população de plantas e a produtividade da próxima safra e de todos os anos vindouros, reduzindo a longevidade do canavial.

A vulnerabilidade climática ainda eleva o custo dos seguros e dificulta o cumprimento de contratos de empréstimo, arrendamento, venda de açúcar e etanol, energia elétrica, pagamento de fornecedores, etc. O risco climático ainda atinge a fração da produção que pode ser pré-comercializada com segurança, e eleva o custo de compra de cana no mercado *spot*. Por conseguinte, afeta o reinvestimento na renovação e modernização dos canaviais, frota, indústria, etc. Ou seja, desmobiliza e inibe os investimentos no setor, comprometendo não só seu crescimento, mas também sua competitividade e sustentabilidade.

Por outro lado, a menor vulnerabilidade climática do sistema irrigado, além de mitigar os aspectos acima, aumenta a probabilidade do cumprimento de metas e favorece o ambiente de trabalho e de negócio, gerando um ciclo virtuoso de motivação e dedicação da equipe, além de ser mais atraente para os melhores profissionais do mercado.

Ademais, a quebra de safra por razões climáticas em determinado ano é um fenômeno que, via de regra, impacta não somente uma única usina, mas o setor como um todo. Isso gera quebra de oferta que, então, exerce pressão sobre os preços e acaba se tornando uma oportunidade para ganho de *Market share* e competitividade das usinas que se diferenciam com sistema irrigado. Ou seja, no momento de crise climática, além de reduzirem sua vulnerabilidade, usinas com sistema irrigado de produção ampliam sua vantagem competitiva de forma mais acelerada e acentuada.

E as incertezas trazidas pelas mudanças climáticas ainda exacerbam essa vantagem do sistema irrigado. Vários prognósticos apontam para maior probabilidade de cenários de maior deficiência hídrica no Cerrado, trazendo eventos de seca cada vez mais frequentes e mais intensos (SANTOS; SENTELHAS, 2014; DIAS; SENTELHAS, 2019). Por essa razão, lastrear pelo menos uma fração da produção sob sistema irrigado tem um impacto que vai muito além do retorno direto de produtividade da área específica. E isso é ainda mais relevante para a sobrevivência dos empreendimentos em *commodities*, que mesmo passando por ciclos de alta e baixa de preços, permanecem com a tendência de achatamento de margem (CASHIN *et al.*, 2002; KABLAN *et al.*, 2017).

7.5.2 Desafios para o ganho de escala

Para acelerar o ganho de escala do sistema irrigado de produção no país, duas frentes precisam ser trabalhadas. A primeira diz respeito à **desconstrução de alguns mitos** e, a segunda, ao **avanço da inovação tecnológica** para o estabelecimento de premissas e protocolos cada vez mais sólidos para assegurar ganhos de sustentabilidade econômica, social e ambiental para o setor sucroenergético.

7.5.2.1 Superar mitos

7.5.2.1.1 Mito: cana-de-açúcar é rústica e não precisa de muita água ou irrigação para sobreviver

O objetivo da produção comercial não é a mera sobrevivência da planta. Ao contrário, um sistema de produção sustentável precisa oferecer condições para que a cultura entregue o melhor de seu potencial genético e seja o mais eficiente possível. Nesse sentido, a afirmação acima é um grande mito.

Seguindo a lógica da Lei dos Mínimos de Liebig (KREUZ *et al.*, 1995), o fator de produção mais restritivo pode não ser a água em um contexto de baixíssimo aprimoramento tecnológico e de gestão. Mas a realidade do setor sucroenergético nacional é muito diferente daquela de 40, 50 anos atrás. É evidente o aprimoramento do manejo varietal, da fertilidade dos solos, de ervas-daninhas, fitossanitário, e do melhor domínio do plantio e colheita mecanizados, além de tantos outros aprimoramentos tecnológicos e gerenciais.

Com o aprimoramento do manejo agrônomo, migração da produção para o Cerrado, e mudanças climáticas que geram eventos de seca mais frequentes e mais intensos, a água, que já era o principal fator de produção, passou a ganhar ainda mais relevância. Por essas razões, é um mito dizer que a cana-de-açúcar, por ser uma planta rústica, não precisa de irrigação.

7.5.2.1.2 Mito: Cana sob sistema irrigado consome mais água do que em sequeiro

É mais apropriado substituir a palavra consumo pela palavra uso. O consumo traz uma visão equivocada de que a água que passa pelo interior da planta é permanentemente perdida, desaparece do sistema hídrico (ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2018; SANTIAGO *et al.*, 2018).

E é um equívoco concluir que a cana-de-açúcar em sistema irrigado, por utilizar água proveniente dos cursos d'água, usa mais água que uma cana de sequeiro. A cana de sequeiro também precisa de água para sobreviver e produzir. Como qualquer outra planta, ela absorve parte da água da chuva com suas raízes, transportando-a através de seus colmos até chegar às folhas, de onde é liberada na atmosfera pela transpiração. Nesse aspecto, a cana irrigada é idêntica à de sequeiro, mas, além da água da chuva, também transpira a água que lhe foi entregue pela irrigação no período de seca.

A cana irrigada, por sofrer menor estresse hídrico e nutricional, consegue produzir mais colmos com cada gota de água que utiliza e extrair mais de seu potencial genético (BUFON *et al.*, 2016). Por isso, para uma visão mais holística sobre esse aspecto, precisamos utilizar o conceito de eficiência de uso da água, ou produtividade da água (PA). Num contexto mais amplo, a PA é o retorno líquido por unidade de água utilizada. Na produção agrícola, melhorar a PA requer aumentar a produção de alimentos, energia e fibra, o retorno financeiro, a qualidade de vida e os serviços ambientais com menor quantidade de água.

Como a demanda de cana-de-açúcar não é regida pelo setor sucroenergético, mas pelo mercado consumidor, seu modo de vida e sua demanda por alimento, energia, etc., o que

cabe ao setor sucroenergético é responder como será produzida essa cana, com que níveis de eficiência e sustentabilidade.

Como será detalhado mais adiante, a cana irrigada usa menos água para produzir cada tonelada de colmos, açúcar, etanol, etc. Por isso, se o setor sucroenergético atender 20, 40 ou 60% da demanda anual de cana-de-açúcar sob sistema irrigado, no final das contas, a necessidade de água e terra para atender a demanda anual do mercado, na verdade, reduzirá.

7.5.2.1.3 Mito: Irrigar cana-de-açúcar é uma agressão ao meio ambiente

Trata-se de outro grande mito. O sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar, como qualquer outro, deve obedecer às melhores práticas de sustentabilidade e atender rigorosamente às legislações ambientais. O mandato do produtor não é mais, simplesmente, produzir. Mas produzir com sustentabilidade ambiental e social, e sob práticas de governança que atendam os novos anseios e paradigmas da sociedade.

Com relação à sustentabilidade do uso da água, isso inclui utilizar exclusivamente água outorgada. A outorga é concedida com base no histórico de vazões do manancial, garantindo que a maior fração permanecerá intacta, preservando a vida do ecossistema (PINTO *et al.*, 2016). Para tal, é crucial uma gestão responsável dos recursos hídricos pelos órgãos públicos e a participação efetiva, cooperativa e harmoniosa dos usuários nos comitês de bacia.

Para análise técnica e racional do uso sustentável da água no sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar, é fundamental compreender os seguintes fatores: (i) a água utilizada por toda agricultura irrigada do Brasil representa menos de 0,6% do que existe em nossos rios (CAMBRAIA NETO *et al.*, 2021); (ii) o Brasil possui umas das legislações de água mais modernas do mundo (Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997); e, (iii) é possível gerar grandes impactos positivos ao disponibilizar para a produção irrigada, de forma sustentável, uma pequena fração da vazão outorgável ainda disponível em muitas regiões do Brasil e do Cerrado, e isso só depende de gestão técnica e responsável, focada na sustentabilidade ambiental.

O fato é que o sistema irrigado é uma oportunidade para o Brasil e o setor sucroenergético reduzirem a quantidade de água hoje utilizada para atender a demanda do mercado por cana-de-açúcar, açúcar, etanol, energia elétrica, etc.

Com relação à sustentabilidade do uso da terra, o ganho de eficiência promovido pelo sistema irrigado implica em verticalização da produção, ou seja, produz-se mais em menor área. Com isso, a quantidade de terra necessária para atender a demanda de cana-de-açúcar poderia ser substancialmente reduzida, sobrando terra para ser destinada a outros usos, inclusive para preservação de vegetação nativa. Ademais, a verticalização através do ganho de eficiência, que gera um efeito "poupa-terra", tem sido uma marca da agricultura brasileira (SCARPARE *et al.*, 2016; VIEIRA FILHO, 2016; RESENDE *et al.*, 2021).

E quando adotada sob os conceitos modernos de irrigação deficitária (ou irrigação por *deficit* controlado) e utilizando exclusivamente a disponibilidade hídrica outorgável, a produção irrigada é mundialmente reconhecida com uma das melhores alternativas para o aumento da sustentabilidade ambiental e do uso racional da água, sobretudo no contexto das mudanças climáticas (FERERRES; SORIANO, 2006; GEETS; RAES, 2009; MOLDEN *et al.*, 2010; PATLE *et al.*, 2019; KIJNE *et al.*, 2020; MALHI *et al.*, 2021; GIORDANO *et al.*, 2021). Por essas razões e diversas outras já citadas anteriormente, sistemas irrigados de produção mais modernos, eficientes, verticalizados e racionalmente conduzidos, podem propiciar maior sustentabilidade ambiental do que a produção de sequeiro.

7.5.2.1.4 Mito: Produzir em sistema irrigado é adicionar água ao sistema de sequeiro

Definitivamente, trata-se de outro grande mito. A produção irrigada possui dinâmica e práticas bem distintas das de sequeiro. A mera adição de água a um sistema de sequeiro sem ajustes na escolha de variedades, nutrição, tratos fitossanitários, maturação, logística e outros fatores, jamais permitirá extrair o potencial do sistema irrigado. Portanto, um sistema irrigado de produção não se resume à adição de água a um sistema de sequeiro.

7.5.2.2 Avançar no desenvolvimento tecnológico

Além de desconstruir gradativamente os mitos sobre o sistema irrigado de cana-de-açúcar, também é fundamental o desenvolvimento tecnológico, das premissas, protocolos, etc. Vejamos algumas demandas de ajuste tecnológico para produção eficiente sob sistema irrigado de produção.

7.5.2.2.1 Variedades para produção irrigada

Os programas de melhoramento de cana-de-açúcar no Brasil conseguiram incorporar importante potencial produtivo às novas variedades, sobretudo para os ambientes edafoclimáticos com maior deficiência hídrica. Como a produção brasileira ocorre majoritariamente sob sistema de sequeiro, as variedades que se destacam nas usinas são as que conferem maior tolerância à seca. Consequentemente, essas se tornam os futuros parentais para os próximos cruzamentos. Como resultado, após décadas de melhoramento genético selecionando variedades com maior tolerância à seca, corre-se o risco de estreitamento da base genética para materiais com essa característica. Ocorre que esse padrão genético frequentemente é antagônico aos padrões genéticos de responsividade à irrigação (CARVALHO; FURTADO, 2013; MORAIS *et al.*, 2015). Por exemplo, frequentemente, as variedades mais responsivas ao aumento da oferta hídrica são aquelas que, sob aumento do *deficit* de pressão de vapor, são menos sensíveis ao fechamento estomatal, retardam a senescência foliar e enrolamento de folhas, etc. E essas são justamente algumas das características desejáveis para conferir maior tolerância à seca.

Atualmente, nenhum programa de melhoramento brasileiro declara oficialmente possuir um programa específico para o sistema irrigado de produção. São conhecidas, contudo, algumas iniciativas que buscam identificar características desejáveis para produção irrigada. Por vezes, isso é realizado através da alocação de *seedlings* sob áreas irrigadas. Mas não necessariamente em áreas cuja lâmina de projeto, manejo da irrigação e manejo agrônômico estejam ajustados segundo as melhores técnicas para sistema irrigado de alto padrão. Assim, o potencial de resposta dos materiais é limitado. O fato dessas iniciativas também não possuírem a mesma envergadura e repetibilidade dos programas para variedades de sequeiro reduz a eficiência e eficácia da seleção.

Se por um lado o sistema irrigado de produção ainda não possui área relevante se comparado à produção de sequeiro, por outro, a ausência de programas fortes de seleção de variedades para área irrigada traz desafios ainda maiores para o ganho de desempenho e relevância para área irrigada.

A alternativa que tem sido adotada pelos produtores é, com base em conhecimento tácito e empírico, tentar identificar dentre as variedades de sequeiro aquelas que, talvez, possam apresentar bom desempenho sob sistema irrigado. Mas, mesmo os produtores com maior experiência em sistema irrigado relatam a dificuldade de conferir longevidade com elevados patamares de produção utilizando as variedades de sequeiro. E após longo período de análise pelo método de "tentativa e erro", a recomendação de variedades mais adequadas

à produção irrigada acontece quando uma enormidade de novas variedades já está disponível para produção de sequeiro.

Algumas das características mais desejáveis para seleção de variedades adaptadas ao sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar são: (i) responsividade acentuada de TAH ao aumento da satisfação hídrica; (ii) manutenção de elevadas taxas de condutância estomática e transpiração sob condições de elevado *deficit* de pressão de vapor; (iii) velocidade de crescimento inicial para fechamento mais rápido da entrelinha e aumento da eficiência de uso de radiação; (iv) porte ereto de colmos; (v) resistência ao acamamento; (vi) resistência ao arranquio de soqueira; (vii) resistência ao enraizamento e brotação lateral após acamamento; e, (viii) tolerância à doenças que se beneficiam do microclima mais úmido.

A responsividade acentuada de uma variedade ao aumento da satisfação hídrica, por exemplo, não é suficiente para sua indicação ao sistema irrigado se, por exemplo, as demais características não lhe conferem capacidade de manutenção das elevadas produtividades por 10-12 anos. Algumas variedades produzem acima de 250 t ha⁻¹ no primeiro ano, mas em razão do tombamento e enraizamento precoce, além da suscetibilidade ao arranquio de soqueira e doenças fúngicas, têm desempenho abaixo de 130 t ha⁻¹ já no segundo ou terceiro ano. Por outro lado, variedades com elevada tolerância ao acamamento, porte ereto de colmos e boa longevidade, mas que não entregam responsividade acentuada de TAH sob aumento da satisfação hídrica, também não são indicadas para o sistema irrigado de produção.

7.5.2.2 Manejo nutricional

Perfil do solo: Um dos paradigmas mais importantes para serem ajustados do sistema de sequeiro para o sistema irrigado diz respeito à construção de um perfil de solo apto para suportar uma elevada produtividade por 10-12 anos, sem necessidade de operações que impliquem em movimentação de solo e, conseqüentemente, renovação precoce do canavial.

Se no sistema de sequeiro podemos incorporar corretivos e matéria orgânica em profundidade, e utilizar cultura de rotação a cada 5-6 anos. Por ocasião da renovação, no sistema irrigado essa janela de intervenção só ocorrerá depois de 10-12 anos. Ou seja, a janela de oportunidade de construir esse perfil diferenciado ocorre exclusivamente na implantação ou renovação da área. Se essa janela não for bem planejada e aproveitada, os impactos negativos na produção só acabarão após 12 anos.

Outro aspecto a ser considerado na construção do perfil do solo é que a adequação do nível de disponibilidade de nutrientes tem a ver com seu valor de mercado, mas também com a intensificação do sistema produtivo. Ou seja, quanto mais verticalizado o sistema, mais rigoroso deve ser o critério de nível de disponibilidade de nutrientes.

Por isso, todas as práticas agrônômicas que demandam movimentação de solo, como o uso de cultura de rotação, incorporação profunda de matéria orgânica, calcário, fósforo e micronutrientes devem ser ajustadas para o sistema irrigado de produção.

Fosfatagem: Para produção de sequeiro, recomenda-se elevar a disponibilidade inicial de fósforo no solo para níveis que atendam de 70 a 80% do potencial produtivo, algo próximo a 15 ppm (resina) (REIN *et al.*, 2016). Para sistema irrigado corrigimos esse nível para, pelo menos, 25 ppm de fósforo (resina), segundo método descrito em Rein *et al.* (2016).

Correção da acidez de subsuperfície: A cana-de-açúcar é menos afetada pela acidez do solo do que pela deficiência de cálcio e magnésio, ou presença de alumínio. Correções de acidez na implantação ou renovação do canavial para elevar o percentual de saturação por bases (V) para 50% atendem a grande maioria das áreas de sequeiro (SOUSA *et al.*, 2015). Contudo, para sistema irrigado de produção, recomenda-se calagem com incorporação profunda para elevar o solo a 70% de saturação de bases. Ademais, recomenda-se correções anuais com calcário em dose equivalente ao poder de acidificação do fertilizante

nitrogenado utilizado, com aplicação a lanço, na superfície, como forma de manter o solo corrigido por mais tempo.

Por ocasião da implantação do canavial ou reforma, recomenda-se o uso do gesso, aplicado a lanço na superfície, em área total, conforme metodologia de cálculo proposta por Sousa *et al.* (2015). Também se recomenda que, anualmente, pequenas doses de gesso sejam aplicadas na superfície como fonte suplementar de cálcio, magnésio e enxofre.

Correção de micronutrientes: Por ocasião do preparo de solo, também recomenda-se realizar a correção de micronutrientes (SOUSA; LOBATO, 2004). Essa prática não eliminará completamente a necessidade de futuras adubações foliares com micronutrientes. Mas, certamente, essa correção de micronutrientes no solo evitará custos elevados com aplicação de micro via foliar.

Matéria orgânica e atividade biológica: A incorporação de matéria orgânica em profundidade e o uso de cultura de rotação, por vezes, é deixada de lado em áreas de sequeiro em função de alguma dificuldade logística, falha de planejamento, etc. Considerando o peso que a matéria orgânica e a atividade biológica têm na capacidade do perfil do solo de sustentar elevadas produtividades por muitos anos, essas práticas não podem ser negligenciadas. É encorajado o uso das técnicas mais modernas de rotação, inclusive, se possível, adotando mix de fabáceas (leguminosas). A inclusão de poáceas (gramíneas) do gênero *Brachiaria* (*Brachiaria* spp.) também pode trazer benefícios semelhantes aos que têm trazido ao solo, produtividade e sustentabilidade da produção de grãos. O aporte frequente de matéria orgânica na superfície também é recomendado para manutenção de teores elevados de matéria orgânica do solo.

Plantio sem falhas: Se em sistema de sequeiro, o plantio sem falhas já é importante, no sistema irrigado essa importância é ainda maior. A verticalização reduz o custo por tonelada, mas eleva o custo por área. Por isso, o custo de oportunidade do recurso despendido em compra ou arrendamento da terra, preparo do solo, adubação, tratos fitossanitários, etc., em qualquer metro linear sem a presença de plantas é superior no sistema irrigado. Apesar deste sistema favorecer a compensação de falhas com crescimento adicional das touceiras na extremidade das falhas, a compensação não é integral. Por isso, o plantio com zero falha é fundamental para o sistema irrigado de produção.

Outro aspecto relevante a ser considerado em sistema irrigado é o emprego de mudas pré-brotadas (MPB). Pela maior longevidade, o custo de capital de MPB por tonelada de açúcar extraído da área será reduzido substancialmente, aumentando sua viabilidade. Também favorecem a recomendação do MPB sua menor mortalidade por deficiência hídrica nesse sistema, além da maior velocidade de incorporação de novas variedades na usina, e o ganho de velocidade de crescimento que resultará em maior produtividade no primeiro ano de cultivo (MARTINS *et al.*, 2015; COELHO *et al.*, 2018).

Adubação de soqueira: Em sistema irrigado de produção, a dose de macro e micronutrientes durante o ciclo devem ser ajustadas proporcionalmente à exportação de nutrientes, que aumentará em relação às áreas de sequeiro por conta da maior produtividade. Para aumentar a eficiência de utilização de nutrientes também é recomendado o fracionamento das adubações, utilizando a fertirrigação, e considerando a curva de exportação de cada nutriente ao longo do ciclo.

Alguns estudos sobre dosagem de nutrientes para produção irrigada têm sido realizados para auxiliar o ajuste necessário entre o aporte de nutrientes e a extração pela cultura (MOURA *et al.*, 2005; DANTAS NETO *et al.*, 2006; ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2012; GOPALASUNDARAM *et al.*, 2012; SIMÕES *et al.*, 2019; WANDERLEY *et al.*, 2021). Uma rede de experimentos da Embrapa Cerrados também está buscando esses refinamentos de protocolo de nutrição para produção irrigada.

Sugere-se atenção para adubações nitrogenadas quando restar menos de 5 meses para a colheita, dado que ela pode inibir a concentração de açúcar no colmo (MEGDA *et al.*, 2012; SCHULTZ *et al.*, 2015). Em contrapartida, aumentar a oferta de potássio, boro e magnésio colaboram para a maturação da cana (OTTO *et al.*, 2010; CRUSCIOL *et al.*, 2017; GARCIA *et al.*, 2020).

Em sistema irrigado de produção, a presença de raízes é abundante tanto em profundidade quanto em toda a largura entre as linhas de cultivo. Por isso, se houver necessidade de aplicação de fertilizantes na superfície, sem ser através da fertirrigação, sugere-se não concentrar as adubações ou corretivos estritamente ao lado da soqueira. Ao contrário, recomenda-se que adubações e correções sejam realizadas a lanço, em área total. Além de reduzir o custo da operação, desejamos um ambiente nutricionalmente rico em toda área, para que a planta também desenvolva raízes e explore com eficiência água e nutrientes na entrelinha, sobretudo quando chegar o período de chuvas e a frequência de irrigação for reduzida.

Tratos fitossanitários: Os tratamentos fitossanitários em sistema irrigado de produção também precisam ser ajustados em relação às práticas de sequeiro.

O microclima em sistema irrigado pode ser mais favorável para propagação de algumas pragas e doenças (BAILEY; BECHET, 1995). Nesses casos, ajustes à intensidade e frequência de monitoramento podem ser necessários. Por outro lado, o microclima mais úmido pode inibir pragas e doenças que se manifestam predominantemente em ambiente mais seco (SENTELHAS, 2016).

Adicionalmente, o microclima mais úmido das áreas irrigadas pode, eventualmente, ampliar janelas e oportunidades de uso de controle biológico (SIMÕES *et al.*, 2019). Também é possível que favoreça a manutenção de níveis mais elevados da população de inimigos naturais, reduzindo a necessidade de intervenção de controle químico.

Quanto aos níveis críticos de dano econômico e controle, é necessário avaliar se os índices que serão adotados para o manejo integrado de pragas e doenças na produção irrigada não têm a ver com padrões de produtividade, velocidade de propagação e dano econômico da praga ou doença em canais de sequeiro. Se esse for o caso, pode ser necessário ajustar os índices críticos de controle. Atenção especial é recomendada para doenças fúngicas, sobretudo em canal adulto com eventos sucessivos de acamamento (CONCEIÇÃO; SILVA, 2011).

Para o manejo fitossanitário, uma das grandes vantagens do sistema irrigado é a ampliação do espectro de estratégias que possibilitam a quimigação - aplicação de insumos químicos e biológicos utilizando a água de irrigação como veículo, seja em pivôs, seja com gotejamento subsuperficial (ANDRADE; BRITO, 2006). A quimigação é especialmente vantajosa quando a grande biomassa de um canal adulto limita o acesso ao alvo e a eficiência das aplicações aéreas e tratorizadas de baixo volume de calda, como por exemplo, no combate às pragas de solo (GARCIA-SALDAÑA *et al.*, 2019; TANG *et al.*, 2020).

7.6 Considerações finais

A transição de fração substancial da produção de cana-de-açúcar brasileira do sistema de sequeiro para o sistema irrigado de produção não é mais dúvida, o que é resultado: (i) da já consolidada e crescente migração da produção sucroenergética para o Cerrado, (ii) da estagnação da produtividade, que é resultado do represamento do potencial genético pelo *deficit* hídrico acentuado, e (iii) da urgência de verticalização da produção, eficiência, e sustentabilidades econômica, social e ambiental do setor sucroenergético brasileiro. A velocidade com que essa transição ocorrerá dependerá, além da saúde financeira das empresas, da difusão das inovações tecnológicas em sistema irrigado acumuladas na última

década e da multiplicação de vitrines tecnológicas e áreas piloto em escala comercial, para evidenciar os resultados possíveis.

Referências

- ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I. Vegetative development and production of sugarcane varieties as a function of water availability and thermic units. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.5, p.1441-1448, 2008.
- ANDRADE, C.L.T.; BRITO, R.A.L. Métodos de Irrigação e Quimigação. **Circular Técnica 86**-Embrapa, n.1, p.1-17, 2006.
- ANDRADE, G.O. O ciclo da cana-de-açúcar no Rio Grande do Norte. **Revista de História da USP**, São Paulo, n.35, p.123-129, 1958.
- ANDRADE, M.C. **A terra e o homem no Nordeste**: contribuição ao estudo da questão agrária no Nordeste. 7. Ed. São Paulo: Cortez, 2005.
- ANDRADE, M.C. Espaço e tempo na agroindústria canavieira de Pernambuco. **Estudos Avançados**, São Paulo, n.15, v.43, p.267-280, 2001.
- ANDRADE, M.C. **Modernização e pobreza**: a expansão da agroindústria canavieira e seu impacto ecológico e social. São Paulo: Unesp, 1994.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q.; DUARTE, J.A.L.; BRAGA, D.L.; NOLETO, D.H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.1, p.76-84, 2012.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; NOLETO, D.H.; BASTOS, E.A.; MOURA, M.S.B.; ANJOS, J.C.R. dos. Demanda hídrica da cana-de-açúcar, por balanço de energia, na microrregião de Teresina, Piauí. **Agrometeoros**, v.25, n.1, p.217-226, 2018.
- BACCHI, J.G.G.M.R.P.; VALDES, L.R.E.T.B.C. **Crescimento e produtividade**. Conab, v.2013, p.239-246, 2013.
- BAILEY, R.A.; BECHET, G.R. The effect of ratoon stunting disease on the yield of some south African sugarcane varieties under irrigated and rainfed conditions. **Proceedings of The South African Sugar Technologists**, p.5, 1995.
- BARBOSA, F.; SHIKIDA, P.; VIAN, C.F. The expansion of sugarcane agroindustry in the Central West Brazilian (1975-2017): a historical-economic analysis. **Gestão e Regionalidade**, v.36, p.283-297, 2020.
- BARBOSA, T.S.; CARVALHO, A.M.; SOUSA, T.R.; ALVIM, R.; VIEIRA, L.V. BUFON, V.B. Decomposição do palhico residual da cana-de-açúcar irrigada no Cerrado. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2020.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, D.D.; SOARES, A.A. **Manual de irrigação**. Viçosa: Imprensa Universitária, 545p., 2019.
- BOLFE, E.L.; SANO, E.E.; CAMPOS, S.K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado**: análises e projeções. Brasília: Embrapa, 2020. v.1, 308p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/212381/1/LV-DINAMICA-AGRICOLA-CERRADO-2020.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2020.
- BUFON, V.B.; MARCANTE, N.C.; SANTOS, J.M. Acúmulo e partição de biomassa da cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos na região do cerrado. **Stab**, p.178-183, 2016.
- CAMBRAIA NETO, A.J.; RODRIGUES, L.N.; SILVA, D.D.; ALTHOFF, D. Impact of climate change on groundwater recharge in a Brazilian Savannah watershed. **Theoretical and Applied Climatology**, v.143, n.3-4, p.1425-1436, 2021.

- CAMPOS, F.H.; BIGATON, A.; TORRES DA SILVA, H.J.; MARQUES, P.V.; COELHO, R.D. Análise de rentabilidade de irrigação na cana-de-açúcar: estudo de caso de uma usina de Goiás. **Revista Pecege**, v.3, n.2, p.124-133, 2017.
- CAMPOS, J.D.O.; CHAVES, H.M.L. Tendências e variabilidades nas séries históricas de precipitação mensal e anual no bioma Cerrado no período 1977-2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.1880, p.157-169, 2020.
- CAMPOS, P.F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; FONTOURA, P.R. **Resposta de variedades de cana-de-açúcar à irrigação com deficit no Cerrado**, p.31-36, 2014.
- CAMPOS, P.F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; FONTOURA, P.R.; EVANGELISTA, A.W.P. Variedades de cana-de-açúcar submetidas à irrigação suplementar no cerrado goiano. **Engenharia Agrícola**, v.34, n.6, p.1139-1149, 2014.
- CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agrícola**, v.70, n.6, p.449-456, 2013.
- CARVALHO, C.P.O. Novas estratégias competitivas para o novo ambiente institucional: o caso do setor sucroalcooleiro em Alagoas: 1990/2001. In: MORAES, M.A.F.D.; SHIKIDA, P.F.A. (org.). **Agroindústria canavieira no Brasil: Evolução, desenvolvimento e desafio**. São Paulo: Atlas, 2002.
- CARVALHO, K.S.; VIANNA, M.S.; NASSIF, D.S.P. Effect of soil straw cover on evaporation, transpiration, and evapotranspiration in sugarcane cultivation. **Australian Journal of Crop Science**, v.13, n.8, p.1362-1368, 2019.
- CARVALHO, S.A.D.; FURTADO, A.T. O melhoramento genético de cana-de-açúcar no Brasil e o desafio das mudanças climáticas globais. **Revista Gestão e Conexões**, v.2, n.1, p.22-46, 2013.
- CASHIN, P.; MCDERMOTT, C.; MCCDERMOTT, C. The long-run behavior of commodity prices: small trends and big variability. **IMF Staff Papers**, v.49, p.2-2, 2002.
- CASTILLO, R. **Dinâmicas recentes do setor sucroenergético no Brasil: competitividade regional e expansão para o bioma cerrado**. GEOgraphia, Niterói: Universidade Federal Fluminense - UFF, Programa de Pós-Graduação em Geografia, v.17, n.35, p.95-119, 2015.
- CASTIONI, G.A.; CHERUBIN, M.R.; MENANDRO, L.M.S. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. **Soil and Tillage Research**, v.184, n.5, p.301-309, 2018.
- CHERUBIN, M.R.; KARLEN, D.L.; FRANCO, A.L.C.; TORMENA, C.A.; CERRI, C.E.P.; DAVIES, C.A.; CERRI, C.C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v.267, p.156-168, 2016.
- COELHO, A.P.; DALRI, A.B.; FARIA, R.T. Productivity and technological quality of sugarcane cultivars fertigated and planted through pre-sprouted seedlings. **Australian Journal of Crop Science**, v.12, n.8, p.1265-1271, 2018.
- COELHO, A.P.; DALRI, A.B.; FARIA, R.T.; LANDELL, E.P.A.; PALARETTI, L.F. Perfilhamento da cana-de-açúcar cultivada com e sem irrigação suplementar e plantada por mudas pré-brotadas: um novo conceito. **Acta Iguazu**, n.5, p.71-84, 2018.
- CONCEIÇÃO, L.L.; SILVA, C.M. O controle biológico e suas aplicações na cultura de cana-de-açúcar. **Campo Digital**, v.6, n.1, p.14-25, 2011.
- COSTA, D.H.; MONDARDO, M.L. A modernização da agricultura no Oeste baiano: migração e novas territorialidades. **Revista Geonorte**, v.7, n.1, p.520-536, 2013.
- CRUSCIOL, C.A.C.; ROSSATO, O.B.; FOLTRAN, R.; MARTELLO, J.M.; NASCIMENTO, C.A.C. Soil fertility, sugarcane yield affected by limestone, silicate, and gypsum application. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.48, n.19, p.2314-2323, 2017.
- DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J.L.C.; FARIAS, C.H.D.A.; AZEVEDO, H.M.; AZEVEDO, C.A.V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.283-288, 2006.

- DIAS, H.B.; SENTELHAS, P.C. Dimensioning the impact of irrigation on sugarcane yield in Brazil. **Sugar Tech**, v.21, n.1, p.29-37, 2019.
- EISENBERG, P.L. **Modernização sem mudança**: a indústria açucareira em Pernambuco, 1840-1910. Rio de Janeiro. Paz e Terra, 294p, 1977.
- FERERES, E.; SORIANO, M.A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.2, p.147-159, 2007.
- FILOSO, S.; CARMO, J.B.; MARDEGAN, S.F.; LINS, S.R.M; GOMES, T.F.; MARTINELLI, L.A. Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals. **Renewable Sustainable Energy Review**, v.52, p.1847-1856, 2015.
- GARCIA, A.; CRUSCIOL, C.A.C.; MCCRAY, J.M. Magnesium as a promoter of technological quality in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.20, n.1, p.19-30, 2020.
- GARCÍA-SALDAÑA, A.; LANDEROS-SÁNCHEZ, C.; CASTAÑEDA-CHÁVEZ, M. Fertirrigation with low-pressure multi-gate irrigation systems in sugarcane agroecosystems: A Review. **Pedosphere**, v.29, n.1, p.1-11, 2019.
- GAROFALO, D.F.T.; PACKER, A.P.; RAMOS, N.P.; KONDO, V.Y.; MATSUURA, M.I.S.F.; CABRAL, O.M.R. **Dinâmica na cultura da cana-de-açúcar no Brasil: 1990 a 2018**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente (Documentos, 124), 2020.
- GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, v.96, n.9, p.1275-1284, 2009.
- GIORDANO, M.; SCHEIERLING, S.M.; TRÉGUER, D.O.; TURRAL, H.; MCCORNICK, P.G. Moving beyond 'more crop per drop': insights from two decades of research on agricultural water productivity. **International Journal of Water Resources Development**, v.37, n.1, p.137-161, 2021.
- GOPALASUNDARAM, P.; BHASKARAN, A.; RAKKIYAPPAN, P. Integrated nutrient management in sugarcane. **Sugar Tech**, v.14, n.1, p.3-20, 2012.
- GOUVÊA, J.R.F.; SENTELHAS, P.C.; GAZZOLA, S.T.; SANTOS, M.C. Climate changes and technological advances: Impacts on sugarcane productivity in tropical Southern Brazil. **Scientia Agricola**, v.66, n.5, p.593-605, 2009.
- INMAN-BAMBER, N.G. **Effect of age and season on components of yield of sugarcane in South Africa**, n.5, p.23-27, 1994.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dinâmica territorial da produção agropecuária**. A geografia da cana. Rio de Janeiro. Ed. IBGE. 170p. 2017.
- KABLAN, S.; FTITI, Z.; GUESMI, K. Commodity price cycles and financial pressures in African commodities exporters. **Emerging Markets Review**, v.30, p.215-231, 2017.
- KLEIN, B.C.; CHAGAS, M.F.; WATANABE, M.D.B.; BONOMI, A.; MACIEL FILHO, R. Low carbon biofuels and the new Brazilian national biofuel policy (RenovaBio): a case study for sugarcane mills and integrated sugarcane-microalgae biorefineries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.115, n.8, p.109365, 2019.
- KREUZ, C.L.; LANZER, E.A.; PARIS, Q. Funções de produção Von Liebig com rendimentos decrescentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, n.1, p.95-106, 1995.
- LI, S.; LI, Y.; LIN, H.; FENG, H.; DYCK, M. Effects of different mulching technologies on evapotranspiration and summer maize growth. **Agricultural Water Management**, v.201, p.309-318, 2018.
- MACENA, F.A.; EVANGELISTA, B.A.; MALAQUIAS, J.V.; OLIVEIRA, A.D.; MULLER, A.G. **Análise temporal de variáveis climáticas monitoradas entre 1974 e 2013 na Estação Principal da Embrapa Cerrados**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, p.121, 2009.
- MACHADO, T.; NEVES, M.F.; BIALOSKORSKI NETO, S. Viabilidade econômica da irrigação localizada na cultura da cana-de-açúcar. **Sober**, n.2, p.1-11, 2002.

- MALHI, G.S.; KAUR, M.; KAUSHIK, P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. **Sustainability**, v.13, p.1318, 2021.
- MANHÃES, C.M.C.; GARCIA, R.F.; FRANCELINO, F.M.A.; FRANCELINO, H.O.; COELHO, F.C. Fatores que afetam a brotação e perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v.17, n.1, p.163-181, 2015.
- MARCUZZO, F.F.N.; MELO, D.C.R.; COSTA, H.C. Sazonalidade e distribuição espaço-temporal das chuvas no bioma do Cerrado do Estado do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.17, p.77-86, 2012.
- MARQUES POSTAL, A.; PASHAEI KAMALI, F.; ASVELD, L.; OSSEWEIJER, P.; SILVEIRA, J.M.F.J.D. The impact of sugarcane expansion in Brazil: Local stakeholders' perceptions. **Journal of Rural Studies**, v.73, October, 2019, p.147-162, 2020.
- MARTINS, A.P.C.; ALBRECHT, L.P.; CASTALDO, J.; CARNEIRO, A.R.; ZUCARELI, V. Novas tecnologias no plantio de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Journal of Agronomic Sciences**, v.4, p.301-317, 2015.
- MEGDA, M.X.V.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; VITTI, A.C. Eficiência agronômica de adubos nitrogenados em soqueira de cana-de-açúcar colhida sem queima. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.12, p.1681-1690, 2008.
- MELO, J.E. **O açúcar no café: agromanufatura açucareira e modernização em São Paulo (1850-1910)**. 2009. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- MENDES, I.C.; CHAER, G.M.; SOUSA, D.M.G. Bioanálise de solo: a mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola. **Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia**, n.8, p.1-11, 2020.
- MOLDEN, D.; OWEIS, T.; STEDUTO, P. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. **Agricultural Water Management**, v.97, n.4, p.528-535, 2010.
- MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Potential and actual sugarcane yields in southern Brazil as a function of climate conditions and crop management. **Sugar Tech**, v.16, n.3, p.264-276, 2014.
- MORAIS, L.K.; CURSI, D. E.; MESSIAS, J. **Melhoramento genético da cana-de-açúcar**. Embrapa, 2015. Disponível em: www.embrapa.com.br. Acesso em: 1 abr. 2021.
- MOURA, M.V.P.S.; FARIAS, C.H.A.; AZEVEDO, C.A.V. Levels of manuring in the sugar-cane crop, first leaf, with and without irrigation. **Ciência e Agrotecnologia**, v.29, n.4, p.753-760, 2005.
- NG CHEONG, L.R.; TEELUCK, M. The practice of green cane trash blanketing in the irrigated zone of Mauritius: effects on soil moisture and water use efficiency of sugarcane. **Sugar Tech**, v.18, p.124-133, 2016.
- NORONHA, F.F.M.; CARDOSO, M.R.D.; FARIA, T.G. Chuvas no Cerrado da região centro-oeste do BRASIL: Análise histórica e tendência futura. **Ateliê geográfico**, v.6, n.2, p.112-130, 2012.
- OLIVEIRA, P.T.S.; NEARING, M.A.; MORAN, M.S.; GOODRICH, D.C.; WENDLAND, E.; GUPTA, H.V. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. **Water Resources Research**, v.50, p.7100-7114, 2014.
- OLIVEIRA FILHO, A.T.; RATTER, J.A. Vegetation physionomies and woody flora of the Cerrado biome. In: OLIVEIRA, P.S.; MARQUIS, R.J. (Ed.). **The Cerrados of Brazil**. Columbia University Press, New York, p.91-120, 2002.
- OLIVIER, F.C.; SINGELS, A. Effect of a trash blanket on irrigation water use efficiency of sugarcane. **Proceedings of International Society of Sugar Cane Technologists**, v.81, p.62-74, 2007.
- OLIVIER, F.C.; SINGELS, A. The effect of crop residue layers on evapotranspiration, growth and yield of irrigated sugarcane. **Water SA**, v.38, p.77-86, 2012.
- OTTO, R.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: Monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.601-611, 2009.
- OTTO, R.; VITTI, C.G.; LUZ, P.H.C. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.4, p.1137-1145, 2010.

- PATLE, G.T.; KUMAR, M.; KHANNA, M. Climate-smart water technologies for sustainable agriculture: A review. **Journal of Water and Climate Change**, v.11, n.4, p.1455-1466, 2020.
- PERRUCCI, G. A república das usinas. Rio de Janeiro: Paz e Terra, p.246, 1978.
- PINTO, V.G.; RIBEIRO, C.B.M.; SILVA, D.D. Vazão ecológica e o arcabouço legal brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.9, n.1, p.91-109, 2016.
- PIRES, M.O. Programas agrícolas na ocupação do Cerrado. **Sociedade e Cultura**, v.3, n.1, p.111-131, 2000.
- PRADO, H. **Pedologia Fácil** - aplicação em solos tropicais. 4. Ed. Piracicaba: Hélio do Prado. 284p, 2013.
- REIN, T.A.; SOUSA, D.M.; SANTOS JÚNIOR, J.D.G.; NUNES, R.S.; KORNDORFER, G.H. **Manejo da adubação fosfatada para cana-de-açúcar no Cerrado**. (Circular técnica, 29). Planaltina: Embrapa Cerrados, 2015.
- RESENDE, R.S.; NASCIMENTO, T.; CARVALHO, T.B. Reducing sugarcane irrigation demand through planting date adjustment in Alagoas State, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.25, n.2, p.75-81, 2021.
- RODRIGUES, G.S.S.C; ROSS, J.L.S. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil**: perspectivas geográfica, histórica e ambiental. Uberlândia: Ed. UFU, 272p. 2020.
- RODRIGUES, T.R.; VOURLITIS, G.L.; LOBO, F.A.; OLIVEIRA, R.G.; NOGUEIRA, J.S. Seasonal variation in energy balance and canopy conductance for a tropical Savanna ecosystem of South central Mato Grosso, Brazil. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v.119, n.1, p.1-13, 2014.
- RODRIGUEZ, G.; SCANLON, B.R.; KING, C.W.; SCARPARE, F.V.; XAVIER, A.C.; PRUSKI, F.F. Biofuel-water-land nexus in the last agricultural frontier region of the Brazilian Cerrado. **Applied Energy**, May, p.1-16, 2018.
- RUIZ-CORRÊA, S.T.; SCARPARE, F.V.; DOURADO-NETO, D. Agricultura irrigada: Produtividade potencial da cana-de-açúcar sem limitações hídricas. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, January, p.67-71, 2013.
- SÁ, M.A.C.; FRANZ, C.A.B.; SANTOS JÚNIOR, J.D.G.; REIN, T.A.; BUFON, V.B.; CARVALHO, A.M.; MULLER, A.G. **Manejo do palhico residual na cultura da cana-de-açúcar no Cerrado**: Primeira aproximação. Brasília: Embrapa Cerrados (Circular Técnica 27), 2015.
- SANTIAGO, A.D.; CHICO, D.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; GARRIDO, A.; CARNAUBA, P.J.P. Pegada hídrica da cana-de-açúcar e etanol produzidos no estado de Alagoas, Brasil. **Agrometeoros**, v.25, n.1, p.209-216, 2018.
- SANTOS, D.L.; SENTELHAS, P.C. Climate change scenarios and their impact on water balance and sugarcane yield in southern Brazil. **Sugar Tech**, v.16, n.4, p.356-365, 2014.
- SATIRO, L.S.; CHERUBIN, M.R.; SAFANELLI, J.L. Sugarcane straw removal effects on ultisols and oxisols in south-central Brazil. **Geoderma Regional**, v.11, August, p.86-95, 2017.
- SCARPARE, F.V.; HERNANDES, T.A.D.; RUIZ-CORRÊA, S.T. Sugarcane land use and water resources assessment in the expansion area in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v.133, p.1318-1327, 2016.
- SCARPARE, F.V.; HERNANDES, T.A.D.; RUIZ-CORRÊA, S.T. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. **Journal of Cleaner Production**, v.112, p.4576-4584, 2016.
- SCHULTZ, N.; REIS, V.M.; URQUIAGA, S. **Resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada**: fontes nitrogenadas, formas de aplicação, épocas de aplicação e efeito varietal. Documentos 298. Embrapa, n.1, p.1-56, 2015.
- SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.B. El Niño - southern oscillation and its impacts on local climate and sugarcane yield in Brazil. **Sugar Tech**, v.21, n.6, p.976-985, 2019.

SILALERTRUKSA, T.; GHEEWALA, S.H. Land-water-energy nexus of sugarcane production in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, v.182, p.521-528, 2018.

SIMÕES, W.L.; OLIVEIRA, A.R.; SOUZA, M.A.; REIS, V.M.; FERNANDES-JÚNIOR, P.I. Efficient inoculation of diazotrophic bacteria into sugarcane by the drip irrigation system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.54, p.6, 2019.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. Ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 416 p. 2004.

SOUSA, D.M.G.; REIN, T.A.R.; NUNES, R.S.; SANTOS JÚNIOR, J.D.G. **Recomendações para correção da acidez do solo para cana-de-açúcar no cerrado**. (Comunicado Técnico, 177). Planaltina: Embrapa Cerrados, 2015.

SOUZA, C.A.A.; SILVA, T.G.F.; SOUZA, L.S.B. Straw management effects on sugarcane growth, nutrient cycling and water use in the Brazilian semiarid region. **Bragantia**, v.79, n.4, p.400-411, 2020.

SZMRECSÁNYI, T. 1914-1939: Crescimento e crise da agroindústria açucareira no Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, 1988.

TANG, P.; CHEN, C.; LI, H. Investigation of hydraulic performance based on response surface methodology for an agricultural chemigation proportional injector. **Water**, v.12, p.1-15, 2020.

TONELLO, K.C.; GASPAROTO, E.A.G.; SHINZATO, E.T.; VALENTE, R.O.A.; DIAS, H.C.T. Precipitação efetiva em diferentes formações florestais na floresta nacional de Ipanema. **Revista Árvore**, v.38, n.2, p.383-390, 2014.

VIAN, C.E.F. Agroindústria canavieira: Estratégias competitivas e modernização. Campinas: **Átomo**, 216p. 2003.

VIAN, C.E.F.; PAULILLO, L.F.O.; SHIKIDA, P.F.A. Expansão e Modernização da produção integrada e açúcar e álcool no Centro-Sul do Brasil no século XX. Travesia. **Revista de História Económica y Social**, v.9, p.175-211, 2007.

VIANNA, M.S.; SENTELHAS, P.C. Simulação do risco de *deficit* hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.4, p.237-246, 2014.

VIEIRA FILHO, J.E.R. Fronteira agropecuária brasileira: Redistribuição produtiva, efeito poupa-terra e desafios estruturais logísticos. In: VIEIRA FILHO, J.E.R.; GASQUES, J.G. (Org.). **Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade**. Brasília: Ipea, p.89-108. 2016.

WANDERLEY, L.R.S.; OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; SIMÕES NETO, D.E.; SANTOS, R.L. Nutritional requirement by irrigated Brazilian sugarcane varieties. **Sugar Tech**. 2021.

WANG, J.; ZHANG, Y.; GONG, S. Effects of straw mulching on microclimate characteristics and evapotranspiration of drip-irrigated winter wheat in North China Plain. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.11, n.2, p.122-131, 2018.

YADAV, R.N.S.; YADAV, S.; TEJRA, R.K. Labour saving and cost reduction machinery for sugarcane cultivation. **Sugar Tech**, v.5, n.1-2, p.7-10, 2003.

CAPÍTULO 8

8 SISTEMA IRRIGADO DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL: MÉTODOS, RECOMENDAÇÕES E RESPOSTA PRODUTIVA

Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira

Resumo

Diversos tipos de equipamento de irrigação são empregados no setor sucroenergético. O carretel enrolador, autopropelido, é o mais utilizado e indicado para aplicação de vinhaça, água residuária e salvamento. Mas, como o custo operacional por milímetro aplicado pode ser mais de dez vezes superior ao do pivô ou gotejamento, ele não é indicado para sistema irrigado de produção. Os pivôs são amplamente utilizados para produção irrigada em grandes áreas. Enquanto o pivô central fixo é recomendado para suprimento de lâminas maiores em uma mesma área, o pivô central rebocável e linear são recomendados para ampliar a área coberta com um único equipamento, mas em detrimento da redução de lâmina aplicada em cada área, em estratégias de irrigação deficitária com atendimento inferior a 30% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta inferior a 3 mm dia⁻¹. Pivôs centrais fixos são recomendados para estratégias de irrigação deficitária com atendimento de 30 a 60% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta entre 3 e 5 mm dia⁻¹. O gotejamento subsuperficial é o sistema com maiores eficiências de aplicação e de produtividade da água, e facilita as práticas de fertirrigação e quimigação. É recomendado para cobrir grandes áreas, com máximo aproveitamento de terra, máxima verticalização de TAH em estratégias de irrigação deficitária, e para atendimento superior a 50% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta superior a 5 mm dia⁻¹. A magnitude e distribuição da demanda hídrica e de irrigação da cana-de-açúcar é influenciada pelo padrão de clima e precipitação da localidade, e por variações intra- e interanuais desse padrão, inclusive causados pelas mudanças climáticas globais. Também influenciam os aspectos genéticos e fisiológicos de cada variedade, a fase fenológica, a capacidade de armazenamento de água do solo, a época de plantio e colheita, além das práticas agronômicas. Na média, precisa-se de 100 mm de ETr para produzir de 5 a 15 toneladas de colmo, com produtividade da água entre 100 e 150 kg mm⁻¹, a depender da variedade, ambiente de produção e manejo agronômico. Em cenário de 650 mm de ETr, típico do Cerrado, para se produzir um TCH maior que a faixa de 65-95 toneladas, precisa-se adicionar água via irrigação, e aproveitar melhor a ETc que a baixa Pef não permitiu converter em ETr. No Cerrado, estratégias de irrigação deficitária para elevar em 40% o TAH e em quase 100% a longevidade do canalial demandam aplicação de 300 a 1.000 mm em 12 meses de cultivo. A maioria dos insucessos de principiantes no sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar deve-se a dois aspectos: (i) não ajustar as práticas agronômicas, simplesmente replicando as práticas de sequeiro e adicionado água, e (ii) falhas no manejo de irrigação. Uma análise detalhada dos métodos e parâmetros de manejo disponíveis na literatura mundial e brasileira é realizada nesse capítulo. Recomenda-se o manejo da irrigação de cana-de-açúcar pelo método combinado, que adota o método via clima como base, mas conjuga a umidade do solo e sensoriamento da planta como camadas adicionais de informação e aferição. O capítulo ainda recomenda parâmetros customizados para o método combinado nas áreas de produção moderna do Cerrado, além de compartilhar dicas e informações para escolher as melhores estratégias de manejo e maturação (*drying-off*), fruto de informações da literatura brasileira e mundial, além da experimentação e experiência acumuladas nos últimos 10 anos. Uma ampla revisão de respostas produtivas da cana-de-açúcar à adoção do sistema irrigado é apresentada. Pela primeira vez, apresenta-se os resultados recém compilados de experimento

de longa duração realizada pela Embrapa Cerrados, que apresentou média acumulada de 8 cortes e 12 variedades de 162 para TCH e 138 para ATR. A evolução do domínio da estratégia de *drying-off* possibilitou atingir valores de ATR na área irrigada no mínimo iguais, mas frequentemente superiores às áreas de sequeiro, com ganhos adicionais acima de 10 toneladas de açúcar por hectare, por ano. Com exceção da estratégia de atendimento de 100% da irrigação total necessária, todas estratégias de irrigação deficitária resultaram em ganhos de produtividade da água, com variedades mais responsivas auferindo ganhos superiores a 50%. Para o Cerrado, a estratégia de reposição de 75% da irrigação total necessária resulta no melhor equilíbrio entre potencial produtivo e sustentabilidade do uso da água. Por isso, recomenda-se exclusivamente a adoção de estratégias de irrigação deficitária. Em nenhuma hipótese recomenda-se reposição de 100% da demanda hídrica da cultura. Finalmente, o capítulo aborda aspectos para execução racional de um plano de investimento em sistema irrigado de produção sustentável, inclusive abordando aspectos não convencionais, mas fundamentais para uma análise de viabilidade mais ampla, coerente, e mais aderente com os resultados de fato atingíveis.

8.1 Introdução

A transição de fração da produção de cana-de-açúcar brasileira do sistema de sequeiro para o irrigado não é mais dúvida. Mas, a velocidade dessa transição dependerá, além da saúde financeira das empresas, da difusão das inovações tecnológicas em sistema irrigado acumuladas na última década e da multiplicação de vitrines tecnológicas e áreas piloto em escala comercial, para evidenciar os resultados possíveis.

Além de fazer ampla revisão da literatura brasileira e mundial, esse capítulo conjuga a experiência acumulada nos últimos 10 anos de pesquisa em sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar no Cerrado, para recomendar tipos de equipamento de irrigação, métodos e parâmetros de estimativa de demanda hídrica e de irrigação, métodos de manejo da irrigação, definição de estratégias de irrigação e maturação (*drying-off*). Adicionalmente, relata-se, em primeira mão, um compilado de resultados de experimento de longa duração com 8 cortes e 12 variedades no Cerrado. Finalmente, recomenda-se estratégias para execução de um plano de investimento e análise de viabilidade de sistema irrigado de produção sustentável.

8.2 Tipos de sistema de irrigação para cana-de-açúcar

São diversos os tipos de equipamento de irrigação utilizados na cultura de cana-de-açúcar. Os mais relevantes serão abordados a seguir.

8.2.1 Carretel enrolador

O carretel enrolador, também chamado de autopropelido, é o sistema mais utilizado e indicado para aplicação de vinhaça, água residuária e salvamento. Com adutoras móveis e bombeamento à diesel, permitem, com pouca infraestrutura, grande mobilidade e aplicação de pequenas lâminas em grandes áreas. Por outro lado, sua limitação de movimento em canal adulto e seu custo operacional por milímetro aplicado o tornam incompatíveis com as maiores lâminas e diversas aplicações ao longo do ano, aspectos fundamentais para um sistema irrigado de produção.

O custo operacional por milímetro aplicado com carretel enrolador pode chegar a ser dez ou mais vezes superior ao custo por milímetro aplicado com pivô ou gotejamento. No entanto, o carretel enrolador possui menor custo de capital e maior robustez para trabalhar com vinhaça e água residuária, raramente sendo substituído por pivô ou gotejamento para aplicação desses resíduos e irrigação de salvamento.

8.2.2 Pivô central fixo, rebocável e linear

Os pivôs são amplamente utilizados para produção irrigada em grandes áreas, possuindo três versões: pivô central fixo, pivô central rebocável e pivô linear (ou lateral móvel).

No pivô central fixo e rebocável, uma área circular recebe uma estrutura suspensa (linha lateral) que gira ao redor de uma torre central distribuindo água. Na versão pivô central fixo, a torre central e a linha lateral ficam fixas e dedicadas a uma única área, enquanto na versão rebocável a torre central e a linha lateral podem ser transportadas para outras áreas por trator, ou sistema de auto reboque. A versão pivô linear também é rebocável, mas, ao invés de pivotar ao redor de uma torre central, movimenta-se linear e paralelamente às linhas de plantio, cobrindo áreas retangulares.

A intensidade de aplicação de água do pivô central aumenta no sentido da torre central para a extremidade e, quanto maior o pivô, maior a taxa de aplicação na extremidade final. Por esse motivo, pivôs centrais de grande dimensão ficam limitados a estratégias de menor satisfação da demanda hídrica, já que a taxa de aplicação instantânea não pode ultrapassar a capacidade de infiltração de água no solo, sob pena de causar escoamento superficial e erosão.

Nos últimos anos, o avanço na tecnologia de emissores para pivôs tem permitido que eles operem com baixas pressões, próximas às utilizadas em irrigação localizada. Outro avanço é o incremento do tamanho de gota que, além de reduzir perdas por evaporação e arraste, aumenta o raio de alcance dos emissores e reduz a precipitação instantânea, o que permite projetos com lâminas e/ou linhas laterais maiores, além de maior eficiência energética e uniformidade de aplicação superiores a 90%. Podem ainda ser utilizados para aplicação de vinhaça e água residuária, desde que revestidos com materiais anticorrosivos.

Como podem ser acionados rapidamente em veranicos nos meses da estação chuvosa, o pivô central fixo apresenta vantagem adicional aos sistemas móveis, já que, via de regra, as usinas dispensam a mão-de-obra contratada para irrigação com sistemas móveis logo no início do período chuvoso.

As operações de fertirrigação e quimigação com pivôs são muito eficientes quando o objetivo é a aplicação de produtos não-sistêmicos e que visam o molhamento de toda parte aérea da cultura. Por outro lado, quando o alvo da fertirrigação e quimigação é estritamente o solo e a área radicular, a eficiência de aplicação pode ser reduzida, sobretudo em canaviais adultos, com grande biomassa.

Enquanto o pivô central fixo destina-se com maior frequência ao suprimento de lâminas maiores em uma mesma área, o pivô central rebocável e linear destinam-se, mais comumente, a ampliar a área coberta com um único equipamento, mas em detrimento da redução de lâmina que consegue entregar para cada área. Com lâmina aplicada menor, o potencial produtivo também é inferior. Em relação ao fixo rebocável, o linear permite melhor aproveitamento de área, desde que o formato do terreno o favoreça.

O pivô central, especialmente o fixo, tem como vantagens a simplicidade de operação e manutenção, elevada eficiência de aplicação, baixo consumo de energia e mão-de-obra, possibilidade de automação e flexibilidade no manejo da irrigação, que resultam em baixo custo por milímetro irrigado. Essas vantagens explicam sua rápida adoção para sistemas irrigados de produção de cana-de-açúcar, tendo Carr e Knox (2010) reportado aumento de seu uso, especialmente na África do Sul, Brasil e Austrália. Por outro lado, pivôs apresentam menor aproveitamento de área, maior limitação para lâminas altas com um único equipamento, e uma flexibilidade de manejo, fertirrigação e eficiência de aplicação ligeiramente inferiores ao gotejamento. Com isso, tendem a perder competitividade para o sistema de gotejamento à medida que se adotam estratégias de maior satisfação da demanda hídrica.

Para cobertura de grandes áreas de cana-de-açúcar, pivôs rebocável e linear são mais frequentemente indicados para estratégias de irrigação deficitária com atendimento inferior a 30% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta inferior a 3 mm dia⁻¹. Já os pivôs centrais fixos costumam ser mais frequentemente indicados para estratégias de irrigação deficitária com atendimento de 30 a 60% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta entre 3 e 5 mm dia⁻¹.

8.2.3 Gotejamento superficial e subsuperficial

Recentemente, o gotejamento superficial tem sido adotado em sistemas móveis como estratégia de salvamento, sobretudo para plantio com mudas pré-brotadas. Nesse caso, capta-se água diretamente em caminhões-tanque estacionados à beira das áreas que serão irrigadas. Ao finalizar o salvamento da área, recolhem-se os tubogotejadores, linhas de derivação de polietileno, e move-se o sistema para outra área.

Contudo, para o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar, o gotejamento subsuperficial é o mais adequado. Quando subsuperficial, o tubo gotejador, ou linha gotejadora, fica enterrado imediatamente abaixo, ou ligeiramente ao lado, da linha de plantio. A água é aplicada diretamente na região radicular, molhando apenas parte do volume do solo, reduzindo as perdas de água por evaporação (OLIVER; SINGELS, 2001).

Em termos de eficiência de aplicação e PA, o gotejamento subsuperficial é considerado o melhor de todos os métodos disponíveis. A água é aplicada em pequenas vazões, baixas pressões e alta frequência, permitindo manter a umidade do solo com pequena variação próxima à capacidade de campo, com pouco riscos de perdas por escoamento superficial ou percolação profunda. Sua boa uniformidade de aplicação também não depende das condições de vento e, por estar enterrado, não impede o trânsito de máquinas durante a irrigação. Destacam-se ainda a economia de fertilizantes, energia e mão-de-obra, capacidade de completa automação e um melhor aproveitamento da área, podendo cobrir praticamente qualquer tamanho, forma e declividade de terreno.

Quanto à fertirrigação e quimigação, apresenta grande eficiência, sobretudo quando se deseja posicionar os insumos exclusivamente no solo e/ou mais próximos ao sistema radicular, sem atingir a parte aérea. Essa é uma grande vantagem para o setor sucroenergético, por exemplo, no combate às pragas de solo. Contudo, quando o alvo da quimigação for a parte aérea da cultura, produtos sistêmicos precisam ser empregados.

Como limitações pode-se relacionar o maior custo de implantação para lâminas baixas e a demanda de uma equipe técnica mais qualificada. Em relação ao pivô, precisa-se dispensar atenção especial à qualidade física, química e biológica da água. Devido aos pequenos orifícios de saída dos gotejadores e a baixa pressão, os sistemas de irrigação localizada requerem tratamento de água e filtragem eficientes e compatíveis com a qualidade da água disponível. Assim como no pivô, a vida útil do gotejamento subsuperficial e o uso potencial de suas vantagens estão fortemente associados aos cuidados na operação, manutenção e práticas de manejo. Carr e Knox (2010) reportam o uso deste sistema na cana há vários anos, em diversos países, e ressaltam a vantagem relacionada à economia no uso da água e nutrientes. Estes autores ainda reportam que a obtenção dos benefícios característicos do sistema está fortemente relacionada à adequação das práticas de manejo.

Para produção irrigada de cana-de-açúcar, o gotejamento subsuperficial tem sido instalado, comumente, em profundidade de 0,2 a 0,4 m. Quanto mais profundo for o enterrio das linhas gotejadoras, maior a redução de problemas com vandalismo, dano mecânico e a interferência nas operações agrícolas, além de manter a superfície do solo mais seca, diminuindo a incidência de plantas invasoras e reduzindo significativamente as perdas de água por evaporação.

O enterrio mais profundo é viável desde que a engenharia e manejo da irrigação do projeto sejam feitos de forma rigorosa e de acordo com as características do solo. Caso contrário, podem ocorrer perdas de água e de nutrientes por lixiviação e molhamento insatisfatório das plantas, em especial em solos arenosos.

Para o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar, o gotejamento subsuperficial é mais frequentemente recomendado quando a estratégia visa cobrir grandes áreas, com grande aproveitamento de terra, visando máxima verticalização com estratégias de irrigação deficitária, para atendimento superior a 50% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta superior a 5 mm dia⁻¹.

8.3 Demanda hídrica e de irrigação

A demanda hídrica de uma cultura depende substancialmente do clima. Regiões distintas possuem padrões climáticos distintos. Além de apresentar variações dentro do mesmo ano a cada estação, uma determinada região pode apresentar variações climáticas em anos distintos, por conta das oscilações do clima em escala global, com fenômenos como *El Niño*, *La Niña* e outros (SENTELHAS; PEREIRA, 2019). Com as mudanças climáticas globais, essas variações dentro do ano, e a cada ano, também estão cada vez mais intensas e frequentes (SANTOS; SENTELHAS, 2014). Para mensurarmos o potencial climático utilizamos o termo Evapotranspiração de referência (ET_o) (ALLEN *et al.*, 1998).

A demanda hídrica da cultura também depende da sua genética e da fase fenológica (idade, ou fase de desenvolvimento e crescimento) que se encontra. Quando se trata da mesma espécie e, em especial quando consideramos a cana-de-açúcar, as diferenças de demanda hídrica entre variedades são inferiores àquelas que dizem respeito às fases fenológicas. Para cana-de-açúcar, dividimos essas fases fenológicas da seguinte forma: (i) germinação (ou brotação, para cana soca); (ii) perfilhamento e desenvolvimento inicial; (iii) desenvolvimento pleno, e (iv) maturação (FRANCISCO *et al.*, 2016; APARECIDO *et al.*, 2020). Um canavial pequeno na Fase I tem demanda hídrica menor do que na Fase II que, por sua vez, tem demanda inferior à Fase III. Quando passa da Fase III para Fase IV, a cana-de-açúcar reduz seu vigor vegetativo e demanda hídrica (SILVA *et al.*, 2013; MARIN *et al.*, 2020).

Para cada fase fenológica de cada cultura utilizamos parâmetros (coeficientes de cultura - K_c) que convertem a demanda potencial do clima (ET_o), em demanda potencial da cultura (evapotranspiração potencial da cultura - ET_c ou ET_p).

A ET_c é a máxima demanda que determinada cultura, de determinada idade, segundo seu melhor potencial genético, conseguiria perder por evapotranspiração em dada condição climática se não estivesse sob nenhum tipo de estresse biótico ou abiótico (DOORENBOS; KASSAM, 1979; ALLEN *et al.*, 1998). Podemos associar a ET_c ao tamanho, potência, de uma motobomba. Quanto maior essa motobomba, maior será a quantidade de água que poderá ser absorvida pelas raízes da planta e transportada pelos colmos até chegar às folhas, de onde será transpirada para atmosfera. E maior será a quantidade de água que poderá ser evaporada do solo.

Nas regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil, a ET_c em um ciclo de 12 meses pode variar, frequentemente, entre 800 e 2000 mm, podendo, eventualmente, atingir valores menores e maiores (CABRAL *et al.*, 2015; MONTEIRO; SENTELHAS, 2014).

Contudo, a disponibilidade hídrica no solo nem sempre está plena e as plantas reagem a essa deficiência hídrica adotando diversos artifícios para reduzir sua vulnerabilidade, reduzindo sua demanda de água para processos fisiológicos e a perda de água por transpiração. A cana-de-açúcar, mediante condições de deficiência hídrica, fecha estômatos, reduz a multiplicação e expansão celular, enrola e senesce folhas e ativa diversos outros mecanismos para reduzir sua demanda hídrica (SMIT; SINGELS, 2006; PINCELLI; SILVA, 2012;

SILVA *et al.*, 2014; VINÍCIUS *et al.*, 2017). Em estágios iniciais de estresse hídrico, a cana-de-açúcar inibe o vigor vegetativo, o crescimento, e acelera mecanismos de sobrevivência, como o armazenamento de açúcar. Em um segundo estágio, de deficiência hídrica mais severa, até mesmo o armazenamento de açúcar é afetado (INMAN-BAMBER, 2002; INMAN-BAMBER, 2004; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; BUFON *et al.*, 2014; BUFON *et al.*, 2016).

Todos esses processos impactam na intensidade de transpiração e, logo, na evapotranspiração que realmente ocorre. Por isso, para calcular a evapotranspiração real da cultura (ET_r ou ET_a), ou seja, a demanda real da cultura, precisamos converter a ET_c em ET_r (ALLEN *et al.*, 1998; CARR; KNOX, 2011). Para conversão da evapotranspiração potencial em evapotranspiração real da cultura, multiplicamos a ET_c pelo coeficiente de estresse (K_s), que é função da disponibilidade de água no solo.

No caso da cana-de-açúcar, por ser plantada e colhida ao longo de vários meses do ano, sua demanda hídrica também depende da época de plantio e colheita, ou seja, da interação entre o efeito do clima e a idade da cultura. Um canavial colhido no início de safra passará pelo período de maior ET_o do Cerrado (agosto e setembro) ainda nas Fases I e II, com pequena biomassa, menor demanda e *deficit* hídrico do que um canavial colhido no final de safra, que brota e cresce com abundância no período chuvoso e chega ao início da estação seca do ano seguinte na Fase III, com enorme biomassa para ser sustentada, justamente quando a ET_o é máxima e a oferta de chuva é mínima.

Por essa razão, a demanda hídrica também está associada à época de colheita e produtividade que se almeja alcançar. A ET_r necessária para a mera sobrevivência da cana-de-açúcar é diferente daquela para atingir um nível aceitável, ou um nível elevado, de produtividade (BUFON *et al.*, 2014; BUFON *et al.*, 2016). Quanto mais água passar por dentro da planta e for transpirada, maior a ET_r e maior será a produtividade (INMAN-BAMBER, 1999; CARR; KNOX, 2011; CARVALHO *et al.*, 2019). E quanto maior o percentual da ET_r devido a transpiração, e não a evaporação, maior também será a produtividade.

Uma motobomba enorme (ou ET_c enorme) não succiona muita água se estiver sobre um reservatório vazio. Ou seja, a ET_r da cana depende da disponibilidade de água, da oferta de água de chuva e irrigação e do tamanho do reservatório de água no solo, que é afetado tanto pelas características físicas do solo quanto pela profundidade do sistema radicular da cana.

A P_{ef} (Precipitação efetiva), fração da chuva que se converte em ET_r, depende não só do volume, mas também do padrão de distribuição da chuva. No Cerrado, por conta da grande concentração da chuva em poucos meses do ano, geralmente, apenas metade da chuva se torna P_{ef} para cana-de-açúcar. A outra metade escoar para rios e lagos, e infiltra para baixo da zona radicular, não sendo transpirada pela planta.

A conversão de chuva em P_{ef} também depende da capacidade de armazenamento de água do solo (BOSQUILIA *et al.*, 2019). Quanto maior a capacidade de armazenamento de água do solo, maior a P_{ef}. A fração da ET_c que não pode ser atendida pela P_{ef}, que não se converte em ET_r, é chamada *deficit* hídrico (ALLEN *et al.*, 1998).

Por exemplo, num período de 30 anos em Goianésia, Goiás, na maior parte dos anos, o canavial de sequeiro evapotranspirou aproximadamente 650 mm em uma safra de 12 meses. Mas houve anos em que o mesmo canavial evapotranspirou 400 mm e outros em que esse valor chegou a 1.400 mm. Essa mesma magnitude de variação é experimentada em regiões produtoras tradicionais de São Paulo, principalmente no Cerrado do estado (CABRAL *et al.*, 2012).

Carr e Knox (2011) apresentaram uma revisão sobre as relações hídricas e as necessidades de irrigação para a cana-de-açúcar, e identificaram demandas variando entre

1.100 a 1.800 mm para as savanas da Austrália e África do Sul, ambiente parecido com nosso Cerrado. Dependendo do local, a ETr diária chegou a atingir picos de 6 a 15 mm.

Na média, precisa-se de 100 mm de ETr (ou 1 milhão de litros por hectare) para que um canal irrigue de 5 a 15 toneladas de colmo, o que resultaria em uma PA entre 100 e 150 kg mm⁻¹ a depender da variedade, ambiente de produção e do padrão de manejo agrônomico. Por isso, em um cenário de 650 mm de ETr e que se pretende produzir um TCH maior que a faixa de 65-95 toneladas, precisa-se adicionar água via irrigação, e aproveitar melhor a ETc que a baixa Pef não permitiu converter em ETr.

No Cerrado, onde está a maior parte da cultura de cana brasileira, estratégias de irrigação deficitária para elevar em 40% o TAH e em quase 100% a longevidade do canal podem resultar na aplicação de 300 a até mais de 1.000 mm em 12 meses de cultivo.

8.4 Manejo da irrigação

Como salienta Bernardo *et al.* (2019), o sistema irrigado é dinâmico e as etapas de estudo de viabilidade, projeto hidráulico e implantação não podem ser compreendidas desassociadas da operação e manejo do sistema irrigado. O manejo da irrigação deve aplicar as melhores estratégias de distribuição da água ao longo do ciclo, considerando tanto aspectos inerentes a cada projeto (lâmina de projeto, metas de produtividade, aspectos sociais e mão-de-obra, estratégias nutricionais e fitossanitárias, manutenção ou aprimoramento das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, manutenção e vida útil dos equipamentos) quanto aspectos comuns a todos os sistemas de irrigação, ou seja, quando e quanto aplicar por evento de irrigação, uniformidade de aplicação e eficiência da irrigação.

Junto com as falhas de ajuste nas práticas agrônomicas do sistema de sequeiro para o irrigado, as falhas no manejo de irrigação são responsáveis pela grande maioria dos insucessos de investimentos em sistema irrigado de produção. E essas falhas nada têm a ver com o potencial do sistema irrigado de produção, mas com a deficiência de capacitação técnica e de qualidade gerencial para aplicar essa tecnologia.

8.4.1 Métodos de manejo da irrigação

A aplicação eficiente de qualquer método de manejo de irrigação requer conhecimento das inter-relações entre solo, água, planta e atmosfera. Dentre os métodos mais utilizados para o manejo da irrigação destacam-se o método via solo, e o método via clima.

8.4.1.1 Manejo via solo

No manejo via solo, estipula-se uma faixa adequada de umidade ou tensão de água no solo e instala-se equipamentos de medição distribuídos espacialmente e em profundidades distintas do solo da área irrigada. Toda vez que a umidade do solo declinar para valores inferiores aos ideais, ou que a tensão de retenção da água no solo subir para valores superiores aos ideais, calcula-se e aplica-se uma lâmina de irrigação que eleve a umidade, ou diminua a tensão, para os níveis desejados.

Existem medidores de leitura manual e, mais recentemente, uma infinidade de opções de medidores automatizados, sobretudo sensores de umidade, que coletam e enviam remotamente a informação.

O manejo eficiente da irrigação via solo, por depender exclusivamente dessa camada de informação, requer excelente acurácia da informação de umidade de cada sensor, e ainda de uma quantidade suficiente de pontos de monitoramento ao redor da lavoura para absorver as discrepâncias intrínsecas à variabilidade espacial do solo e da cultura.

Dos inúmeros sensores eletrométricos disponíveis comercialmente, poucos possuem precisão e acurácia adequadas para o manejo de irrigação em solos tropicais. Mas, por conta do custo, acabam sendo empregados estritamente na pesquisa. Os sensores eletrométricos de menor custo, apesar da simplicidade de uso, não entregam exatidão inferior a 3,5% em umidade volumétrica para nossos solos tropicais (SCHWARTZ; EVETT, 2016; LEÃO *et al.*, 2020; SCHWARTZ *et al.*, 2020). Considerando que, em média, nossos solos armazenam cerca de 1 mm de água para cada centímetro de solo, ou seja, 10% em volume, o nível de precisão desses medidores resulta em erro de até 35% da água disponível para cultura. Quando utilizados sensores com exatidão inferior a 1,5% de umidade volumétrica, o manejo via solo é uma alternativa viável.

Contudo, não recomendamos que o manejo via solo seja a primeira opção para manejo de irrigação em grandes áreas sob sistema irrigado de cana-de-açúcar. Um manejo eficiente com esse método demandaria uma enorme quantidade de sensores de custo elevado, além da dificuldade de instalação, automação, operacionalização e manutenção desses sensores.

8.4.1.2 Manejo via clima

Para o manejo via clima, define-se um volume de controle do solo a partir do qual todas as entradas e saídas de água são estimadas - balanço hídrico. Esse volume de controle do balanço hídrico é a Capacidade Total de Armazenamento de Água do Solo (CTA).

Capacidade total de armazenamento: a CTA é definida tanto pela CAD/ z quanto pela profundidade do sistema radicular (z). A CAD/ z depende intrinsecamente da textura e estrutura do solo, é dada em mm cm^{-1} , e informa quantos milímetros de água por centímetro de profundidade um solo é capaz de reter, sem que ela se perca por percolação profunda (escoamento). Já a profundidade do sistema radicular para manejo de sistemas irrigados, além das características da planta, também envolve decidir qual profundidade ou, qual volume de controle, se deseja adotar para manejar a irrigação.

Uma estratégia é considerar a profundidade radicular efetiva (z), que é aquela em que se encontram 80-90% de todo o volume radicular da planta (CUNHA *et al.*, 2010; SMIT *et al.*, 2000). A z é sempre menor que a profundidade radicular máxima de uma cultura. A distribuição e profundidade radicular é definida pela presença de barreiras químicas e físicas do solo, pela genética da cultura e pela oscilação da presença de água e nutrientes ao longo do ciclo. A planta ajusta a densidade de raízes, expandindo ou contraindo, para encontrar água e nutrientes disponíveis para seu crescimento.

Por essa razão, em sistemas irrigados, a profundidade de manejo não precisa ser, necessariamente, um valor comum de z dessa cultura no sequeiro. Como controla-se a irrigação e a fertirrigação, pode-se induzir a planta a concentrar raízes na região do solo que se deseja definir como volume de controle.

Em ambientes mais áridos, com pouca disponibilidade de chuva, permite-se confinar o sistema radicular em um percentual menor do volume total disponível para a planta. Contudo, no Cerrado, apesar dos 5-6 meses de pouca ou nenhuma precipitação, temos 6-7 meses com boa precipitação. Nesse caso, confinar demasiadamente o sistema radicular implicaria em não ter raízes disponíveis para explorar água e nutrientes fora desse pequeno volume no período chuvoso.

Um volume de raízes excessivo implica em gasto de carboidratos que poderiam estar sendo utilizados para ganho de produtividade de colmos e açúcar. Por outro lado, quanto menor o volume de controle maior a suscetibilidade da cultura para o estresse hídrico caso haja falhas no sistema de irrigação, além de reduzir o uso dos nutrientes e água da chuva nas regiões do solo onde não há densidade radicular suficiente.

Balanco hídrico: no manejo via clima estima-se a umidade do solo diariamente através do balanço hídrico, que é a estimativa do saldo remanescente de água no solo após considerar as entradas (chuva e irrigação) e saídas (ETr), escoamento superficial e lateral, e percolação profunda) de água no volume de controle (CTA).

Para estimativa da ETr, estima-se primeiro a ETo com dados de uma estação meteorológica nas proximidades da área, medindo as variáveis temperatura, radiação, umidade relativa e velocidade do vento para estimar a demanda climática. Na mesma estação, ou em pontos adicionais, também é mensurada a precipitação. A partir dos valores de ETo e do coeficiente de cultura (Kc) referentes à fase fenológica que está a cultura, estima-se a ETc. Com a ETc e valores de coeficiente de estresse (Ks), estima-se a fração da ETc que se converte em ETr.

Quando irrigar: o momento de irrigação é definido através do nível de umidade crítico, chamado de Fator de Disponibilidade Hídrica (**f**). O **f** representa o nível de depleção da umidade do solo permitido pela estratégia de irrigação, variando de 0 a 1. Um **f** igual a 0,1 significa que o manejo será conduzido de tal forma que, quando for consumido 10% da CTA, um evento de irrigação será realizado. Um **f** igual a 0,5 implica em eventos de irrigação toda vez que 50% da CTA for consumida. A decisão do **f** para cada fase fenológica tem a ver com a sensibilidade da cultura ao estresse hídrico nessa fase. Quanto mais sensível, menor o valor de **f** que se utiliza para disparar as irrigações.

Quanto irrigar: o volume de irrigação necessário é calculado pela diferença entre a umidade atual do solo e a umidade para a qual se deseja elevar.

Mais detalhes sobre procedimentos de cálculo de evapotranspiração e balanço hídrico de culturas podem ser consultados em Doorenbos e Kassam (1979) e Allen *et al.* (1998).

8.4.1.3 Método combinado de manejo

O método via clima é mais adequado para aplicação em grandes áreas, sem a necessidade de uma enorme quantidade de sensores espalhados pelo campo. Por outro lado, por se basear estritamente em estimativas, podem resultar em erros que só seriam identificados quando algum dano ao desenvolvimento da cultura já tivesse ocorrido.

Por essa razão, recomenda-se o **método combinado de manejo** para sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar em grandes áreas. Esse método conjuga estratégias do método via solo e via clima, e ainda adiciona uma terceira camada, o sensoriamento da planta.

No método combinado, utiliza-se como referência principal o método via clima. Tal qual descrito acima, sem modificações. E adicionamos ao sistema de tomada de decisão mais duas camadas de informação e aferição.

A primeira camada é o monitoramento da umidade do solo. Mas diferentemente do método de manejo via solo, não distribuimos muitos sensores ao redor da área, nem nas mesmas profundidades, e nem precisamos de grande exatidão da aferição umidade do solo. Coloca-se apenas alguns sensores eletrométricos em profundidades estratégicas para aferir o método via clima. Um primeiro sensor é localizado no limite inferior da zona de controle e um segundo sensor de 10 a 15 cm abaixo do primeiro sensor. Ou seja, 10 a 15cm abaixo do limite inferior da zona de controle do manejo. Se o primeiro sensor não detectar a chegada de água após o evento de irrigação, temos um alerta de subestimativa da demanda de irrigação. Se, por outro lado, a chegada de água é detectada no primeiro sensor, mas também no segundo sensor, temos um alerta de superestimativa da demanda hídrica. Pelo fato de demandar apenas a detecção da presença de água, e não sua quantidade com exatidão, sensores eletrométricos de menor custo atendem satisfatoriamente ao objetivo de adição de uma

camada de monitoramento no método combinado de manejo. A segunda camada é o monitoramento da temperatura do dossel da cultura. Utilizamos parâmetros conhecidos de temperatura do dossel da cana-de-açúcar sob condições ótimas de manejo de irrigação e, através de imagens tomadas por drones e satélites, aferimos se o manejo de irrigação está propiciando pleno desenvolvimento para o canavial.

8.5 Parâmetros para estimativa de demanda hídrica

8.5.1 Capacidade de água disponível

Recomenda-se amostragens a campo para determinação da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e densidade. Para determinação da CC, recomenda-se amostras indeformadas e o método da Mesa de Tensão, ou método da bacia de saturação à campo. Essa mesma amostra indeformada por ser utilizada para determinação da densidade do solo. Para o PMP, recomenda-se o uso de amostras deformadas com método de Richards ou semelhante. A mesma amostragem deformada para PMP pode ser utilizada para análise de textura.

Na ausência de informações tomadas diretamente a campo, a título provisório, sugere-se considerar os valores de CAD estimados por Prado (2018).

8.5.2 Profundidade radicular e profundidade de controle

Sem barreiras físicas ou químicas, o sistema radicular da cana-de-açúcar pode chegar até 6m de profundidade, mas a maior densidade fica concentrada na faixa de 1,5 a 2 m (SMITH *et al.*, 2005; ARAÚJO, 2018).

Nos solos tropicais, em razão da deficiência de cálcio e fósforo em profundidade, a maior densidade de raízes na cana-de-açúcar encontra-se restrita à profundidade do preparo e correção do solo.

Na Tabela 1 apresenta-se o padrão de distribuição de raízes de cana-de-açúcar disponíveis na literatura para diversas localidades e variedades, sob diferentes cenários de oferta hídrica e em ciclo de cana planta e cana soca.

Tabela 1. Distribuição radicular em cana-de-açúcar por camada de solo (cm) e sistema de irrigação.

Referência	Sistema de Irrigação	Ciclo	Proporção de raízes por camada de solo (%)				
			0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Laclau (2005)	Aspersão	Planta	51,6	36,7	11,1	0,4	-
Farias <i>et al.</i> (2008)	Pivô Central	Planta	55,6	20,1	12,0	8,9	3,2
Ohashi <i>et al.</i> (2015)	Gotejamento	Soca	53,6	29,5	12,9	4,0	-
	Subsuperficial						
Ohashi <i>et al.</i> (2015)	Gotejamento	Soca	53,3	31,2	10,8	4,7	-
	Subsuperficial						
Clemente <i>et al.</i> (2017)	Aspersão	Planta	55,5	32,3	12,7	-	-

8.5.3 Coeficiente de cultura

Na Figura 1, apresenta-se uma análise de valores de Kc por fase fenológica da cana-de-açúcar, utilizando-se dados de 34 publicações que estimaram ou determinaram o Kc por diversos métodos, tanto para lavouras no Brasil (10 publicações) quando em outros lugares

do mundo (24 publicações), entre 1967 e 2020. Essas diferenças podem estar associadas aos fatores que afetam as taxas de transpiração e evaporação, como diferenças varietais e, principalmente, práticas agrônômicas e sistemas de produção. Por exemplo, diferentes espaçamentos entre fileiras de cultura, arquitetura de dossel, velocidade de crescimento da planta, sombreamento do solo e padrões de molhamento do solo pela irrigação podem afetar tanto a transpiração quanto a evaporação.

O método sugerido por Allen *et al.* (1998) para cálculo da evapotranspiração da cultura pressupõe que as diferenças regionais e metodológicas de estimativas de ET_c podem ser reduzidas, deixando para a ET_o a responsabilidade de capturar majoritariamente os efeitos do clima e para o K_c a função de transformar o potencial do clima em potencial da cultura. Para determinação dos valores de K_c , submete-se a cultura às condições ideais, onde nenhuma restrição biótica ou abiótica limite seu desenvolvimento e transpiração. No entanto, garantir essa ausência absoluta de estresse biótico e abiótico pode ser um grande desafio, sobretudo para uma cultura como a cana-de-açúcar, em que o sistema irrigado de produção não está completamente dominado.

Outro aspecto importante é a evidência de que, em vários dos estudos utilizados, condições hídricas e nutricionais ótimas, sobretudo no Brasil, não foram garantidas. Por isso, possivelmente, dificuldades experimentais conduzam mais frequentemente à subestimativa do que à superestimativa dos valores de K_c no Brasil.

Adicionalmente, valores de K_c são influenciados pela resistência aerodinâmica ou outros mecanismos que inibem a transpiração da cultura sob condições de ET_o elevadas, sobretudo quando superior a 5 mm dia^{-1} . Nesses casos, Allen *et al.* (1998) e Marin *et al.* (2020) sugerem equações para correção dos valores de K_c .

Julgamos que o aperfeiçoamento de valores de K_c específicos para diferentes variedades e espaçamentos entre fileiras utilizados no Brasil não são, no momento, prioritários ante ao bom domínio dos ajustes agrônômicos para um sistema irrigado de produção, e do manejo de irrigação utilizando parâmetros de K_c já disponíveis na literatura.

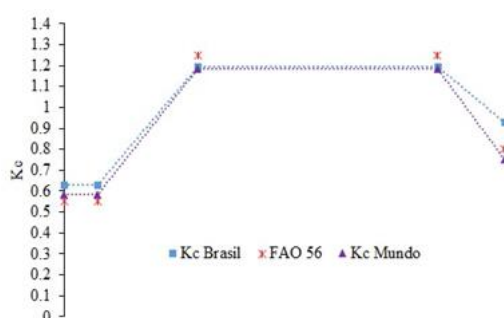


Figura 1. Valores médios de coeficiente de cultura (K_c) por fase fenológica da cana-de-açúcar, estimados a partir de 10 estudos no Brasil e 24 ao redor do mundo, e valores recomendados por Allen *et al.* (1998) no Boletim FAO 56.

8.5.4 Fator de disponibilidade hídrica

O fator de disponibilidade hídrica é o limite de depleção da água do solo a partir do qual um evento de irrigação será realizado. A sua escolha depende não só da sensibilidade da cultura ao estresse hídrico, mas também da estratégia de manejo.

Partindo de um solo na capacidade de campo, ou seja, com 100% da CTA disponível, a cana-de-açúcar absorverá água pelo sistema radicular e não sofrerá nenhum impacto na sua taxa de transpiração e vigor vegetativo até um determinado momento, que chamaremos de **1º Limite de Depleção**. A partir desse ponto, a planta começa a encontrar mais resistência

para absorver água do solo, resultando em desaceleração da expansão e multiplicação celular, ou seja, do crescimento (INMAN-BAMBER, 2002), até chegar no **2º Limite de Depleção**. A partir daí, a planta continua extraíndo água do solo, mas, a dificuldade de extração aumenta a tal ponto que, além de interromper completamente seu crescimento vegetativo, reduz a taxa de concentração de sacarose (INMAN-BAMBER, 2004; MACHADO *et al.*, 2009), até atingir um **3º Limite de Depleção**. Após esse 3º Limite, além da paralisação completa do crescimento vegetativo, a planta também cessa totalmente a concentração de açúcar nos colmos. Consequentemente, embora haja uma quantidade mínima de água disponível no solo, ela está retida em tensões tão elevadas que a planta não mais consegue absorvê-la. Desse momento em diante, com estômatos praticamente todos fechados e taxa de transpiração próxima a zero, a planta não produz mais energia suficiente para atender sua demanda. Então, para sobreviver e continuar respirando, sobretudo em noites quentes, precisa utilizar das reservas de energia (açúcar) que havia acumulado em seus colmos (VAZQUEZ *et al.*, 1989). É o que chamamos de processo de inversão de sacarose e isoporização - perda de peso e qualidade do colmo (ARALDI *et al.*, 2010).

Na Tabela 2 são listados alguns valores de **f** para esses estágios de estresse hídrico, e que podem ser utilizados para definir a faixa de água disponível que se pretende utilizar na estratégia de manejo da irrigação. Os valores de **f** listados são, em sua maioria, determinados para condições de ETC média de aproximadamente 5 mm dia⁻¹. Para valores maiores e menores de ETC, Allen *et al.* (1998) sugere uma equação para correção do valor de **f**.

Tabela 2. Fator de disponibilidade hídrica (f) para cana-de-açúcar.

Fator de Disponibilidade Hídrica - f				
Faixa de Depleção da CTA	< 1º Limite	1º a 2º Limite	2 a 3º Limite	> 3º Limite
Impacto no desenvolvimento vegetativo	Máximo	Reduzido	Interrompido	Interrompido
Impacto no acúmulo de açúcar nos colmos	Máximo	Máximo	Reduzido	Interrompido
Doorenbos e Kassam (1979)	0,65	0,65	0,65	0,65
Allen <i>et al.</i> (1998)	0,65	0,65	0,65	0,65
Inmam-Bamber (2002)	< 0,26	0,26 - 0,57	0,57 - 0,65	> 0,65
Singels <i>et al.</i> (2010)	< 0,126	0,126 - 0,27	0,27 - 0,81	> 0,81
Singels e Laan (2012)	< 0,3	0,3 - 0,5	0,5 - 0,7	> 0,7
Raes <i>et al.</i> (2018)	< 0,2	0,2 - 0,6	0,6 - 0,85	> 0,85
Santos <i>et al.</i> (2019)	< 0,3	0,3 - 0,5	0,5 - 0,8	> 0,85

8.5.5 Coeficiente de estresse hídrico

Os mecanismos morfológicos e fisiológicos utilizados pela cana-de-açúcar para se adaptar a condições de deficiência hídrica impactam na fração da ETC que se converte em ETR (HSIAO; ACEVEDO, 1974; INMAN-BAMBER *et al.*, 2012). O coeficiente de estresse hídrico (Ks) é utilizado para a estimativa dessa redução da ETR em relação à ETC. Se o valor de Ks for igual

a 1, significa que toda a disponibilidade de água no solo permite que toda ET_c seja convertida em ET_r . Um K_s igual a zero implica que a disponibilidade de água no solo para planta está tão baixa que nada da ET_c se converte em ET_r . Na Tabela 3, são apresentados modelos de cálculo de K_s .

Tabela 3. Modelos de cálculo do coeficiente de estresse hídrico, K_s .

Coeficiente de Estresse Hídrico - K_s		
Referência	Equação	Descrição
Allen <i>et al.</i> (1998)	$K_s = \frac{CAD - D_r}{(1 - p)CAD}$	CAD = total de água disponível na zona radicular [mm]; D_r = depleção hídrica na zona radicular [mm]; p = fração da CAD que a cana-de-açúcar pode extrair antes do início do estresse hídrico.
Singels <i>et al.</i> (1998)	$K_s = F_s(1 - F_i)$	F_s = índice de umidade da superfície do solo; F_i = fração da cobertura do dossel.
Bernardo <i>et al.</i> (2019)	$K_s = \frac{\ln(LAA + 1)}{\ln(CRA + 1)}$	LAA = lâmina atual de água no solo [mm]; CRA = capacidade real de água no solo [mm].
Steduto <i>et al.</i> (2012)	$K_s = (0,28 - 0,18G - 0,03ET_o + \left(\frac{3,8F(1 - F)}{ET_o}\right)(1 - wz))$	G = fração do solo coberta pelo dossel; ET_o = evapotranspiração de referência; F = frequência mensal de dias chuvosos; wz = fração da superfície úmida do solo.

8.6 Estratégias de manejo

Para produção irrigada de cana-de-açúcar recomendamos a estratégia de irrigação com **deficit hídrico controlado**, também chamada de **irrigação deficitária**. Essa estratégia de otimização aplica irrigação durante as fases fenológicas de forma dinâmica, provendo maior atendimento da demanda nas fases em que a planta é mais sensível ao estresse hídrico. Fora desses períodos, a irrigação é total ou parcialmente suprimida, seja em função da maior tolerância da cultura ao estresse hídrico, seja porque a chuva já provê água suficiente para otimizar a produção. Essa prática, além de otimizar o TAH, também aumenta a PA e a sustentabilidade ambiental da produção irrigada frente à produção de sequeiro (ZHANG; OWEIS, 1999; FERERES; SORIANO, 2007).

Os limites físicos e fisiológicos que determinam o valor de f para cada fase fenológica não precisam ser os únicos considerados na definição do valor que será adotado, podendo a estratégia de manejo adotar valores ligeiramente maiores ou menores, seja por questões estratégicas ou econômicas. Por exemplo, o aprofundamento radicular de gramíneas, como a cana-de-açúcar, pode ser induzido através da prática de manejo criterioso de irrigação deficitária, permitindo um incremento gradativo do limite de depleção (ALLEN *et al.*, 1998). Se bem conduzida, essa prática pode aumentar a eficiência de uso de água e nutrientes do perfil do solo, aumentar a P_{ef} , e reduzir a demanda de irrigação.

Dentre as formas de aplicar o *deficit* hídrico controlado no manejo da irrigação, duas se destacam: (i) aumentar o valor de f adotado, permitindo um maior nível de depleção de água no solo antes de voltar a irrigar; e (ii) repor apenas parcialmente a irrigação total necessária (ITN - lâmina necessária para elevar a umidade atual até a capacidade de campo) toda vez que a umidade atingir o ponto f . A aplicação simultânea das duas estratégias também pode ser utilizada.

Se a estratégia de irrigação por *deficit hídrico controlado* for considerada desde a concepção do projeto de irrigação, a lâmina máxima diária que pode ser aplicada (lâmina de projeto) pode ser dimensionada de tal forma que atenda integralmente à demanda hídrica nas fases iniciais, mais críticas, e apenas uma fração da demanda nas fases de maior requerimento, onde a cana-de-açúcar também é mais tolerante ao *deficit hídrico*. Essa estratégia otimiza a lâmina de projeto e, logo, o investimento na infraestrutura de irrigação.

Uma forma de dimensionar esse nível de *deficit hídrico* aplicado durante o ciclo da cultura é o % de redução da ETC. Ou seja, o percentual da ETC de todo o ciclo que, de modo controlado e proposital, não se transformará em ETR.

8.7 Estratégia de maturação (*drying-off*)

Cada variedade tem seu potencial genético para acúmulo de açúcar e seu padrão de curva de maturação (PEREIRA *et al.*, 2017). A fisiologia da maturação é um sistema belíssimo e complexo que também é influenciado por diversos outros processos (MARIN; NASSIF, 2013). Praticamente tudo que sinaliza para a planta que o seu ciclo de vida pode estar chegando ao fim ou que seu futuro está em perigo, engatilha processos fisiológicos que aceleram a maturação e o armazenamento de açúcar nos colmos. Declínio de temperatura e *deficit hídrico* são dois dos fatores que aceleram a curva de maturação (CASAROLI *et al.*, 2019).

Com temperatura favorável ao seu crescimento, se não houver restrição hídrica, a cultura continuará dedicando a maior parte de sua energia para produzir mais folhas e crescer. Isso ocorre tanto para cana de sequeiro como cana irrigada. Por essa razão, por exemplo, eventos de chuva fazem os valores de ATR (açúcar total recuperável, kg t⁻¹) caírem em canavial que está prestes a ser colhido (OLIVEIRA *et al.*, 2011). Por outro lado, temperatura excessivamente baixa e estresse hídrico por períodos muito prolongados fazem a cultura ultrapassar o ponto de maturação ótimo. Os processos fisiológicos da cana em sistema de sequeiro e irrigado são os mesmos, o que muda são o formato de suas curvas de maturação (CASAROLI *et al.*, 2019), da mesma forma como a curva de maturação da cana de sequeiro em um solo que armazena mais água é mais lenta do que a curva num solo arenoso (MAULE *et al.*, 2001). Ou seja, é necessário aprender o comportamento da curva de maturação de um canavial irrigado e, assim, como se faz em áreas de sequeiro, utilizar estratégias de manejo para otimizar a maturação e o momento de colheita. Chama-se *drying-off* (INMAM-BAMBER; SMITH, 2005) a estratégia de redução controlada da irrigação nos dias que antecedem a colheita, que resulta em maior *deficit hídrico*, interrompe o vigor vegetativo e a acelera a concentração de açúcar nos colmos.

Se o manejo da oferta de nutrientes não estiver compatível com o objetivo de interromper o crescimento vegetativo e otimizar a maturação, a estratégia de *drying-off* funcionará, mas de forma limitada.

Se o *drying-off* aplicado for demasiadamente moderado, o TCH será maximizado, mas não o ATR. Por outro lado, se for demasiadamente agressivo, o ATR será maximizado, mas o TCH pode ser reduzido além do adequado. Na verdade, sob condições de estresse hídrico excessivo, perde-se TCH e perde-se ATR. Por isso, o objetivo do *drying-off* não é maximizar nem o TCH, nem o ATR, mas o TAH.

O ganho de TAH com a aplicação da estratégia de *drying-off* já foi observado em várias áreas de produção (ROBERTSON; DONALDSON, 1998; INMAM-BAMBER; SMITH, 2005; OLIVIER *et al.*, 2006; BARBOSA *et al.*, 2012; BARBOSA *et al.*, 2013; HAGOS *et al.*, 2014; PIRES *et al.*, 2014; SILVA, 2014). Há relatos de até 18% de TAH em vários experimentos. Inman-Bamber (2004) reporta *drying-off* otimizado quando resulta na perda de 3 a 4 folhas por colmo. Robertson e Donaldson (1998), analisando resultados na África do Sul, identificaram ganhos médios de TAH de 8%, chegando até 15%.

Diversos autores tentam correlacionar a intensidade adequada do *drying-off* a um determinado número de dias de interrupção da irrigação antes da colheita. Hagos *et al.* (2014), na Etiópia, identificaram que 65 dias de *drying-off* favoreceu a variedade estudada. Em Guaira, SP, Barbosa *et al.* (2012), Barbosa *et al.* (2013), e Pires *et al.* (2014) aplicaram *drying-off* de 45 a 75 dias para otimizar o TAH para variedade RB85536. Vieira *et al.* (2013), estudando a variedade RB86-7515 em Jaíba, MG, otimizaram o TAH com *drying-off* aplicado 7 dias antes do corte. Araújo *et al.* (2016) otimizaram o TAH para variedade CTC 4 em Santo Antônio de Goiás, GO, aplicando *drying-off* 30 dias antes da colheita. E Olivier e Singels (2015) otimizaram o TAH na África do Sul com *drying-off* de 20 a 40 dias. Comumente, no Brasil, produtores aplicam *drying-off* de 30 dias antes da colheita, independentemente da variedade, do padrão nutricional da lavoura, do uso de maturadores, do nível de água disponível no início do *drying-off*, do clima (ETo e temperatura) na fase de maturação, da profundidade radicular e da capacidade de retenção de água do solo. No entanto, o número de dias não é o método mais adequado para determinar a intensidade ótima do *drying-off*, justo por que não considera todas as variáveis que influenciam esse processo de maturação.

Inman-Bamber e Jager (1986) indicaram que a maturação ocorre quando o potencial de água na folha encontra-se entre -0,2 e -1,2 MPa. Robertson e Donaldson (1998) demonstraram que o TAH é maximizado quando o *drying-off* resulta em decréscimo inferior a 10% da matéria seca do colmo. Além desse limite, o TAH cai linearmente. Robertson *et al.* (1999) reportaram melhores resultados de TAH quando o *drying-off* aplicado produziu redução de 4 a 8% da matéria seca. Donaldson e Benzuidenhout (2000) afirmam que, na África do Sul, uma prática comum dos produtores era aplicar um *drying-off* equivalente a duas vezes a CTA. Mas, em seu trabalho, obtiveram otimização do *drying-off* quase sempre com múltiplos bem abaixo de 2 vezes a CTA. Para solos e alta retenção, os múltiplos se aproximaram de 1 e, nos solos de menor retenção, múltiplos de até 1,8. Singels *et al.* (2000) verificaram que o ATR foi favorecido quando o *drying-off* imprimiu níveis de disponibilidade relativa de água no solo abaixo de 55%. Este tipo de estratégia de mensuração da intensidade do *drying-off* - observação da planta e/ou do solo, pode auxiliar a tomada de decisão mais assertiva para otimização do TAH.

Vale ressaltar que a aplicação precisa da estratégia de *drying-off* também depende de que o clima após a interrupção da irrigação se comporte próximo da condição normal prevista. Eventos não esperados de chuva prejudicam a precisão da estratégia, sobretudo quando se pretende aplicá-la para colher o canavial no início ou final de safra. No meio da safra, quando há menor probabilidade de chuva nos dois meses que antecedem a colheita, há maior chance de executar com perfeição o *drying-off*.

No Cerrado, o período de *drying-off* pode oscilar entre 10 e 90 dias. Para uma variedade de curva de maturação menos acentuada, sob solo de elevada CTA, colhido no início da safra (temperaturas mais amenas e mais próximo ao final do período chuvoso), será necessário um maior número de dias de *drying-off* do que um canavial com variedade de curva de maturação mais acentuada, sob solo com menor CTA, colhido no final de agosto, quando a temperatura do ar é mais elevada e o nível de água disponível no solo já está muito reduzido.

Uma vantagem adicional do *drying-off* é a criação de melhores condições para o tráfego de máquinas na colheita, sem os efeitos de compactação e afundamento de entrelinha.

8.8 Recomendações para estimar a demanda hídrica da cana-de-açúcar no Cerrado

Nos últimos 10 anos, a equipe de pesquisa em sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar da Embrapa Cerrados tem conduzido dezenas de experimentos dentro de usinas no Cerrado. Em todos esses experimentos, todas as práticas agrônômicas para alto desempenho e operações são realizadas utilizando os mesmos insumos e maquinários empregados nas

áreas comerciais dessas usinas. Esse aspecto é fundamental para aumentar a probabilidade de resultados da pesquisa serem replicáveis quando aplicados em área comercial. Além das dezenas de experimentos, a equipe também tem orientado e acompanhado o aperfeiçoamento da tecnologia e o manejo da irrigação em milhares de hectares sob esse sistema. Por isso, baseados na combinação do conhecimento científico e empírico acumulados pela equipe, indicamos na Tabela 4 um conjunto de parâmetros que tem proporcionado, até o momento, a melhor acurácia para estimativa de ETr e manejo de irrigação para produção de cana-de-açúcar no Cerrado. Os resultados de produtividade alcançados com esse conjunto de parâmetros serão descritos adiante no texto.

O uso da zona radicular indicada na Tabela 4 pressupõe a eliminação de barreiras químicas e físicas para o pleno desenvolvimento de raízes nessas profundidades, sobretudo quanto aos níveis de cálcio, magnésio e fósforo. Na fase de germinação, ajustes na profundidade de controle podem ser necessários em função do método de plantio (propagação vegetativa ou MPB) e em função da profundidade de sulcação. Recomenda-se um volume de controle inicial pelo menos 0,2 m abaixo da profundidade de plantio.

A partir da 1ª soca, e com exceção da fase de maturação, caso haja qualquer problema que implique no esgotamento total da camada de manejo, consideramos uma disponibilidade adicional de água equivalente a 30% da CTA. Em suma, essa estratégia considera que, além da zona escolhida para manejo da irrigação, existem algumas poucas raízes cordão que descem a camadas mais profundas do solo e que, em condições de estresse hídrico severo, são responsáveis pela absorção da maior quantidade de água utilizada pela planta (SMITH *et al.*, 2005; ARAÚJO, 2018). Na prática cotidiana do manejo de irrigação, trincheiras devem ser abertas eventualmente para verificação da distribuição radicular no perfil do solo.

Adotando práticas nutricionais de pré-maturação e o cálculo do *drying-off* equivalente ao consumo da CTA têm resultado, frequentemente, em valores de ATR superiores às áreas de sequeiro, comprovando o potencial do sistema irrigado de extrair melhor o potencial genético da cana. Com isso, além dos ganhos em TCH, um canavial irrigado e com manejo adequado de *drying-off* também pode entregar ganhos expressivos de ATR e, conseqüentemente, TAH.

Tabela 4. Parâmetros recomendados para estimativa de ETr e manejo de irrigação de cana-de-açúcar no Cerrado.

Fase Fenológica	I	II	III	IV
	Até 25% de cobertura do solo	25 a 100% de cobertura do solo	100% de cobertura do solo	100% de cobertura do solo
	Germinação ou Brotação	Perfilhamento e Desenvolvimento Inicial	Desenvolvimento Pleno	Maturação (Drying-off)
Coefficiente de Cultura - Kc				
Cana-planta e cana-soca	0,55	0,9	1,25	0,8
Fator de Disponibilidade Hídrica - f				
Cana-planta e Cana-soca	0,3	0,3	0,5	0,9
Modelo de cálculo de coeficiente de estresse - Ks				
Até ponto f	Ks = 1	Logarítmico, Bernardo <i>et al.</i> (2019)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)
Após ponto f	Logarítmico, Bernardo <i>et al.</i> (2019)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)
Reposição da Irrigação Total Necessária (ITN), em %				
Cana-planta e Cana-soca	100	100	100 ¹	5
Profundidade da zona radicular de controle - z (m)²				
Cana Planta ³	0,3	0,4	0,5	1
1ª Soca	0,35	0,45	0,55	1,1
2ª Soca em diante	0,4	0,5	0,6	1,2

¹ Na Fase III, utiliza-se aplica-se 100% da ITN enquanto a demanda não supera a lâmina de projeto. Contudo, como recomenda-se estratégias de irrigação deficitária e lâminas de projeto para satisfação de 75% da ITN máxima simulada pelas normais climatológicas, em boa parte da Fase III o sistema não consegue satisfazer a demanda, gerando uma redução proposital da fração de ETC que se converte em ETR.

² O uso da zona radicular indicada na Tabela 4 pressupõe a eliminação de barreiras químicas e físicas para o pleno desenvolvimento de raízes nessas profundidades, sobretudo quanto aos níveis de cálcio, magnésio e fósforo.

³ Na fase de germinação, ajustes da profundidade de controle podem ser necessários em função do método de plantio (propagação vegetativa ou MPB) e em função da profundidade de sulcação. Recomenda-se um volume de controle inicial pelo menos 0,2m abaixo da profundidade de plantio.

As melhores respostas da cana-de-açúcar sob sistema irrigado de produção têm ocorrido quando aproximadamente 75% da ETC é convertida em ETr ao longo do ciclo. Ou seja, quando, ao final do ciclo, a ETr acumulada representa uma redução de aproximadamente 25% da ETC. Variedades menos responsivas à irrigação, e por isso não recomendadas, normalmente, atingem máxima produtividade em patamares inferiores a 75% de satisfação da ETC. Para se alcançar a redução recomendada de 25% ETC ao final do ciclo, um percentual maior que 75% da ETC é satisfeito nas fases fenológicas iniciais, e um percentual menor que 75% da ETC é satisfeito na fase fenológica de desenvolvimento pleno. Os parâmetros apontados na Tabela 4 devem propiciar o nível recomendado de irrigação deficitária para a maior parte da região produtora de cana-de-açúcar no Cerrado, sob condições climatológicas normais, e adotando o manejo agrônômico sugerido. Para condições diferentes das normais climatológicas, ou manejo agrônômico muito distinto do recomendado, ou em regiões de transição do bioma Cerrado para outros biomas, os parâmetros precisam ser ajustados.

A deficiência hídrica na fase de maturação não é considerada no cômputo do alvo de redução da ETC, dado que, nessa fase a deficiência hídrica é induzida e benéfica.

8.9 Resposta produtiva da cana-de-açúcar ao sistema irrigado

É farta a literatura que demonstra a resposta produtiva da cana-de-açúcar sob sistema irrigado de produção. Na Figura 2, apresenta-se o resultado da compilação de dados oriundos de 42 publicações, sendo 16 relativas à experimentação em outros países, como África do Sul, Austrália, Suazilândia, Índia, China, Estados Unidos e Irã, e outras 26 oriundas de experimentação no Brasil. O experimento mais antigo da base de dados é de 1971 e, o mais recente, 2020. Do total de publicações, 17 referem-se a experimentações anteriores ao ano 2000, e 25 posteriores a esse ano. Resultados de cana-planta e cana-soca não foram separados nesta análise.

Na Figura 3, apresenta-se a resposta produtiva em experimento de longa duração conduzido pela Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, Goianésia, GO, entre os anos de 2012 e 2020. Nesse experimento, 12 variedades foram submetidas ao primeiro protocolo de sistema irrigado proposto pela equipe de pesquisa, e detalhado a seguir: Irrigação por aspersão com molhamento de área total, tipo pivô central, e manejo da irrigação via clima, com aferição via solo. A correção de solo foi realizada para alcançar 70% de saturação por bases e a fosfatagem para atingir 15 ppm de P_2O_5 (resina). O preparo de solo incorporou os corretivos a 35 cm de profundidade com grade pesada. A gessagem foi calculada conforme Sousa *et al.* (2016). Adubações anuais com N, P e K, divididas em 3 parcelas foram aplicadas a lanço, em área total, sobre a superfície. A área não recebeu adubação corretiva de micronutrientes, nem adubação via água de irrigação, nem quimigação. Utilizou-se anualmente inibidor de florescimento, mas não maturadores. Aplicações anuais de 500 kg de calcário dolomítico e 400 kg de gesso foram realizadas imediatamente após cada corte. Todas as operações agrícolas, controle de erva-daninha e tratos fitossanitários foram realizadas empregando os mesmos métodos e maquinários adotados em área comercial de sequeiro da usina.

8.9.1 Toneladas de colmo por hectare

Na análise de dados de literatura (Figura 2A), tanto experimentações que antecedem o ano 2000 quanto posteriores, o TCH (toneladas de colmo por hectare) em sistema irrigado supera o sistema de sequeiro. O valor máximo de TCH nas experimentações anteriores ao ano 2000 excedia pouco as 140 toneladas, ao passo que, nas últimas duas décadas, esse patamar superou as 200 toneladas por hectare.

Antes de 2000, o ganho médio de TCH conferido pelo sistema irrigado era de 23,3 toneladas superior ao de sequeiro. Após 2000, o ganho médio do conjunto de experimentos alcançou 30,4 toneladas, um aumento de 30%. Esse aumento da diferença de TCH entre o sistema sequeiro e irrigado evidencia o ganho de domínio da tecnologia de sistema irrigado de produção. Esse avanço tecnológico também fica evidente ao observar a maior dispersão de resultados para o sistema irrigado após 2000. Confirmando a experiência empírica, os dados mostram que, quando não se domina o sistema irrigado de forma holística, os ganhos de TCH são marginais, ao passo que quando aplicado em elevado padrão de domínio, as diferenças são acentuadas, podendo entregar um TCH até 100% superior ao sequeiro.

Além de áreas experimentais, elevadas produtividades de cana-de-açúcar irrigadas por pivô central em solos com boa fertilidade têm sido reportadas. No Noroeste e Norte Mineiro, Semiárido e Cerrado Nordestino, Noroeste e Sudoeste Goiano e Cerrado de São Paulo, são inúmeros os relatos de produtividade de canavial de 12 meses superando as 200 toneladas por hectare em áreas comerciais de usinas. Em algumas áreas da Usina Jalles Machado e Usina Otávio Lage, em Goianésia (GO) e em experimentação em Planaltina (DF) (BUFON *et al.*, 2013) também reportaram produtividades acima de 200 t ha⁻¹.

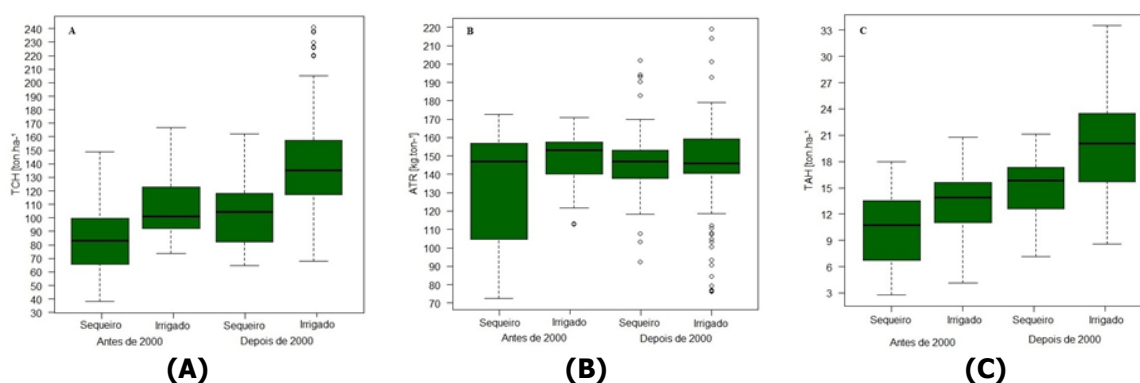


Figura 2. Valores de TCH (A), ATR (B) e TAH (C) de experimentos com cana-de-açúcar de sequeiro e irrigada em 17 estudos publicados no Brasil e no Mundo antes do ano 2000 e em 25 estudos posteriores ao ano 2000.

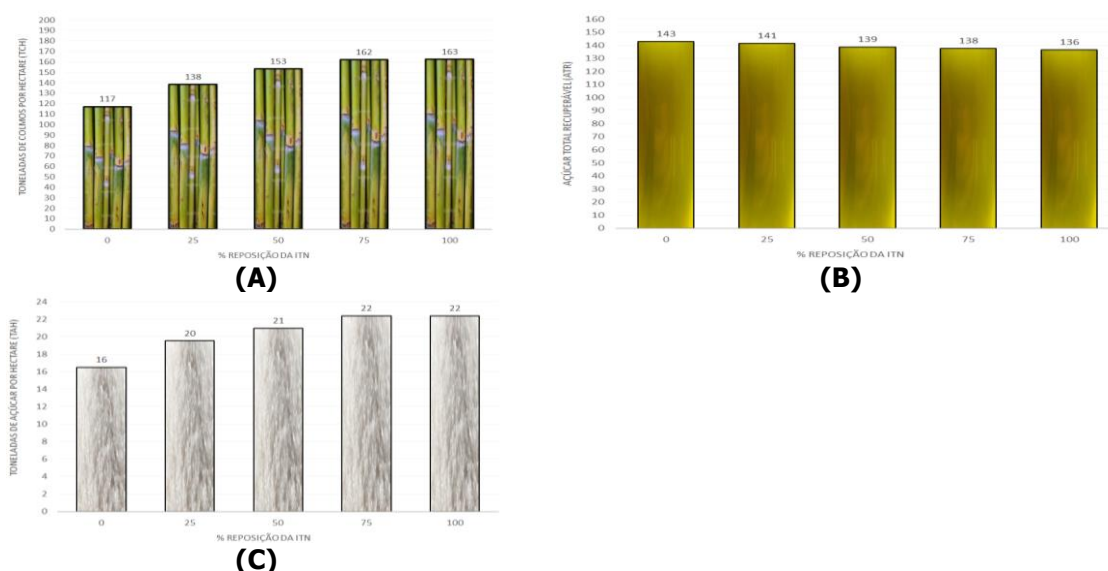


Figura 3. Resposta produtiva da cana-de-açúcar em toneladas de colmo por hectare (TCH) (A), açúcar total recuperável (ATR) (B) e toneladas de açúcar por hectare (TAH) (C), em experimentação da Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, GO, quando submetida a sistema irrigado de produção. Os tratamentos refletem 5 níveis de reposição da irrigação total necessária (ITN), e sendo a testemunha (0% da ITN) conduzida em sequeiro e adicionada de uma lâmina de salvamento de 60mm aplicada imediatamente após a colheita. Resultados médios de 8 anos e 12 variedades, entre os anos de 2012 e 2020.

Na experimentação da Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado (Figura 3A), a média acumulada de TCH para 8 cortes e 12 variedades atingiu-se 162 toneladas quando 75% da irrigação total necessária foi suprida. A variedade de menor responsividade, SP860042 atingiu média de 140 e, a mais responsiva, RB96 6928, atingiu 193 toneladas na média de 8 anos. De forma geral, incluindo variedades mais e menos responsivas, o sistema irrigado produziu 45 toneladas de colmo por ano a mais que a produção de sequeiro, tendo algumas variedades entregado diferença superior a 60 toneladas na média de 8 anos.

8.9.2 Açúcar total recuperável

Adotando práticas nutricionais de pré-maturação e a estratégia de cálculo do *drying-off* equivalente a duas vezes a CTA do solo têm resultado, frequentemente, em valores de ATR superiores às áreas de sequeiro, comprovando o potencial do sistema irrigado de extrair

melhor o potencial genético da cana. Com isso, além dos ganhos em TCH, um canavial irrigado e com manejo adequado de *drying-off* também pode entregar ganhos expressivos de ATR e, consequentemente, agregar TAH tanto pela massa de colmos quanto por sua qualidade.

Na curva de aprendizado em sistema irrigado de produção, normalmente, atinge-se a otimização de TCH antes de se dominar a otimização da maturação. Por essa razão, é esperado que, pelo menor entendimento do comportamento da curva de maturação das variedades em condição irrigada, o desempenho de ATR no sistema irrigado seja, com frequência, inferior ao da produção de sequeiro.

Nota-se na Figura 2B que, na média dos 42 experimentos analisados, sistemas irrigados auferiram valores de ATR semelhantes aos de sequeiro, ao redor de 145 kg t^{-1} . Mas, notadamente, a grande dispersão dos valores das experimentações posteriores a 2000 evidencia oportunidade de aprimoramento no domínio da técnica de *drying-off*.

Conforme apresentado na Figura 3B, a média acumulada de 8 cortes e 12 variedades, atingiu-se um ATR de 138 kg t^{-1} quando 75% da irrigação total necessária foi suprida, 5 kg abaixo do valor médio em sequeiro. Esse experimento foi conduzido entre 2012 a 2020 e, durante os 5 primeiros anos, até que a equipe dominasse melhor o *drying-off*, perdas de ATR ocorreram. Nos últimos 3 anos, os valores de ATR do sistema irrigado foram, no mínimo, iguais aos alcançados no sequeiro. Após a equipe ter dominado melhor a prática de *drying-off* (vide orientações na seção anterior) o padrão de valores de ATR iguais ou superiores às áreas de sequeiro tem se repetido na rede de experimentos que a Embrapa Cerrados conduz em diversas parceiras usinas do Cerrado.

8.9.3 Toneladas de açúcar por hectare

A análise das 42 publicações (Figura 2C) mostra que o valor médio de TAH (toneladas de açúcar por hectare) em sistema irrigado antes do ano 2000 era de, aproximadamente, 15 toneladas, ao passo que, nas últimas duas décadas, a média ultrapassou 20 toneladas e, com frequência, atingiu TAH acima de 30.

Tanto nas experimentações que antecedem o ano 2000 quanto nas posteriores, o TAH no sistema irrigado supera o sistema de sequeiro. Antes de 2000, na média dos experimentos, o sistema irrigado produziu TAH aproximadamente 3 toneladas superior ao sequeiro. Após 2000, o sistema irrigado produziu quase 6 toneladas, ou seja, 100% a mais que o sequeiro. Frequentemente, essas respostas chegam a incrementos de mais de 10 toneladas de açúcar por ano.

O aumento na diferença de TAH entre o sistema sequeiro e irrigado ao longo dos anos também evidencia o ganho de domínio tecnológico do sistema irrigado de produção. Assim como para o TCH, esse avanço tecnológico também fica evidente ao observar a maior dispersão de resultados de TAH para o sistema irrigado após 2000, confirmando observação empírica da equipe da Embrapa Cerrados.

A Figura 3C apresenta o resultado de TAH em experimentação conduzida pela Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, Goianésia (GO). Na média acumulada de 8 cortes e 12 variedades, atingiu-se um TAH de 22 quando 75% da irrigação total necessária foi suprida. Na média dos 8 anos e 12 variedades, o sistema irrigado produziu anualmente 6 toneladas a mais de TAH que o sequeiro. Para algumas variedades essa diferença foi superior a 8 toneladas de açúcar. Com a experiência de *drying-off* acumulada até o momento, e baseando-se nos resultados dos últimos 3 anos, acredita-se que essa diferença pode facilmente ultrapassar 10 toneladas de açúcar por ano.

8.9.4 Produtividade da água

Em razão dos ganhos de produtividade do sistema irrigado de produção, tanto em relação a TCH quanto TAH, a produção irrigada pode ser mais eficiente no uso da água do que a produção de sequeiro (MOLDEN; OWEIS, 2010; CALGARO *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2013; BUFON *et al.*, 2014; OLIVER; SINGELS, 2015; SINGH, 2018; CARVALHO *et al.*, 2019).

Segundo Olivier e Singels (2015), estudos relacionados à PA (produtividade da água) na cana-de-açúcar ao redor do mundo reportam valores variando normalmente entre 6 a 12 kg m⁻³. Mas, enquanto observando quatro ciclos (planta e 3 socas) na África do Sul, Olivier e Singels (2015) verificaram PA entre 7 a 13 kg m⁻³, e que a manutenção da palhada e o manejo criterioso da irrigação favoreceram os valores mais altos.

No Brasil, vários trabalhos apresentaram resultados de PA no sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar (CALGARO *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2013; BUFON *et al.*, 2014) encontrando valores entre 7,2 e 14,2 kg m⁻³.

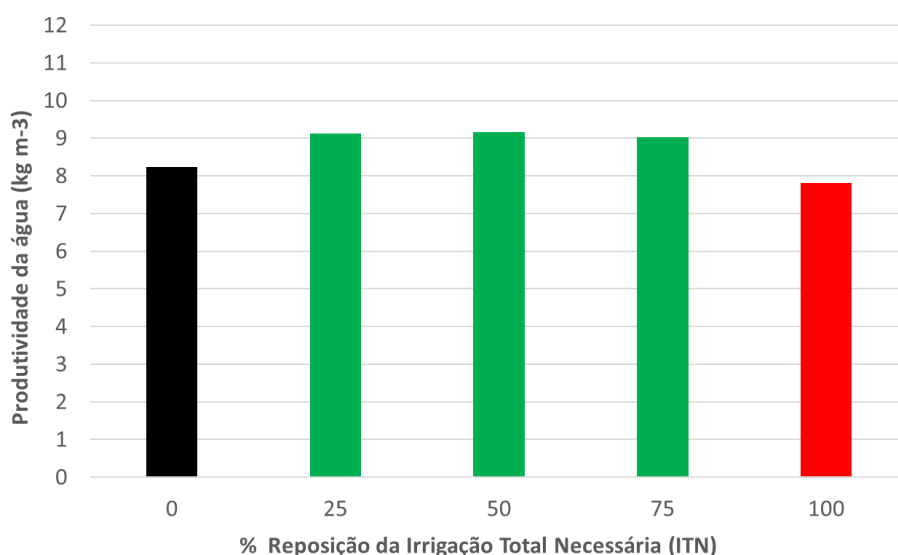


Figura 4. Produtividade da água (PA) de cana-de-açúcar, em kg m⁻³, em experimentação da Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, GO, quando submetida a sistema irrigado de produção. Os tratamentos refletem 5 níveis de reposição da irrigação total necessária (ITN), sendo a testemunha (0% da ITN) conduzida em sequeiro e adicionada de uma lâmina de salvamento de 60 mm aplicada imediatamente após a colheita. Resultados médios de 8 anos e 12 variedades, entre os anos de 2012 e 2020.

O resultado dos experimentos de longa duração da Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, Goianésia (GO) (Figura 4) indicam que, com exceção da estratégia de atendimento de 100% da irrigação total necessária, todas estratégias de irrigação deficitária resultaram em ganhos de PA, geralmente superiores a 15%. Para as variedades mais responsivas, estratégias de irrigação deficitária frequentemente auferiram ganhos de PA superiores a 50%.

8.10 Plano de investimentos em produção irrigada

O Plano de Investimentos em Produção irrigada deve garantir, simultaneamente, a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos e a otimização dos investimentos em sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar. Normalmente, esse plano passa por três etapas: (i) inventário de disponibilidade hídrica e aptidão, (ii) planejamento hídrico estratégico, e (iii) plano diretor de investimentos.

A primeira etapa Inventário de disponibilidade hídrica e aptidão levanta toda vazão outorgada e outorgável dentro dos limites da usina, e classifica suas áreas quanto a aptidão edafoclimática e logística para receberem um sistema irrigado de produção.

Na segunda etapa, elabora-se o Plano Hídrico Estratégico, que define como será utilizada a disponibilidade hídrica para verticalizar a produção. Nessa etapa, define-se quais talhões receberão o sistema irrigado, e qual será a época de colheita e a produtividade esperada de cada um deles. Esse processo define o papel de cada talhão sob sistema irrigado na estratégia global da usina. Com essas informações, define-se a demanda hídrica que deverá ser suplementada em cada área. Cada nível de satisfação hídrica e produtividade esperada gera um protocolo agrônômico e premissas de projeto de irrigação.

Normalmente, devido à limitação de recursos hídricos, a estratégia caminha para lastrear uma fração da produção da usina sob sistema irrigado, onde será mitigado o risco climático, e o restante da usina é direcionada para o sistema de sequeiro. Nesse caso, da área total demandada para moagem, a fração com piores solos, e as piores janelas de plantio e colheita são direcionadas para produção irrigada, muito menos sensível a esses fatores. E as melhores áreas, janelas de plantio e colheita são direcionadas para fração em sistema de sequeiro. Dessa forma, os investimentos na fração irrigada geram um impacto positivo também na área de sequeiro.

Mesmo nos casos excepcionais em que a disponibilidade hídrica permite que a totalidade da área da usina esteja sob produção irrigada, o planejamento hídrico estratégico ainda é fundamental. Nesse caso, em função da época de colheita e produtividade alvo de cada área, ainda será necessário ordenar os talhões por nível de demanda hídrica e, conseqüentemente, orientar protocolos agrônômicos e premissas de projeto de irrigação específicos para cada nível.

A terceira etapa é o plano diretor de investimentos em sistema irrigado. No plano diretor, estrutura-se a estratégia e velocidade de implementação, faz-se análise preliminar de viabilidade financeira, e estrutura-se o ordenamento dos investimentos por prioridades. Nesta etapa, projetos básicos de engenharia e análises de fluxo de caixa para áreas individuais podem ser necessários para subsidiar e direcionar a priorização das áreas que receberão primeiro o sistema irrigado.

Uma questão recorrente e controversa durante a fase de planejamento hídrico estratégico diz respeito à priorização para o sistema irrigado de canais colhidos no início, meio ou final da safra. Há casos de projetos e usinas com a totalidade de sua área irrigada e que, por isso, não precisam fazer essa escolha. Mas esses casos são exceção. Na maior parte dos casos será necessário decidir qual canal irrigar, seja por limitação financeira para investir em irrigação, seja por limitação de disponibilidade hídrica.

Normalmente, prioriza-se o canal de final de safra, dada a maior deficiência hídrica e quebra da produtividade em áreas de sequeiro colhidas nesse período (MONTEIRO; SENTELHAS, 2014; CARVALHO *et al.*, 2019). Contudo, alguns resultados experimentais também podem embasar uma estratégia diferente.

Primeiramente, as evidências de campo mostram que, na verdade, no longo prazo, os maiores ganhos de produtividade (TAH) não estão associados à decisão de que canal se escolhe irrigar (início, meio ou final de safra), mas do domínio do sistema de produção irrigado, o que passa pela seleção da variedade, da adoção das melhores estratégias de manejo da irrigação, da fertilidade e do trato fitossanitário.

Segundo, porque a maior probabilidade de acerto na estratégia de *drying-off* está em canal irrigado de meio de safra, pela menor probabilidade de ser afetada por evento de chuva inesperada.

Em terceiro lugar, quando a usina está realizando os primeiros investimentos em produção irrigada e depende do retorno financeiro de um projeto específico para custear os demais, ao invés de olhar a estratégia geral da usina, pode preferir analisar a área irrigada como um projeto financeiro em si mesmo - quase com um CNPJ próprio, almejando que a área entregue o maior retorno financeiro possível, sem compará-la a uma área de sequeiro. Quando essa visão predomina, é inevitável perceber que, se por um lado a diferença de TAH entre sequeiro e irrigado é maior no final de safra, por outro lado, o custo do projeto de irrigação também aumenta à medida que se avança na safra, dado que a deficiência hídrica aumenta. Por isso, o melhor retorno financeiro por tonelada de cana (ou de açúcar) pode ser superior em canavial colhido no início ou meio de safra.

Em quarto lugar, pode-se considerar que, ao se direcionar os piores solos para produção irrigada em início e meio de safra, também se obterá ganho de produtividade no canavial de sequeiro colhido em final de safra que migrar para solos melhores e melhores janelas de plantio.

Em quinto lugar, considerando que a grande maioria das usinas no Brasil não possui experiência com sistemas modernos de produção irrigada de cana e que o aprendizado dessa tecnologia necessita de algum tempo e experiência prática, pode-se concluir ser mais fácil começar a dominar a tecnologia com um canavial irrigado para colheita no meio da safra, onde a probabilidade de acerto do *drying-off* é maior. Por essas razões, entendemos que o início da curva de aprendizado do sistema irrigado de produção de cana para a maioria das usinas pode ser facilitado com a escolha de canaviais de meio da safra, entre o início de julho e, no mais tardar, até a primeira quinzena de agosto.

8.11 Viabilidade econômica

Primeiramente, é fundamental perguntar se haverá sustentabilidade econômica para o setor sucroenergético brasileiro caso continue produzindo nos moldes atuais, com produção de sequeiro. A resposta para essa pergunta pode ser negativa, dada a tendência de redução e volatilidade de preços de *commodities* agrícolas (CASHIN *et al.*, 2002), os riscos climáticos crescentes (MARIN; NASSIF, 2013; ZILLI *et al.*, 2020) e os avanços tecnológicos e de eficiência experimentados pela concorrência, como o açúcar de beterraba (RAJAEIFAR *et al.*, 2019), o etanol de milho (OLIVEIRA *et al.*, 2018), os carros elétricos (SCHIMIDT *et al.*, 2011), entre outros.

Por isso, é urgente a verticalização do setor sucroenergético brasileiro, elevando cada vez mais sua eficiência e reduzindo custos de insumos, terra, e outros recursos naturais. Para isso, atualmente, não há estratégia melhor do que a conversão de fração produção de cana-de-açúcar de sequeiro para o sistema irrigado. Hoje, essa é a única alternativa prontamente disponível para mudar substancialmente, em curto e médio prazo, os patamares de produtividade e o custo do setor sucroenergético brasileiro.

No Brasil, com boa gestão, há recursos hídricos abundantes para isso (MULTSCH *et al.*, 2020). Também está disponível as melhores tecnologias do mundo para engenharia e manejo de irrigação. Resta a intensificação da colaboração entre instituições de pesquisa, empresas de irrigação e setor produtivo para continuar desenvolvendo, comunicar, capacitar e evidenciar ainda mais a viabilidade técnica e econômica dessa estratégia. Diversos grupos e produtores que são referência em inovação tecnológica na produção sucroenergética já caminham a passos largos nessa direção – muitos até com estratégias sigilosas para acentuar sua vantagem competitiva. Mas é importante que esse seja um movimento de todo o setor e não apenas de poucos grupos.

Um erro recorrente ao avaliar a viabilidade econômica de sistemas irrigados é considerar única e exclusivamente o ganho de produtividade de colmos. De fato, o ganho de

TCH é muito importante pois, além de aumentar receita, dilui os custos por tonelada produzida. Mas, como expressado ao longo deste capítulo, há muito mais vantagens.

Vale destacar que, no sistema irrigado, é possível atingir níveis de ATR iguais ou superiores a áreas de sequeiro. Por isso, aumenta-se substancialmente a produção de TAH, tanto pelo aumento de TCH quanto pelo aumento de ATR.

Além do aumento de receita direta e diluição de custos por unidade produzida, ainda há redução de custos por ganho de eficiência operacional nas principais, senão todas, operações agrícolas.

Pode-se destacar a redução do custo de plantio e preparo e custo da terra, um dos maiores custos da fase agrícola. No final de um ciclo de 10-12 anos de produção irrigada, se produz mais TAH do que se essa fosse uma área de sequeiro. Ganha-se no TAH anual e no acumulado em razão da maior longevidade. Consequentemente, haverá mais TAH para diluir o custo de plantio e custo da terra. Ou seja, custo da terra, custo de preparo e custo de plantio por TAH também são menores no sistema irrigado.

Há ainda os ganhos de eficiência nas outras operações agrícolas. A operação em menor área para produzir a mesma quantidade de açúcar reduz os custos de capital (inclusive maquinário), de mão-de-obra, administrativo, etc. Ainda pode-se considerar as facilidades e ganhos de eficiência na gestão ocasionadas pela redução da área.

Deve-se ainda considerar o ganho de produtividade, longevidade e redução de custos das áreas de sequeiro, que migram para os melhores ambientes e janelas de plantio da usina à medida que os piores ambientes e janelas de plantio são absorvidos pelo sistema irrigado.

Por fim, a maior produtividade eleva a eficiência das colhedoras por hora trabalhada e reduz as distâncias percorridas por colhedoras, transbordos e carretas para atender a moagem da usina. Ou seja, a verticalização das áreas com sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar resulta em aumento de eficiência e redução acentuada de um dos principais custos do setor, o CTT.

Dito isso, considerando apenas os ganhos diretos (sem contar os vários ganhos indiretos apontados acima), calculamos um *payback* aproximado de três anos para o investimento em sistema irrigado de produção. Depois desse prazo, o produtor terá pelo menos mais 7 a 9 anos de vida útil de equipamento para usufruir dos ganhos do sistema irrigado. Variações ocorrerão em função da natureza de cada projeto.

8.12 Considerações finais

Os dois argumentos mais relevantes contra a viabilidade econômica, na verdade, não têm relação com a viabilidade do sistema em si. O primeiro argumento é a falta de domínio da tecnologia para extrair seu potencial. Como em qualquer outro sistema, a única solução é buscar apoio técnico e começar a exercitar o sistema de produção irrigada em uma pequena fração de sua área – evoluindo na curva de aprendizado e domínio tecnológico. Como esse aprendizado demanda tempo, não começar o quanto antes pode custar a sobrevivência do negócio. O segundo argumento relevante é a fragilidade financeira para iniciar os investimentos em sistemas de irrigação. Para isso, não há outra solução além de estruturar um Plano de Investimentos em Sistema Irrigado, incluindo as etapas do inventário de disponibilidade hídrica, planejamento hídrico estratégico e plano diretor de investimentos. Também é uma estratégia viável utilizar os ganhos das primeiras etapas de investimento em produção irrigada para custear a expansão para novas áreas irrigadas. Isso é mais plausível do que imaginar que a expansão da área irrigada será custeada pelos ganhos incertos da área de sequeiro.

Referências

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. United Nations Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, **Irrigation and drainage paper**, 56, 300p., 1998.
- APARECIDO, L.E.O.; MENESES, K.C.; TORSONI, G.B.; MORAES, J.R.S.C.; MESQUITA, D.Z. Accuracy of potential evapotranspiration models in different time scales. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, n.1, p.63-80, 2020.
- ARALDI, R.; SILVA, F.M.L.; ONO, E.O.; RODRIGUES, J.D. Florescimento em cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.40, n.3, p.694-702, 2010.
- ARAÚJO, L.G. **Gesso Agrícola na cana-de-Açúcar: Produtividade, desenvolvimento radicular e estoque de carbono no solo**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Brasília. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília, 2018.
- BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça e adubos minerais via irrigação por gotejamento subsuperficial: Ciclo da cana-planta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n.19, p.952-958, 2012.
- BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; PIRES, R.C.M.; SILVA, T.J.A.; SAKAI, E. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça via irrigação por gotejamento subsuperficial em três ciclos de cana-soca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.6, p.588-594, 2013.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, D.D.; SOARES, A.A. **Manual de Irrigação**, 9 Ed., Viçosa, UFV, 545p., 2019.
- BHUIYAN, M.Z.I.; WANG, S.; CARTER, J.; RAKA, T.M. Calibration and assessment of capacitance based soil moisture sensors. *Geo-Congress*, p.754-766, 2020.
- BOSQUILIA, R.W.D.; NEALE, C.M.U.; DUARTE, S.N.; LONGHI, S.J.; FERRAZ, S.F.B.; MULLER-KARGER, F.E. Evaluation of evapotranspiration variations according to soil type using multivariate statistical analysis. **Geoderma**, v.355, n.1, p.1-11, 2019.
- BUFON, V.B.; FONTOURA, P.; BRENN, R.; ZUKETTA, R.; MESQUITA, J.; FEITOSA, W. Sugarcane in the Brazilian Savanna (Cerrado): Effects of irrigation on biomass production and water use efficiency. American Society of Biological and Agricultural Engineering. In: INTERNATIONAL ANNUAL MEETING. Montreal, Canada, 2014.
- BUFON, V.B.; MARCANTE, N.C.; SANTOS, J.M.; *et al.* Acúmulo e partição de biomassa da cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos na região do cerrado. **STAB**, p.178-183, 2016.
- BUFON, V.B.; MESQUITA, J.; ZUKETTA, R.; BATISTA, L.T.; EVANGELISTA, B.; MARIN, F. Sugarcane in the Brazilian Savanna (Cerrado): Effects of irrigation on biomass production and partitioning. American Society of Biological and Agricultural Engineering. In: INTERNATIONAL ANNUAL MEETING. Kansas City, 2013.
- CABRAL, O.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H. Water use in a sugarcane plantation. **GCB Bioenergy**, v.4, p.555-565, 2012.
- CABRAL, O.M.R.; DA ROCHA, H.R.; GASH, J.H.; FREITAS, H.C.; LIGO, M.A.V. Water and energy fluxes from a woodland savanna (Cerrado) in southeast Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v.4, n.PB, p.22-40, 2015.
- CALGARO, M.; SIMÕES, W.L.; PINTO, J.M.; BRAGA, M.B.; SOARES, J.M.; SOUZA, M.A. de; LIMA, J.A. Eficiência do uso da água de irrigação em dois sistemas de cultivo de cana-de-açúcar de segunda soca no Submédio São Francisco. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 23, Luís Eduardo Magalhães. **Anais**, 2013.
- CARR, M.K.V.; KNOX, J.W. The water relations and irrigation requirements of sugar cane (*Saccharum officinarum*): a review. **Experimental Agriculture**, v.47, n.1, p.1-25, 2011.
- CARVALHO, T.B.; RESENDE, R.S.; RODRIGUES, R. Water use efficiency in the sugarcane cropping in different planting dates in Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v.14, n.18, p.794-800, 2019.

- CASAROLI, D.; ALVES JÚNIOR, J. A.; EVANGELISTA, A. W. P. Quantitative and qualitative analysis of sugarcane productivity in function of air temperature and water stress. **Comunicata Scientiae**, v.10, n.1, p.203-212, 2019.
- CASHIN, P.; McDERMOTT, J. The long-run behavior of commodity prices: small trends and big variability. **IMF Staff Papers** v.49, n.2, p.1-25, 2002.
- CLEMENTE, P.R.A.; BEZERRA, B.K.L.; SILVA, V.S.G.; SANTOS, J.C.M.; ENDRES, L. Root growth and yield of sugarcane as a function of increasing gypsum doses. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.47, n.1, p.100-117, 2017.
- CUNHA, F.F.; RAMOS, M.M.; ALENCAR, C.A.B. Sistema radicular de seis gramíneas irrigadas em diferentes adubações nitrogenadas e manejos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.32, n.2, p.351-357, 2010.
- DONALDSON, R.; BEZUIDENHOUT, C. Determining the maximum drying off periods for sugarcane grown in different regions of the South African industry. **Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association**, v.74, n.1, p.162-166, 2000.
- DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. Yield response to water. Rome: FAO. **Irrigation and Drainage Paper**, n.33, 1979.
- FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; DANTAS NETO, J.Y.; GHEYI, H.R. Eficiência no uso da água na cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de zinco no litoral paraibano. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v.28, n.3, p.494-506, 2008.
- FERERES, E.; SORIANO, M.A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.2, p.147-159, 2007.
- FRANCISCO, P.R.M.; GUIMARÃES, C.L.; SABOYA, L.M.F.; DANTAS NETO, J.; SANTOS, D. Aptidão climática da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) para o Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.10, n.3, p.676-686, 2016.
- HAGOS, H.; WORKU, W.; TAKELE, A. Effect of drying off period and harvest age on quality and yield of ratoon cane (*Saccharum officinarum* L.). **Advances in Crop Science and Technology**, v.2, n.3, p.5, 2014.
- HSIAO, T.C.; ACEVEDO, E. Plant responses to water deficits, water-use efficiency, and drought resistance. **Agricultural Meteorology**, v.14, p.59-84, 1974.
- INMAN-BAMBER, N.G. Crop response to water stress. In: BRUCE, R. **Best Practice Irrigation in Sugarcane Production Short Course**. Course Manual. Townsville. 229p. 2002.
- INMAN-BAMBER, N.G. Efficient use of water resources in sugar production: a physiological basis for crop response to water supply. **Sugar Research Australia**, p.39, 1999.
- INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, p.107-122, 2004.
- INMAN-BAMBER, N.G.; JAGER, M. Effect of water stress on growth, leaf resistance and canopy temperature in field grown sugarcane. **Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association**, p.156-161, 1986.
- INMAN-BAMBER, N.G.; SINGELS, A.; MUCHOW, R.C. A systems approach to benchmarking for sugarcane production in Australia and South Africa. **Proceeding of South African Sugarcane Technologists' Association**, v.72, p.3-9, 1998.
- INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, p.185-202, 2005.
- LACLAU, P.B.; LACLAU, J.P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, v.144, p.351-360, 2009.
- LEÃO, T.P.; COSTA, B.F.D.; BUFON, V.B.; ARAGÓN, F.F.H. Using time domain reflectometry to estimate water content of three soil orders under savanna in Brazil. **Geoderma Regional**, v.21, p.13, 2020.

- 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.
- MARIN, F.; NASSIF, D.S.P. Climate change and the sugarcane in Brazilian: Physiology, conjuncture and future scenario. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, p.232-239, 2013.
- MARIN, F.R.; INMAN-BAMBER, G.; SILVA, T.G.F. Evapotranspiration and irrigation requirements in tropical climates. **Theoretical and Applied Climatology**, v.140, n.3-4, p.1349-1357, 2020.
- MAULE, R.F.; MAZZA, J.A.; MARTHA, G.B. Productivity of sugarcane cultivars in different soils and harvesting periods. **Scientia Agrícola**, v.58, n.2, p.295-301, 2001.
- MOLDEN, D.; OWEIS, T. STEDUTO, P.; BINDRABAN, P.; HANJRA, M.A.; KIJNE, J. Improving agricultural water productivity: between optimism and caution. **Agricultural Water Management**, v.97, p.528-535, 2010.
- MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Potential and actual sugarcane yields in southern Brazil as a function of climate conditions and crop management. **Sugar Tech**, v.16, n.3, p.264-276, 2014.
- MULTSCH, S.; KROL, M.S.; PAHLOW, M. Assessment of potential implications of agricultural irrigation policy on surface water scarcity in Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.24, n.1, p.307-324, 2020.
- OHASHI, P.; PIRES, D.M.; RIBEIRO, R.V.; SILVA, A.L.B.O. Root growth and distribution in sugarcane cultivars fertigated by a subsurface drip system. **Bragantia**, v.74, n.2, p.131-138, 2015.
- OLIVEIRA, F.M.; ASPIAZU, I.; KONDO, M.K.; BORGES, I.D.; PEGORARO, R.F.; VIANNA, E.J. Avaliação tecnológica de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e supressões de irrigação. **Revista Ceres**, v.59, n.6, p.832-840, 2012.
- OLIVEIRA, L.A.; MIRANDA, J.H.; COOKE, R.A.C. Water management for sugarcane and corn under future climate scenarios in Brazil. **Agricultural Water Management**, v.201, p.199-206, 2018.
- OLIVIER, F.C.; DONALDSON, R.A.; SINGELS, A. Drying off sugarcane on soils with low water holding capacity. **Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association**, v.80, n.1, p.183-187, 2006.
- OLIVIER, F.; SINGELS, A. A database of crop water use coefficients for irrigation scheduling of sugarcane. **Proceedings South Africa Sugarcane Technology Association** v.75 p.81-83. 2001.
- OLIVIER, F.C.; SINGELS, A. Increasing water use efficiency of irrigated sugarcane production in South Africa through better agronomic practices. **Field Crops Research**, v.80, n.1, p.87-98, 2015.
- PEREIRA, L.F.M.; FERREIRA, V.M.; OLIVEIRA, N.G. Sugars levels of four sugarcane genotypes in different stem portions during the maturation phase. In: Academia Brasileira de Ciências. **Anais**. v.89, n.2, p.1231-1242, 2017.
- PINCELLI, R.P.; SILVA, M.D.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.
- PIRES, R.C.M.; BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E.; SILVA, T.J.A. Effects of subsurface drip irrigation and different planting arrangements on the yields and technological quality of sugarcane. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.140, n.9, p.1-7, 2014.
- PRADO, H.; VAN LIER, Q.J.; LANDELL, M.G.A.; VASCONCELOS, A.C.M. Classes de disponibilidade de água para cana-de-açúcar nos principais solos. 2018. Disponível em: https://www.pedologiafacil.com.br/artig_4.php. Acesso em: 13 mai. 2021.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. **AquaCrop Reference manual**. FAO, May, p.302, 2018. Disponível em: www.fao.org/publications. Acesso em: 1 abr. 2021.
- RAJAEIFAR, M.A.; SADEGHZADEH HEMAYATI, S.; TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M.; MAHMOUDI, S.B. A review on beet sugar industry with a focus on implementation of waste-to-energy strategy for power supply. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.103, January, p.423-442, 2019.

- ROBERTSON, M.J.; DONALDSON, R.A. Changes in the components of cane and sucrose yield in response to drying-off of sugarcane before harvest. **Field Crops Research**, v.55, p.201-208, 1998.
- ROBERTSON, M.J.; INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, v.64, p.211-227, 1999.
- ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; DONALDSON, R.A.; INMAN-BAMBER, N.G.; WOOD, A.W. Estimating the risk associated with drying-off strategies for irrigated sugarcane before harvest. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.50, p.65-78, 1999.
- SANTOS, J.M. **Índice de área foliar de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos no cerrado**. 121p. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.
- SCHMIDT, J.; GASS, V.; SCHMID, E. Land use changes, greenhouse gas emissions and fossil fuel substitution of biofuels compared to bioelectricity production for electric cars in Austria. **Biomass and Bioenergy**, v.35, n.9, p.4060-4074, 2011.
- SCHWARTZ, R.C.; EVETT, S.R.; ANDERSON, S.K.; ANDERSON, D. Evaluation of a direct-coupled time-domain reflectometry for determination of soil water content and bulk electrical conductivity. **Vadose Zone Journal**, v.15, n.1, p.1-8, 2016.
- SCHWARTZ, R.C.; EVETT, S.R.; DOMÍNGUEZ, A.; LÉLLIS, B.C.; PARDO, J.J. Soil water and bulk electrical conductivity sensor technologies for irrigation and salinity management. In: Joint FAO/IAEA Programme (Org.). Landscape Salinity and Water Management for Improving Agricultural Productivity. Vienna: International Atomic Energy Agency, p.121-146, 2020.
- SILVA, A.L.B.O. **Produção e eficiência no uso da água de quatro cultivares de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento subsuperficial em Campinas, SP**. 45p., 2014. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical), Campinas: IAC, 2014.
- SILVA, M.A.; JIFON, J.L.; SILVA, J.A.G.; SANTOS, C.M.; SHARMA, V. Relationships between physiological traits and productivity of sugarcane in response to water deficit. **Journal of Agricultural Science**, v.152, n.1, p.104-118, 2014.
- SILVA, S.; DANTAS NETO, J.; TEODORO, I. Economic depth of drip irrigation on sugarcane. **Irriga**, v.1, n.2, p.37-46, 2015.
- SILVA, V.P.R.; SILVA, B.B.; ALBUQUERQUE, W.G.; BORGES, C.J.R.; SOUSA, I.F.; DANTAS NETO, J. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. **Agricultural Water Management**, v.128, p.102-109, 2013.
- SINGELS, A.; LAAN, M. Sugarcane. In: STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES D. (Ed.), Crop yield response to water (p.174-180). Rome: FAO, **Irrigation and Drainage Paper**, n.66, 2012.
- SINGELS, A.; KENNEDY, A.J.; BEZUIDENHOUT, C.N. The effect of water stress on sugarcane biomass accumulation and partitioning. **Proceedings of South African Sugar Technologists' Association**, v.74, p.169-172, 2000.
- SINGELS, A.; KENNEDY, A.J.; BEZUIDENHOUT, C.N.I. A simple computerized irrigation scheduling method for sugarcane. **Proceedings of South African Sugar Technologists' Association**, v.72, p.117-122, 1998.
- SINGELS, A.; VAN DEN BERG, M.; SMIT, M.A.; JONES, M.R.; VAN ANTWERPEN, R. Modelling water uptake, growth and sucrose accumulation of sugarcane subjected to water stress. **Field Crops Research**, v.117, n.1, p.59-69, 2010.
- SINGH, I. Growth, yield, irrigation water use efficiency, juice quality and economics of sugarcane under different irrigation scheduling. **Sugar Tech**, v.20, n.1, p.29-35, 2018.
- SMIT, A.L.; GEORGE, E.; GROENWOLD, J. Root observations and measurements at transparent interfaces with soil. In: SMIT, A.L.; BENGOUGH, A.G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Ed.), **Root methods: A handbook**. Berlin: Springer-Verlag, p.235-271, 2000.
- SMIT, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v.98, p.91-97, 2006.

SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v.92, p.169-183, 2005.

VAZQUEZ, M.; TEREZA, M.; RAMOS, B. Influência da deficiência hídrica no florescimento e características tecnológicas da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.24, n.4, p.461-466, 1989.

VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; DELAZARI, F.T. Época de interrupção da irrigação na cultura da cana-de-açúcar. **Irriga**, v.18, n.3, p.426-441, 2013.

VINÍCIUS, M.P.; SILVA, J.F.; SILVA, E.D.S.S.; ANDRADE JUNIOR, A.S.; MOUSINHO, F.E.P. Parâmetros fisiológicos de variedades de cana-de-açúcar submetidas a distintos regimes hídricos. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.2, n.4, p.509-518, 2017.

ZHANG, H.; OWEIS, T. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. **Agricultural Water Management**, v.38, p.195-211, 1999.

ZILLI, M.; SCARABELLO, M.; SOTERRONI, A.C. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of the Total Environment**, v.740, p.1-32, 2020.

CAPÍTULO 9

9 AGRICULTURA IRRIGADA NO CERRADO

Lineu Neiva Rodrigues, Maria Emília Borges Alves, Daniel Althoff e Diego Bispo dos Santos Faria

Resumo

O desempenho da agricultura brasileira nas últimas quatro décadas reflete, em grande medida, o extraordinário desenvolvimento desse setor no Cerrado. Dentre os elementos que vem contribuindo de forma fundamental para as transformações registradas no Cerrado desde a década de 1970 está o uso da irrigação. A agricultura irrigada agrega benefícios importantes a agricultura da região propiciando a verticalização da agricultura, ganhos em produtividade, estabilidade na produção e a viabilização da agricultura durante todo o ano. A área irrigada do Brasil é de aproximadamente 8,2 Mha, sendo que dos 30 municípios com maiores áreas irrigadas no Brasil, 14 estão no Cerrado. Além disso, 12 dos 15 Polos Nacionais de irrigação com predomínio de pivôs centrais estão na região do Cerrado, que conta com 73% (1,14 Mha) dos 1,55 milhão de hectares plantados sob pivô central no Brasil. A agricultura irrigada está em franca expansão, principalmente no Brasil, que possui uma área adicional irrigável de 55,85 milhões de hectares (potencial físico-hídrico total) e um potencial efetivo de médio prazo de 13,69 Mha, sendo que 45% deste potencial efetivo está localizado no Centro-Oeste, em especial em Mato Grosso e Goiás. É importante avaliar este incremento da irrigação sob a ótica da disponibilidade de recursos hídricos, principalmente, e somando a este aspecto questões relativas a logística, acesso à energia e o fortalecimento da produção de forma sustentável. Entender a agricultura irrigada no Cerrado é fundamental para a segurança alimentar do país.

9.1 Introdução

O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil e cobre 24% de seu território, ocupando uma área aproximada de 204 milhões de hectares. A região é de grande importância para a agricultura do país (KLINK, 2014; RADA, 2013; RODRIGUES; DOMINGUES, 2017) e é bastante afetada pela sazonalidade das chuvas.

O desempenho da agricultura brasileira nas últimas quatro décadas reflete, em grande medida, o extraordinário desenvolvimento desse setor no Cerrado. Este desenvolvimento é traduzido em números visto que, em 1975, o Cerrado contribuiu com 18% para o valor total da produção de culturas temporárias e permanentes no Brasil, passando a contribuir, em 2015, para 41% (SANTANA *et al.*, 2020a).

Dentre os elementos que vem contribuindo de forma fundamental para as transformações registradas no Cerrado desde a década de 1970 está o uso da irrigação. Em consonância com o desenvolvimento da agricultura, a participação dessa região na área total irrigada no País aumentou de 9% em 1970 para 44% em 2015, sendo este o bioma que apresentou maior expansão da irrigação nos últimos 20 anos. (SANTANA *et al.*, 2020b).

A agricultura irrigada agrega benefícios importantes a agricultura da região propiciando a verticalização da agricultura, ganhos em produtividade, estabilidade na produção e a viabilização da agricultura durante todo o ano. A agricultura irrigada, no entanto, é altamente intensiva no uso de recursos hídricos, principalmente no período seco (abril a setembro). Assim, caso não seja adequadamente planejada e gerenciada, o seu crescimento pode vir a agravar as disputas pelo uso de água na região.

Projeções indicam que o crescimento populacional e da renda irá aumentar a demanda global por alimentos em 35%, até 2030 (em comparação ao período 2005–2007). É esperado que o Brasil, como um dos principais produtores e exportadores de commodities agrícolas, e as regiões que compõem o Cerrado, como principais produtoras nacionais de grãos e carnes, tenham um papel fundamental no suprimento dessa demanda. Nesse contexto, o desafio para a agricultura da região será continuar aumentando a produção sem, contudo, expandir para novas áreas. Cada vez mais será preciso imprimir ações de intensificação e sustentabilidade ao processo produtivo no Cerrado (SANTANA *et al.*, 2020a) e a irrigação figura como uma das principais práticas a serem incrementadas para o alcance deste desafio.

Cabe dizer que é importante avaliar este incremento sob a ótica da disponibilidade dos recursos hídricos, principalmente, e somando a este aspecto questões relativas a logística, acesso a energia e o fortalecimento da produção de forma sustentável.

A diversidade de cultivos, produtividade, estabilidade de produção, uso eficiente da água e aumento do número de safras anuais são fatores positivos para a segurança alimentar e qualidade de vida frente às crescentes demandas por alimentos, fibras e energia renovável. Por outro lado, é fundamental considerar a crescente demanda pelos recursos hídricos, sazonalidade na oferta e a preservação ambiental (GUIMARÃES; LANDAU, 2020).

Neste contexto, já se observa o incremento de conflitos em regiões do Cerrado onde a expansão de áreas irrigadas se deu com pouco planejamento e informações hidrológicas (POUSA *et al.*, 2019). Além disso, estudos considerando diferentes projeções de mudanças climáticas apontam diversos riscos para o desenvolvimento socioeconômico da região. Dentre os impactos esperados pode-se citar o aumento da temperatura e a redução da precipitação (CHOU *et al.*, 2014), prolongamento da estação seca (PIRES *et al.*, 2016) e redução da vazão disponível em cursos d'água (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Frente a este paradigma, a agricultura irrigada, por sua vez, tem ainda o desafio de melhorar a eficiência de uso de dois insumos estratégicos para a sociedade: água e energia. Além disso, a cada dia fica mais clara a premissa de que para compatibilizar aumento de produção com sustentabilidade alimentar e ambiental será necessário embasar os processos produtivos em inovação e uso de tecnologias (RODRIGUES; DOMINGUES, 2017).

9.2 Área irrigada atual

A área irrigada do Brasil passou de quase 460 mil hectares em 1960 para aproximadamente 8,2 Mha em 2021, segundo dados da Agência Nacional de Águas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021). Destes, cerca de 64% da área irrigada no Brasil está na região do Cerrado (BRASIL, 2014), que possui 14 municípios dentre os 30 com maiores áreas irrigadas no Brasil (Figura 1), 12 dos 15 polos de irrigação com predomínio pivôs centrais e 73% (1,14 Mha) dentre os 1,55 milhão de hectares plantados sob pivô central no Brasil (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021).

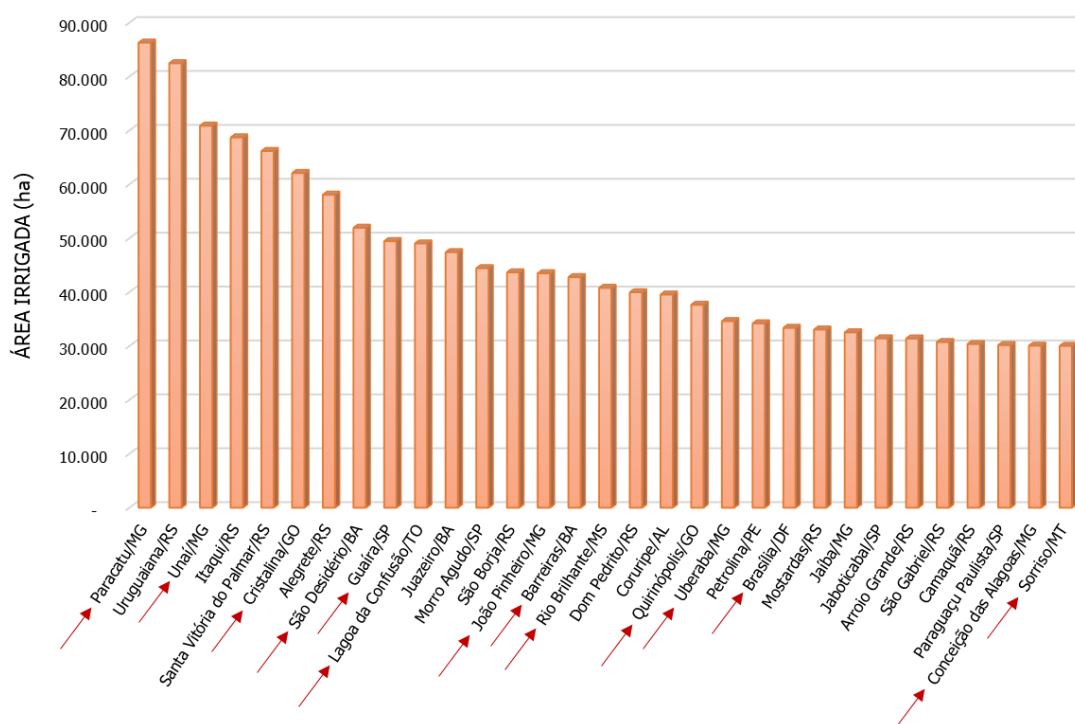


Figura 1. Municípios com maiores áreas equipadas com irrigação, em 2019. Destacados (seta vermelha) os municípios situados no bioma Cerrado (Adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021).

As características edafoclimáticas do Cerrado foram determinantes para seu estabelecimento como um dos principais polos de irrigação no Brasil. Com as estações seca e chuvosa bem definidas e presença de veranicos, os solos profundos e bem drenados e o relevo predominante que favorece a agricultura mecanizada e o uso de sistemas de irrigação do tipo pivô central, sistema que ocupa as maiores áreas irrigadas na região.

Na região, encontra-se também outros sistemas de irrigação, como o gotejamento, principalmente nas culturas do café, batata, cana, olerícolas e frutíferas; a aspersão convencional em áreas pequenas e médias, com pastagem, milho, feijão, batata e cana e o carretel autopropelido, muito usado na fertirrigação com vinhaça na cultura da cana (MANTOVANI; COLL, 2021).

Na Figura 2 é apresentada a porcentagem correspondente ao uso de diferentes sistemas de irrigação no Cerrado em 2019 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019). Observa-se que os sistemas gotejamento e pivô central ocupavam 77% da área irrigada. Estes dois sistemas, representaram uma área de 0,36% (0,74 Mha) da área total do Cerrado.

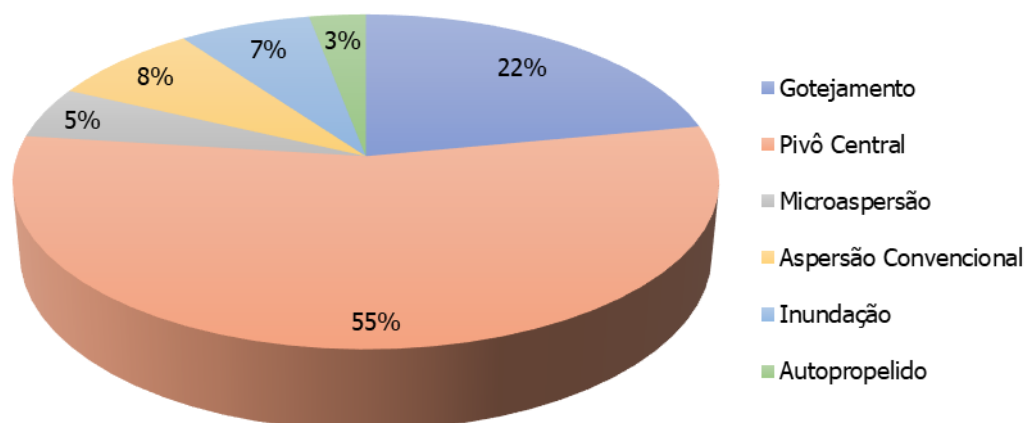


Figura 2. Área ocupada com diferentes sistemas de irrigação no ano de 2019 no Cerrado (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019).

O sistema pivô central apresenta grande expansão na região do Cerrado, sendo responsável por aproximadamente 40% do aumento anual dos sistemas de irrigação nas últimas duas décadas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021). Essa expansão deve-se principalmente à sua automação, uniformidade de aplicação de água e facilidade de operação.

De toda área irrigada por pivôs centrais no país, 78% se concentram no Cerrado (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019). Pode-se observar especificamente onde as áreas irrigadas se expandiram no bioma baseado nos mapeamentos de áreas irrigadas disponibilizados pela ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2019) e pelo projeto MapBiomias (MAPBIOMIAS, 2022) (Figura 3).

No Cerrado, a maior parte das áreas irrigadas por pivôs se concentram na região Noroeste de Minas, Extremo Oeste Baiano, no estado do Goiás, Mato Grosso e no Distrito Federal (Figura 3). Além de áreas irrigadas por pivôs centrais, a base do MapBiomias também disponibiliza áreas de cultivo de arroz inundado, e outros tipos de irrigação usadas especialmente em regiões semiáridas do Brasil (BA, CE, PE e MG). É importante ressaltar que o produto de áreas irrigadas do MapBiomias ainda está em processo de validação e evolução.

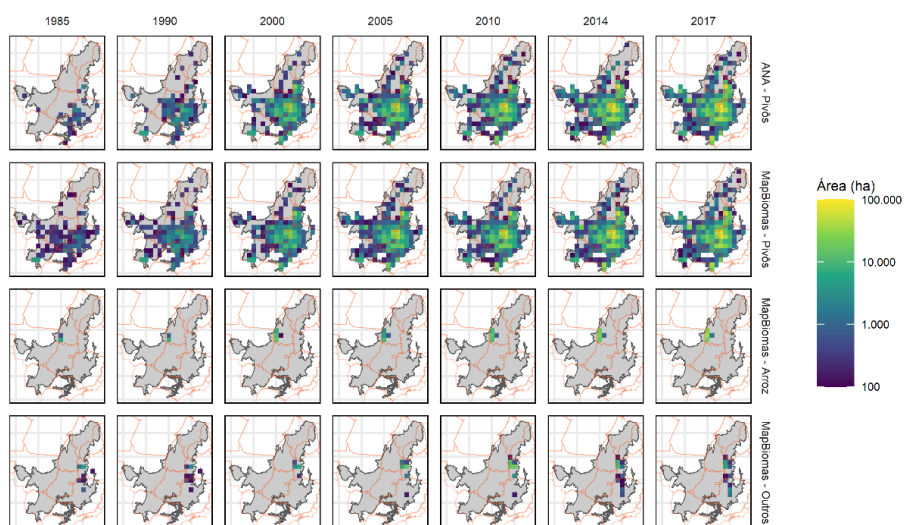


Figura 3. Distribuição espacial de áreas irrigadas dos bancos de dados da ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2019) e MapBiomias (MAPBIOMAS, 2022). Os dados foram agregados espacialmente em células de 1º x 1º (~12.000 km², SRC: Sirgas 2000). Células com área irrigada inferior a 100 ha são omitidas.

É notório o crescente desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil. Vale ressaltar que esse crescimento também é impulsionado pela abertura de novas fronteiras agrícolas. A mais nova fronteira agrícola do Brasil, MATOPIBA (sigla formada pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), possui a maior parte da sua extensão localizada no bioma Cerrado, sendo este bioma responsável por 2,3 Mha irrigados no Brasil (Figura 4), com potencial de crescimento projetado para em média 56.000 hectares/ano, podendo atingir uma área irrigada de aproximadamente 3 Mha.

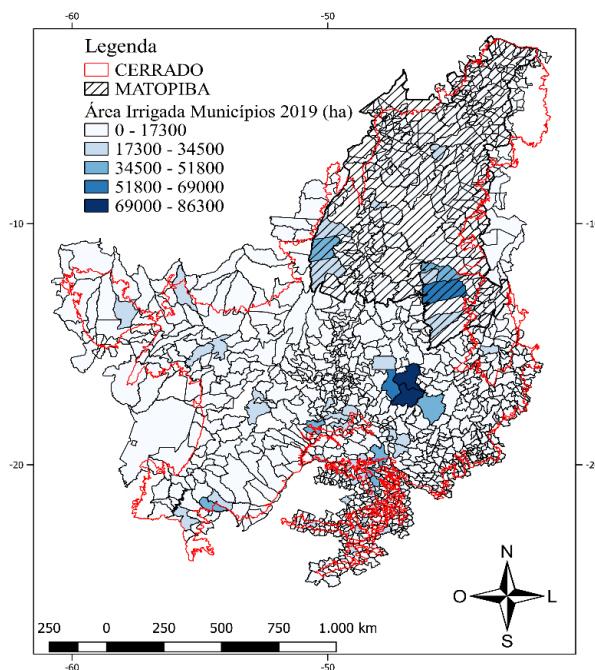


Figura 4. Área irrigada em municípios que estão em partes ou completamente dentro do bioma Cerrado e a nova fronteira agrícola (MATOPIBA) do Brasil (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021; GRUPO DE INTELIGÊNCIA TERRITORIAL ESTRATÉGICA, 2014).

9.2 Projeção futura

Na Figura 5, apresenta-se área irrigada atual e o potencial efetivo de expansão da área irrigada dos vinte municípios com maior potencial efetivo de expansão e as áreas irrigada, potencial irrigável e potencial irrigável efetivo totalizada para o Brasil.

A área adicional irrigável no Brasil é de 55,9 milhões de hectares (potencial físico-hídrico total) (Figura 5b). O potencial efetivo de médio prazo é de 13,7 Mha, sendo que 45% deste potencial efetivo está localizado no Centro-Oeste, em especial em Mato Grosso e Goiás (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021), sendo a maior parte no bioma Cerrado.

Dentre os 20 municípios com maior potencial efetivo irrigável (Figura 5a), Sorriso, no Mato Grosso, com 266.078 ha, é o que apresenta a maior área, seguido de Nova Mutum, MT, com área de 189.101 ha e Campo Novo do Parecis, também no Mato Grosso, com área de 180.829 ha. Sorriso/MT, com uma área irrigada igual a 30.010 ha, é o município que apresenta a maior área irrigada, seguido de Campo Novo do Parecis/MT (27.959 ha) e Primavera do Leste/MT (27.183 ha).

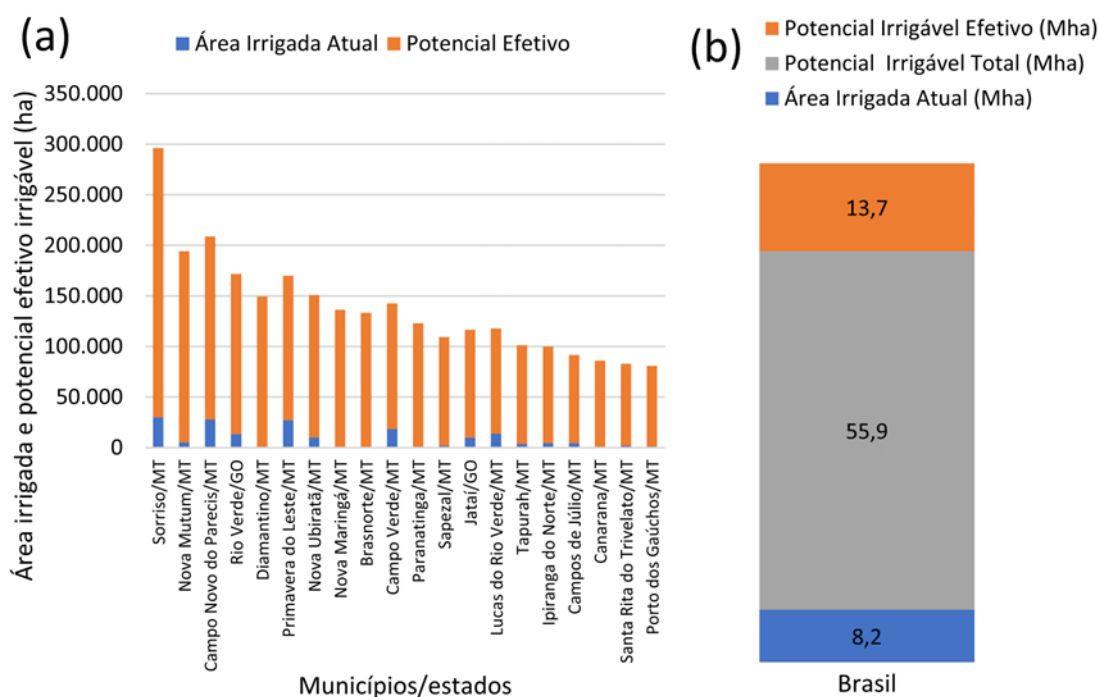


Figura 5. (a) Área irrigada e potencial efetivo de expansão da área irrigada dos 20 primeiros municípios com maior potencial efetivo de expansão (b) Áreas irrigada, potencial irrigável e potencial irrigável efetivo (Fonte: adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021).

Esta informação é reforçada quando, filtrando os dados disponibilizados pela ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021) para municípios que compõem ou estão inseridos em partes no Cerrado (Figura 6), nota-se um potencial efetivo de expansão da área irrigada de 7,3 Mha que é o equivalente a 3,6 % da área total do Cerrado (204,5 Mha).

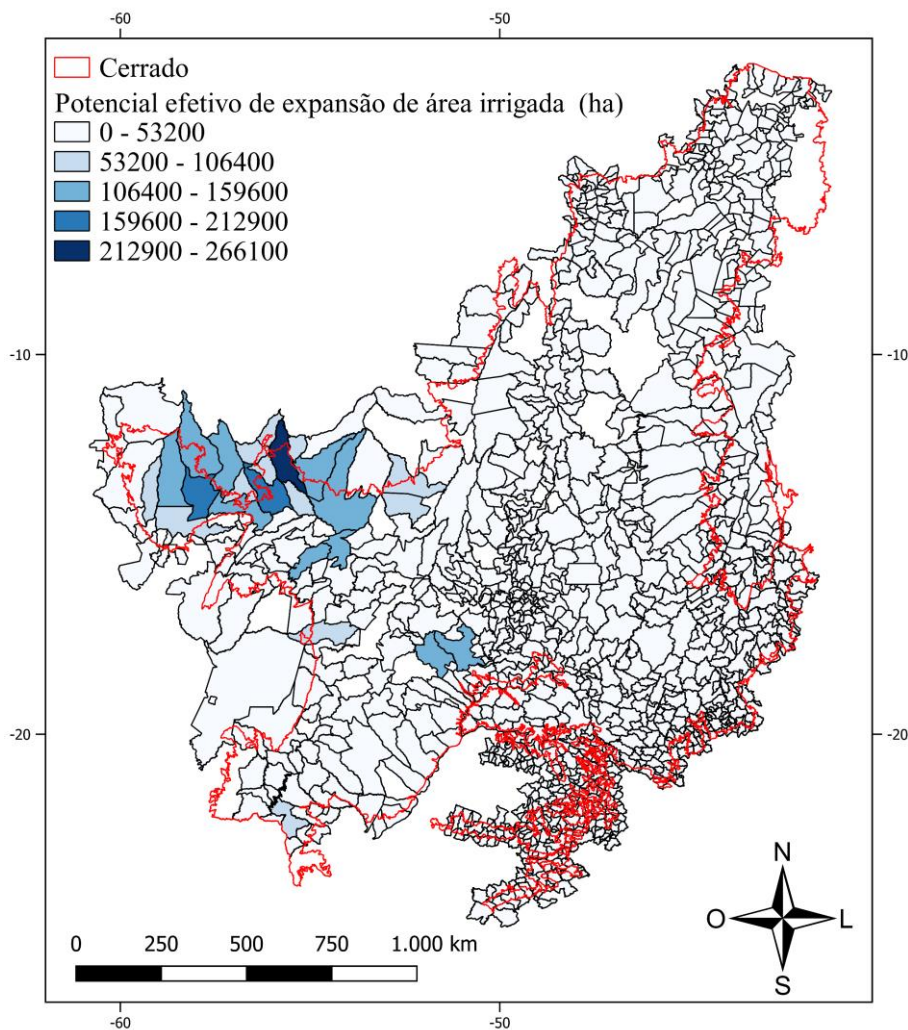


Figura 6. Potencial efetivo de expansão e área irrigada na região do Cerrado brasileiro (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021).

O bioma Cerrado tem sido uma das principais regiões de expansão da agricultura irrigada e continuará sendo no futuro, mas considerando as tendências de aumento dos últimos anos, o Cerrado ainda está longe de atingir a área potencial de expansão (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019).

Analisando-se, por meio de regressão linear, o período histórico referente ao crescimento da área irrigada (Figura 7), nota-se uma tendência de expansão de áreas irrigadas por pivô central para os bancos de dados da ANA e MapBiomas de aproximadamente 33 e 31 mil ha/ano desde 1985, respectivamente. Se considerarmos apenas a última década, a tendência apresentada por estes bancos de dados é de aproximadamente 67 e 52 mil ha/ano. Mesmo se a maior destas tendências se mantiver até o final do século, não teremos ocupado metade da área considerada de potencial efetivo de médio prazo.

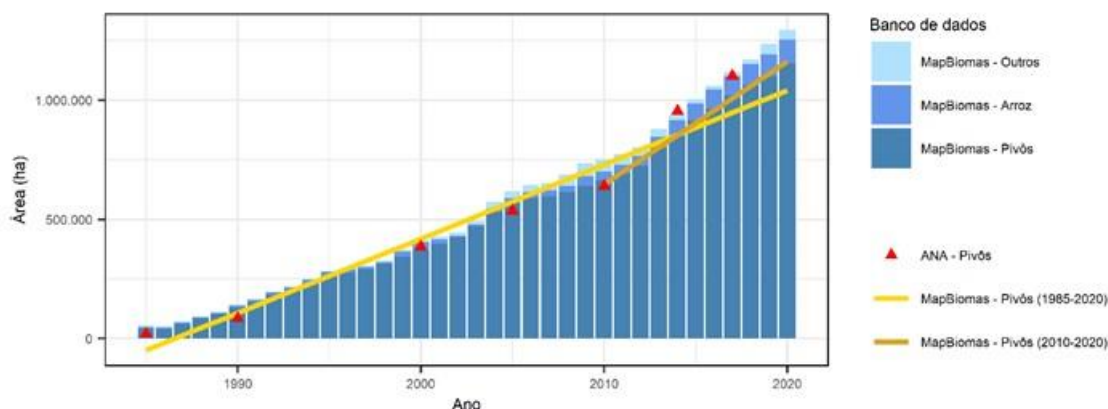


Figura 7. Área total irrigada por ano. Bancos de dados da ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2019) e MapBiomas (MAPBIOMAS, 2022). As linhas representam as retas de regressão.

A maior resolução temporal do banco de dados do MapBiomas possibilita avaliar com maior precisão as tendências de expansão ao longo do Cerrado. Na Figura 8 são apresentadas as regiões cuja tendência de expansão de áreas irrigadas foi significativa (p -valor $< 0,05$ para coeficiente angular da regressão linear de área em função do tempo) para o período de 2010 a 2020.

Nota-se que as regiões com maior expansão de áreas irrigadas por pivô centrais na última década ainda se concentram no Noroeste de Minas e Extremo Oeste Baiano (Figura 8). Destaca-se que as regiões de alta prioridade para a expansão das áreas irrigadas concentram-se principalmente no MATOPIBA. Muitas destas regiões são consideradas áreas de muito elevado interesse para intervenção pública (FUNDAÇÃO DE ESTUDOS AGRÁRIOS LUIZ DE QUEIROZ, 2014).

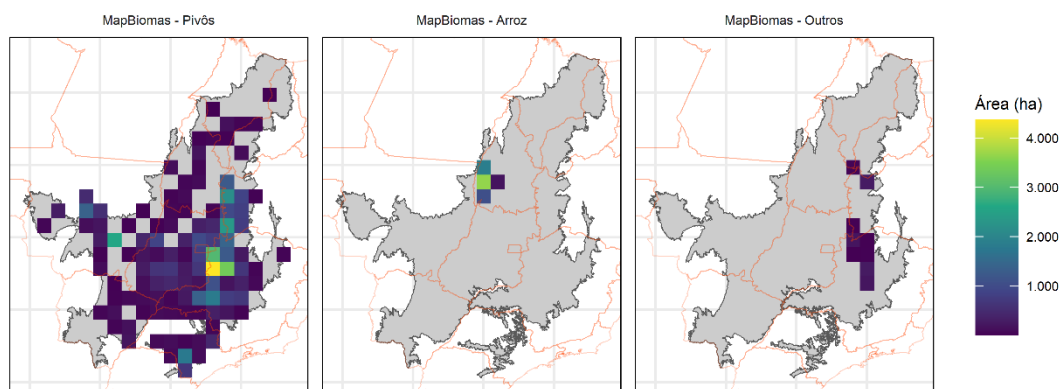


Figura 8. Tendência de expansão de áreas irrigadas 2010-2020. Baseado no banco de dados do MapBiomas (MAPBIOMAS, 2022). Os dados foram agregados espacialmente em células de $1^\circ \times 1^\circ$ ($\sim 12.000 \text{ km}^2$, SRC: Sirgas 2000). Células com tendências não significativas são omitidas.

9.3 Considerações finais

São vários os desafios a serem enfrentados para se alcançar uma agricultura irrigada sustentável na região. A agricultura irrigada representa 17% da agricultura e produz aproximadamente 40% da produção de alimento do mundo. A intensificação da agricultura combinada a redução dos impactos ambientais é a estratégia mais adequada para aumentar a produção mundial de alimentos (PRADHAN *et al.*, 2017). Qualquer estratégia que vise

intensificar a agricultura, reduzindo a variação e aumentando a produtividade das culturas, deve necessariamente incluir a irrigação (RODRIGUES; DOMINGUES, 2017).

A irrigação é fundamental para a sustentabilidade da produção de alimentos. Um ponto importante de preocupação com o futuro da região do Cerrado, entretanto, é a oferta limitada de água doce que não é distribuída uniformemente. Além disso, a região possui algumas bacias hidrográficas onde as atuais disputas pelo uso da água podem aumentar ainda mais, especialmente considerando que estudos de mudanças climáticas já relatam períodos de estiagem mais longos (PIRES *et al.*, 2016) e aumentos na temperatura do ar (CAMILO *et al.*, 2018; DE JONG *et al.*, 2018) para a região do Cerrado.

Embora o Brasil tenha mais de 12% das reservas de água doce e algumas das maiores bacias hidrográficas do mundo, a água se tornou um fator limitante para o desenvolvimento econômico do país. Para se alcançar um crescimento sustentável da agricultura irrigada na região do Cerrado é fundamental se ter segurança hídrica e energética.

Durante a estação seca no Cerrado, a vazão dos rios é reduzida, o que compromete a prática da irrigação e pode favorecer o surgimento de conflitos entre os usuários de recursos hídricos. Diversos instrumentos legais regulamentam a utilização dos recursos de água e solo e tais instrumentos condicionam tanto a prática da agricultura irrigada quanto à implantação de sistemas públicos de irrigação (BRASIL, 2008).

Neste sentido, é fundamental ter uma base de dados hidro-climatológica consolidada e gerar informações para subsidiar os gestores públicos, que devem estar atentos as especificidades das regiões. A bacia hidrográfica é a unidade onde se faz a gestão dos recursos hídricos. Além de gerar informações sobre as demandas hídricas, é fundamental conhecer a disponibilidade hídrica.

Via de regra a disponibilidade hídrica pode ser avaliada por meio de vazões de referência que são utilizadas como critério de outorga. Para águas superficiais de domínio da união, por exemplo, a vazão máxima outorgável é baseada na Q_{95} , isso é, a vazão que apresenta permanência em 95% do tempo.

Na Figura 9a, apresenta-se as 4538 ottobacias de nível 5 e na Figura 9b a Q_{95} para essas regiões. Os dados foram obtidos do banco de dados HydroCerrado (ALTHOFF; RODRIGUES; SILVA, 2019). Essa informação é um dos índices básicos necessários para subsidiar as políticas de desenvolvimento da irrigação na região.

Nota-se uma maior disponibilidade hídrica na região oeste do Cerrado, no estado do Mato Grosso, onde a Q_{95} chega a $20,5 \text{ L km}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Por outro lado, mais de 10% das ottobacias do Cerrado apresentam Q_{95} inferior a $1,0 \text{ L km}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, o que evidencia a importância dessa informação a fim de se evitar conflitos sobre o uso do recurso.

Os estudos sobre mudanças climáticas têm indicado aumento das taxas de evaporação e redução da disponibilidade hídrica nos reservatórios de irrigação, prejudicando o plantio de duas safras (ALTHOFF; RODRIGUES; SILVA, 2019). Nesse contexto, uma gestão de recursos hídricos atenta as especificidades das regiões e o uso de tecnologias de irrigação mais eficientes, serão essenciais nas próximas décadas (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019).

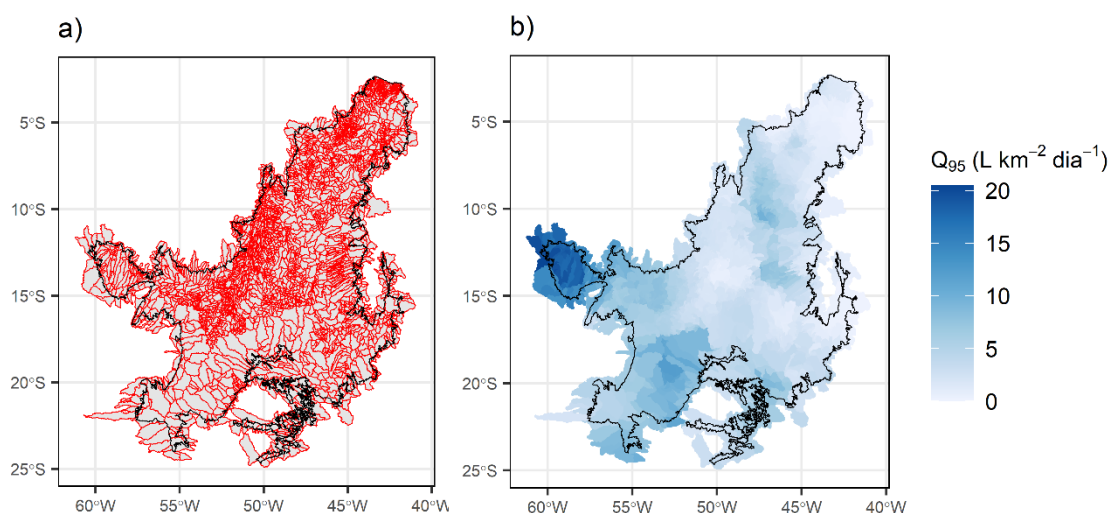


Figura 9. (a) Ottobacias de nível 5 e respectivas (b) Q₉₅ para todo o Cerrado.

Melhorar a eficiência de irrigação é uma estratégia que pode contribuir para aumentar a viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental da agricultura irrigada no Cerrado. Considerando o atual cenário de uso da água na região e a tendência de aumento de conflitos por esse recurso, torna-se cada vez mais importante produzir mais utilizando uma menor quantidade de água, sendo, para isso, fundamental avaliar e aperfeiçoar ferramentas que possam contribuir para o uso eficiente de água.

A infraestrutura é outro importante gargalo para o desenvolvimento da agricultura na região. A agricultura irrigada requer a combinação de vários componentes, tais como, solos aptos, disponibilidade quantitativa e qualitativa de água, de fertilizantes, de equipamentos, de máquinas, de infraestruturas hídricas, de suporte de energia, de transporte, de armazenamento e de comercialização.

Entretanto, entre todas as infraestruturas necessárias para o adequado desenvolvimento da agricultura irrigada em uma região, as destinadas a prover energia com qualidade e as barragens são vistas como as mais importantes. A energia é elemento vital para o desenvolvimento da agricultura irrigada. A disponibilidade e a qualidade de energia são tão importantes quanto a disponibilidade e a qualidade de água (RODRIGUES; DOMINGUES, 2017).

É oportuno identificar fatores que dificultam a expansão da agricultura irrigada no Brasil. Barros et al. (2009) fizeram um amplo levantamento de informações, entrevistaram atores dos diferentes segmentos da agricultura irrigada e identificaram um conjunto de temas relacionados às causas da baixa utilização do potencial das áreas irrigáveis do País, dentre os quais se destacaram: Energia elétrica, Pesquisa, tecnologia e assistência técnica, Gestão de recursos hídricos, Crédito e incentivos financeiros, Infraestrutura complementar e Papel das instituições públicas e privadas no desenvolvimento da agricultura irrigada.

Atualmente, o grande desafio enfrentado pelo agronegócio brasileiro, na figura do produtor agrícola, é o atendimento a restrições ambientais colocadas pela atual legislação ambiental vigente no país (LUQUEZ, 2017). No Brasil, os principais impactos ambientais advindos da irrigação são bem conhecidos, mas pouco estudados e documentados.

Sabe-se que se a agricultura irrigada não for cuidadosamente planejada, dimensionada e manejada pode trazer impactos negativos ao ambiente. Segundo Rodrigues e Irias (2004), esses impactos ambientais devem ser vistos de forma sistêmica, procurando considerar todas

suas dimensões relevantes para a produção agrícola, tais como: as ações de captação e de disponibilização da água, a sua condução, sua distribuição, a aplicação de água aos cultivos, a drenagem agrícola e a sua descarga de resíduos líquidos nos corpos receptores.

Segundo Testezlaf *et al.* (2002), os efeitos adversos relacionados com a agricultura irrigada podem ser reduzidos se ações forem tomadas de forma a minimizar as respectivas causas. Na região do Cerrado, essas ações devem ser priorizadas, uma vez que o crescimento da agricultura irrigada tem enfrentado dificuldades relacionadas a questões ambientais.

O principal desafio para a expansão será conhecer as medidas mais efetivas para aumentar a produção de alimentos com o mínimo de impactos negativos ao meio ambiente. Neste contexto, é fundamental considerar as aptidões/vocações das regiões. Isto é, uma ação pode ser efetiva e contribuir para reduzir os efeitos adversos da irrigação em uma região, mas não funcionar em outra. Isso é particularmente importante no Cerrado, onde a zona de transição entre o Cerrado e os outros biomas forma uma área com uma alta diversidade de solos e clima.

O Cerrado é uma região com uma grande aptidão para agricultura. Isso deve ser entendido pela sociedade como um dos nossos mais importantes ativos. Para que o nosso papel estratégico de produtor de alimentos possa ser consolidado, é importante que os nossos agricultores tenham segurança hídrica.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas irrigação:** uso da água na agricultura irrigada. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, ANA, 2ed. Brasília: ANA, 130p., 2021.
- ALTHOFF D.; RODRIGUES L.N. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. **Irriga**, Botucatu, v.1, n.1, p. 56-61, 2019.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L.N.; SILVA, D.D. *Evaluating evaporation methods for estimating small reservoir water surface evaporation in the Brazilian savannah*. **Water**, v.11, n.9, p.1942, 2019.
- BARROS, D.S.; CAVALCANTI, A.A.P.; LUCIANO, A.A.; NAVARRO, A.A.A.L.; BATTISTON, C.C.; ESPÍNDOLA, T. **Relatório final do modelo lógico:** tema: agricultura irrigada, Brasília, DF: MPOG/SPIE/NTIH/CGECRH, 2009.
- BRASIL. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Brasília: MI, 217p., 2014
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **A irrigação no Brasil:** situação e diretrizes. Brasília, DF. 132p., 2008.
- CAMILO, J.A.; ANDRADE, C.L.T.; AMARAL, T.A.; TIGGES, C.H.P.; MELO, M.L.A.; CHOU, S.C.; GARCIA Y GARCIA, A. *Impact of Climate Change on Maize Grown in the Brazilian Cerrado*. In: ASABE 2018 ANNUAL INTERNATIONAL MEETING. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2018.
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; MARENGO, J. *Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios*. **American Journal of Climate Change**, n.3, v.5, p.512, 2014.
- DE JONG, P.; TANAJURA, C.A.S.; SÁNCHEZ, A.S.; DARGAVILLE, R.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E.A. *Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability*. **Science of The Total Environment**, v.634, p.1540-1553, 2018.
- FUNDAÇÃO DE ESTUDOS AGRÁRIOS LUIZ DE QUEIROZ. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Piracicaba, SP, Fealq, 2014.
- GRUPO DE INTELIGÊNCIA TERRITORIAL ESTRATÉGICA. **Proposta de Delimitação Territorial do MATOPIBA**, GITE, 2014. Disponível em: <[https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMato piba.pdf](https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMato%20piba.pdf)>. Acesso em: 30 mar. 2022.

GUIMARÃES, D.P.; LANDAU, E.C. **Georreferenciamento dos pivôs centrais de irrigação no Brasil: ano base 2020**. Sete Lagoas, Embrapa Milho e Sorgo, 63p. 2020. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Milho e Sorgo).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola Municipal**, IBGE, 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>>. Acesso em: 30 mar.2022.

KLINK, C.A. *Policy intervention in the Cerrado savannas of Brazil: changes in the land use and effects on conservation*. In: CONSORTE-McCREA, A.; FERRAZ SANTOS, E. **Ecology and Conservation of the Maned Wolf: Multidisciplinary Perspectives**, p.293-308, 2014.

LUQUEZ, L.P. **A agricultura irrigada e as questões ambientais**, 3 p., 2017. Disponível em: <<http://www.mi.gov.br/documents/10157/3672008/A+agricultura+irrigada+e+as+quest%C3%B5es+ambientais.pdf/5fbb84c0-4935-4b70-9009-a508fd3212cf>>. Acesso em: 17 mar 2017.

MANTOVANI, E.C.; COLL, L. **Agricultura irrigada avança no Brasil**. Notícias... FAEMG, 2021. Disponível em: <<http://www.faemg.org.br/inaes/noticias/agricultura-irrigada-avanca-no-brasil#:~:text=A%20agricultura%20irrigada%20avan%C3%A7a%20a,8%2C4%20Mha%20em%202020>>. Acesso em: 30 mar. 2022.

MAPBIOMAS, 2022. Projeto MapBiomas - Coleção 6 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. Disponível em: <<http://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 30 mar.2022.

OLIVEIRA, V.A.; MELLO, C.R.; VIOLA, M.R.; SRINIVASAN, R. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v.37, n.15, p.5005-5023, 2017.

PIRES, G.F.; ABRAHÃO, G.M.; BRUMATTI, L.M.; OLIVEIRA, L.J.; COSTA, M.H.; LIDDICOAT, S.; KATO, E.; LADLE, R.J. *Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil*. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.228, p.286-298, 2016.

POUSA, R.; COSTA, M.H.; PIMENTA, F.M.; FONTES, V.C.; BRITO, V.F.A.D.; CASTRO, M. *Climate change and intense irrigation growth in Western Bahia, Brazil: the urgent need for hydroclimatic monitoring*. **Water**, n.11, v.5, p.933, 2019.

PRADHAN, P.; FISCHER, G.; VAN VELTHUIZEN, H; REUSSER, D.E.; KROPP, J.P. *Closing yield gaps: how sustainable can we be?* **Plos One**, v.10, n.6, 129487, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129487>>. Acesso em: 28 abr. 2017.

RADA, N. *Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle*. **Food Policy**, v.38, p. 146-155, 2013.

RODRIGUES, G.S.; IRIAS, L.J.M. **Considerações sobre os impactos ambientais da agricultura irrigada**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, Circular técnica, 7p., 2004.

RODRIGUES, L.N.; DOMINGUES, A.F. **Agricultura Irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. 1.ed. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2017.

SANTANA, C.A.M.; CAMPOS, S.K.; MARRA, R.; ARAGÃO, A.A. Cerrado, Pilar da agricultura brasileira. In: BOLFE, E.L.; SANO, E.E.; CAMPOS, S.K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF, Embrapa, v.1, p. 141-192, 2020a.

SANTANA, C.A.M.; SOUZA, G.S.; CAMPOS, S.K.; DEL'ARCO SANCHES, I.; GOMES, E.G.; SANO, E.E. Dinâmicas agropecuárias e socioeconômicas no Cerrado, de 1975 a 2015. In: BOLFE, E.L.; SANO, E.E.; CAMPOS, S.K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF, Embrapa, v.1, cap.5, p.141-192, 2020b

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E.E.; CARDOSO, J.L. **Importância da irrigação no desenvolvimento do agronegócio**. Campinas, ABIMAQ; CSEI; UNICAMP, 2002.

CAPÍTULO 10

10 SENSORIAMENTO REMOTO NA AGRICULTURA IRRIGADA

Christopher M. U. Neale, Ivo Zution Gonçalves e Mitchell S. Maguire

Resumo

Com o avanço tecnológico das últimas décadas e da globalização da internet, tornou-se possível a estimativa precisa da evapotranspiração, produtividade e das necessidades hídricas das culturas agrícolas em tempo real através das abordagens de sensoriamento remoto utilizando imagens de satélites e veículos não tripulados. Toda esta tecnologia vem colaborando de forma efetiva para uma melhor gestão dos recursos hídricos na agricultura irrigada e auxiliando nas tomadas de decisões de cientistas e produtores rurais. Neste capítulo iremos apresentar com detalhes os mais recentes e principais sensores, produtos e algoritmos de sensoriamento remoto utilizados na área agrícola, com foco em aplicações práticas na agricultura irrigada.

10.1 Introdução

A irrigação é fundamental na produção de alimentos resultando numa maior segurança alimentar, além de gerar empregos, aumentar o valor da terra e garantir maiores produtividades e lucros. Os crescentes conflitos entre os diversos setores pelo uso da água, e a necessidade de preservação dos recursos hídricos tem impulsionado a busca do uso mais eficiente desses recursos na agricultura irrigada, garantindo a oferta de alimentos, fibras e biocombustíveis sem a queda no rendimento das culturas.

O avanço tecnológico e a globalização da internet têm proporcionado avanços significativos na área agrícola. Atualmente, é cada vez mais comum a utilização de abordagens de sensoriamento remoto através de dados orbitais e veículos não tripulados no monitoramento e manejo da água na agricultura irrigada, além da estimativa do vigor vegetativo, biomassa e produtividade. Já é possível, através de algoritmos usando dados de sensoriamento remoto, monitorar em tempo real as necessidades hídricas das culturas agrícolas em escalas de campo, e ainda, sem a utilização de nenhum dado de campo em tempo real, apenas dispo de dados orbitais e conhecimento das propriedades do solo. Isso só é possível, devido as constelações atuais de satélites, ciências de análise de dados, geoprocessamento e o avanço de metodologias e modelos usando sensoriamento remoto.

Dessa forma, este capítulo propõe trazer informações atualizadas sobre os principais sensores, produtos e suas aplicações na área agrícola, com foco em aplicações na agricultura irrigada na estimativa da evapotranspiração (ET), produtividade, índices de vegetação e necessidades hídricas da cultura, através de alguns algoritmos de sensoriamento remoto.

10.2 Conceitos de Sensoriamento Remoto

Sensoriamento remoto pode ser definido como uma técnica de obter informação sobre uma determinada superfície ou objeto sem o contato físico. Normalmente isso é realizado através de medição de ondas electromagnéticas (REM) emitidas ou refletidas pela superfície ou objeto (alvo). Para tal, foram desenvolvidos nos últimos 50 anos, radiômetros eletrônicos e sistemas de análise de imagens que medem a REM em várias regiões espectrais desde ondas de luz visível até micro-ondas.

10.2.1 Sistema sensores

O sensor remoto é um dispositivo capaz de responder a REM de determinada faixa do espectro eletromagnético, registrá-la e gerar um produto numa forma adequada para a interpretação do usuário. Os instrumentos de sensoriamento remoto podem ser classificados em função da fonte de energia em sensores passivos e ativos.

Sensores passivos: não possuem fonte própria de REM, registrando a radiação solar refletida ou radiação emitida pelos alvos. O âmbito das bandas inclui espectros dentro e fora da visão humana (visível, infravermelho próximo, infravermelho térmico, micro-ondas), ou seja, entre 400nm e 12500nm. Sensores no visível e infravermelho próximo só podem operar em condições diurnas, quando há luz solar para iluminar as cenas transformadas em imagens. Têm forte dependência das condições atmosféricas, que interferem na qualidade das imagens. Alguns sensores passivos como a missão Landsat e o sensor *Thematic Mapper* (<https://www.usgs.gov/landsat-missions>) são muito utilizados na agricultura.

Sensores ativos: quando um sinal é emitido por um sensor num satélite ou aeronave e seu reflexo no objeto é detectado pelo sensor, podem operar tanto no período diurno quanto no período noturno, como por exemplo micro-ondas ativo, ou radar. Além disso, independem das condições atmosféricas, sendo as nuvens praticamente transparentes para a faixa das micro-ondas em que atuam. Exemplo de sensores ativos são os radares, como por exemplo a *Shuttle Radar Topography Mission* recolheu os dados da elevação da Terra (*U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data* (nasa.gov) elaborando os modelos digitais das superfícies do nosso planeta, sendo estes dados úteis no auxílio para a elaboração de projetos de irrigação. Outro exemplo são as constelações de radares meteorológicos como o *Global Precipitation Measurement* (GPM - <https://gpm.nasa.gov/data/imerg>) que podem ser utilizados no estudo de manejos de bacias hidrográficas e mitigação de secas em grandes áreas.

Em função do tipo de produto, os sensores ainda podem ser classificados em imageadores e não-imageadores que não geram imagem da superfície sensoriada. Ex.: Espectrorradiômetros (assinatura espectral) e radiômetros (saída em dígitos ou gráficos). Essenciais para aquisição de informações precisas sobre o comportamento espectral dos objetos.

Imageadores: obtém-se uma imagem da superfície observada como resultado (série Landsat, CBERS e Sentinel por exemplo). Fornecem informações sobre a variação espacial da resposta espectral do alvo.

10.2.2 Níveis de aquisição de dados

O sensoriamento remoto, quanto aos níveis de aquisição de dados e à localização do sensor remoto sobre a superfície terrestre, pode ser dividido em nível terrestre, sub-orbital e orbital.

Em nível terrestre são feitas as pesquisas básicas sobre o comportamento das superfícies (alvo), sobre como eles absorvem, refletem e emitem radiação solar ou do sensor. Os resultados destas pesquisas geram informações sobre como os objetos podem ser identificados pelos sensores orbitais através de sua assinatura espectral. O espectrorradiômetro, por exemplo, são sensores utilizados a nível terrestre para medir a intensidade de um comprimento de onda e assim obter a característica de um objeto.

Os exemplos mais conhecidos do nível sub-orbital na agricultura estão o levantamento aerofotogramétrico com câmeras fotogramétricas analógicas ou digitais instalados numa aeronave e utilizados para o mapeamento da superfície terrestre bem como os veículos não tripulados (VANTS) como os drones que atuam até 150m sobre a superfície terrestre. Estes sistemas estão cada vez mais sendo utilizados na agricultura, por possibilitar a coleta de dados

a qualquer momento e não depender das condições climáticas para sua operação, entretanto, ainda apresentam um custo elevado referente as câmeras multiespectrais e termais. Neste nível ainda podem ser enquadrados aeronaves equipadas com câmaras multiespectrais voando a uma altitude de até 3 km sobre a superfície.

No nível orbital estão os satélites a centenas até milhares de quilômetros de altitude, que são utilizados para produzir imagens tanto para estudos meteorológicos utilizando radares e micro-ondas passivos, e outros satélites utilizados nas áreas de mapeamento e estudo de recursos naturais através de imagens multiespectrais. Em relação aos sistemas sensores orbitais, os satélites imageadores utilizando a órbita heliossíncrona, sendo a órbita síncrona com o sol, ou seja, o ângulo Sol-Terra-Satélite permanece constante, garantindo condições semelhantes de iluminação ao longo do ano na área imageada. Neste caso, o satélite cruza a linha do Equador e cada latitude sempre à mesma hora solar. Geralmente os satélites helio-síncronos são satélites de média e baixa órbita, com altitudes variando de 550 até 850km orbitando com uma inclinação em relação ao equador de 97 a 98°. Apenas para conhecimento, existem outras órbitas de satélites, como por exemplo a órbita geoestacionária, onde a inclinação com a Terra é nula ($I = 0$), é o caso por exemplo do satélite meteorológico GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), situado a aproximadamente 36.000km acima do equador orbitando numa velocidade angular igual à da Terra em torno de seu eixo, de modo que o satélite se mantém imóvel para um observador terrestre. GOES é muito utilizado para estimar a precipitação durante as tempestades e furacões para avisos de inundações repentinas, bem como estimar as acumulações de neve (*snow pack*) e sistemas frontais. Outros satélites com sensores de micro-ondas ativos e passivos bem como instrumentos imageadores nas bandas visíveis, infravermelho próximos e térmicos estão em órbitas polares e cobrem praticamente toda a superfície da terra diariamente. Exemplos são as missões MODIS, VIIRS e SSMI.

10.2.3 Resolução

A resolução dos sensores remotos possui grande importância nesta ciência, pois a decisão de qual sensor (satélite ou VANT) escolher no desenvolvimento de qualquer atividade está relacionado diretamente com a qualidade e tempo de coleta da imagem. Assim, podemos dividir a resolução de uma imagem em quatro classes, sendo esta resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal.

A resolução espacial diz respeito à capacidade do sensor em dividir ou resolver os elementos na superfície terrestre. Quanto maior a resolução espacial, maior o nível de detalhe observado. O satélite TERRA (MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) possui uma resolução espacial média (1km) mas por outro lado cobrem grandes áreas, enquanto satélites como a série Landsat apresentam sensores com resolução espacial de 30m para as bandas do visível, já outros satélites possuem sensores de alta resolução espacial como o WORLDVIEW-2 (0.50m), QUICKBIRD (0.60cm), GEOEYE-1 (0.41m) e IKONOS-2 (1m).

A resolução espectral caracteriza a capacidade do sensor em operar em várias e estreitas bandas espectrais. O Amazonia-1, por exemplo, possui um imageador óptico de visada larga com câmera com 3 bandas no espectro visível (VIS) e uma banda no infravermelho próximo (NIR), já o Landsat 9 possui, por exemplo, onze bandas espectrais, sendo nove no espectro do visível, infravermelho próximo e pancromáticas e duas no infravermelho térmico (TIRS-2). Os sensores que operam em centenas de bandas são conhecidos como hiperespectrais, como, por exemplo, AVIRIS (*Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer*), da NASA/EUA, com 224 bandas e várias faixas de imageamento.

A resolução radiométrica está relacionada ao nível de quantização ou sensibilidade do sensor em detectar pequenas variações radiométricas. A resolução radiométrica de Landsat

9 é de 14bits, em comparação com a resolução de 8bits (256 níveis de cinza) do Landsat 7 por exemplo.

A resolução temporal é definida em função do tempo de revisita do sensor para um mesmo ponto da superfície terrestre. O tempo de revisita está relacionado às características orbitais da plataforma (altura, velocidade, inclinação), e ao ângulo total de abertura do sensor. A resolução temporal é de grande interesse especialmente em estudos relacionados a mudanças na superfície terrestre e no seu monitoramento, e normalmente, a resolução temporal do sensor é inversamente proporcional a sua resolução espacial. O satélite CBERS-4A para as bandas multiespectral e pancromática de ampla varredura possuem uma resolução temporal de 5 dias, enquanto o Landsat 9 de 16 dias. É muito comum a utilização de uma constelação de satélites da mesma missão (por exemplo, Landsat 7, 8 e 9) ou diferentes constelações para diminuir o intervalo de aquisição de imagens, aumentando assim a resolução temporal.

10.2.4 Sensores e produtos

Na agricultura irrigada, os principais satélites utilizados são:

(i) Série Landsat: destacam-se o sensor *Thematic Mapper* (TM) de 30m resolução espacial. No LANDSAT-5 (1984-2011), o sensor LANDSAT *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) de 15 a 30m de resolução, no satélite LANDSAT-7 (desde 1999), o sensor OLI (*Operational Terra Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) 15 a 30m de resolução e dados multiespectrais e 100m no infravermelho térmico do LANDSAT-8 (desde 2013) e Landsat 9 (desde 2021). Atualmente, as imagens podem ser baixadas e entregue com correção atmosférica e representando a reflectância na superfície (*Landsat Collection 2 Level-2*).

(ii) Série Sentinel: A série de satélites SENTINEL começou a ser lançada em 2014. A missão é composta por uma série de pares de satélites especializados. O par de satélites SENTINEL-2 (S2) por ser dotado de sensor óptico de alta resolução espacial foi direcionado ao monitoramento da vegetação, solos e áreas costeiras, assim, é o mais utilizado da série Sentinel na agricultura irrigada. O Sentinel-2A (desde 2015) leva a bordo o sensor multiespectral MSI com 13 bandas espectrais com 10m (VIS), 20m (infravermelho) e 60m (bandas de correção atmosférica) de resolução espectral variando de 443 a 2190nm. O satélite Sentinel 2-B, lançado em 2017, teve os mesmos objetivos do 2-A, tendo inclusive o mesmo sensor MSI.

(iii) MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*): instrumento desenvolvido pela NASA que opera em 36 canais espectrais em comprimentos de onda que variam de 0,4 a 14,4 μm e resolução espacial que varia de 250 a 1.000 metros. Além do satélite TERRA, o MODIS está a bordo do satélite AQUA (lançado em 2002) e juntos, os dois instrumentos conseguem adquirir imagens cobrindo toda a Terra em 1 a 2 dias. As imagens do MODIS oferecem uma base sistemática de dados na elaboração de produtos sobre as interações entre atmosfera, terra e oceano. É muito utilizado em estudos de mudanças no uso e cobertura das terras, mitigação de secas, estudo de queimadas, desmatamento, entre outras.

(iv) Missão GPM (*Global Precipitation Measurement*): a missão GPM é uma rede internacional de satélites que fornece observações globais de chuva e neve de última geração para avançar nossa compreensão do ciclo de água e energia da Terra, melhorar a previsão de eventos extremos e fornecer informações precisas e oportunas para beneficiar diretamente a sociedade. O algoritmo IMERG combinado com informações da constelação de satélites GPM podem estimar a precipitação na maior parte da superfície da Terra mesmo em locais onde não possuem pluviômetros para a medição de precipitação terrestre. Dados de precipitação são fornecidos a cada 30 minutos, com 10 quilômetros de resolução espacial. Estas informações são valiosas e podem ser utilizadas em estudos diversos em bacias hidrográficas

e, ainda melhorar a previsão de eventos extremos que eventualmente podem causar desastres naturais como enchentes e secas.

(v) ERA5-Land: o conjunto de dados ERA5-Land (reanálise climática ERA5) está disponível para uso público para o período de 1950 a 2-3 meses antes do presente. O ERA5-Land fornece informações horárias de alta resolução (9 km) de variáveis climáticas na superfície de qualidade para aplicações como por exemplo monitoramento climático, gestão dos recursos hídricos e entrada de modelos de sensoriamento remoto para a estimativa da ET.

Geralmente, os produtos dos satélites são disponíveis gratuitamente e atendem a todas as demandas dos usuários em projetos e serviços relacionados a agricultura como monitoramento e de culturas agrícolas e irrigação. Todavia, ainda existem diversos outros satélites comerciais (imagens não-gratuitas) que podem ser utilizados quando são necessárias imagens com altíssima resolução espacial (até 1m) e temporal (diária) como as séries SPOT, IKONOS e GEOEYE. Outro ponto importante, é que estes satélites normalmente apresentam baixa área imageada comparado aos sensores do Landsat e TERRA, limitando seu uso em pesquisas de médias a grandes escalas.

10.3 *Google Earth Engine - GEE*

Atualmente, com a vasta disponibilidade de produtos orbitais e com o avanço da tecnologia e processamento de dados, é quase impossível realizar tarefas em largas escalas e longa série temporal sem a utilização de ferramentas inovadoras. O *Google Earth Engine* (<https://code.earthengine.google.com/>) combina um catálogo de vários petabytes de imagens de satélite e conjuntos de dados geoespaciais com recursos de análise em escala planetária (Landsat, SENTINEL, MODIS, ERA5, SRTM, entre outros), tudo processado no *Google Cloud Platform* (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/>) sem a necessidade de baixar aos dados no disco rígido.

O *Earth Engine* está disponível para uso comercial e permanece gratuito para uso acadêmico e de pesquisa. Adicionalmente, através de API (*Application Programming Interface*), pode-se interligar o GEE com uma linguagem de programação *Open-Source* (Python por exemplo), e assim potencializar seu uso através do uso de algoritmos de sensoriamento remoto como o geeSEBAL na estimativa de variáveis utilizadas na agricultura irrigada, como ET, índices de vegetação e componentes do balanço de energia por exemplo.

10.4 **Uso de sensoriamento remoto na agricultura**

A missão Landsat lançada no começo da década de 1970, tem como a aplicação original a estimativa da produção de culturas como trigo, como uma informação estratégica durante a guerra fria. Como o aprimoramento dos sensores e tecnologia computacional, hoje se tem numerosas aplicações de monitoramento a nível global de vegetação natural, florestas, agricultura, sistemas aquáticos, gelo e neve, umidade do solo, evapotranspiração etc.

O uso de sensoriamento remoto para estimativa da evapotranspiração (ET) em largas escalas estão se tornando rotineiras. As principais metodologias desenvolvidas nos últimos 40 anos são (1) o uso de coeficientes de cultura baseados em reflectância do dossel juntamente com evapotranspiração de referência; (2) modelos de balanço de energia usando a banda térmica e (3) modelos de crescimento de culturas atualizados com informação de sensores remotos.

O uso do coeficiente de culturas baseado em reflectância do dossel, Kcbrf (BAUSCH; NEALE, 1987; NEALE *et al.*, 1989) tem se tornado prática comum com a disponibilidade de múltiplos sensores em satélites e plataformas aerotransportadas (aviões e drones). As bandas espectrais no vermelho e infravermelho próximo são usadas para obter um índice de vegetação

como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) ou o *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) que por sua vez são relacionados com o coeficiente de cultura basal, Kcb (WRIGHT, 1982; ALLEN *et al.*, 1998) através de uma transformação linear simples. Nesta abordagem, uma série temporal de imagens de satélite rastreia o crescimento da cultura em cada campo ao longo da estação de crescimento com índices de vegetação que são usados para obter o Kcb em tempo real e ajustar o Kcb para corresponder às condições reais de crescimento no campo.

O Kcb, por definição, produz o ET potencial da cultura para uma determinada área foliar sob uma condição de superfície do solo seco (evaporação mínima) e sem limitação do teor de água do solo na zona radicular (transpiração potencial). Para obter a ET real usando o Kcb, um cálculo do balanço hídrico do solo deve ser mantido para a zona radicular, levando em consideração a diminuição da transpiração devido ao *déficit* hídrico do solo ou o aumento na evaporação do solo devido a uma irrigação ou chuva, ajustando o Kcb no coeficiente de cultura (Kc) [$Kc = Ks \times Kcb + Ke$], onde Ks é o coeficiente de *déficit* hídrico do solo (0-1) e Ke é um ajuste para condições de superfície de solo úmido resultado de chuva ou irrigação.

A abordagem do coeficiente de cultura é um método empírico simples que tem sido usado com sucesso nos últimos 40 anos para planejamento da irrigação, programação de irrigação de campos individuais bem como estimativas de ET sobre grandes áreas irrigadas. O uso de índices de vegetação para monitorar o coeficiente de cultura basal leva em conta o real crescimento da cultura e sua variabilidade em campo devido à textura do solo e variações no teor de água, irrigação não uniforme, variabilidade nas aplicações de fertilizantes e outros fatores ambientais.

Uma das principais vantagens do uso de coeficientes de cultura basais é que eles fornecem uma estrutura de modelagem para interpolar e estimar a ET diária de uma área irrigada entre a cobertura de imagens de satélite intermitentes. Isso permite o monitoramento da ET durante os estágios fisiológicos críticos da cultura durante a estação de crescimento, quando podem estar faltando imagens de sensoriamento remoto devido à cobertura de nuvens. Essas lacunas nas informações de sensoriamento remoto podem chegar a um mês ou mais ao usar o sensor *Landsat Thematic Mapper*, que tem um tempo de revisita de 16 dias.

As imagens ausentes podem ser particularmente problemáticas durante o estágio de crescimento ativo de muitas culturas, onde há um rápido aumento da biomassa vegetal. O método do uso de coeficiente de cultura requer dados confiáveis de estações meteorológicas coletados dentro da área que está sendo modelada para estimar a evapotranspiração de referência e calcular o balanço hídrico do solo diário. Isso também requer informações sobre as propriedades hídricas relacionadas a textura do solo como a capacidade de retenção de água.

Outro método desenvolvido para a estimativa da evapotranspiração são os modelos baseados na solução da equação de balanço de energia, usando tanto as bandas de ondas curtas e infravermelho térmicas dos sensores de satélite para estimar a radiação líquida (R_n), o fluxo de calor do solo (G) e fluxo de calor sensível (H) e como resultado o fluxo de calor latente (LE) obtido como resíduo da equação do balanço de energia ($LE = R_n - G - H$). O LE pode então ser extrapolado de um valor quase instantâneo no momento da passada do satélite para um valor de ET diário usando diferentes métodos, como a fração evaporativa ou a fração ET de referência. Os métodos de balanço de energia variam em complexidade principalmente na forma como parametrizam a solução do H .

Modelos baseados na temperatura da superfície da terra (balanço de energia) podem ser ditos de uma fonte quando a ET é estimada para solo e vegetação juntos como uma única camada, como exemplo o conhecido SEBAL (BASTIAANSEN *et al.*, 1998) e METRIC (ALLEN *et al.*, 2007), e duas fontes quando a ET é estimada para solo e vegetação individualmente, como o balanço energético de duas fontes (TSEB) (NORMAN *et al.*, 1995). Os modelos SEBAL

e METRIC são calibrados localmente para uma área irrigada, buscando pixels “quentes e frios” nas imagens térmicas, representando respectivamente solo descoberto e seco e superfícies cobertas com vegetação densa, transpirando sem limite de água. Essa calibração leva a resultados bons e representativos nas áreas irrigadas, mas não necessariamente em áreas ao redor dos perímetros irrigados numa área semiárida com vegetação natural e limitação de água, por exemplo. Uma fraqueza dos modelos de uma fonte, já que os modelos de duas fontes podem representar estas superfícies adequadamente.

É evidente que existem vantagens e desvantagens no uso de técnicas tanto baseadas no balanço da energia ou no coeficiente de cultura para a estimativa de ET. Uma tentativa de alavancar os pontos fortes de ambas as metodologias foi o desenvolvimento de uma técnica “híbrida” para estimar ET originalmente proposto por Neale *et al.* (2012), e implantado operacionalmente por Geli e Neale (2012).

Esta abordagem consiste em combinar um modelo de balanço de energia de duas fontes para estimar a ET real da cultura bem como um balanço de água na zona da raiz usando o método de coeficiente de cultura baseado em refletância do dossel, rastreando o crescimento da safra e permitindo a interpolação de estimativas de ET entre datas de observação de sensoriamento remoto. Essa é a base do modelo SETMI (*Spatial EvapoTranspiration Modeling Interface*).

Atualmente existem uma variedade muito grande de diferentes sensores remotos que podem ser utilizados na agricultura, entretanto, definir quais são os sensores mais apropriados na execução de tarefas em um projeto com abordagens de sensoriamento remoto em qualquer área do conhecimento, é fundamental conhecer suas principais características. Em alguns casos, dependendo das exigências do projeto, podem ser utilizados diferentes tipos de sensores que são divididos quanto ao seu sistema, níveis de aquisição, produtos e resoluções.

10.4.1 Aplicações na agricultura irrigada

Com o lançamento e desenvolvimento de novos sensores e com o avanço da área de ciência de dados (*data science*), é cada vez mais comum a utilização da técnica de sensoriamento remoto na agricultura, podendo ser utilizado desde a criação de simples mapas até a estimativa, através de modelos, das necessidades hídricas das culturas agrícolas sem a necessidade do uso de dados terrestres (*ground data*), tanto para pequenas áreas ou grandes escalas. A seguir iremos destacar alguns exemplos de aplicações para a agricultura irrigada.

É possível aprimorar o manejo da irrigação, através do balanço de água no solo usando sensoriamento remoto (RSWB) utilizando o SAVI (VERMOTE *et al.*, 2016; MASEK *et al.*, 2006) (Equação 1), e ainda estimar a demanda hídrica das culturas agrícolas tanto para o manejo quanto para o monitoramento da irrigação. Adicionalmente, a estimativa do vigor vegetativo das plantas através de índices de vegetação como o SAVI que considera o ajuste do solo (recomendado em áreas irrigadas e de maior latitude, Neale *et al.* (2021) é muito importante para observar através de mapas (análise espacial) e gráficos (análise temporal) se há desuniformidade no desenrolamento vegetativo da cultura agrícola.

$$SAVI = \frac{NIR + RED}{NIR - RED + L} \times (1 + L) \quad (1)$$

Onde SAVI é o índice de vegetação ajustado ao solo; e usando as bandas Landsat *Thematic Mapper*, o NIR é o valor de refletância da faixa infravermelha próxima (0,76-0,90 μm); RED é o valor de refletância da banda vermelha (0,630-0,690 μm); L é o coeficiente de ajuste do solo com valor 0.5 para aplicações com uma variedade de refletância do solo.

A Figura 1 mostra a estimativa média da lâmina de irrigação envolvendo milhares de áreas irrigadas por pivôs centrais no oeste do Estado de Nebraska nos Estados Unidos de 1985

a 2012 utilizando imagens Landsat 5 e 7 com o modelo SETMI. Este tipo de análise só é possível com o uso de dados orbitais conjuntamente com dados de bombeamento nos poços (água do Aquífero Ogallala) suprindo os pivôs centrais.

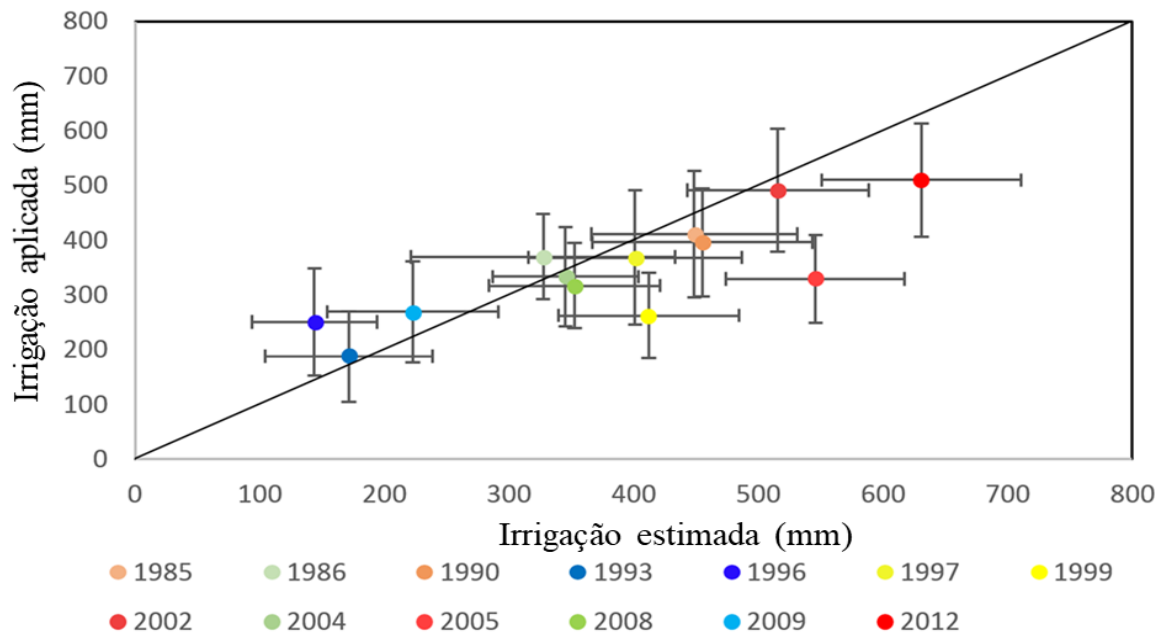


Figura 1. Irrigação média estimada e aplicada para o período de 1985-2012 no oeste do Nebraska-EUA.

Nota-se que para as cores frias (anos chuvosos), os produtores de milho tendem a irrigar mais que o necessário, gastando-se mais água e energia. Em anos considerados normais (cor verde), a quantidade de água aplicada é similar a demanda hídrica da cultura para a estação de crescimento, já em anos secos (cores quentes), o produtor aplica menos água que o necessário devido principalmente a limitação do sistema de irrigação em aplicar uma alta lâmina de água em um período curto, adicionalmente os agricultores estão sujeitos a restrições de bombeamento de água do aquífero para irrigação devido as baixas precipitações e recarga (menor que 400mm anuais) e o nível do aquífero da região (Aquífero Ogallala). Para mais detalhes ver Foster *et. al*/(2019)

Na Figura 2 a esquerda, é possível observar um campo de milho irrigado por pivô central com uma alta desuniformidade no desenvolvimento vegetativo representado pelo SAVI, o que indica um campo de cultivo mal manejado ou heterogeneidade do solo. Já o mapa de ETa para a mesma data (julho/2021 - máximo LAI) reflete exatamente os valores de SAVI e sua alta variabilidade espacial. Neste caso, a ETa foi estimada utilizando apenas dados orbitais com o algoritmo de balanço de energia geeSEBAL totalmente automatizado no GEE através de imagens Landsat 8 e dados climáticos de análise ERA5-Land.

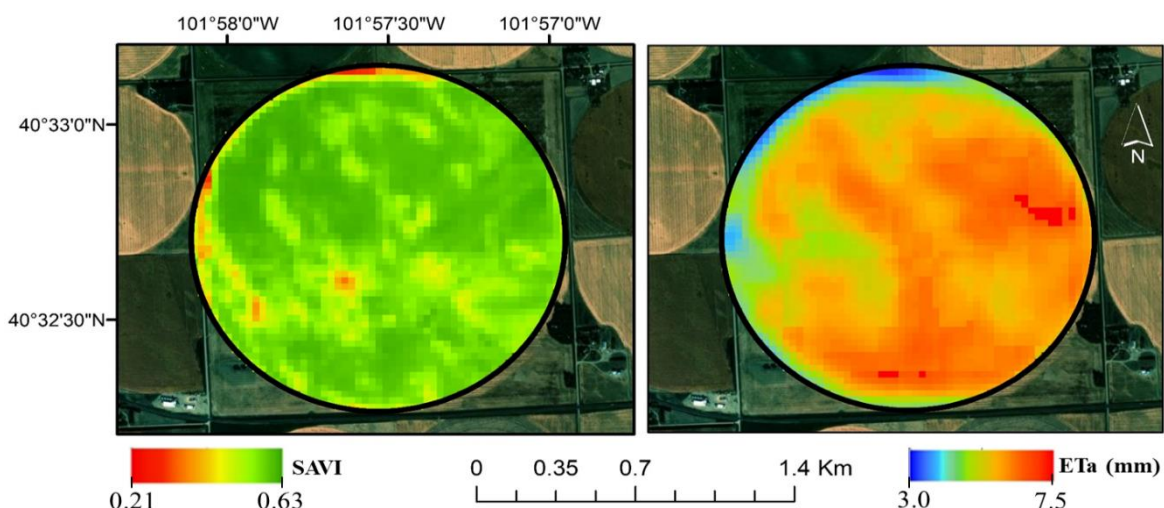


Figura 2. SAVI e ETa estimada utilizando o geeSEBAL para milho em julho/2021 em Nebraska-EUA.

Uma das formas mais comuns de estimar a biomassa seca acima do solo e 'produtividade da água' da cultura de interesse com o uso do sensoriamento remoto, é através do produto entre o coeficiente basal de transpiração (K_{cb}) ao longo do ciclo de cultivo, descontando os estresses hídricos (K_{sw}) e térmicos (K_{st}), o produto de uma eficiência de uso de água normalizada para a produção de biomassa (WUE_B^* , em $g\ m^{-2}$), e um índice de colheita (HI) apresentada na equação 2. Maiores detalhes sobre esta abordagem pode ser obtido em Campos *et al.* (2017) e Campos *et al.* (2018).

$$\text{Produtividade da água} = HI \times WUE_B^* \times \sum_{i=1}^n K_{cb} \times K_{st} \times K_{sw} \quad (2)$$

Na Figura 3A observa-se resultados satisfatórios da estimativa da produtividade da água para a região Central de Nebraska-EUA com valores de R^2 próximo a 1, e na 3B valores da produtividade do uso da água de irrigação, com valores maiores em média para o sistema de pivô central por aplicar menos água para atender a demanda hídrica da cultura do milho, mais detalhes em Gonçalves *et al.* (2020).

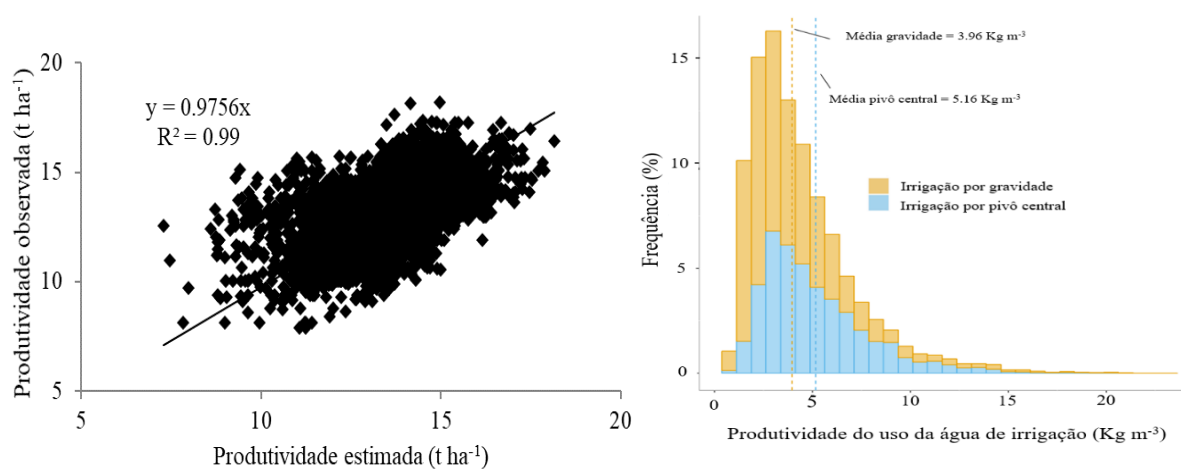


Figura 3. Produtividade estimada e observada (A) e produtividade do uso da água de irrigação (B) para o sistema de pivô central e gravidade para milho para a região Central de Nebraska-EUA.

A primeira aplicação de um modelo híbrido de sensoriamento remoto no Brasil para a estimativa da ET e coeficientes de cultivos foi realizada utilizando-se o SETMI em cana-de-açúcar no Estado de São Paulo através de uma parceria entre o *Daugherty Water for Food Global Institute* (DWFI) da Universidade de Nebraska e a UNESP-Ilha Solteira.

Observa-se que o modelo híbrido estimou perfeitamente o Kcb ao longo do ciclo da cana-de-açúcar baseado nos Kcbvi, e ainda detectou estresse hídrico na cultura através dos picos de Kcb descendentes nas épocas de baixa precipitações e ausência de irrigação (gotejamento subsuperficial). Para mais detalhes consulte a publicação de Bispo (2020).

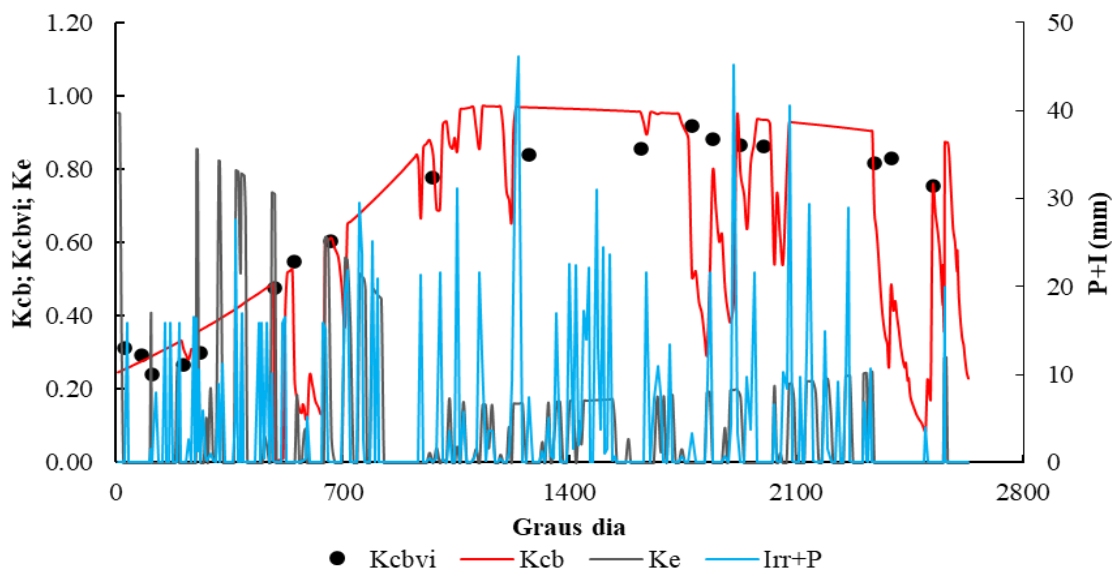


Figura 4. Coeficiente basal de cultura interpolado (Kcb) e derivado de imagens de satélite (Kcbvi) e, coeficiente de evaporação do solo (Ke) para o quarto ciclo da cana-de-açúcar (2016-2017).

Os VANTS podem ser usados para adquirir imagens multiespectrais e térmicas necessários para informar modelos híbridos como o SETMI no manejo de irrigação. Um estudo foi realizado em um campo de milho localizado no leste de Nebraska-EUA em 2021. A irrigação foi gerenciada usando SETMI informado com imagens de refletância multiespectral e imagens de infravermelho térmico adquiridas por um VANT DJI Matrice 600 integrado com um sensor multiespectral MicaSense RedEdge e câmeras térmicas FLIR Duo Pro R. A câmera MicaSense coletou imagens de refletância em cinco bandas espectrais (azul, verde, vermelho, borda vermelha e infravermelho próximo) e a câmera FLIR coletou imagens radiométricas de temperatura da superfície. O campo de milho foi imageado em dez ocasiões ao longo da estação de crescimento com o primeiro conjunto de imagens coletado logo após a emergência e o último conjunto de imagens coletado durante a senescência. As imagens adquiridas pelo VANT foram utilizadas para alimentar o modelo SETMI.

As imagens de refletância foram usadas para desenvolver a curva de coeficiente de cultura baseada em refletância (Figura 5c). Esta abordagem fornece estimativas de ET diária ao longo da estação de crescimento. A refletância e as imagens térmicas foram utilizadas no modelo de balanço de energia de duas fontes que estimou a ET nos dias em que as imagens foram adquiridas.

A combinação do coeficiente de cultura baseado em refletância e modelos de balanço de energia de duas fontes forneceu estimativas de ET diárias que foram usados para atualizar o modelo de balanço hídrico do solo e estimar a quantidade de água na zona radicular da cultura (Figura 5a). O uso de propriedades físicas conhecidas do solo e o rastreamento da quantidade de água no solo forneceram informações sobre quando a irrigação era necessária para evitar o estresse hídrico das culturas. A Figura 5a mostra o balanço hídrico do solo do campo de milho em 2021 com eventos de precipitação e irrigação, depleção da zona radicular e limite de depleção para irrigação necessária, conhecido como depleção permitida pelo manejo (MAD). Um MAD de 50% representa que o teor de água do solo foi permitido esgotar até 50% do teor total de água disponível no solo antes da irrigação ser necessária. Os eventos de irrigação foram programados para manter um teor de água no solo (Esgotamento, Figura 5a) acima do 50% MAD. Durante a safra de 2021, foram aplicadas três irrigações totalizando 96mm de água.

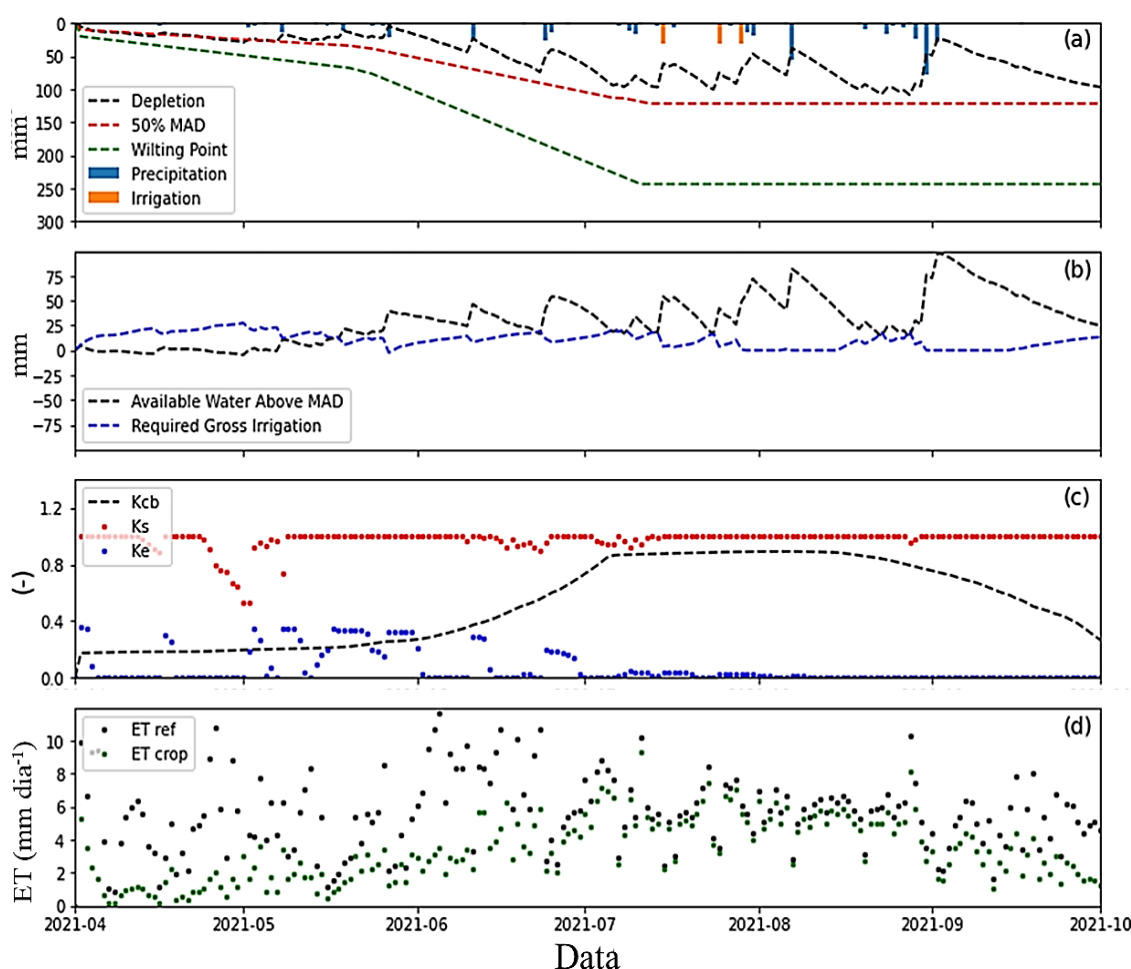


Figura 5. Resultados do SETMI para o campo de milho durante a estação de produção 2021: (a) balanço hídrico do solo mostrando eventos de precipitação e irrigação, esgotamento de água do solo na zona radicular (*depletion*) e esgotamento de água no solo na zona radicular para 50% MAD; (b) água disponível acima de 50% MAD e lâmina de irrigação necessária; (c) curva de coeficiente de cultura (K_{cb}) baseada em refletância modelada com os coeficientes de estresse (K_s) e evaporação superficial (K_e) estimados pelo modelo de balanço hídrico; (d) evapotranspiração de referência calculada para alfafa (ET_{ref}) e evapotranspiração estimada da cultura (ET_{crop}) a partir do modelo SETMI.

10.5 Considerações finais

O sensoriamento remoto é uma das tecnologias que vêm sendo aplicadas cada vez mais na agricultura, facilitando o manejo das culturas em todos os aspectos, desenvolvendo a agricultura de precisão. Esta maneira moderna de gerir as plantações tem proporcionado resultados de produtividade nunca alcançados, e ainda possibilitando uma redução de diversos custos de operação. Na área de irrigação, já é possível utilizar dados de sensoriamento remoto para estimar e monitorar as necessidades hídricas das culturas com baixos custos e alta segurança, isso só se tornou possível graças aos esforços científicos e no desenvolvimento de novos instrumentos e sensores remotos, modelos e avanços na ciência de dados. Assim, o produtor rural tem mais uma ferramenta para auxiliar na irrigação, produzindo mais com menos água e com mais sustentabilidade.

10.5 Agradecimentos

Agradecemos ao *Daugherty Water for Food Global Institute* da Universidade de Nebraska pelo suporte científico e financeiro e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP: Processo 2020/08365-1) pela concessão da bolsa.

Referências

- ALLEN, R.G.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements. *Irrigation and Drainage*, n.56. FAO, Rome, Italy, 1998.
- ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - model. *J. Irrigation and Drainage*. Eng. 133, p.380-394, 2007. DOI: doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380).
- BAUSCH, W.C.; NEALE, C.M.U. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Trans ASAE*, n.30, p.703-9, 1987
- BASTIAANSEN, 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. DOI: doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4.
- BISPO, R.C. **Measurements and modeling of evapotranspiration in sugarcane in northwest São Paulo**. 94p., 2020. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Botucatu, 2020.
- CAMPOS, I.; NEALE, C.M.U.; ARKEBAUER, T.J.; SUYKER, A.E.; GONÇALVES, I.Z. Water productivity and crop yield: a simplified remote sensing driven operational approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.249, p.501-511, 2018.
- CAMPOS, I.; NEALE, C.M.U.; SUYKER, A.; ARKEBAUER, T. J.; GONÇALVES, I.Z. Reflectance based crop coefficients REDUX: for operational evapotranspiration estimates in the age of high producing hybrid varieties. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.187, p.140-153, 2017.
- FOSTER, T.; GONCALVES, I.Z.; CAMPOS, I.; NEALE, C.M.U.; BROZOVIC, N. Assessing landscape scale heterogeneity in irrigation water use with remote sensing and in situ monitoring. *Environmental Research Letters*, n.14, v.2, p.1-10, 2019. DOI: doi.org/10.1088/1748-9326/aaf2be.
- GELI, H.M.E.; NEALE, C.M.U. Spatial EvapoTranspiration Modelling Interface (SETMI), p.171-174. In: NEALE, C.M.U.; COSH, M. H (Edit). Remote Sensing and Hydrology. Wallingford: **International Association Hydrological Sciences**, 2012.
- GONÇALVES, I.Z.; MEKONNEN, M.M.; NEALE, C.M.U.; CAMPOS, I.; NEALE, M.R. Temporal and spatial variations of irrigation water use for commercial corn fields in Central Nebraska, *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 228, [S.N.], p.105, 2020.
- MASEK, J.G.; VERMOTE, E.F.; SALEOUS, N.; WOLFE, R.; HALL, F.G.; HUENNRICH, F.; GAO, F.; KUTLER, J.; LIM, T.K. A Landsat surface reflectance data set for North America, 1990-100, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v.3, p.68-72, 2006.

NEALE, C.M.U.; BAUSCH, W.; HEERMANN, D. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. **Trans ASAE**, v.32, p.1891-1899, 1989.

NEALE, C.M.U.; GELI, H.M.E.; KUSTAS, W.P.; ALFIERI, J.G.; GOWDA, P.H.; EVETT, S.R.; PRUEGER, J.H.; HIPPS, L.E.; DULANEY, W.P.; CHÁVEZ, J.L.; FRENCH, A.N.; HOWELL, T.A. Soil water content estimation using a remote sensing based hybrid evapotranspiration modeling approach. **Advances in Water Resources**, v.50, p.152-161, 2012. DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.10.008.

NEALE, C.M.U.; GONZALEZ-DUGO, M.P.; SERRANO-PEREZ, A.; CAMPOS, I.; MATEOS, L. Cotton canopy reflectance under variable solar zenith angles: Implications of use in evapotranspiration models. **Hydrological Processes**, v.35, n.6, number 14162, 2021. DOI: 10.1002/hyp.14162.

NORMAN, J.M.; KUSTAS, W.P.; HUMES, K.S. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface-temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.77, n.3-4, p.263-293, 1995.

VERMOTE, E.; JUSTICE, C.; CLAVERIE, M.; FRANCH, B. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. **Remote Sensing of Environment**, v.185, p.46-56, 2016.

WRIGHT, J.L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage**, v.108, p.57-74, 1982.

Antonio Fernando Lordelo Olitta

HOMENAGEM

Irrigação



Engenheiro Agrônomo (1964) e Doutor (1970) pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (Esalq/USP), Pós-Doutor (1971-1973) pela *University of California - Davis* (UCDavis), Professor Livre-Docente (1981) e Professor Titular (1990) junto ao Departamento de Engenharia Rural da Esalq/USP.

Com o falecimento do Professor Dr. **Antonio Fernando Lordelo Olitta**, a Engenharia de Irrigação no Brasil perdeu um de seus ícones, responsável por significativos avanços na eficiência do uso da água na agricultura irrigada, com base em suas pesquisas pioneiras em irrigação por gotejamento, nas culturas de morango, figo, ameixa e melão, sob condição de cultivo tropical e fertirrigação.

Em 1977, lançou o livro "Os Métodos de Irrigação" que serviu de base para a formação de inúmeros Engenheiros Agrônomos na área de irrigação.

Em 1978, criou o Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, em nível de Mestrado, junto ao Departamento de Engenharia Rural da Esalq/USP. Em 1990, o Programa passou também a oferecer em nível de Doutorado. Este Programa deu origem ao atual Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, oferecido no atual Departamento de Engenharia de Biosistemas na Esalq/USP.

Idealizou, junto ao Departamento de Engenharia Rural, o primeiro Laboratório de Irrigação do Brasil, que serviu de modelo para outras Universidades e Centros de Pesquisa possibilitando o desenvolvimento e o aprimoramento de diversos dispositivos e equipamentos de irrigação fabricados pela indústria nacional.

Implementou, na Fazenda Areão, a *Estação Experimental em Agricultura Irrigada* do Departamento de Engenharia de Biosistemas.

Foi Chefe de Departamento e Coordenador de Programa de Pós-Graduação. Foi membro da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Comitê Assessor de Engenharia Agrícola, Alimentos e Florestais do CNPq.

Amante de flores e pescaria, dedicou-se a esses *hobbies* nos últimos anos de sua vida ao lado de sua amada esposa Ana (*In Memoriam*), tendo sido presidente da Associação Orquidófila de Piracicaba.

Tivemos o grande privilégio de termos trabalhado com ele ao longo de sua carreira docente na Esalq/USP e somos muito gratos pelos ensinamentos de vida que nos deixou.

**Rubens Duarte Coelho,
José Antonio Frizzone, e
Sergio Nascimento Duarte**

3 de junho de 2022

RELAÇÃO DE AUTORES, CAPÍTULOS E E-MAILS

Id	Autor	Capítulo	E-mail
1	André Luís Teixeira Fernandes	2	andre.fernandes@uniube.br
2	André Santana Andrade	1	capitalagricola@hotmail.com
3	Catariny Cabral Aleman	5	catariny@ufv.br
4	Christopher M. U. Neale	10	cneale@nebraska.edu
5	Daniel Althoff	9	daniel.althoff@ufv.br
6	Danielle Morais Amorim	1	nielymorais@gmail.com
7	Diego Bispo dos Santos Farias	9	diego.farias@ufv.br
8	Dionei Lima Santos	3	dionei.santos@ifpa.edu.br
9	Eugênio Ferreira Coelho	3	eugenio.coelho@embrapa.br
10	Eusímio Felisbino Fraga Júnior	2	eusimiofraga@ufu.br
11	Felipe Cardoso de Oliveira Maia	7/8	felipe2cardoso@gmail.com
12	Fernando Campos Mendonça	1	fernando.mendonca@usp.br
13	Ivo Zution. Gonçalves	10	ivo.zution@gmail.com
14	Jose Giacoia Neto	6	jgiacoia@rainbird.com
15	Lineu Neiva Rodrigues	9	lineu.rodrigues@embrapa.br
16	Luís César Dias Drumond	1	irriga@gappi.com.br
17	Maicon Fábio Appelt	1	maicon@gappi.com.br
18	Marco Antônio Fonseca Conceição	4	marco.conceicao@embrapa.br
19	Maria Emília Borges Alves	9	maria.emilia@embrapa.br
20	Maurício Antônio Coelho Filho	4	mauricio-antonio.coelho@embrapa.br
21	Mitchell S. Maguire	10	mmaguire2@unl.edu
22	Patricia Angélica Alves Marques	5	paamarques@usp.br
23	Regina Célia de Matos Pires	4	regina.pires@sp.gov.br
24	Rodrigo Moura Pereira	7/8	rodrigomouracbs@gmail.com
25	Vinicius Bof Bufon	7/8	vinicius.bufon@embrapa.br
26	Welson Lima Simões	3	welson.simoies@embrapa.br

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

Inovação, Empreendedorismo e Sistemas de Produção



Portal Monumental da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
Universidade de São Paulo