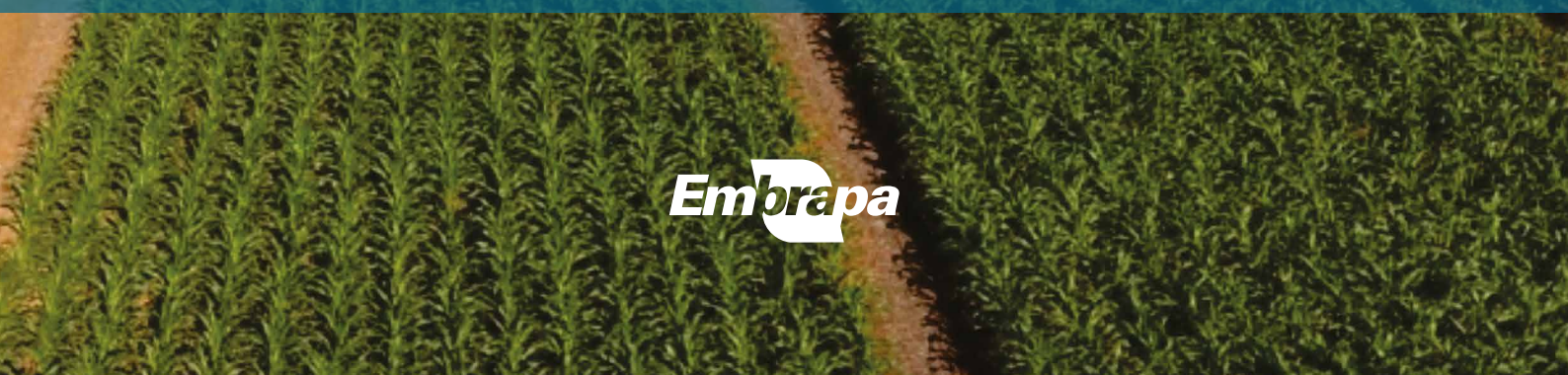


IRRIGAÇÃO

Dos fundamentos ao manejo de sistemas

Sara de Almeida Rios
Paulo Emílio Pereira de Albuquerque
Frederico Ozanan Machado Durães

Editores Técnicos



Embrapa

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Milho e Sorgo
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

IRRIGAÇÃO

Dos fundamentos ao manejo de sistemas

Sara de Almeida Rios
Paulo Emílio Pereira de Albuquerque
Frederico Ozanan Machado Durães

Editores Técnicos

Embrapa
Brasília, DF
2021

Embrapa Milho e Sorgo
Rodovia MG-424, Km 45
Caixa Postal: 285 ou 151
35701-970 Sete Lagoas, MG
Fone: (31) 3027-1100
Fax: (31) 3027-1188
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Responsável pelo conteúdo
Embrapa Milho e Sorgo

Comitê Local de Publicações

Presidente
Maria Marta Pastina

Secretária-executiva
Elena Charlotte Landau

Membros
Antônio Cláudio da Silva Barros
Cláudia Teixeira Guimarães
Maria Cristina Dias Paes
Mônica Matoso Campanha
Roberto dos Santos Trindade
Rosângela Lacerda de Castro

Responsável pela edição
Embrapa, Secretaria-Geral

Coordenação editorial
Alexandre Aires de Freitas
Heloiza Dias da Silva
Nilda Maria da Cunha Sette

Supervisão editorial
Wyviane Carlos Lima Vidal

Revisão de texto
Maria Cristina Ramos Jubé

Normalização bibliográfica
Marcia Maria Pereira de Souza

Projeto gráfico, diagramação e capa
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Tratamento das ilustrações
Paula Cristina Rodrigues Franco

Foto da capa
Alexandre Martins Abdão Dos Passos

1ª edição
Publicação digital – PDF (2021)

Nota: A Embrapa é uma empresa que respeita os direitos autorais. No entanto, não conseguimos localizar os autores de algumas imagens utilizadas nesta obra. Se você é autor de alguma ou conhecer quem o seja, por favor, entre em contato com a Embrapa, no endereço acima.

Note: Embrapa is a company that respects copyrights. However, the authors of some images used in this book could not be found. If you are or if you know who is the author of any image, please, contact Embrapa, which address is above.

Todos os direitos reservados
A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei n° 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa, Secretaria-Geral

Irrigação : dos fundamentos ao manejo de sistemas / Sara de Almeida Rios, Paulo Emílio Pereira de Albuquerque, Frederico Ozanan Machado Durães, editores técnicos. – Brasília, DF : Embrapa, 2021.
349 p. : il. color ; 21 cm x 29,7 cm.

ISBN 978-65-87380-25-4

1. Cultura irrigada 2. Manejo do solo. 3. Desenvolvimento sustentável. 4. Manejo de água. 5. Sistema de irrigação. 6. Recursos naturais. 7. Ciências ambientais. 8. Saneamento. I. Embrapa Milho e Sorgo.

CDD 631.587

Marcia Maria Pereira de Souza (CRB-1441)
© Embrapa, 2021

Autores

Camilo de Lelis Teixeira de Andrade
Engenheiro agrícola, Ph.D. em Engenharia de Irrigação, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Davi José Silva
Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Derli Prudente Santana
Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Fernando Cezar Saraiva do Amaral
Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Frederico Ozanan Machado Durães
Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

João Carlos Ferreira Borges Júnior
Engenheiro agrícola, doutor em Engenharia Agrícola (Recursos Hídricos e Ambientais), professor da Universidade Federal de São João del-Rei, Sete Lagoas, MG

João Herbert Moreira Viana
Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

José Maria Pinto
Engenheiro agrícola, doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

Lairson Couto
Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Irrigação, pesquisador aposentado da Embrapa Milho e Sorgo, consultor autônomo, Sete Lagoas, MG

Luiz Marcelo Aguiar Sans
Engenheiro florestal, doutor em Solos, Climatologia e Hidrologia, professor do Centro Universitário de Sete Lagoas (Unifemm), Sete Lagoas, MG

Manoel Ricardo de Albuquerque Filho
Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Paulo César Magalhães
Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Fisiologia da Produção, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Paulo Emílio Pereira de Albuquerque
Engenheiro agrícola, doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Reinaldo Lúcio Gomide
Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Engenharia de Irrigação, Instrumentação e Automação, pesquisador aposentado da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Ricardo Augusto Lopes Brito
Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Irrigação e Drenagem, pesquisador aposentado da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Rubens Augusto de Miranda
Economista, doutor em Administração, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Sara de Almeida Rios
Engenheira-agrônoma, doutora em Genética e Melhoramento, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Apresentação

Água é um insumo fundamental para a produção agropecuária por participar de processos vitais dos organismos – plantas, animais e microrganismos. Como solvente universal, é relevante para as transformações físico-químicas e biológicas que ocorrem na natureza.

A eficiência desses processos depende de conhecimento técnico-científico do uso da água, para as finalidades gerais e específicas da vida humana.

Para o cidadão comum e, em particular, para técnicos e operadores dos sistemas agropecuários, é relevante compreender e implementar os fundamentos, os requerimentos e as aplicações da agricultura irrigada, embasada em ciência, dados e evidências.

Esses conceitos e procedimentos fazem toda a diferença entre a teoria e a prática de irrigação e de molhação, com economia de recursos e de energia, evitando desperdícios e perdas. Ademais, eles permitem compreender, de forma adequada, os conceitos de ciclo hidrológico – macroprocesso de ciclagem da água na natureza – e o balanço hídrico – microprocesso de entradas e saídas de água, no contexto dos sistemas dinâmicos no contínuo solo-organismo-atmosfera.

Objetivando apresentar, discutir e promover aprendizagem acerca desses fundamentos de manejo e uso de água na agropecuária, esta obra, elaborada por doutores experientes em suas áreas de atuação, foi organizada em 11 capítulos, e seu conteúdo serve de apoio para a capacitação on-line da Embrapa em uso e manejo de irrigação e mostras de divulgação técnica e jornalística sobre o tema. Além disso, destaca-se o contexto de uma agricultura irrigada para produção de biomassa, notadamente de base vegetal, com grande potencial de crescimento, em todos os territórios das bacias hidrográficas brasileiras, mas carentes por pessoal treinado no nível operacional e em instâncias de tomada de decisão empresarial ou de políticas públicas para a temática água na agricultura e agricultura irrigada.

O Capítulo 1 introduz o tema A água na agricultura irrigada, com foco no ciclo hidrológico e no balanço hídrico no contexto dos sistemas de produção agrícola irrigados. E, com evidências, procura desmistificar do imaginário popular que a agricultura não é a vilã do desperdício de água, e que o entendimento adequado a respeito do ciclo hidrológico deve permitir a percepção correta sobre os impactos de práticas adequadas ou inadequadas pelo uso e manejo de água, nos campos ou em cidades.

Os capítulos 2, 3, 4 e 5 evidenciam os fundamentos sobre a água no sistema solo-planta-atmosfera, imprescindíveis para a adequada e diferenciada compreensão acerca da dinâmica da água no solo, na planta, e de condições de clima que favorecem ou promovem fatores restritivos para a irrigação. Os capítulos 6 e 7 tratam sobre os requerimentos de água de culturas e seleção de métodos. E os capítulos 8, 9 e 10 tratam das aplicações, abordam a avaliação do desempenho de sistemas e projetos de irrigação, as estratégias de manejo de irrigação, a aplicação de fertilizantes e agroquímicos via água de irrigação. E, ao final, o Capítulo 11 aborda a gestão e avaliação econômica de sistemas irrigados.

Esta obra destaca as leis que regem o uso da água na agricultura e apontam os passos para a obtenção da outorga de água por organismos reguladores estatais, entretanto, sem aprofundamentos e extensão exaustiva das questões sobre bacias hidrográficas, hidrogeologia e relevância de fontes e de qualidade de água. Não se enfatiza o dimensionamento de sistemas de irrigação, porquanto é um tema dependente de diversos fatores gerenciais, técnicos e ambien-

tais que, normalmente, as empresas comerciais de equipamentos e produtores irrigantes consideram quando da transação de projetos de irrigação, ressaltando os requisitos redutores e mitigatórios de desperdícios e perdas de carga, e aumentando a eficiência hídrica, energética e econômica para os volumes de recursos hídricos racionalmente movimentados.

A agricultura irrigada no Brasil tem potencial de expansão, e esta obra constitui um elemento relevante para a aprendizagem e prática do uso e manejo da irrigação.

Frederico Ozanan Machado Durães
Chefe-Geral da Embrapa Milho e Sorgo

Prefácio

Projeções do governo brasileiro indicam que a produção brasileira de grãos e de carne terá um acréscimo de quase 30% até 2028/2029. Esse aumento é favorecido pela produtividade e a transformação digital, fatores determinantes para a maior sustentabilidade da produção.

A socialização de conhecimentos de alto valor agregado é também relevante na qualidade do agro brasileiro; e, como ativo intangível, esta obra descentraliza *know how*, ciência, tecnologias e inovação para agricultores, gestores de bacias, operadores de sistemas irrigados, agentes de assistência técnica e demais *stakeholders* em todo o País, com o propósito de apoiar políticas públicas e programas público-privados de aumento da efetividade dos sistemas irrigados no País e também políticas de aumento sustentável da área irrigada no território nacional.

A obra *Irrigação: dos fundamentos ao manejo de sistemas* é também conteúdo base de suporte para os cursistas de uma das maiores capacitações on-line em irrigação do Brasil, o IrrigaWeb, com carga horária de 200 horas – com novo nome, em 2021, Irrigafácil – Capacitação on-line da Embrapa em Uso e Manejo de Irrigação[1].

É a Embrapa como ecossistema inovador que amplia continuamente seus serviços estratégicos de transferência de tecnologias e ativos e sua prestabilidade pública e de socialização de conhecimentos de alto valor agregado em território nacional e internacional. Excelente leitura, absorção e aplicabilidade!

Sara de Almeida Rios
Editora Técnica

[1] Disponível em: www.embrapa.br/e-campo.

Sumário

Parte 1. Fundamentos da irrigação

13 **Capítulo 1.** Água na agricultura irrigada

29 **Capítulo 2.** Água no solo

57 **Capítulo 3.** Solos e classificação de terras para irrigação

83 **Capítulo 4.** Dinâmica da água na planta

113 **Capítulo 5.** Clima na irrigação

Parte 2. Requisitos da irrigação

135 **Capítulo 6.** Requerimento de água de culturas

163 **Capítulo 7.** Seleção do método de irrigação

Parte 3. Aplicações e aspectos econômicos

219 **Capítulo 8.** Desempenho de sistemas e projetos de irrigação

257 **Capítulo 9.** Estratégias de manejo de irrigação

281 **Capítulo 10.** Aplicação de fertilizantes e agroquímicos via água de irrigação

321 **Capítulo 11.** Gestão e avaliação econômica de sistemas irrigados



PARTE 1

FUNDAMENTOS DA IRRIGAÇÃO

Foto: Jeff Vanuga (United States Department of Agriculture - Usda, Natural Resource Conservation Service - NRCS)

Capítulo 1

Água na agricultura irrigada

Sara de Almeida Rios
Frederico Ozanan Machado Durães
Paulo Emílio Pereira de Albuquerque

Introdução

O tema água na agricultura é estratégico para o Brasil, e são vários os pontos críticos que precisam ser conhecidos e gerenciados para que o uso desse recurso na produção agrícola seja realizado com sua máxima eficiência.

A variabilidade espaço-temporal da distribuição pluviométrica nas diferentes regiões brasileiras, além da diversidade e do aumento da demanda hídrica, requer tomadas de decisão relevantes, em nível global, nacional, regional, e também ações de gerenciamento da água na propriedade, que, se não realizadas, poderão inviabilizar, em curto prazo, os sistemas produtivos atuais. As questões de seca e escassez de água no Sudeste, as inundações no Norte e as secas no Nordeste ilustram alguns dos desafios potenciais que o País já enfrenta. Esses desafios crescem exponencialmente quando são consideradas as demandas de água no Brasil e no mundo para outros setores, especialmente o uso municipal (uso doméstico) e usos pelo setor industrial.

Como parte da solução dos desafios na agricultura irrigada, a política de uso dos recursos hídricos demandará especialmente conhecimento técnico para eficiência na gestão de distribuição e uso da água, com necessidade primordial, especialmente para o produtor, de avaliação da disponibilidade hídrica na região e propriedade, avaliação do desempenho e eficiência do sistema de irrigação dimensionado e real viabilidade econômica da produção sob sistema irrigado.

Este capítulo aborda o ciclo hidrológico e o balanço hídrico no sistema de produção agrícola irrigado, a conjuntura hídrica global e nacional, o gerenciamento da água na propriedade agrícola e a legislação de uso da água, todos com o objetivo de trazer para discussão e análise a temática do uso da água na agricultura.

O ciclo hidrológico e o balanço hídrico na agricultura irrigada

A água é a única substância que existe nos três estados da matéria (sólido, líquido e gasoso) na natureza, com o seu ciclo, denominado ciclo hidrológico, representado numa escala que vai desde o macroprocesso de ciclagem da água na natureza (ciclo hidrológico) até o microprocesso de ciclagem no sistema de produção agrícola irrigada ou entorno (balanço hídrico na propriedade agrícola).

Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico (Figura 1) integra o aquecimento das regiões tropicais por causa da radiação solar, a qual provoca a evaporação contínua da água dos oceanos, que é transportada sob a forma de vapor pela circulação geral da atmosfera, para outras regiões. Durante a transferência, parte do vapor de água condensa-se formando nuvens que, em razão do arrefecimento, podem dar origem à precipitação. A água no estado líquido segue o seu fluxo por ação conjunta da infiltração

Ciclo hidrológico

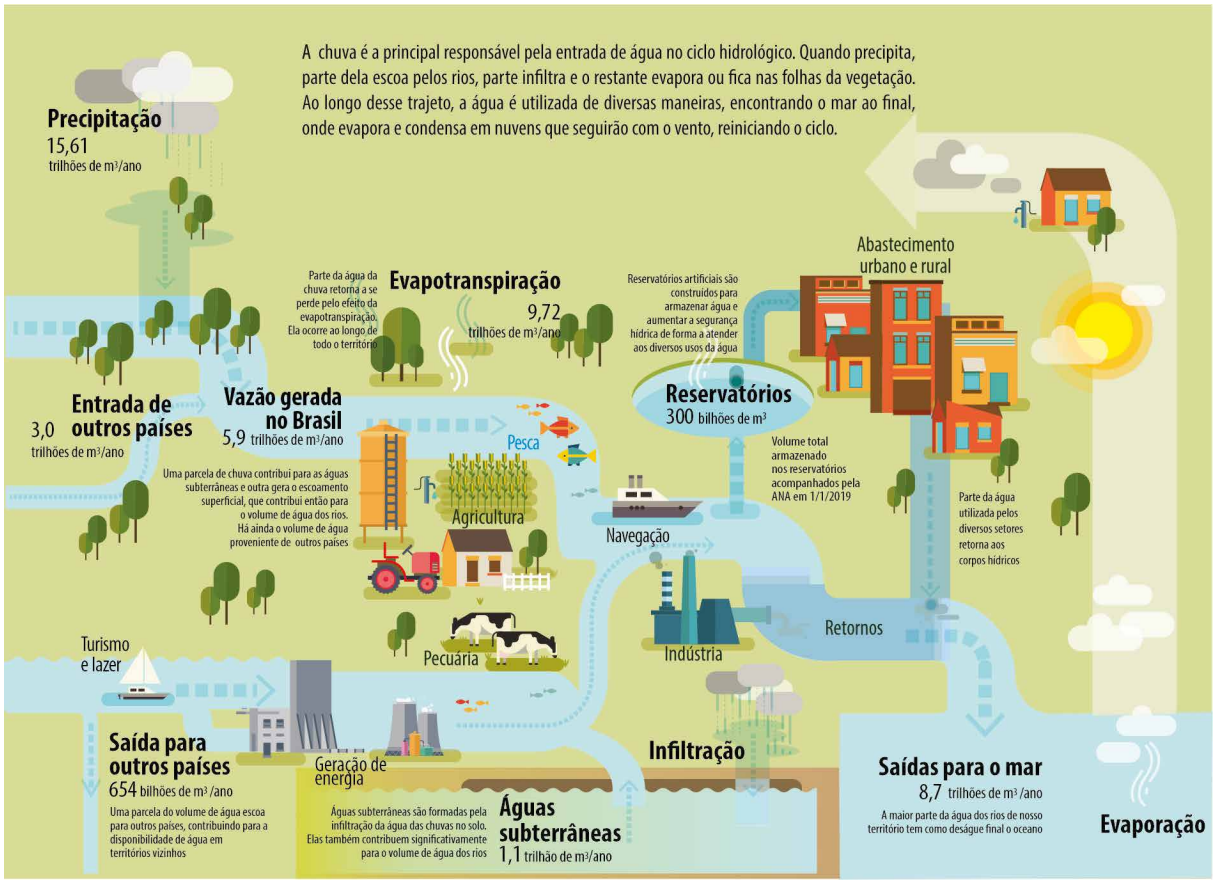


Figura 1. Ciclo hidrológico da água.

Fonte: Agência Nacional das Águas (2020).

Ilustração: Anderson Araújo.

e do escoamento superficial e subterrâneo proveniente dos rios e das correntes marítimas. O ciclo da água constitui, pois, um dos pilares fundamentais do ambiente e de alimentação e renovação dos cursos e reservatórios de água das várias bacias hidrográficas brasileiras, marcadas hoje por disparidades socioeconômicas e vulnerabilidades ambientais.

No conceito do ciclo hidrológico, destaca-se o contexto da transferência de energia, em que o ciclo da água inicia-se com parte da energia solar (parcela de energia dissipada do saldo de radiação denominado de calor latente) que incide na superfície terrestre, responsável pela transferência da água que se encontra nos solos e nas plantas para a atmosfera. Essa alteração do estado físico da água faz com que ela absorva calor, armazenando energia solar na molécula de vapor de água à medida que se transforma pela evaporação. Essa influência da energia solar faz com que a água seja mais evapotranspirada, em particular durante os períodos mais quentes do dia e nas zonas mais quentes (maior temperatura) e secas (baixa umidade relativa) da terra, condições de maior demanda evaporativa da atmosfera.

Ciclo hidrológico em sistemas irrigados

O ciclo hidrológico, para condição de sistemas agrícolas irrigados, é mostrado na Figura 2, onde se encontra representado como se processa esse ciclo, envolvendo toda a dinâmica da água no contínuo solo-planta-atmosfera e evidenciando a interferência desse ciclo no balanço da água no perfil do solo. Também nessa figura é mostrada a relação entre a precipitação/irrigação (entrada de água), a evaporação, a transpiração e a drenagem (saída de água).

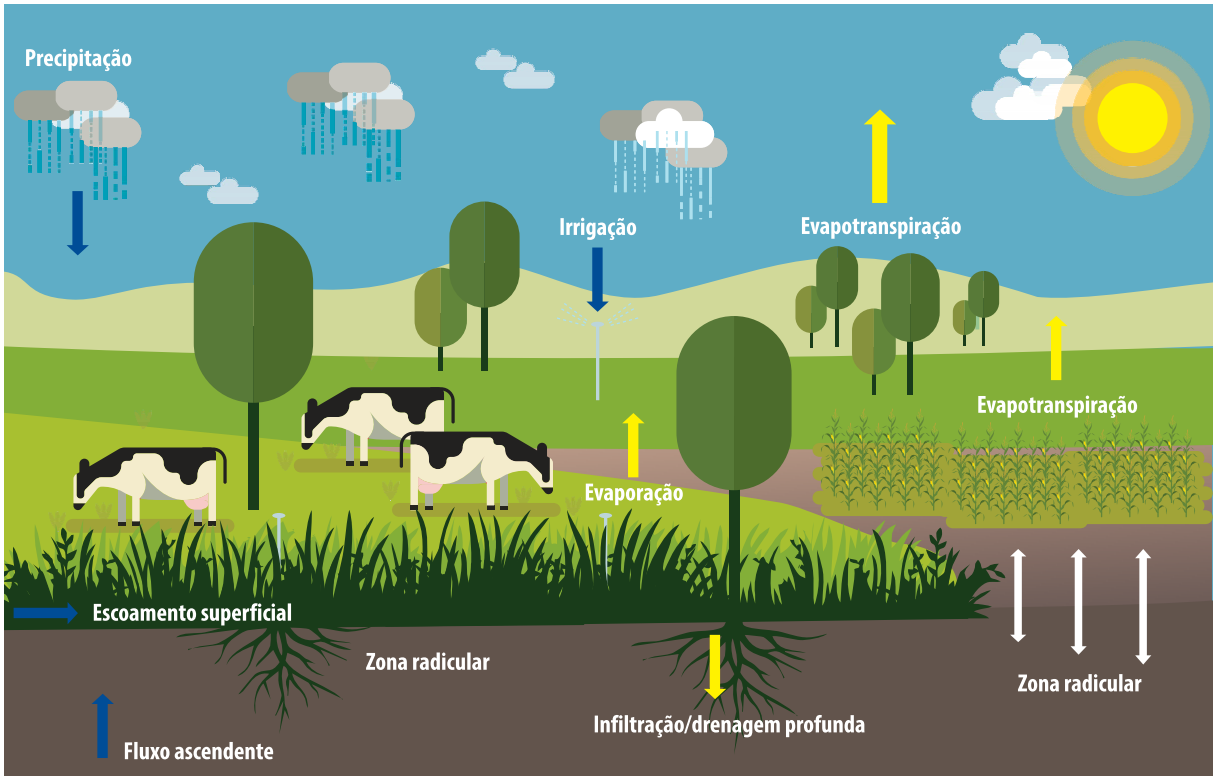


Figura 2. Ciclo hidrológico no contexto de sistemas de produção agrícola irrigados.

Ilustração: Paula Cristina Rodrigues Franco.

A água evapora para o ar de qualquer superfície úmida, seja ela água de lagos, dos cursos de água e do mar, solo ou folhagem, ou superfícies úmidas das células do parênquima esponjoso das folhas. A taxa de evaporação é governada pela energia da radiação incidente e pela temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento imediatamente acima da superfície evaporante.

Nos sistemas agrícolas em que a água de irrigação deve ser bem manejada, a evapotranspiração (ET) é mais intensa, independentemente da época do ano e do estágio de desenvolvimento das plantas, uma vez que as culturas não têm restrição hídrica, pelo fato de a aplicação de água de irrigação ser sempre realizada de acordo com a necessidade hídrica das plantas. O excedente da irrigação, quando ocorre em situações de manejo inadequado, passa por infiltração nas camadas mais profundas do perfil do solo, abaixo da zona radicular das plantas, denominada de percolação, e alimenta o lençol freático bem como escoa superficialmente.

No caso de ocorrência de chuvas mais intensas, pode haver escoamento superficial e acúmulo de água nas superfícies dos solos, de onde parte da água evapora e parte sofre também percolação profunda. A parcela da água percolada alimenta as nascentes, que, por sua vez, formam os cursos d'água que alimentam os rios, os quais vão desaguar no mar. A água do ciclo hidrológico, utilizada para a irrigação, pode ser captada direto de fontes dos rios, de reservatórios ou de poços subterrâneos. Os reservatórios podem ser construídos para o acúmulo de água na época das chuvas, de forma a disponibilizar a água armazenada para múltiplos usos na época da escassez hídrica.

Balanço hídrico

O balanço hídrico é o cômputo, a partir de várias escalas espaciais, das entradas e saídas de água de um sistema. Na escala macro, o balanço hídrico é o próprio ciclo hidrológico, cujo resultado nos fornece a água disponível no siste-

ma (no solo, nos rios, nos lagos, na vegetação e nos oceanos), isto é, na biosfera. Em uma escala intermediária, representada por uma microbacia hidrográfica, o balanço hídrico resulta na vazão de água desse sistema, ou seja, o balanço é o cálculo da precipitação diminuindo-se o deflúvio/vazão anual (Q) e a ET (Guandique; Morais, 2015). Para períodos em que a chuva é menor do que a demanda atmosférica por vapor d'água, a vazão (Q) diminui, ao passo em que, nos períodos em que a chuva supera a demanda, a vazão (Q) aumenta.

Na escala local, no caso de uma cultura, o balanço hídrico tem por objetivo estabelecer a variação de armazenamento e, consequentemente, a disponibilidade de água no solo. Conhecendo-se qual a umidade do solo ou quanto de água este armazena, é possível determinar se a cultura está sofrendo deficiência hídrica, a qual está diretamente ligada aos níveis de rendimento dessa lavoura.

Balanço hídrico de bacias hidrográficas

A Agência Nacional de Águas (ANA), com base em informações atualizadas de oferta, demandas e qualidade de água, realiza diagnóstico dos principais rios e bacias hidrográficas brasileiras, definindo áreas críticas do ponto de vista do balanço qualitativo e quantitativo, de forma a orientar as ações de planejamento e gestão, previstas na Política Nacional de Recursos Hídricos. A Lei nº 9.433, de 1997 (Brasil, 1997), conhecida como Lei das Águas, é o marco legal da Política Nacional de Recursos Hídricos. Em 2020, o marco legal do saneamento básico no Brasil foi atualizado pela Lei nº 14.026, que trouxe novas competências à agora Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.

Em 2020, no Informe Conjuntura da ANA, foram delimitadas e identificadas 47 unidades, correspondentes à área de drenagem das bacias hidrográficas de rios de domínio da União, além de 17 unidades de gestão de bacias de domínio dos estados. Tudo isso com vistas ao reconhecimento das demandas por gestão e definição de tipologias para as diversas bacias hidrográficas brasileiras (Agência Nacional de Águas, 2020). O balanço hídrico nacional (Figura 3) aponta as mesmas regiões críticas onde se verifica maior estresse hídrico, seja pela baixa disponibilidade (bacias da região semiárida, no Nordeste) seja pela alta demanda (bacias localizadas no Sul do País, com alta demanda para irrigação, principalmente de arroz) ou a combinação dos dois fatores (bacias do Tietê, pela expressiva demanda urbana associada à baixa disponibilidade em áreas de cabeceiras, bem como a região central do País, onde a criticidade ocorre pela alta demanda para irrigação associada à baixa disponibilidade em áreas de cabeceiras) (Agência Nacional de Águas, 2017). Outro aspecto diz respeito à alta demanda em regiões com grande concentração de sistema de irrigação por pivôs, destacando-se os rios Paranaíba, Grande e Paranapanema, uma vez que a região hidrográfica (RH) do Paraná responde por 44,1% do total de áreas ocupadas por pivôs centrais no Brasil. A irrigação também é fator determinante na limitação hídrica das bacias dos rios Grande e Verde Grande, ambas na RH do São Francisco.

Balanço hídrico no sistema de produção agrícola irrigado

Considerando-se um volume controle de solo, os componentes do balanço hídrico nos sistemas irrigados são apresentados na Figura 2.

Equacionando-se as entradas (+) e as saídas (–) de água do sistema, tem-se a variação de armazenamento de água no solo:

$$\Delta ARM = P + I + O + Ri + DLi + AC - \\ - ET - Ro - DLo - DP$$

em que P é precipitação; I é irrigação; O é orvalho; Ri é escoamento superficial; DLi é escoamento subsuperficial; AC é ascensão capilar (fluxo ascendente); ET é evapotranspiração; Ro é escoamento superficial; DLo é escoamen-

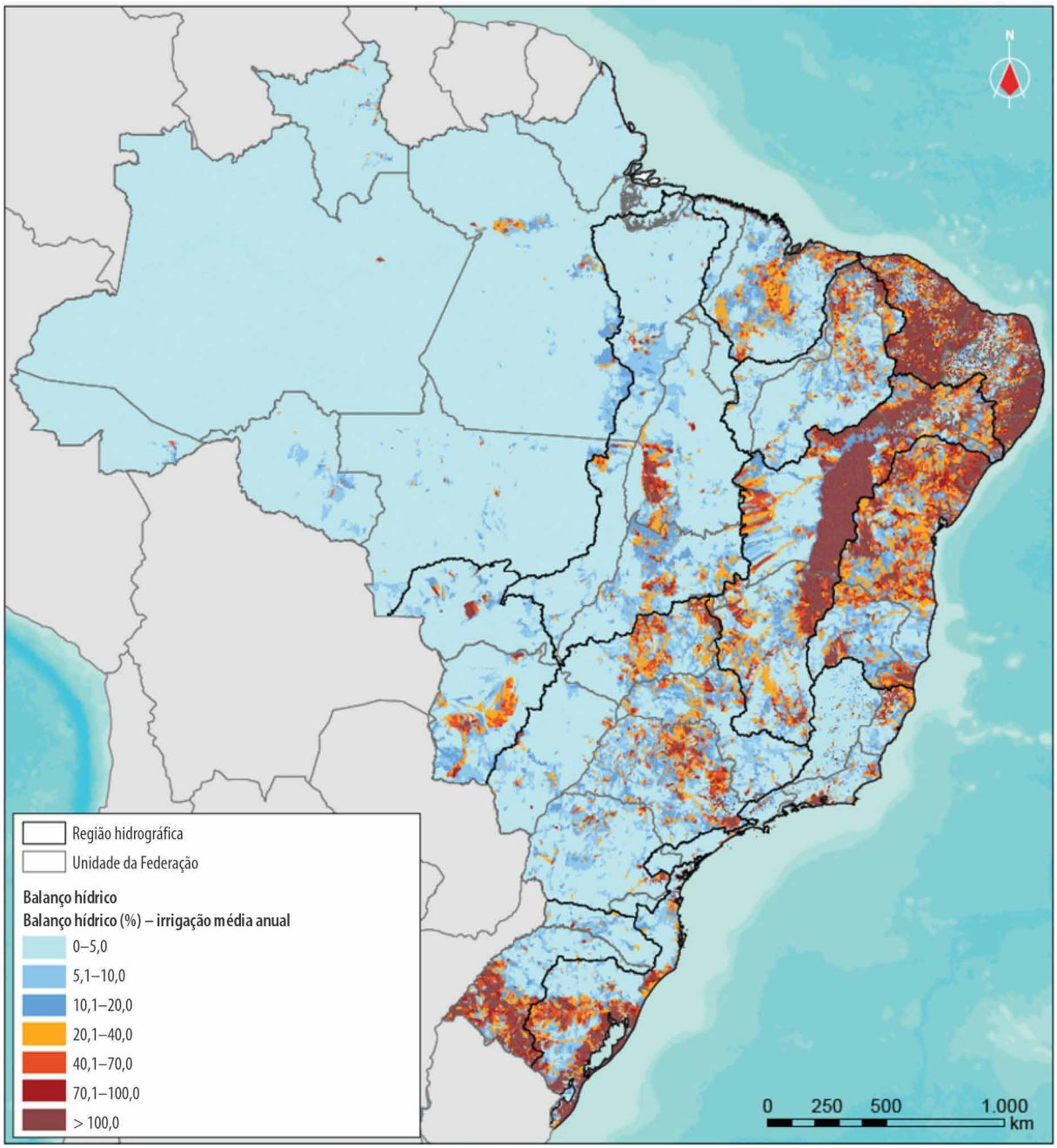


Figura 3. Balanço hídrico nas principais bacias hidrográficas brasileiras, considerando a demanda média anual para irrigação.

Fonte: Agência Nacional de Águas (2016).

to subsuperficial; e DP é drenagem profunda (infiltração).

A chuva e a irrigação representam as principais entradas de água em um sistema, ao passo que a contribuição do orvalho só assume papel importante em regiões muito áridas, sendo assim desprezível. As entradas de água pela ascensão capilar também são muito pequenas e somente ocorrem em locais com lençol freático superficial e em períodos muito secos. Mesmo assim, a contribuição dessa variável é pequena e também desprezível. Já os fluxos horizontais de água (escorrimento superficial e subsuperficial, de entradas e de saídas: Ri, Ro, DLi e DLo), para áreas homogêneas, se compensam, portanto, anulando-se. A ET é a principal saída de água

do sistema, especialmente nos períodos secos, ao passo que a drenagem profunda (DP) se constitui em outra via de saída de água do solo nos períodos excessivamente chuvosos (Sentelhas; Angelocci, 2012b).

Pode-se considerar, então, que $Ri \approx Ro$, $DLi \approx DLo$, O e AC são desprezíveis, o que resulta na seguinte equação geral do balanço hídrico:

$$\Delta ARM = P + I - ET - DP$$

Por meio dessa equação, pode-se determinar a variação da disponibilidade de água no solo e, caso se conheça a capacidade de água disponível (CAD) desse solo, pode-se determinar também a quantidade de água armazenada por ele.

Uma das formas de se contabilizar o balanço de água no solo é por meio do método proposto por Thornthwaite e Mather (1957), denominado de Balanço Hídrico Climatológico, no qual, a partir dos dados de precipitação (P), de evapotranspiração potencial (ETp) e da CAD, chega-se aos valores de disponibilidade de água no solo (ARM), de alteração do armazenamento de água do solo ($ALT = \Delta ARM$), de evapotranspiração real (ETr), de deficiência hídrica (DEF) e de excedente hídrico ($EXC = DP$).



Não somente o conhecimento da disponibilidade hídrica, mas também o conhecimento da quantidade de água requerida pelas culturas, juntos, constituem-se em aspectos de grande relevância na agricultura irrigada para que haja uma adequada programação de manejo de irrigação.

Existem várias metodologias e critérios para estabelecer programas de irrigação, que vão desde simples turnos de rega a completos esquemas de integração do sistema solo-água-planta-atmosfera. Entretanto, reconhece-se que, ao agricultor, devem ser fornecidas técnicas simples, mas com precisão suficiente, para possibilitarem, no campo, a determinação criteriosa do momento e da quantidade de água a ser aplicada.

Técnicas de análise espacial podem mapear as demandas e a disponibilidade hídrica em uma região, identificando as bacias hidrográficas com elevado potencial de uso da água e as principais atividades rurais. O cálculo da demanda é feito com base no consumo potencial da água pelas propriedades no meio rural. Em estudo realizado por Conceição et al. (2013), em Santa Catarina, os potenciais usuários da água foram divididos em três grupos: população rural, rebanho animal e agricultura irrigada. A disponibilidade hídrica foi definida como a vazão mínima de 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos. E o balanço hídrico foi calculado pela diferença entre a disponibilidade hídrica e a demanda rural. Os resultados foram fundamentados na: a) análise da distribuição espacial da demanda hídrica em escala estadual e local; b) análise dos fatores que impactam essa disponibilidade; e c) estimativa do balanço hídrico rural nas divisões hidrográficas. As análises foram feitas no Sistema de Informações Geográficas – SIG (ArcGis), e os resultados foram apresentados por mapas de superfície contínua e divisões hidrográficas em escala estadual, e de superfície contínua dentro das divisões hidrográficas, em escala local. Constatou-se que a região no extremo sul do estado apresenta os maiores deficits no balanço hídrico, coincidindo com os períodos de intensa atividade agrícola com irrigação, indicando que a demanda da quantidade de água destinada à atividade agrícola supera a capacidade regional das bacias.

No momento de implantar uma dada cultura agrícola, o produtor deve compreender a necessidade hídrica, para quantificar o volume de água necessário durante o seu ciclo de desenvolvimento (de vida ou produtivo). Para tal, determinar os períodos em que a cultura se encontra suscetível à falta de água é, em última análise, essencial para reduzir perdas de produtividade. A ET e o coeficiente de cultura (Kc) são de grande valia para determinar a demanda hídrica. Essas variáveis estabelecem o momento e a quantidade de água para cada cultura.

O balanço hídrico, dependente diretamente da ET, é uma ferramenta para o planejamento de irrigação. Esse parâmetro consiste em apresentar condições hídricas nas diferentes fases do desenvolvimento da planta, e é possível evidenciar a quantidade de água consumida pela cultura e determinar a necessidade de irrigação essencial, no momento adequado. Para adequado manejo da demanda hídrica, é fundamental a compreensão da dinâmica da evapotranspiração real (ETr), em sequeiro ou irrigado. O conhecimento da ET máxima ou potencial (ETp) é relevante para determinar a necessidade hídrica da cultura, quando existe água em condições adequadas para a planta crescer, desenvolver-se sem restrições, com teores evaporativos em crescimento e condições ótimas de cultivo. O manejo de irrigação é ferramenta imprescindível para atender às necessidades da cultura, evitar excessos ou a escassez de água. Vários métodos permitem realizar práticas de irrigação, baseados no solo e oriundos de extrações de dados climáticos.

Na irrigação é importante avaliar o sistema solo-planta-atmosfera para obter um panorama da situação e favorecer a tomada de decisão correta de quanto e quando irrigar. O uso de água para irrigação busca alta produtividade, geração de qualidade maior aos produtos e redução de perdas causadas por deficiência hídrica. Na agricultura, a economia de água, medida pelo uso e eficiência de água na cultura e pelo máximo retorno econômico, é meta importante. A irrigação de forma inadequada aumenta os custos de produção, causando desequilíbrio na relação custo-benefício da área irrigada.

A conjuntura hídrica e área agrícola irrigada

Estatísticas de uso mundial de água apontam a agricultura como a principal demandadora, com quase 70% do total de retiradas de água doce (FAO, 2020; Unesco, 2016). No entanto, apesar de figurar aparentemente como vilã, a agricultura irrigada retorna quase 84% do seu consumo hídrico de volta ao sistema (drenagem agrícola), de forma mais limpa quando comparada a outros setores usuários, como águas residuais urbanas e industriais. Além disso, o uso de água agrícola é a atividade que traduz o seu consumo na entrega de produção de alimentos, fator extremamente importante se considerado o crescimento da população mundial nos últimos anos e também a qualidade da alimentação e diversificação de dietas, com alimentos mais exigentes em água.

Outro aspecto, como a espacialização das fontes de água, no entanto, destacam a importância do gerenciamento desse recurso em curto, médio e longo prazo. É visível a irregularidade de distribuição geográfica de água no mundo, com destaques pontuais para a Ásia, com quase 60% dos habitantes do globo, mas que detém apenas 31,6% da água doce superficial do planeta, e Américas, que concentram 41% da água doce, tendo apenas 14% da população mundial (Rosso, 2014).

Pelos dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura – FAO (2014), 17 países de diferentes continentes são responsáveis pelo uso de mais de 90% da água para a agricultura, sendo que ⅔ desses países, classificados como industrializados, fazem uso de menos de 10% da água na agricultura.

Considerando a utilização global da água no setor agrícola, em 2012, foram contabilizados 324 milhões de hectares equipados com sistemas de irrigação (FAO, 2016), e, desse total, 85% foram áreas efetivamente irrigadas. Inclusive há controvérsias quanto aos cenários de maior ou menor uso de sistemas e áreas irrigadas até 2050 (FAO, 2017; Grafton; Wheeler, 2018). A FAO (FAO, 2014) contabilizou, em 2014, a distribuição de 86% de hectares com irrigação por superfície, 11% com irrigação por aspersão e outros 3% com irrigação localizada. O Brasil é o país com maior disponibilidade hídrica mundial e concentra 12% da água doce superficial do planeta (Rosso, 2014). No entanto, assim como em outras regiões do mundo, a distribuição desse recurso natural é heterogênea e não

favorece o balanço demanda/oferta para a disponibilidade e o consumo na produção agrícola.

A região geográfica que representa grande percentual do total de água doce superficial do Brasil é a região hidrográfica da Amazônia, que concentra 80% dos atuais 255 mil metros cúbicos de água por segundo que passam pelo território do País (Agência Nacional de Águas, 2020). Essa região apresenta apenas 6,8% de concentração demográfica. O Nordeste, que concentra 30% da população, conta apenas com 5% da água disponível. A região Sudeste, que sofre com períodos sucessivos de secas nos últimos anos, abriga mais de 40% da população brasileira e detém apenas 12,5% do volume disponível de água doce do País (Agência Nacional de Águas, 2017).

Além da heterogeneidade de distribuição fluvial em território brasileiro, é perceptível a variação de regime de chuvas ao longo do ano, com estações secas e chuvosas bem definidas na maior parte do Brasil e com variação entre anos. Nesse aspecto, cabe ao gerente hídrico, como garantia de disponibilidade hídrica, realizar o armazenamento da água do ciclo hidrológico por meio de reservatórios, açudes, lagos lonados, entre outros, capazes de reservar água nos períodos úmidos para a oferta garantida nos períodos mais secos.

As últimas estimativas apontam 8,2 milhões de hectares de área irrigada, o que corresponde a menos de 10% de todo o potencial nacional para agricultura (Agência Nacional de Águas, 2020). No entanto, são necessários estudos aprofundados da realidade dos sistemas de produção irrigada no Brasil. O maior volume de retirada de água no Brasil é destinado à irrigação (Figura 4). Das áreas equipadas com irrigação, 35,5% da retirada é para uso em fertirrigação com água de reuso (2,9 Mha) e os outros 64,5% é para irrigação com água de mananciais (5,3 Mha). A Embrapa, em parceria com a ANA, tem feito o mapeamento das áreas com sistemas de irrigação por pivôs centrais no País (Figura 5), como forma de aprimorar as estimativas de demanda de água para irrigação.

O relatório da Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação (Csei)/Abimaq de 2021 mostra uma tendência de crescimento da área irrigada puxada pelos sistemas de irrigação localizados e por pivôs centrais. Houve um crescimento de áreas com pivô central em 20% de 2019 para

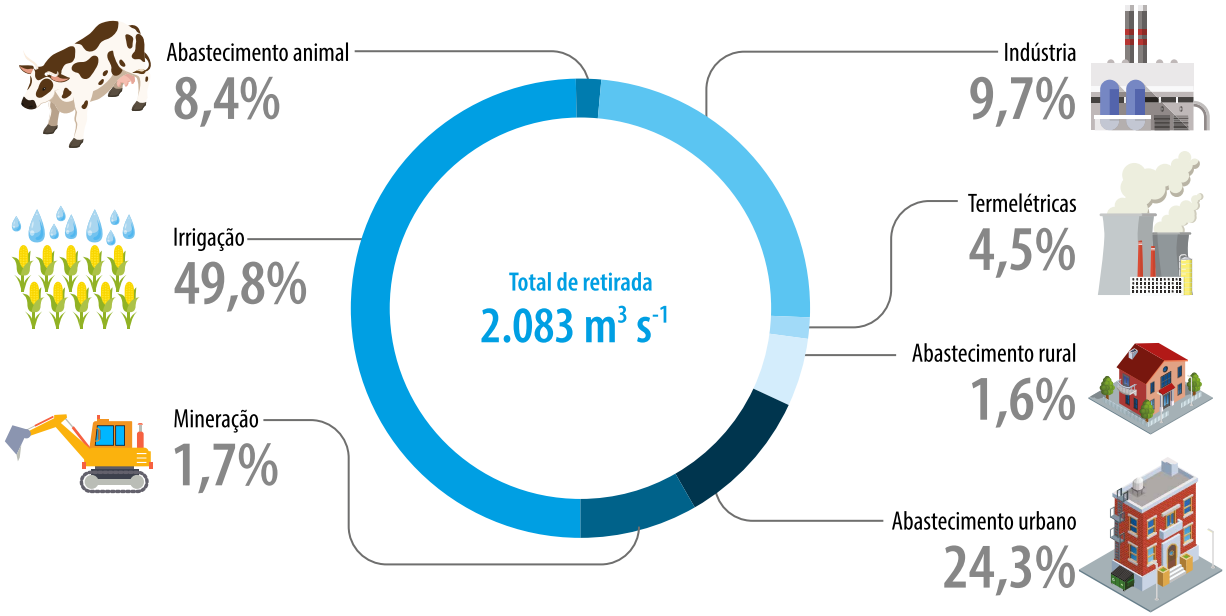
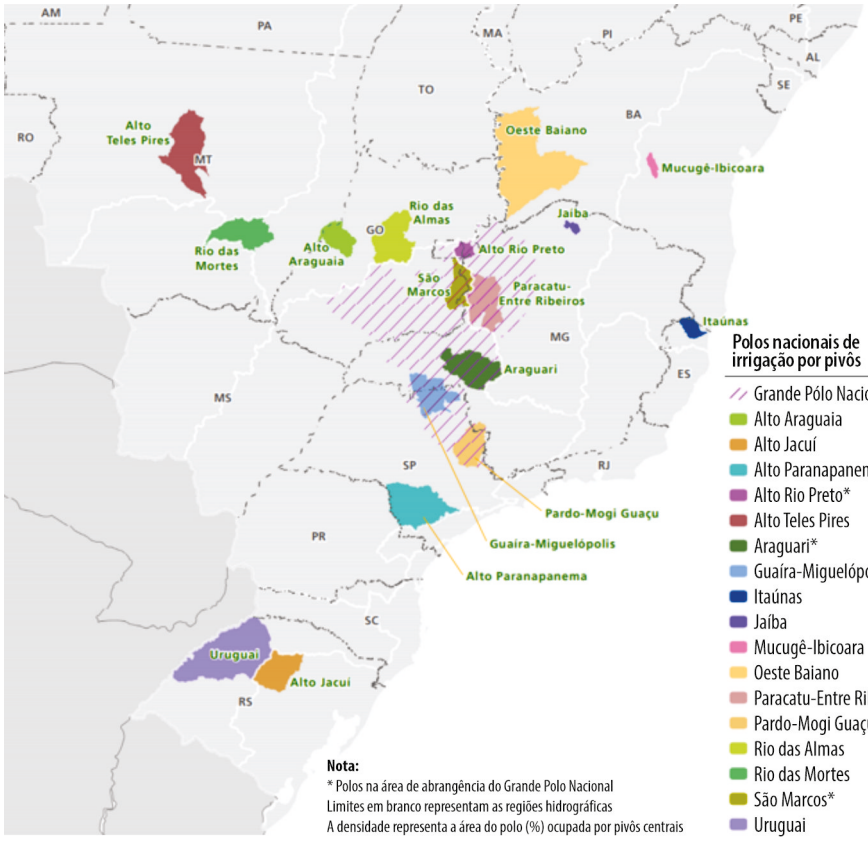


Figura 4. Total de água retirada no Brasil (média anual).

Fonte: Agência Nacional de Águas (2020).



Polos nacionais de irrigação por pivôs	Área (ha)	Ranking Área
Grande Pólo Nacional	620.029	-
Alto Araguaia	20.915	13º
Alto Jacuí	21.358	12º
Alto Paranapanema	88.414	4º
Alto Rio Preto*	17.495	15º
Alto Teles Pires	38.559	9º
Araguari*	69.892	6º
Guaíra-Miguelópolis*	46.726	7º
Itaúnas	10.229	17º
Jaíba	14.256	16º
Mucugê-Ibicoara	40.801	8º
Oeste Baiano	147.087	1º
Paracatu-Entre Ribeiros*	91.856	3º
Pardo-Mogi Guaçu*	33.375	11º
Rio das Almas	18.148	14º
Rio das Mortes	38.060	10º
São Marcos*	100.872	2º
Uruguai	70.708	5º

Figura 5. Distribuição das áreas equipadas com irrigação por pivôs centrais nos polos nacionais.

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas (2019).

Agricultura irrigada brasileira

2020 e, respectivamente, de 30% e 20% de crescimento, neste mesmo período, para os sistemas com carretel e convencional. Nos últimos 6 anos, os pivôs obtiveram desempenho superior ao histórico, com participação igual ou superior a 40% em relação ao incremento total da área irrigada mecanizada (Agência Nacional de Águas,2019). Em termos de área, o ritmo médio de incremento tem sido de 95 mil hectares ao ano nos últimos anos (2013–2018).

Os investimentos em irrigação contribuem para o aumento da produtividade e do valor da produção agrícola, e também para a redução da necessidade de expansão em áreas ocupadas por outros usos e coberturas (pastagens ou matas nativas, por exemplo). Aplicando boas práticas de manejo do solo e da água, irrigantes alcançam eficiências elevadas de uso dos recursos hídricos.

Importância do gerenciamento da água na propriedade

No conceito de ciclo hidrológico – fenômeno global de circulação da água – estão os fundamentos para compreender a importância da ação humana, quanto ao gerenciamento dos recursos hídricos, em toda e qualquer natureza ou dimensão, nos campos ou nas cidades. Entretanto, a lei de conservação de massa (Lavoisier: "na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma") expressa, além dos ensinamentos físicos, dois aspectos relevantes para a compreensão do cidadão comum: a) a agricultura não é a vilã do desperdício de água, como é anunciado em diferentes veículos de comunicação, nos tempos atuais, embora haja desperdícios de água, por usos indevidos de técnicas de captação, distribuição e manejo

de irrigação, e por perdas de carga em razão de dimensionamentos incorretos de engenharia e de sistemas de usos de água; b) o conceito de ciclo hidrológico deve ser compreendido de forma a permitir o entendimento de que práticas inadequadas em algum local, por certo, implicarão ou trarão impactos locais e alhures.

Desse modo, é importante internalizar que o gerenciamento de água é uma medida útil e necessária, e tem-se conhecimento de técnicas de impactos locais eficazes e eficientes para a sociedade. É preciso compartilhar inteligência, esforços e resultados positivos, com vizinhos locais e regionais, quando se trata de manejo de recursos hídricos. Além disso, por essa razão é que o gerenciamento de recursos hídricos requer fundamentos, sendo, tipicamente, um negócio da iniciativa pública, privada e parceria público-privada, com demonstrado grau de amadurecimento e compromisso com os recursos hídricos para com o presente e o futuro.

O tema envolvendo a disponibilidade de água e seus usos tem ampliado, do ponto de vista técnico, legal e econômico, uma consciência coletiva para a sua gestão integrada. Portanto, os aspectos de quantidade e qualidade da água, para as suas finalidades de utilidade natural e construída pelo homem, requerem uma adequação quanto às diversidades físicas, bióticas, demográficas, ambientais, sociais, econômicas e culturais de diversas localidades e regiões do Brasil ou de qualquer outra região do globo terrestre. A sustentabilidade das atividades humanas, em todos os ambientes – urbano ou campo –, necessita de um conhecimento e uma aplicação de fundamentos, instrumentos e práticas adequadas de gestão dos recursos hídricos, todos apensados ao "pensar global e agir localmente". Essa máxima de sabedoria requer manejo e uso de água com parcimônia, preservação e adequação de recursos hídricos com inteligência estratégica, eficiência de desempenho e tolerância zero para desperdícios de água, de qualquer natureza.

No Brasil, instituições governamentais, de ciência, tecnologia e inovação, públicas e privadas, se encarregam de captar e analisar dados fornecendo subsídios para políticas públicas de aumento da eficiência de uso da água. A ANA desenvolveu o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos[1] (SNIRH), que é um dos instrumentos de gestão previsto na Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, conhecida como Lei das Águas (Brasil, 1997). Trata-se de um amplo sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre recursos hídricos, bem como fatores intervenientes para sua gestão. Na prática, são disponibilizadas informações sobre a divisão das bacias hidrográficas, quantidade de água (precipitação, disponibilidade hídrica, monitoramento quantitativo de reservatórios), qualidade de água, usos da água e balanço hídrico de bacias hidrográficas.

O portal HidroWeb[2], integrante do SNIRH, oferece um banco de dados com informações coletadas pela rede hidrometeorológica – dados sobre cotas, vazões, chuvas, evaporação, perfil do rio, qualidade da água e sedimentos. Trata-se de uma importante ferramenta para a sociedade, pois os dados coletados pelas estações de monitoramento são utilizados para produzir estudos, definir políticas públicas e avaliar a disponibilidade hídrica. Por meio dessas informações, a ANA monitora eventos considerados críticos, como cheias e estiagens, disponibiliza informações para a execução de projetos, identifica o potencial energético, de navegação ou de lazer em um determinado ponto ou ao longo da calha do manancial, levanta as condições dos corpos d'água para atender a projetos de irrigação ou de abastecimento público, entre outros. E todos esses relatórios e tomadas de decisão interferem no balanço hídrico e na gestão da água dentro do sistema de produção agrícola.

[1] Disponível em: http://www.snirh.gov.br.

[2] Disponível em: http://www.snirh.gov.br/hidroweb.

Em 2020, também foi lançado um novo portal do SNIRH[3] e, para facilitar o acesso às diferentes bases de dados do SNIRH em formatos de dados abertos, a ANA disponibilizou o portal de Dados Abertos[4] .

Na propriedade, a agricultura é altamente dependente das condições de tempo e clima, e os agricultores na maioria das vezes não têm controle sobre eles, especialmente os recursos hídricos derivados da precipitação anual, os quais são condicionados aos regimes de chuvas e às sazonalidades específicos em cada região. Segundo Sentelhas e Angelocci (2012a), cerca de 80% da variabilidade na produtividade agrícola se deve à variabilidade das condições meteorológicas durante a estação de cultivo, especialmente para as culturas de sequeiro. E, ainda, dentre os fatores responsáveis por colapso na agricultura no mundo, as inundações, os ventos intensos e as secas são os principais, havendo impactos da variabilidade do tempo percebidos não somente sobre o crescimento e a produtividade das culturas, mas também sobre as práticas agrícolas no sistema de produção.

A questão hídrica, extremamente crítica, nos tempos atuais, aponta a necessidade de um produtor agrícola eficiente e também um produtor de águas. É evidente que há urgência nas mudanças conceituais e práticas de usos de água, de forma direta ou indireta, que impactam positivamente na eficiência do seu uso. Neste contexto, preservação, manutenção, reservação, captação, transporte, tratamento, distribuição e reusos de água, dentre outras, são medidas essenciais (Figura 6).

O gerenciamento de recursos hídricos deverá considerar a implantação de tecnologias pelas águas, a exemplo de manutenção e preservação de nascentes e fontes hídricas, leitos d'água e aquíferos, matas ciliares, cobertura vegetal de solos, práticas de manejo e conservação de solo-água-espécies, adequação de obras de engenharia, formação de barraginhas, dentre outras ações de conservação e usos hídricos na propriedade, com impacto social e relevância para a consciência ecológica e organização produtiva. As práticas de plantio direto, de terraceamento, de plantio em curvas de nível e a formação de barraginhas tornam-se exemplos potenciais de manejo para quaisquer propriedades, com e sem sistema de produção agrícola irrigado. São práticas que reduzem o escoamento superficial e mantêm a reposição contínua das fontes hídricas no perfil do solo, tanto superficiais como subterrâneas.

A função social da propriedade rural e o acesso à terra como respeito à dignidade da pessoa humana estão previstos na Constituição Federal (CF-88) (Brasil, 1988) e no Código Civil

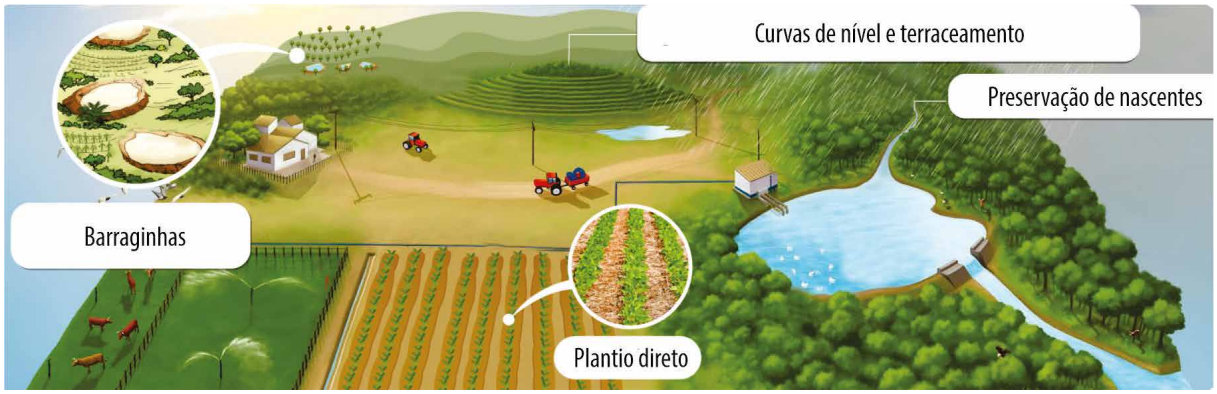


Figura 6. Boas práticas agrícolas de conservação do solo e da água para a gestão eficiente da água na propriedade.
Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

[3] Disponível em: http://www.snirh.gov.br.

[4] Disponível em: https://dadosabertos.ana.gov.br.

(Lei nº 10.406/2002) (Brasil, 2002), que disciplinam uma visão de sociabilidade, deixando de lado o caráter individualista da propriedade, e indicando a necessidade de se buscar o equilíbrio entre os interesses individuais e os da coletividade, garantindo primazia à dignidade da pessoa humana e todas as consequências e os aportes que seu respeito impõe. As obrigações legais do proprietário rural estão expressas em legislação federal complementar, a exemplo da Lei das Águas; Lei de Uso Sustentável e Conservação de Solos Agrícolas (Lei nº 6.225/1975 – discrimina regiões para execução obrigatória de planos de proteção ao solo e de combate à erosão (Brasil, 1975); Lei nº 8.171/1991 – Lei de Política Agrícola (Brasil, 1991); Código Florestal Brasileiro, regulado pela Lei nº 12.651/2012 – atualiza a Lei nº 4.771/1965, e estabelece limites de uso da propriedade, que deve respeitar a vegetação existente na terra, considerada bem de interesse comum a todos os habitantes do Brasil (Brasil, 2012). Legislações complementares, no âmbito de estado e município, também tratam da ocupação e de usos dos recursos naturais, a exemplo de condutas para manejo e usos de bacias hidrográficas, águas superficiais e temas afins, nos ambientes urbano e rural.

As leis que regem o uso da água na agricultura

No Brasil, a Lei das Águas estabelece os principais argumentos para a outorga de direito de uso da água, esta última como instrumento de política pública de uso de recursos hídricos, assegurando o controle quali e quantitativo dos usos da água e o direito de acesso a ela.

A outorga é emitida pelo poder público outorgante (a União, o Estado ou Distrito Federal) e dá direito de uso da água ao requerente por prazo determinado e nos termos e condições expressos em seu respectivo ato. A autorização deve ser requerida sempre que houver captação de águas superficiais ou subterrâneas, lançamento de efluentes, fins hidrelétricos ou quaisquer ações que interfiram no regime hídrico.

A definição da outorga e da respectiva vazão a ser outorgada deve considerar as opções e as metas de desenvolvimento social e econômico que se pretende atingir, considerando os múltiplos usos, a capacidade de suporte do ambiente e a busca de desenvolvimento sustentável. Para tanto, devem ser observadas as questões técnicas de hidrologia, hidráulica e qualidade da água, as questões legais de competências, direitos e responsabilidades dos usuários bem como as questões políticas referentes a acordos entre setores usuários e governos para o desenvolvimento sustentável da bacia (Agência Nacional de Águas, 2011).

A outorga também está relacionada à cobrança pelo uso das águas, e os usuários sujeitos à outorga são cobrados a partir do volume de água que efetivamente estão autorizados a utilizar. O armazenamento das informações relevantes à análise de pedidos de outorga é feito no SNIRH[5].

A ANA é responsável pela emissão da outorga em corpos d'água de domínio da União, ou seja, rios, lagos e represas que dividem ou passam por dois ou mais estados, ou ainda aqueles que passam pela fronteira entre o Brasil e outro país (Figura 7). Já as águas subterrâneas e os cursos d'água que banham apenas um estado ou o Distrito Federal são outorgadas pelos poderes públicos estaduais ou distrital.

Os critérios adotados pelas outorgantes são bastante diversificados no País, configurando desafio imenso para a articulação entre os órgãos gestores, na prática da gestão compartilhada das bacias. Estados do Nordeste, por exemplo, outorgam percentuais muito superiores a outros estados da Federação com maior disponibilidade hídrica.

Passos para a obtenção da outorga

A ANA elaborou uma nova ferramenta de solicitação de outorga de direito de uso de recursos

[5] Disponível em: http://www.snirh.gov.br.

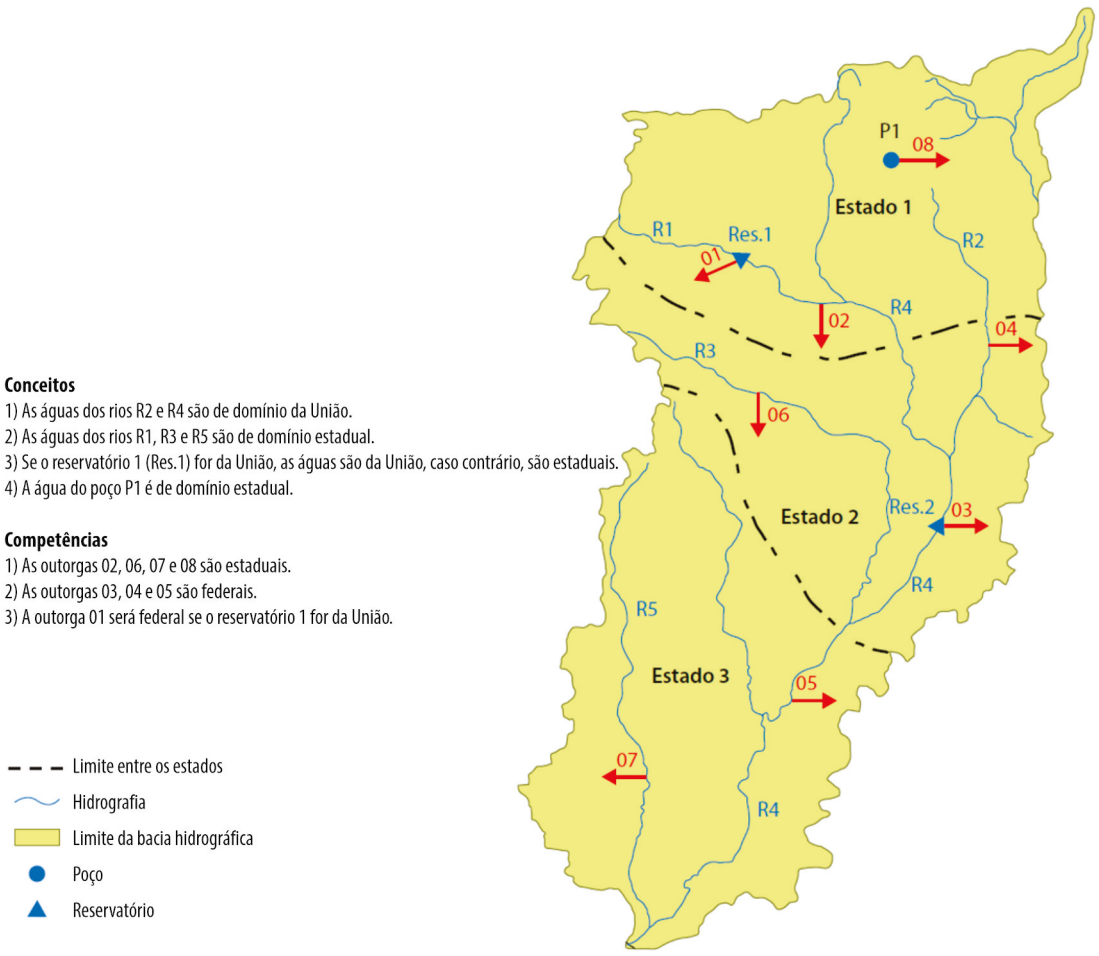


Figura 7. Competências estadual, distrital e federal para domínio de corpos d'água e emissão de outorga no Brasil.

Fonte: Agência Nacional de Águas (2011).

hídricos de domínio da União: Sistema Federal de Regulação de Usos (Regla). Os tutoriais Regla estão disponíveis no site da ANA[6] .

Importante ressaltar que há fiscalização específica para uso de recursos hídricos, consistindo na busca da regularização de usos ainda não outorgados ou na verificação dos usos outorgados, ambas com aplicação de sanções legais para sanar infrações às normas de utilização de recursos hídricos, que, de modo geral, são caracterizadas em casos de:

- Derivar ou utilizar recursos hídricos para qualquer finalidade, sem a respectiva outorga de direito de uso.
- Iniciar a implantação ou implantar empreendimento de derivação ou utilização de recursos hídricos superficiais ou subterrâneos que impliquem alterações no regime, quantidade, qualidade, sem autorização.
- Utilizar-se dos recursos hídricos ou executar obras em desacordo com condições da outorga.
- Perfurar poços para extração subterrânea sem autorização.
- Fraudar medições.
- Infringir normas estabelecidas no regulamento da Lei de Recursos Hídricos e regulamentos administrativos.
- Obstar ou dificultar ação fiscalizadora.

[6] Disponível em: https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-regla/tutoriais-regla.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: informe 2016. Brasília, DF, 2016. 95 p. Disponível em: http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe-conjuntura-2016.pdf. Acesso em: 19 maio 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**: recursos plenos. Brasília, DF, 2017. Disponível em: http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/relatorio-conjuntura-2017.pdf. Acesso em: 16 abr. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020**. Brasília, DF, 2020. Disponível em: http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.23309814.pdf. Acesso em: 16 fev. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (Brasil). **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil (1985-2017)**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: https://www.ana.gov.br/noticias/ana-e-embrapa-identificam-forte-tendencia-de-crescimento-da-agricultura-irrigada-por-pivos-centrais-no-brasil/ana_levantamento-da-agricultura-irrigada-por-pivos-centrais_2019.pdf. Acesso em 16 fev. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (Brasil). **Outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Brasília, DF, 2011. 50 p. (Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos, v. 6). Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/OutorgaDeDireitoDeUsoDeRecursosHidricos.pdf. Acesso em: 19 maio 2017.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF, 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 19 maio 2017.

BRASIL. Lei nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002. Institui o Código Civil. **Diário Oficial da União**, 11 jan. 2002. Seção 1, p. 1.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 28 maio 2012. Seção 1, p. 1. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 14 maio 2017.

BRASIL. Lei nº 6.225, de 14 de julho de 1975. Dispõe sobre discriminação, pelo Ministério da Agricultura, de regiões para execução obrigatória de planos de proteção ao solo e de combate à erosão e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 15 jul. 1975. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6225.htm. Acesso em: 13 maio 2017.

BRASIL. Lei nº 8.171, de 17 de janeiro de 1991. Dispõe sobre a política agrícola. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, 18 jan. 1991. Seção 1, p. 1330. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8171.htm. Acesso em: 13 maio 2017.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, 9 jan. 1997. Seção 1, p. 470. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm. Acesso em: 13 maio 2017.

CONCEIÇÃO, G.; VIANNA, L. F. N.; BACIC, I. L. Z.; KOBIYAMA, M.; BELLI FILHO, P. Análise espacial do balanço hídrico no meio rural de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 4, p. 89-100, out./dez. 2013.

FAO. **Aquastat Infographics**. Rome, 2014. Disponível em: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/infographics/Infographics_all_eng.pdf. Acesso em: 21 maio 2016.

FAO. **Aquastat**. Roma, 2016. Disponível em: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en. Acesso em: 21 maio 2016.

FAO. **The future of food and agriculture**: Trends and challenges. Rome, 2017. Disponível em: www.fao.org/3/a-i6583e.pdf. Acesso em: 16 fev. 2021.

FAO. **The State of food and agriculture**. Rome, 2020. Disponível em: http://www.fao.org/3/cb1447en/CB1447EN.pdf. Acesso em: 16 fev. 2021.

GRAFTON, R. Q.; WHEELER, S. A. Economics of water recovery in the Murray-Darling Basin, Australia. **Annual Reviews**, Mar. 2018.Disponível em: https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-resource-100517-023039. Acesso em: 16 fev. 2021.

GUANDIQUE, M. E. G.; MORAIS, L. C. Estudo de variáveis hidrológicas e do balanço hídrico em bacias hidrográficas. In: POMPÊO, M.; MOSCHINI-CARLOS, V.; ISHIMURA, P. Y.; SILVA, S. C. da; DOVAL, J. C. L. (org.). **Ecologia de reservatórios e interfaces**. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2015. p. 437-438. Disponível em: http://ecologia.ib.usp.br/reservatorios/PDF/Cap._29_Variaveis_hidrologicas.pdf. Acesso em: 10 jun. 2017.

ROSSO, G. Gestão da água. **Ciência para a vida**, n. 8, p. 30-31, set./dez. 2014. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1006730/xxi-ciencia-para-a-vida-embrapa-semeando-agua. Acesso em: 22 maio 2017.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. **Balanço hídrico**: climatológico normal e sequencial, de cultura e para manejo da irrigação. Piracicaba: Esalq, 2012b. Disponível em: http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce306/Aula9_2012.pdf. Acesso em: 10 abr. 2017.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. Uso de modelos de simulação de culturas como ferramentas para identificação dos agentes deflagradores de colapso na produção agrícola: balanço hídrico climatológico normal e sequencial, de cultura e para manejo da irrigação. In: REUNIÃO TÉCNICA DO CEMADEN, 3., 2012 Fortaleza. **Extremos climáticos e colapso de produção agrícola**. Fortaleza, 2012a.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1957. 311 p. (Drexel Institute of Technology. Publications in Climatology, v. 10, n. 3).

UNESCO. World Water Assessment Programme. **The United Nations World Water Development Report 2016**: water and Jobs. Paris, 2016. Disponível em: http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002439/243938e.pdf. Acesso em: 22 maio 2017.



Capítulo 2

Água no solo

João Herbert Moreira Viana
Camilo de Lelis Teixeira de Andrade
João Carlos Ferreira Borges Júnior
Lairson Couto

Introdução

O solo é o suporte físico e o reservatório de água para as plantas, além de ser o armazenador dos nutrientes necessários à produção. As partículas do solo, agregadas, constituem um meio poroso complexo e dinâmico. Isso afeta a interação entre a água e o solo no sistema maior solo-água-planta-atmosfera, que governa inúmeros processos, entre os quais o movimento dos gases e da própria água, o transporte de agroquímicos, além da absorção de água e nutrientes pela planta.

Vários parâmetros e relações (funções), de interesse para as engenharias agronômica, de irrigação e ambiental, são utilizados para descrever os processos no sistema solo-água. Esses parâmetros e relações são empregados em projetos de sistemas de irrigação e drenagem, para o manejo de irrigação e para o monitoramento e o controle ambiental.

O objetivo deste capítulo é conceituar os principais parâmetros e relações que regem a dinâmica da água no solo e descrever os métodos disponíveis para as suas determinações. Os conceitos envolvidos nas relações solo-água não são novos. Entretanto, a maneira de interpretá-los, de descrevê-los matematicamente e de utilizá-los de forma prática tem evoluído nos últimos anos.

O desenvolvimento tecnológico dos computadores e, atualmente, dos aparelhos celulares permitiu a implementação de modelos ou aplicativos que simulam os vários processos que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera, cuja interação é, às vezes, consideravelmente complexa. Esses modelos propiciam a extrapolação de resultados de pesquisa para situações diversas, aumentando o alcance desses estudos. Também podem ser utilizados como ferramentas de tomada de decisão no planejamento e na gestão de projetos de irrigação e/ou drenagem. A grande limitação para aplicação dessa tecnologia está no requerimento de dados realistas de solo, planta e clima e dados relativos à dinâmica de água e solutos no solo.

Novos sensores e instrumentos têm permitido uma melhor precisão na quantificação de parâmetros físico-hídricos do solo. Contudo, há ainda a necessidade de desenvolvimento, adaptação e melhoria de metodologias para determinação desses parâmetros, sobretudo em campo.

Finalmente, o esforço maior, do ponto de vista de pesquisa e desenvolvimento, deve ser devotado à geração de banco de dados, avaliação, calibração e aprimoramento de modelos e instrumentos, com o objetivo de favorecer e viabilizar a adoção de tecnologias avançadas pelos irrigantes. A evolução do nível tecnológico dos irrigantes contribuirá para a sustentabilidade da agricultura irrigada no País, segundo aspectos ambientais (uso racional de água e solo) e econômicos.

Caracterização físico-hídrica do solo

O solo pode ser caracterizado por meio de análises físicas, mineralógicas e de fertilidade, das diversas camadas do seu perfil. Pode também ser classificado de acordo com sua aptidão para

irrigação. Para o manejo da irrigação, é necessário que sejam conhecidas algumas de suas propriedades físicas e físico-hídricas. As principais são a densidade, o limite superior de água disponível ou capacidade de campo, o limite inferior de água disponível ou ponto de murcha permanente ou a curva característica de retenção de água, que engloba estes dois últimos parâmetros. Outros parâmetros, não menos importantes, são a composição granulométrica, a densidade das partículas, a condutividade hidráulica do solo saturado, a condutividade elétrica, a taxa de infiltração básica e a porosidade (Couto; Sans, 2002).

Granulometria e estrutura do solo

A granulometria diz respeito à distribuição, por tamanho, das partículas minerais que constituem o solo. O solo apresenta a fração grosseira, maior que 2 mm e a fração terra fina, menor que 2 mm. Esta última é tradicionalmente dividida em três frações de tamanho: areia, silte e argila. Para o sistema adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), os limites são: areia (2,0 mm a 0,05 mm), silte (0,05 mm a 0,002 mm) e argila (< 0,002 mm). A granulometria de um solo indica apenas o diâmetro equivalente de suas partículas e não diz muito a respeito de suas propriedades físico-hídricas. Relações solo-água, importantes para a irrigação, requerem outras análises além da determinação da textura do solo. Todavia, a informação sobre a granulometria do solo permite que se estabeleça uma faixa esperada para um certo parâmetro físico-hídrico. De um modo geral, para um dado tipo de solo, as características granulométricas são praticamente invariáveis com o tempo e, geralmente, são pouco afetadas pela ação do homem, a não ser em casos de degradação por erosão severa.

A estrutura se refere ao arranjo das partículas do solo in situ, ou seja, como as partículas do solo estão agrupadas em condições de campo. A estrutura define também a geometria do espaço poroso do solo. Em razão da complexidade do arranjo das partículas, não existe um método prático para se medir a estrutura do solo, sendo feita a descrição qualitativa quando da classificação de perfis. Empregam-se parâmetros do solo como a densidade, a porosidade, a permeabilidade e a estabilidade dos agregados, entre outros, para inferir-se sobre a sua estrutura. Portanto, ao contrário da granulometria, a estrutura é um descritor qualitativo das condições do solo. Solos com granulometria similar podem apresentar estruturas diferentes, dependendo do arranjo e do nível de agregação das suas partículas. Um exemplo típico são os solos tropicais, sob vegetação de Cerrado, com granulometria argilosa, mas bem estruturados e altamente porosos, muito diferentes dos solos com granulometria similar descritos em outras regiões do mundo. Diferentemente da granulometria, a estrutura é altamente dinâmica, podendo variar muito com o tempo em função das mudanças nas condições naturais ou nas práticas de manejo do solo.

Tanto a granulometria quanto a estrutura conferem ao solo um espaço poroso e um arranjo de partículas característicos que, por sua vez, afetarão de alguma forma suas propriedades hídricas, tais como a curva característica de retenção de água, os limites de água disponível e a condutividade hidráulica, todos de interesse para a irrigação e para as ciências ambientais (Hillel, 1970; Cuenca, 1989; Reichardt, 1996).

Os fenômenos de compactação do solo estão associados a mudanças da estrutura. É fundamental, portanto, que os parâmetros de solo relacionados com a estrutura do solo e de interesse para o manejo da irrigação sejam monitorados ao longo do tempo e que as informações geradas sejam atualizadas nos modelos de controle e manejo da irrigação.

Várias tentativas têm sido feitas para relacionar parâmetros físico-hídricos do solo, de interesse para as ciências da irrigação e ambiental, cuja obtenção requer equipamentos laboratoriais, muitas vezes não disponíveis, a dados de textura e outras propriedades físicas mais acessíveis, tais como densidade do solo (Saxton et al., 1986;

Arruda et al., 1987; Meng et al., 1987; Coelho; Conceição, 1993). Avaliações isoladas têm levado a um consenso sobre a viabilidade de uso dessas relações ou modelos, entretanto, eles devem ser calibrados em condições locais para maior confiabilidade (Meng et al., 1987). Têm sido propostas relações, chamadas funções de pedotransferência (FPTs), entre parâmetros físico-hídricos do solo e atributos mais fáceis ou rápidos de serem medidos, como a granulometria (Schaap; Leij, 1998). Tais FPTs necessitam, todavia, de calibração para as condições de solos tropicais. FPTs ajustadas para solos brasileiros estão em desenvolvimento (Oliveira et al., 2002; Michelon et al., 2010; Santos et al., 2013) desde o trabalho de Tomasella et al. (2000).

Composição do solo e relações de massa e volume

O solo é composto de partículas sólidas e pelo espaço poroso, que está preenchido com quantidades variáveis de água (solução do solo) e ar (gases) (Figura 1).

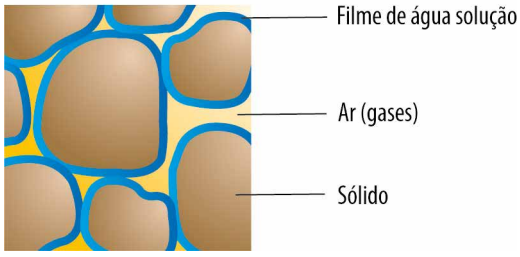


Figura 1. Representação da composição do solo.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Esquematicamente, o solo pode ser representado como mostrado na Figura 2, segundo a composição de suas frações, em que é dividido nas fases sólida, líquida e gasosa.

A partir dessa representação esquemática do solo, com suas fases componentes, podemos estabelecer uma série de relações de massa e volume de grande importância na caracterização físico-hídrica dos solos, como apresentado a seguir. Os procedimentos detalhados são descritos em Donagemma et al. (2011).



Figura 2. Representação esquemática do solo, segundo a composição de suas frações.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Massa e volume totais do solo

A massa total do solo (kg ou g) é dada por:

$$m_t = m_g + m_l + m_s \quad (1)$$

em que m_t é a massa total do solo; m_g é a massa da fase gasosa; m_l é a massa da fase líquida (solução do solo); e m_s é a massa da fase sólida (massa do solo seco em estufa a 105 °C–110 °C, até peso constante).

O volume total (m^3 ou cm^3) é obtido por:

$$V_t = V_g + V_l + V_s \quad (2)$$

em que V_t é o volume total do solo; V_g é o volume da fase gasosa; V_l é o volume da fase líquida; e V_s é o volume da fase sólida.

Volume de poros

O volume de poros (V_p), constituído pelo volume total de fluidos (água e ar), é obtido por meio das equações:

$$V_p = V_g + V_l \quad (3)$$

ou

$$V_t = V_g - V_s \quad (4)$$

Um solo encontra-se saturado quando o volume de poros, V_p, é igual ao volume ocupado

pela água (solução do solo), V_l, ou seja, quando $V_g = 0$.

Densidade atual

A densidade ou massa específica atual do solo (ρ_t) é dada pela relação:

$$\rho_t = m_t / V_t \quad (5)$$

Ao contrário dos parâmetros densidade de partículas e densidade do solo, descritos a seguir, a densidade atual é variável com o teor de água do solo.

Densidade das partículas

A densidade ou massa específica das partículas do solo (ρ_p) é dada pela relação:

$$\rho_p = m_s / V_s \quad (6)$$

A densidade das partículas depende da composição mineralógica do solo e varia pouco nos solos minerais. Na maioria dos casos, para fins práticos, atribui-se à densidade das partículas o valor de 2,65 Mg m^{-3} (1 Mg m^{-3} = 1 g cm^{-3}), porém o valor pode ser maior em solos derivados de litologias associadas a rochas máficas ou metamórficas, ricas em ferro.

Densidade do solo

A densidade ou massa específica do solo (ρ_s) é descrita pela equação:

$$\rho_s = m_s / V_t \quad (7)$$

Ao contrário da densidade das partículas, a densidade do solo é bastante afetada pelas intervenções provocadas pelo homem. A compactação do solo, causada pelo uso intensivo de maquinaria agrícola, reduz o volume total do solo (V_t), para uma mesma massa (m_s), fazendo com que a densidade do solo aumente, o que afeta a capacidade de retenção e o movimento da água no solo. Portanto, a densidade do solo é, assim como a porosidade, um indicador do grau de compactação do solo.

A densidade do solo varia de valores menores que 0,5 Mg m^{-3}, para solos turfosos, de 0,90 Mg m^{-3} a 1,20 Mg m^{-3}, para solos argilosos, e de 1,25 Mg m^{-3} a 1,60 Mg m^{-3}, para solos arenosos. Os valores podem ir até 1,9 Mg m^{-3}, para solos com elevado grau de compactação. A densidade de solo é função da granulometria e da mineralogia e, por si só, não é suficiente para caracterizar a natureza do espaço poroso.

Porosidade

A porosidade (N) é um índice do volume relativo dos poros no solo. É obtida pela relação:

$$N = V_p / V_t = (V_l + V_g) / V_t = (V_t - V_s) / V_t \quad (8)$$

Substituindo V_s e V_t, das Equações 5 e 6, na Equação 8 estabelece-se uma nova relação que pode ser empregada para determinar a porosidade do solo:

$$N = 1 - (\rho_s / \rho_p) \quad (9)$$

A unidade de porosidade é m^3 m^{-3}, ou seja, dimensões [L^3 L^{-3}]. Porém, é comum expressar a porosidade também em termos de porcentagem (%), bastando multiplicar o valor de N, nas dimensões [L^3 L^{-3}], por 100.

Teor de água do solo com base em peso

O teor de água[1] com base em peso (U, em %), ou, mais apropriadamente, com base em massa, é dado por:

[1] O termo umidade é, às vezes, utilizado para designar o teor de água. Contudo, muitos autores têm considerado esse termo mais apropriadamente utilizado segundo um aspecto qualitativo, e o termo teor de água utilizado na quantificação da água armazenada no solo.

$$U = (m_t - m_s)/m_s = m_l/m_s \quad (10)$$

A unidade de U é g g^{-1}, isto é, nas dimensões [M M^{-1}], ou porcentagem, quando a Equação 10 é multiplicada por 100.

Teor de água do solo com base em volume

O teor de água com base em volume (θ, em %) é expresso pela equação:

$$\theta = V_l/V_t = U\rho_s/\rho_a \quad (11)$$

em que ρ_a é a densidade da água.

As unidades usuais de θ são m^3 m^{-3}, dimensões [L^3 L^{-3}], podendo, como no caso anterior, ser expressa em porcentagem, desde que a Equação 11 seja multiplicada por 100. Considerando ρ_a igual a 1 Mg m^{-3}, pode-se calcular θ diretamente com a equação:

$$\theta = U\rho_s \quad (12)$$

Quando o solo está saturado, θ é igual a N.

Em geral, mede-se ou estima-se o teor de água com base em peso, que é bastante simples, e, conhecendo-se a densidade do solo, determina-se o teor de água com base em volume. Em alguns casos, em que amostras de solo não deformadas são coletadas, pode-se determinar, simultaneamente, a densidade do solo e o teor de água com base em volume.

O teor de água no solo pode ser também entendido como a lâmina de água no solo por profundidade do solo, nas unidades m m^{-1}, ou seja, nas dimensões L L^{-1}.

Conteúdo de água no solo

O conteúdo de água no solo é a quantidade de água armazenada até uma dada profundidade do solo, comumente a profundidade efetiva do sistema radicular. É, geralmente, expresso como lâmina, ou seja, em mm. Esse é um parâmetro importante no dimensionamento de sistemas e no manejo da irrigação. É obtido pela equação:

$$A_l = 1.000\ \theta L \quad (13)$$

em que A_l é o conteúdo (lâmina) de água (mm); na camada de espessura L do perfil do solo (m).

Para obter o armazenamento em todo o perfil, basta somar as lâminas armazenadas em cada camada (ou horizonte), para as quais se conhece o teor de água.

Coleta de amostras de solo deformadas e não deformadas

As amostras do solo podem ser retiradas de duas formas:

a) Com alteração de sua estrutura natural de campo, 'amostras deformadas', retiradas com o uso de trados tipo holandês ou enxada.

b) Sem alteração de sua estrutura natural de campo, amostras 'não deformadas', retiradas utilizando-se trados especiais, como o trado (ou amostrador) de Uhland.

Determinação do teor de água do solo

São apresentados os métodos de medição do teor de água do solo mais comuns, incluindo o método de referência do *Manual de métodos de análise de solos* (Donagemma et al., 2011).

Método gravimétrico

É um método direto, o mais simples e o mais utilizado na determinação do teor de água do solo. As amostras devem ser retiradas em vários locais e profundidades no campo, podendo constituir-se de amostras simples ou compostas, conforme a necessidade e a variabilidade da área. Essas amostras podem ser deformadas, obtidas utilizando-se trados comuns ou podem

ser amostras não deformadas, de volumes conhecidos. As perdas de água do solo por evaporação durante a amostragem devem ser evitadas, por meio de retirada e acondicionamento rápidos em embalagem hermética.

As amostras de solo são colocadas em latas de alumínio, que devem ser vedadas por fita adesiva e levadas ao laboratório o mais rápido possível. As amostras são pesadas e mantidas em estufa a uma temperatura entre 105 °C e 110 °C, até atingirem peso constante.

O cálculo do teor de água em base massa, U (g g^{-1}), é feito com a Equação 10. O teor de água do solo em base volume, θ, é então calculado com a Equação 11. Mais detalhes do método podem ser obtidos em Donagemma et al. (2011).

Sensores do tipo capacitivo-reflectometria no domínio da frequência (FDR)

Os sensores desse grupo usam um oscilador para gerar um campo de corrente alternada, o qual é aplicado ao solo para detectar mudanças nas propriedades dielétricas do solo relacionadas a variações do teor de água do solo. São conhecidos como sensores dielétricos. Sensores do tipo capacitivo consistem, essencialmente, de um par de eletrodos (ou um conjunto de hastes em paralelo ou anéis de metal), o qual forma um capacitor em que o solo atua como um dielétrico. Esse capacitor trabalha com um oscilador para formar um circuito sintonizado. Mudanças no teor de água do solo são detectadas pelas mudanças na frequência do oscilador. No mercado brasileiro, encontra-se disponível um sensor comercial baseado em princípio similar, denominado Impedância do Solo em Alta Frequência – Isaf (Figura 3).

Sensores no domínio da frequência trabalham similarmente aos capacitivos, mas usam uma varredura de frequência. A frequência ressonante (na qual a amplitude é maior) é uma medida do teor de água do solo, e a amplitude é uma medida da condutividade elétrica do solo. Semelhante



Foto: Sara de Almeida Rios

Figura 3. Medidor do teor de água do solo tipo Impedância do Solo em Alta Frequência (Isaf).

aos sensores do tipo capacitivo, as medidas são feitas numa única frequência, mas a frequência exata depende do teor de água do solo.

Alguns modelos de sensores, do tipo FDR, operam dentro de tubos de acesso, não estando em contato com o solo, podendo ser inseridos vários sensores para executar medições em diferentes profundidades.

Como desvantagens, podem-se citar:

- As leituras são fortemente influenciadas pelo teor de água e lacunas com ar no volume de solo junto aos eletrodos. Para modelos com tubos de acesso, particularmente, é extremamente crítico ter um bom contato sensor-tubo-solo para estimativas seguras do teor de água do solo.

- Sistemas operando a frequência mais baixa (particularmente aquelas menores que 20 MHz) são mais susceptíveis a erros em razão da salinidade do solo.
- Calibrações em diferentes locais são usualmente necessárias, o que é um processo que exige tempo e recursos. Além disso, cada calibração local é, geralmente, única para o instrumento e a sonda utilizados (Murphy, 1996).

Outros métodos

O teor de água do solo pode também ser determinado indiretamente por meio da determinação do potencial de água no solo, por meio de tensiômetros e sensores (blocos) de resistência elétrica, utilizando-se a curva característica de retenção de água desse solo para a conversão dos valores. Esses métodos serão mencionados adiante neste capítulo.

O avanço das pesquisas com novos sensores integrados aos sistemas eletrônicos de aquisição de dados faz com que novos produtos comerciais sejam oferecidos ao mercado internacional, com base em tecnologias patenteadas, como a medição microtérmica de umidade.

Problemas e limitações dos métodos de determinação do teor de água do solo

A medição precisa do teor de água do solo em condições de campo é difícil, em razão de uma série de fatores, tais como:

- Crescimento desigual das plantas e desuniformidade na distribuição do sistema radicular causam variações no teor de água no solo.
- Diferenças em características de infiltração resultam em variações de lâminas infiltradas logo após chuva ou irrigação.
- Variabilidade do solo no campo com relação à estrutura, estratificação e granulometria causa diferenças na quantidade de água armazenada no solo.
- Distúrbios e mudanças na densidade do solo, variação em volume de poros e distribuição de tamanho de poros causam expressivas variações no teor de água ao longo do perfil do solo, em condições de campo.
- Desigualdades no relevo resultam em umedecimento desuniforme do solo.
- Desuniformidade inerente à irrigação depende da adequação do dimensionamento, da operação e da qualidade do sistema de irrigação.
- Desuniformidade inerente à precipitação, em termos quantitativos e espaciais.

O teor de água no solo está sujeito a uma variabilidade temporal, uma vez que o sistema solo-água é dinâmico, e espacial, tanto verticalmente, no perfil do solo, quanto horizontalmente, na área. As variabilidades espacial e temporal devem ser consideradas no planejamento da amostragem do teor de água do solo, tendo em vista, também, a finalidade das informações (manejo de irrigação, pesquisa, etc.).

Como determinar o teor de água no solo

Potencial da água no solo

A água presente no solo está em equilíbrio com as partículas do solo sob diferentes níveis de energia ou potencial, que condicionam sua disponibilidade para as plantas. Além de determinados limites desse potencial, as plantas não conseguem extrair a água do solo. Portanto, não apenas o teor absoluto de água, mas também esse potencial deve ser determinado.

A água tende a movimentar-se de um ponto onde o potencial é maior para outro onde o potencial é menor. O potencial de água no solo está relacionado ao trabalho necessário para se levar a massa de água de um estado padrão ao estado atual da água e representa um gasto de energia (Reichardt, 1996). O potencial da água no solo ou na planta representa, então, o esta-

do de energia da água no solo ou na planta, governando todos os processos de transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera (Couto; Sans, 2002). A água no solo pode conter energia em diferentes quantidades e formas; são, todavia, reconhecidas duas formas principais: cinética e potencial. A energia cinética da água no solo pode ser considerada desprezível, uma vez que a velocidade de movimentação da água no solo é muito pequena e que essa forma de energia é proporcional ao quadrado da velocidade. A energia potencial, a qual é em razão da posição e/ou condição interna, é determinante no estado energético e no movimento da água no solo.

Componentes do potencial da água no solo

O potencial da água é determinado por todos os fatores que afetam sua energia livre. Os principais fatores para o sistema solo-planta são a pressão hidrostática, a concentração de solutos, a interação da água com a matriz sólida e a força gravitacional, as quais determinam os respectivos componentes do potencial total. O potencial total é expresso como a soma desses componentes:

$$\Psi_t = \Psi_p + \Psi_m + \Psi_s + \Psi_z \quad (14)$$

em que Ψ_t é o potencial total da água do solo; Ψ_p é o potencial de pressão; Ψ_m é o potencial matricial; Ψ_s é o potencial osmótico; Ψ_z é o potencial gravitacional ou de posição.

Os índices apresentados para Ψ denotam os componentes do potencial da água, que são variáveis essencialmente independentes. Os termos potencial de pressão, potencial matricial, potencial osmótico e potencial gravitacional referem-se aos componentes do potencial de água no solo por causa da pressão, da interação com a matriz do solo, da presença de solutos e da gravidade, respectivamente (Tabela 1).

A água move segundo o gradiente do potencial total. O equilíbrio é alcançado quando o gra-

Tabela 1. Descrição dos componentes do potencial da água.

Tipos de pontecial	Descrição
Ψ_p	O potencial de pressão, Ψ_p, é devido à pressão exercida por uma coluna de líquido (submersão) ou por uma massa de ar comprimido (pneumático). Será sempre zero ou positivo. Quando o solo não está saturado, a água nos poros do solo está essencialmente em contato com a atmosfera, portanto Ψ_p é zero
Ψ_m	O potencial matricial, Ψ_m, é o componente relativo à interação entre a água e a matriz do solo, ou seja, ocorre em razão do fenômeno de capilaridade e das forças de adsorção. Veja as microfotografias de partículas de solo abaixo, em que ocorre a interação entre a água e a matriz do solo. À medida que o solo seca, o filme de água na matriz do solo torna-se cada vez mais fino, resultando em Ψ_m maior, em valor absoluto
Ψ_s	O potencial osmótico, Ψ_s, é relativo à presença de solutos. Os potenciais osmótico e matricial são negativos ou zero, uma vez que a presença de solutos ou a interação com a matriz do solo reduzem a atividade ou o potencial da água para um valor abaixo daquele da água pura. Quanto maior a concentração dos solutos ou mais forte a interação com a matriz, maior é o valor Ψ_s ou Ψ_m, em termos absolutos. Em solos agrícolas, a concentração de solutos é geralmente considerada baixa e o potencial de soluto assume valores próximos de zero
Ψ_z	O estado de referência para Ψ_z é escolhido para cada caso em particular. Assim, Ψ_z pode ser positivo, negativo ou zero
Ψ_t	O potencial gravitacional é um componente muito importante quando o solo está próximo da saturação, mas torna-se menos significante à medida que o solo drena e seca, porque ele é suplantado pelo potencial matricial que se torna progressivamente maior, em valor absoluto

diente se torna zero, isto é, Ψ_t é constante no sistema. Entretanto, os componentes de Ψ_t podem diferir de local para local, em um sistema em equilíbrio.

Unidades do potencial da água no solo

Conforme a definição do potencial da água no solo, este é expresso em energia por unidade de quantidade. Portanto, o potencial pode ser expresso em energia por unidade de peso, volume ou massa.

Potencial como energia por unidade de peso, ou carga hidráulica

As unidades usualmente utilizadas para expressar o potencial como energia por unidade de peso são m (metro de coluna d'água – m.c.a.) ou cm. A derivação da unidade no Sistema Internacional de Unidades (*SI*) é:

$$Potencial = J/N = Nm/N = m$$

Potencial como energia por unidade de volume, ou pressão

No *SI*, obtém-se a unidade de potencial como energia por unidade de volume pela derivação:

$$Potencial = Nm/m^3 = N/m^2 = Pa$$

As unidades mais usadas são: quiloPascal (kPa), megaPascal (MPa), bar, atm, kgf cm^{-2} e dina cm^{-2}.

Potencial como energia por unidade de massa

Na engenharia de irrigação e drenagem, não é usual expressar o potencial como energia por unidade de massa. As unidades mais usadas são: J kg^{-1} e erg g^{-1}. Pode-se, também, derivar a unidade no *SI* como:

$$Potencial = J/kg = Nm/kg = [(kgm/s^2)m]/kg = m^2/s^2$$

Relação entre unidades de potencial

As relações entre as unidades mais comuns para o potencial são:

1 bar = 10 m.c.a. = 10^5 Pa = 100 KPa

1 KPa = 0,1 m.c.a. = 0,01 bar

1 Mpa = 100 m.c.a. = 10 bar

1 atm = 1,0132427 bar = 760 mmHg

1 bar = 14,5044963 psi

em que m.c.a. é metro de coluna d'água; atm é atmosfera ou atmosfera normal ou atmosfera física; mmHg é milímetro de mercúrio ou torr (Torricelli); e psi é lbf pol^{-2} (libra-força por polegada ao quadrado).

Usualmente, considera-se 1 atm = 1 bar.

Determinação dos componentes do potencial da água no solo

Os componentes do potencial podem ser determinados por diversos tipos de instrumentos. Muitos estão baseados no princípio do equilíbrio, ou seja, quando instalados no sistema solo-água, em contato com o solo no ponto de medição, trocam água com este até atingirem o equilíbrio.

Determinação do potencial matricial

O potencial matricial é o componente do potencial total que mais tem sido avaliado em razão da sua importância para o manejo da irrigação e nos estudos do movimento da água no solo.

1) Tensiômetro

Consiste em uma cápsula porosa, geralmente feita de cerâmica, contendo poros pequenos, ligada por meio de um tubo a um medidor de vácuo (vacuômetro, às vezes impropriamente mencionado como manômetro). O tensiômetro é instalado no solo e preenchido com água, ficando a cápsula porosa em contato com o solo. Quando o potencial da água no solo é inferior (mais negativo) que o potencial da água dentro do tensiômetro, ocorre o fluxo da água do ten-

siômetro para o solo através da cápsula porosa saturada, resultando em uma tensão, dentro do tensiômetro, medida pelo vacuômetro. O movimento de água continua até o equilíbrio ser alcançado, ou seja, até a tensão dentro do tensiômetro ser igualada ao potencial matricial do solo. Quando o solo está úmido, o fluxo pode ocorrer na direção inversa.

Os valores do potencial são geralmente expressos nas unidades: quiloPascal (kPa), centibars, atm, m ou cm de coluna d'água e mm de mercúrio. A Figura 4 ilustra modelos de tensiômetros.

Fotos: Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

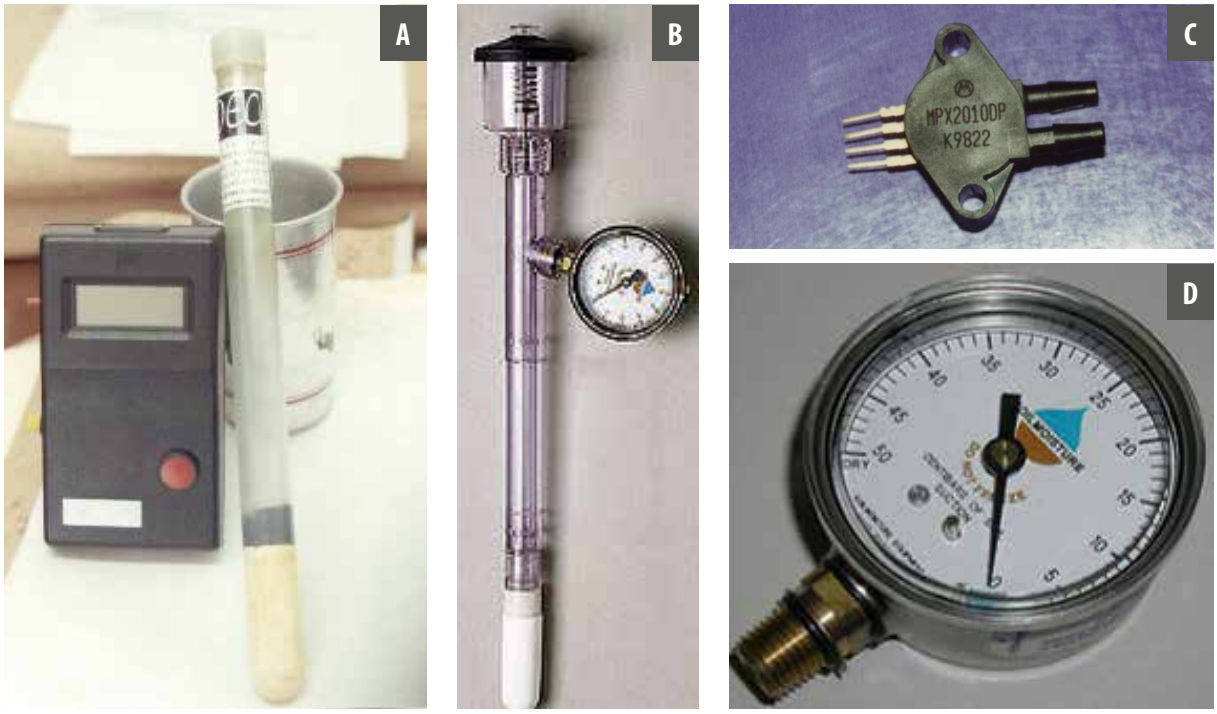


Figura 4. Tensímetro dotado de rolha especial com medidor (tensímentro) do lado (A); tensiômetro com vacuômetro (B); transdutor de pressão (C); e vacuômetro (D).

Tensiômetro

VANTAGENS

- Relativo baixo custo de aquisição.
- Leitura rápida e simples.
- Automação de operações da irrigação permitida por alguns.

DESVANTAGENS

- Exigência de excelente contato com o solo, não trabalhando bem com areia grossa ou argila expansiva.
- Resposta lenta às mudanças no teor de água do solo (dependendo da aplicação, isso pode ou não ser um fator importante).
- Alto requerimento de manutenção. A cápsula de cerâmica é sujeita a entupimento por partículas finas do solo. Mesmo se o tensiômetro estiver entupido, ele ainda continuará operante; portanto, o usuário pode não suspeitar que esteja entupido (Murphy, 1996).
- Funcionamento somente na faixa de umidade mais elevada.
- Elaboração de medidas pontuais.

O tensiômetro é um exemplo típico de instrumento que necessita entrar em equilíbrio com a água do solo para medir o potencial matricial (e algumas vezes o potencial de pressão) na faixa de +20 kPa a -100 kPa. Na prática, o intervalo de uso do tensiômetro é de 0 kPa a -80 kPa. Tem sido cada vez mais comum o uso de tensímetros, que são transdutores de pressão portáteis que se prestam para medir o vácuo dos tensiômetros. Para a coleta automática de dados, empregam-se transdutores de pressão conectados a coletores de dados (dataloggers) ou direto a computadores. Na prática, para o manejo da irrigação, têm sido empregados tensiômetros com vacuômetro de Bourdon e também tensímetros. É possível também empregar tensiômetros conectados a transdutores de pressão, para automatizar sistemas de irrigação, como acionar válvulas ou ligar e desligar bombas.

A cápsula porosa do tensiômetro é, geralmente, permeável tanto à água quanto ao soluto contido na solução do solo. Consequentemente, o tensiômetro não indica o potencial osmótico da solução do solo.

2) Blocos de resistência elétrica

Blocos de resistência elétrica têm sido utilizados por muitos anos para relacionar o potencial matricial da água no solo com a resistência à passagem da corrente elétrica entre dois eletrodos inseridos no solo. A grande vantagem dos blocos de resistência elétrica é que modelos mais simples podem ser construídos localmente, a leitura pode ser automatizada com a utilização de microprocessador, coletor de dados e computador, o que permite o seu uso para automatizar operações da irrigação. Todavia, eles necessitam de calibração, podem apresentar grande variabilidade entre blocos, podem sofrer efeito da temperatura e da concentração da solução do solo, desgastam com o uso e são pouco precisos na faixa de potencial elevado (solo úmido) (Andrade et al., 1998).

Os blocos de resistência elétrica são fabricados com diferentes tipos de materiais: gesso, nylon, fibra de vidro e uma combinação de gesso envolvendo nylon e fibra de vidro em volta dos eletrodos. Todos esses dispositivos são sensíveis à presença de sais no solo, mas os blocos de fibra são consideravelmente mais sensíveis que os de gesso.

3) Outros métodos para determinação do potencial matricial

Os métodos de determinação do potencial matricial, utilizando funil de Büchner, mesa de tensão e extrator de pressão serão descritos na seção Métodos para Determinação da Curva Característica de Água no Solo.

Determinação do potencial osmótico da água no solo

A medida da condutividade elétrica da solução do solo possibilita a estimativa do potencial osmótico da água do solo. Uma aproximação prática que pode ser empregada para estimar Ψ_s a partir da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, EC_s, é (Or; Wraith, 1997):

$$\Psi_s = -36\ EC_s \qquad (15)$$

em que a unidade de Ψ_s é kPa e a de EC_s é dS m^{-1}. A EC_s é definida como a condutividade elétrica da solução do solo após a adição de uma quantidade suficiente de água destilada para elevar o teor de água no solo àquele correspondente à saturação.

Medidores de condutividade elétrica da solução do solo, para uso em laboratório, são muito comuns e amplamente descritos na literatura e rotineiramente utilizados nos laboratórios de solos do País.

Determinação do potencial gravitacional e de pressão

O potencial gravitacional é obtido medindo-se a distância vertical entre o ponto de interesse no solo até um plano de referência, que pode ser a superfície do solo ou o nível do lençol freático.

O potencial de pressão é medido utilizando-se um piezômetro que permite a obtenção do potencial de pressão em condições de lençol confinado ou não. Alguns autores separam a pressão hidrostática exercida pela água livre da pressão exercida na água do solo por um lençol confinado (onde a água fica confinada por camadas impermeáveis do subsolo). O piezômetro mede o efeito combinado dessas duas pressões, que só ocorrem juntas quando o solo está confinado e existe lençol confinado (Jury et al., 1991). O piezômetro nada mais é do que um tubo sem perfurações laterais (diferente de poço de observação), com ambas as extremidades abertas, inserido no solo utilizando-se trado. Após o equilíbrio, a altura de água dentro do tubo corresponde ao potencial de pressão para o ponto na extremidade inferior do piezômetro. Para lençol não confinado, essa altura corresponde à distância do lençol até a extremidade inferior do piezômetro, mas para condição de lençol confinado a altura da água no seu interior é maior que a do lençol (Figura 5).

Curva característica ou curva de retenção de água no solo

A relação funcional entre o teor de água no solo, com base em peso ou volume, com o potencial matricial é chamada curva característica ou curva de retenção de água no solo.

Como o próprio nome indica, é típica para cada solo. É uma importante propriedade do solo relacionada à distribuição de tamanho de poros, a qual é fortemente afetada pela granulometria, estrutura e outros fatores, tais como o teor de matéria orgânica (Or; Wraith, 1997). A curva característica é, geralmente, determinada em laboratório e, de preferência, em amostras não deformadas. Entretanto, para fins de pesquisa, pode também ser determinada diretamente no campo, sendo este um processo mais trabalhoso e demorado (Couto; Sans, 2002).

A curva característica de água no solo é fundamental na estimativa do teor de umidade do solo quando se dispõe de medidas ou estimativas do potencial matricial da água no solo ou

Fotos: Sara de Almeida Rios

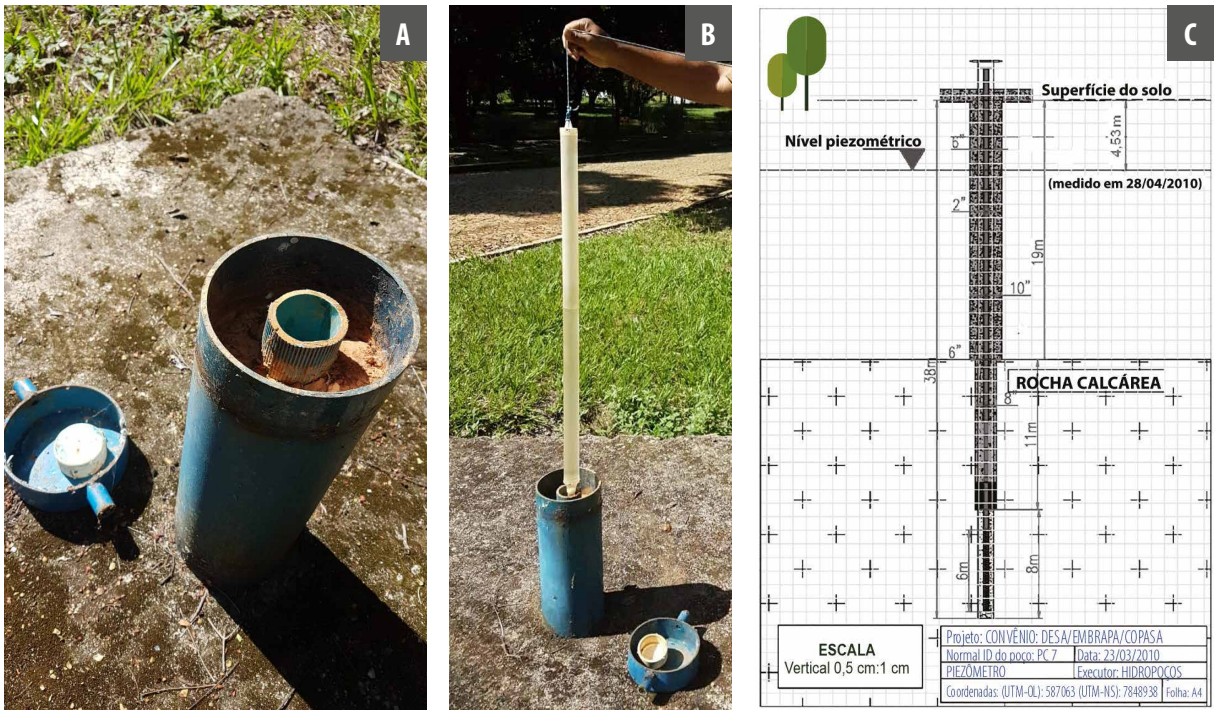


Figura 5. Poço piezométrico (A), detalhe do amostrador descartável bailer (B) e perfil construtivo de poço de monitoramento (C).

vice-versa. Em áreas onde ocorre lençol freático pouco profundo, é importante na definição do manejo de irrigação e/ou da configuração da rede de drenagem, sendo empregada, indiretamente, na estimativa do fluxo ascendente de água oriundo do lençol freático.

Medição da curva característica

A curva característica pode ser avaliada medindo-se o teor de água do solo e o potencial matricial simultaneamente, em mudanças sucessivas do teor de água com o tempo. Para a obtenção de uma curva em toda a faixa de teor de água que vai da saturação até o teor de água residual ou teor de água no ponto de murcha permanente, mais de um método deve ser empregado. Na faixa de potencial matricial de 0 kPa a -50 kPa, a curva é comumente determinada em laboratório por meio de instrumentos como o funil de Büchner e a mesa de tensão (Reichardt, 1996). Para a determinação da curva de retenção na faixa de -10 kPa a -2.000 kPa, utiliza-se o extrator de pressão (ou de placa porosa ou de membrana).

Métodos de campo

Curvas de retenção determinadas em campo são consideradas as mais representativas das reais condições em que as plantas estão submetidas. Entretanto, pouco tem sido feito para se desenvolver técnicas de determinação da curva de retenção in situ (Or; Wraith, 1997). Um método comumente empregado consiste em instalar lado a lado, no campo, sensores de potencial matricial e de teor de água e executar medições com o tempo, à medida que o teor de água do solo modifica-se. Variações nas condições de umidade do solo podem ser induzidas pela evaporação da água do solo ou por meio da extração pelas culturas. Uma alternativa para os tensiômetros, os quais por natureza têm faixa de atuação limitada, é a utilização de blocos de resistência elétrica (ou de dissipação de calor) calibrados para potencial matricial ou o emprego de psicrômetros termopares de campo.

As principais limitações dos métodos de campo são (Or; Wraith, 1997):

1) Diferença no volume de solo amostrado pelos sensores de potencial e de conteúdo de umidade.

2) Medições da umidade são quase sempre instantâneas enquanto as determinações de potencial requerem tempo para atingir o equilíbrio.

3) Faixa limitada de operação dos sensores e baixa precisão dos instrumentos de campo.

Condutividade hidráulica

Condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica do solo saturado, ou condutividade hidráulica do meio poroso saturado, é uma das características físico-hídricas do solo de maior utilidade na engenharia de irrigação e ambiental. É um parâmetro relevante a todas as áreas que tratam de escoamento de água no solo, seja em estudos de água subterrânea, em drenagem agrícola ou em irrigação. A condutividade hidráulica está presente em todas as equações de dimensionamento de sistemas de drenagem, tanto em condições de regime de escoamento permanente como não permanente. Da mesma forma, está presente nos modelos numéricos, analíticos, relativos à hidráulica de poços em aquíferos, intrusão em aquíferos e em hidrologia de águas subterrâneas em geral.

A Tabela 2 apresenta classes de condutividade hidráulica no solo saturado e permeabilidade intrínseca (Ferreira, 2001).

Existem diversos métodos para a determinação da condutividade hidráulica saturada (K_o), tanto em laboratório (permeâmetro de carga cons-

tante ou variável), como no campo, tais como o método do trado, do piezômetro, método do poço seco, em que se pode utilizar o permeâmetro de Guelph (Figura 6) para obter dados para diferentes camadas do perfil do solo (Cruciani, 1980; Pizarro, 1985; Ferreira, 2001).

A condutividade hidráulica do solo saturado é um parâmetro que depende da textura e, principalmente, da estrutura do solo, caracterizada pela densidade e porosidade. A estrutura do solo pode ser afetada pelo manejo do solo, e a condutividade hidráulica do solo saturado tam-

Tabela 2. Classes de condutividade hidráulica no solo saturado e permeabilidade intrínseca.

Classe	Condutividade hidráulica a 20 °C ($cm\ h^{-1}$)	Permeabilidade intrínseca a 20 °C (cm^2)
Muito lenta	< 0,125	$< 3\times10^{-10}$
Lenta	0,125–0,5	3×10^{-10}–15×10^{-10}
Moderadamente lenta	0,5–2,0	15×10^{-10}–60×10^{-10}
Moderada	2,0–6,25	60×10^{-10}–170×10^{-10}
Moderadamente rápida	6,25–12,5	170×10^{-10}–350×10^{-10}
Rápida	12,5–25,0	350×10^{-10}–700×10^{-10}
Muito rápida	> 25,0	$< 700\times10^{-10}$

Foto: Camilo de Lelis Teixeira de Andrade



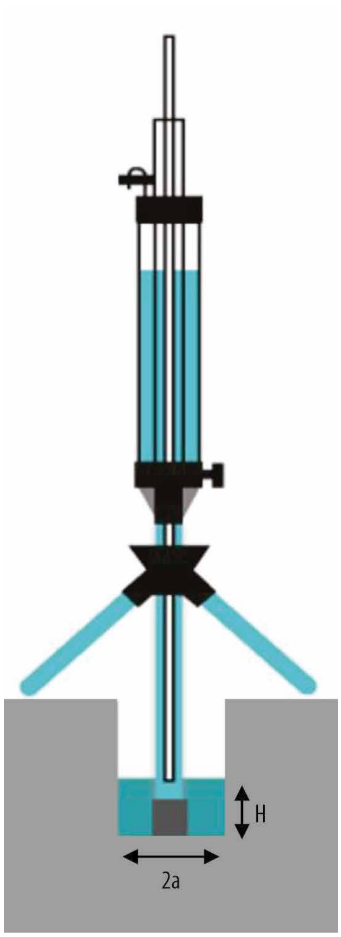


Figura 6. Permeâmetro de Guelph.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

bém pode ser afetada. Para condições de solo típico de Cerrado, há uma estreita correlação entre densidade e condutividade hidráulica do solo saturado (Figura 7).

Infiltração da água no solo

Infiltração é o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo e percola pelos poros do solo. A capacidade de infiltração é fundamental na determinação da taxa de aplicação de água por sistemas de irrigação. Na irrigação por sulcos, faixas ou inundação, o dimensionamento do sistema pelo balanço volumétrico utiliza, basicamente, parâmetros de infiltração. O dimensionamento dos sistemas pressurizados, tais como aspersão convencional, pivô central ou microirrigação, requer o conhecimento dos parâmetros de infiltração, no sentido de se evitar, principalmente, as perdas de água e solo decorrentes do escoamento superficial.

Infiltração da água no solo

O processo de infiltração de água no solo, o qual é tempo-dependente, é afetado pelos seguintes fatores:

- Fatores relacionados à superfície do solo, como rugosidade, encrostamento, compactação superficial (por causas naturais ou pela ação do homem), fração da superfície do solo com cobertura vegetal e capacidade de armazenamento superficial.
- Fatores relacionados ao perfil do solo, como condutividade hidráulica e fatores que interferem na condutividade hidráulica, presença de camadas de impedimento, profundidade do lençol freático, conteúdo de água inicial.
- Fatores climáticos, como duração e frequência de chuvas e temperatura.
- Fatores relacionados ao manejo de irrigação, como taxa de aplicação.

As equações utilizadas para a estimativa da infiltração da água no solo podem ser classificadas como empíricas e físicas, isto é, baseadas na representação física do processo de infiltração. As equações empíricas apresentam parâmetros que devem ser obtidos a partir do ajuste a dados observados no campo. As equações físicas são fundamentadas em análise teórica ou conceitual do processo de infiltração, mas não

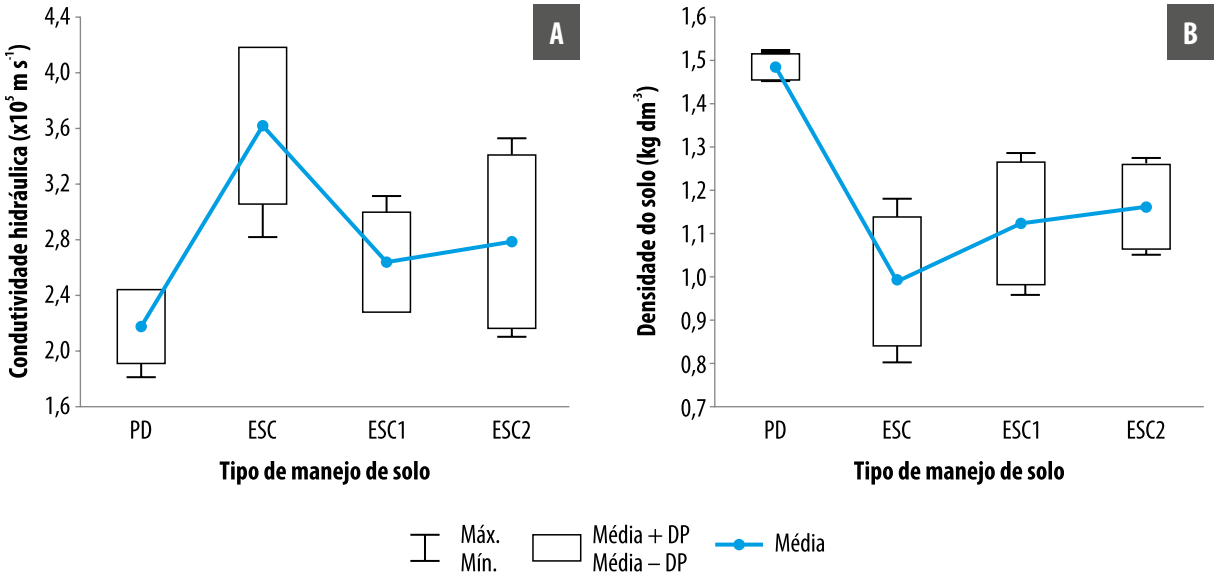


Figura 7. Condutividade hidráulica do solo saturado para diferentes tipos de manejo (A); e efeito da densidade do solo nos valores da condutividade (B). Sete Lagoas, MG.

Fonte: Adaptado de Tavares-Filho et al. (2006).

serão tratadas aqui, devendo o interessado se reportar à literatura.

Equações empíricas

Equação de Kostiakov

A equação de Kostiakov, de 1932, é uma das mais utilizadas, especialmente no dimensionamento de sistemas de irrigação por superfície (Bernardo, 1995; Pruski et al., 1997):

$$I = kt^a \quad (16)$$

em que I é a infiltração acumulada (mm); e t é tempo de infiltração (h).

Os parâmetros k e a são determinados estatisticamente (regressão linear), a partir de valores observados de I versus t; dependem do solo e das suas condições iniciais. O parâmetro a varia entre 0 e 1. Derivando a Equação 16, obtém-se a equação da taxa de infiltração – TI (mm h^{-1}) ou, menos apropriadamente, a velocidade de infiltração:

$$TI = akt^{a-1} \quad (17)$$

Embora seja uma equação empírica, apresenta bons resultados quando aplicada para períodos não muito extensos. A principal limitação da equação de Kostiakov é o fato de TI tender a zero, quando t tender a infinito. Na realidade, TI tende a uma taxa de infiltração básica (TIB), com o aumento de t. Portanto, as Equações 16 e 17 não devem ser utilizadas para valores elevados de t.

Equação de Kostiakov-Lewis

Também denominada equação de Kostiakov modificada, nessa equação é eliminada a limitação quanto à aplicação para valores elevados de t. As equações para I e TI são:

$$I = kt^a + TIB\ t \quad (18)$$

$$TI = akt^{a-1} + TIB \quad (19)$$

Na Equação 19, observa-se que, quando t tende a infinito, TI tende a TIB.

Equação de Horton

Esta equação, desenvolvida em 1940, é baseada em processos observados na natureza, como o aquecimento ou resfriamento de um corpo em relação a outro, que obedecem à lei segundo a qual a taxa de variação de uma determinada grandeza é proporcional à diferença entre seu valor em determinado tempo e seu valor final constante (Pruski et al., 1997).

No caso em questão, a grandeza é a taxa de infiltração TI cujo valor final constante é igual à TIB. A equação de Horton é:

$$TI = TIB + (TI_0 - TIB)e^{-ct} \quad (20)$$

em que TI_0 é a taxa de infiltração inicial; e c é um parâmetro de regressão.

Equação de Holtan

A equação de Holtan pode ser escrita da forma (Holtan et al., 1967; Aguiar et al., 1998):

$$TI = a(S - I)^n + f_c \quad (21)$$

em que a e n são constantes que dependem do solo e da sua cobertura; S é o armazenamento potencial do solo acima da camada impermeável; I é a infiltração acumulada; fc é a infiltração na condição de regime estacionário (Aguiar et al., 1998).

Em 1967, Huggins e Monke modificaram a equação original para (Skaggs et al., 1969):

$$TI = D\{[(S - D)/TP]\}^n + fc \quad (22)$$

em que D é o maior aumento possível na taxa de infiltração acima da condição de regime estacionário; TP é a porosidade total acima da camada impermeável; e n é igual a 1,4.

A maior dificuldade em se trabalhar com a equação de Holtan é a determinação da profundidade de controle, que serve de base para o cálculo de TP e S (Skaggs et al., 1969; Aguiar et al., 1998).

Modelos empíricos não consideram o entendimento científico do problema, sendo uma descrição matemática de dados observados, com parâmetros obtidos por ferramentas estatísticas. São aplicáveis às situações para as quais os parâmetros foram obtidos, mas existem restrições quanto à extrapolação.

Uma desvantagem dos modelos empíricos acima mencionados é a não consideração do efeito do teor de água inicial do solo sobre a taxa de infiltração. Quanto mais seco o solo estiver no início do processo de infiltração, maior será a taxa de infiltração inicial; e, portanto, para um mesmo tempo de infiltração, maior será a lâmina infiltrada. Com o aumento do tempo, a taxa de infiltração tende a um valor constante (*TIB*), independentemente do teor de água inicial do solo, e as curvas de infiltração acumulada, para diferentes teores iniciais de água, tornam-se paralelas (Figura 8).

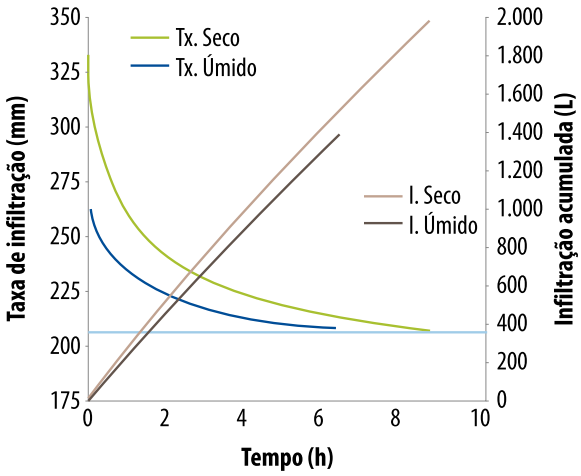


Figura 8. Taxa de infiltração e curvas de infiltração acumulada para um solo sob Cerrado úmido e seco.

Medição da infiltração

A medição da infiltração no campo pode ser feita por diversos métodos. A seleção do mais adequado depende, principalmente, dos objetivos do trabalho e do tipo de irrigação a ser usado.

O método mais utilizado para representar o fluxo vertical unidimensional de água no solo tem sido o do infiltrômetro de anel, usando dois anéis concêntricos. Esse método ou outros usando infiltrômetros de aspersor podem ser empregados para determinação da infiltração acumulada ou taxa de infiltração para irrigação por aspersão. No caso da irrigação por sulcos, a medição de infiltração mais adequada pode ser feita pelo método da entrada e saída de água no sulco, ou pelo infiltrômetro de sulco. Outro modelo de infiltrômetro que mede a condutividade não saturada é o infiltrômetro de disco (Figura 9).



Foto: João Herbert Moreira Viana

Figura 9. Mini-infiltrômetro de disco.

Redistribuição de água no solo

O processo de redistribuição da água no solo ocorre durante e após o processo de infiltração, em que se verifica contínuo movimento de água em decorrência de gradientes de potencial gravitacional e matricial da água no solo. É um processo complexo, uma vez que o conteúdo de água tende a reduzir-se nas zonas inicialmente mais úmidas e a aumentar nas zonas inicialmente mais secas. Esse processo é sensivelmente afetado pela absorção de água pelas raízes, o que torna a dinâmica de água ainda mais complexa.

No caso do escoamento unidimensional resultante de irrigação por superfície, tal como inundação ou por aspersão, a redistribuição será predominantemente vertical (Figura 10). Cessada a irrigação, a frente de umedecimento se aprofunda no perfil de solo, e o teor de água local tende a reduzir-se, havendo também redução na condutividade hidráulica, nos gradientes de potenciais e no movimento da frente de umedecimento. No caso do escoamento tridimensional, como ocorre em gotejamento, a dinâmica de água é dependente, tanto dos gradientes de potencial por causa das forças de tensão ou sucção, como do potencial em razão da gravidade.

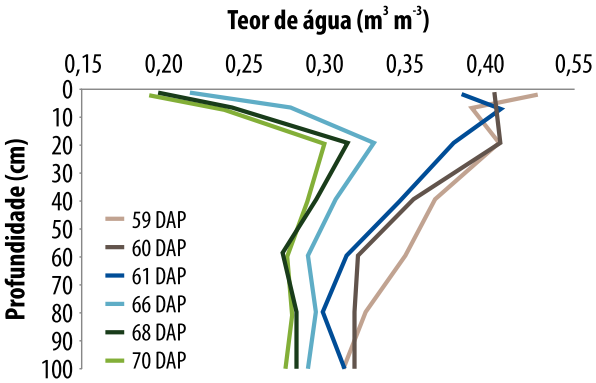


Figura 10. Redistribuição do teor de água no perfil do solo e extração de água pela cultura do milho, cultivada sob plantio direto, após chuvas intensas (DAP, dias após o plantio).

Disponibilidade de água no solo

A quantidade de água que pode ser armazenada na zona radicular, juntamente com o clima (evapotranspiração e precipitação), determina a frequência e a lâmina de irrigação para um determinado cultivo.

O estudo da disponibilidade de água no solo, relativo à irrigação e drenagem, envolve os conceitos dos limites superior (capacidade de campo) e inferior (ponto de murcha permanente) de água disponível, disponibilidade total de água do solo, capacidade total de água do solo e capacidade real de água do solo, os quais serão descritos a seguir.

Limite superior de água disponível ou capacidade de campo

A capacidade de campo, considerada o limite superior de água disponível no solo, equivale à condição de umidade do solo em que a água se encontra em equilíbrio com as forças gravitacionais, ou seja, é a condição de umidade do solo após a drenagem interna ter sido reduzida drasticamente, em um solo previamente saturado por chuva ou irrigação.

Após a infiltração de uma chuva ou irrigação, a umidade do solo se reduz com o tempo, através da drenagem interna, com taxas cada vez menores, porém nunca nulas. Assume-se que, em certo momento, a taxa de percolação profunda ou de drenagem interna é pequena o suficiente para ser desprezada e que, nesse ponto, o solo atinge a capacidade de campo. O problema é que, até o momento, não está definida a taxa de percolação profunda que pode ser considerada desprezível (Cassel; Nielsen, 1986; Jury et al., 1991; Reichardt, 1996). Dados de campo indicam que essa taxa não é desprezível nas condições brasileiras (Fernandes; Sykes, 1968). Tentativas têm sido realizadas para associar a capacidade de campo com o teor de água do solo em equilíbrio com a tensão de -10 kPa ou

-33 kPa, para solos de textura grossa e fina, respectivamente. Essa definição desconsidera o fato de que o equilíbrio da água no solo depende das propriedades de transmissão no meio poroso como um todo e do gradiente de potencial total, e não somente do estado de energia da água em um ponto no perfil. Além disso, por causa do formato da curva de retenção nessa faixa de potencial, grandes erros podem ser cometidos na obtenção do teor de água do solo, na capacidade de campo, associado a um valor de potencial matricial (Jury et al., 1991).

Capacidade de campo é um conceito arbitrário e não uma propriedade física do solo (Bernardo, 1995), que tem sido questionado do ponto de vista teórico (Fernandes; Sykes, 1968; Reichardt, 1988). Depende, entre outros fatores, da distribuição do teor de água no perfil do solo antecedente a um evento de umedecimento, da presença de camadas de impedimento e da presença de um lençol freático pouco profundo, o qual afeta o processo de redistribuição da água no solo.

Em solos arenosos de areia grossa ou cascalhentos, geralmente existe uma nítida faixa de transição do teor de água para o qual se verifica uma redução na intensidade de movimento da água, determinando a capacidade de campo. Porém, em vários solos, a redução na intensidade de movimento da água não é nítida, o que torna o conceito de capacidade de campo impreciso (Figura 11) (Bernardo, 1995).

O limite superior de água disponível deve ser determinado, preferencialmente, no campo. Cassel e Nielsen (1986) e Reichardt (1996) descrevem os procedimentos de campo e os métodos para determinação do limite superior de água disponível, com a vantagem que o mesmo experimento pode ser utilizado para a obtenção tanto da capacidade de campo quanto da condutividade hidráulica do solo não saturado. A maior dificuldade em aplicar essa técnica ainda é o estabelecimento do momento de se assumir que o solo atingiu a capacidade de campo ou que a taxa de percolação profunda se tornou desprezível.

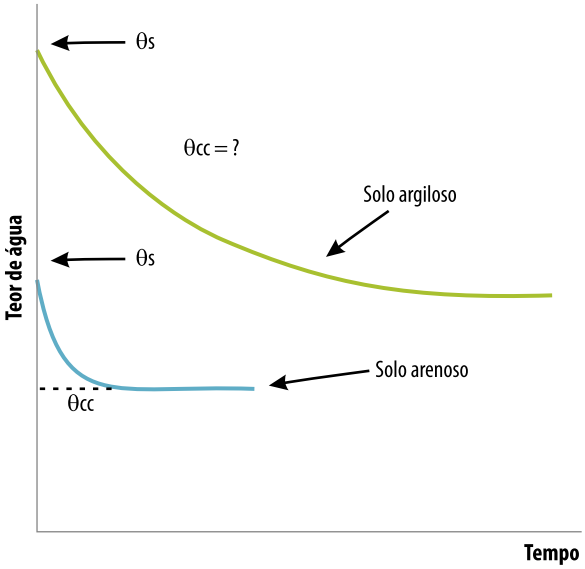


Figura 11. Capacidade de campo em solo argiloso e arenoso (θ_s é o teor de água na saturação; θ_{cc} é o teor de água na capacidade de campo).

Fonte: Adaptado de Hillel (1970).

A Figura 12 apresenta curvas de depleção a 10 cm de profundidade, em uma parcela em solo arenoso de Parnaíba, PI, utilizando-se cobertura com plástico (Andrade et al., 1992). Nesse experimento, observou-se que, mesmo aos 38 dias após a saturação, ocorria redução no teor de água do solo e que o potencial matricial não abaixou além de -6,5 kPa. No local estudado, o solo apresenta um gradiente textural no qual as camadas subsuperficiais são menos permeáveis e afetam toda a dinâmica da água no seu perfil. Assumiu-se que o solo atingiu a capacidade de campo quando as variações diárias no teor de água fossem menores que 0,005 $m^3\ m^{-3}$, considerando que essa água em processo de drenagem pudesse ser absorvida pelas plantas por causa da condição de alta demanda de evapotranspiração da região. O valor do potencial matricial do solo na capacidade de campo, medido com tensiômetro, foi de -4,5 kPa, muito maior do que o recomendado para solos arenosos (-10 kPa). Esse exemplo ilustra a possibilidade de erros na obtenção da capacidade de campo a partir de curvas de

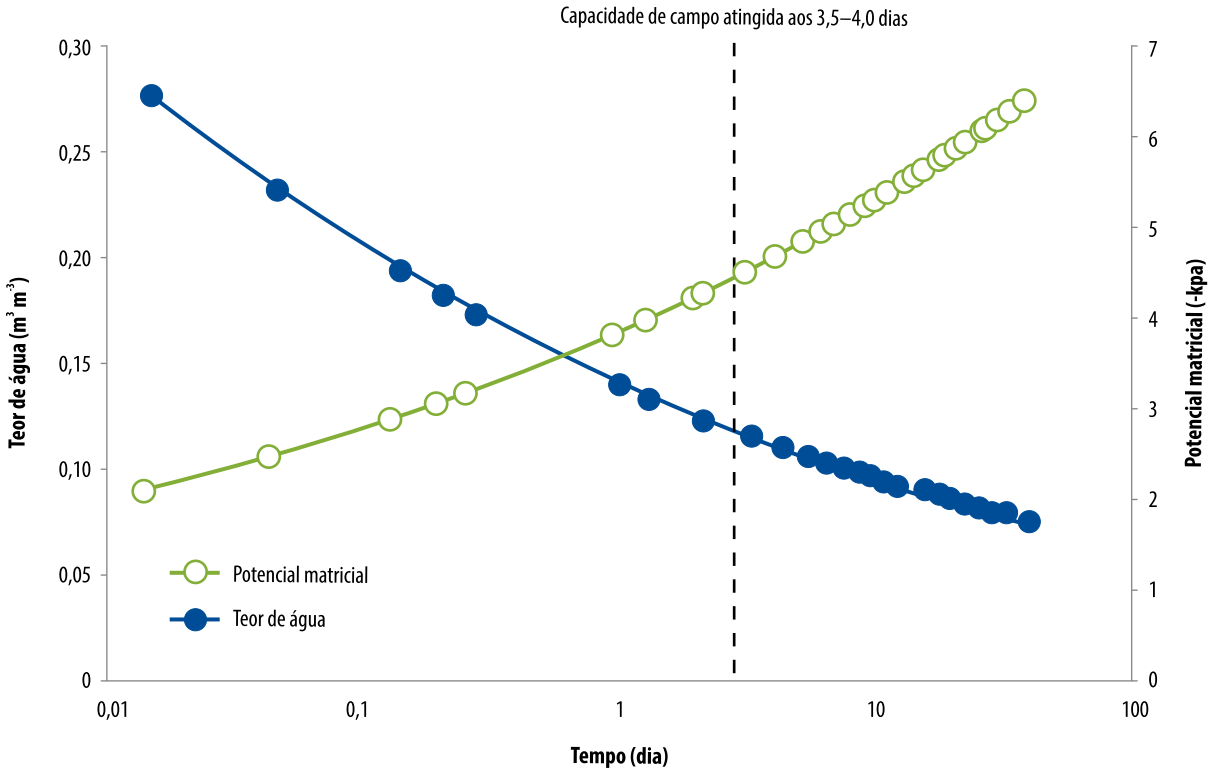


Figura 12. Curvas de depleção de água a 10 cm de profundidade em Neossolo Quartzarênico, Parnaíba, PI.
Fonte: Andrade et al. (1992).

retenção determinadas em laboratório, e essa informação deve ser obtida, preferencialmente, a partir de experimentos de campo.

A consideração da capacidade de campo como limite superior de água disponível implica que a água no solo sob potenciais entre 0 (saturação) e -10 kPa ou -33 kPa (capacidade de campo) será perdida por percolação profunda. Entretanto, deve-se observar que o processo de percolação ocorre simultaneamente à evapotranspiração. Assim, parte dessa água suprirá a demanda de evapotranspiração, não sendo perdida por percolação.

Apesar das limitações conceituais de capacidade de campo, por questões práticas, essa é uma informação importante e necessária a projetos de agricultura irrigada.

Determinação da capacidade de campo

O teor de água, em peso, equivalente à capacidade de campo, pode variar de menos de 8% para solos arenosos a mais de 30% para solos argilosos (Bernardo, 1995). Conforme se observa na Figura 12, a determinação da capacidade de campo, ou seja, a determinação do teor de água na capacidade de campo, θ_{CC}, é mais simples para solos de textura grossa do que para os solos de textura fina. A determinação pode ser feita no campo ou em laboratório.

Determinação no campo

O solo deve ser saturado até uma profundidade de cerca de 1,5 m, por meio de irrigação ou de represamento de água, em uma bacia de 2 m de diâmetro. Após o umedecimento do solo, sua superfície deve ser coberta com um plástico para evitar a evaporação. Usualmente, o teor de água é determinado em intervalos de 24 horas, por amostragem em cada camada de 5 cm, até a profundidade desejada. O teor de água pode ser determinado com sensores ou pelo método gravimétrico. A amostragem ou monitoração deve continuar até que a variação do

teor de água, no intervalo de 24 horas, tenha se tornado mínima, ao longo do perfil. Esse é considerado o método-padrão (Bernardo, 1995).

Determinação no laboratório

Por causa da determinação da capacidade de campo, em campo, exigir muito tempo, ser laboriosa e, por isso, ser executada para pequeno número de áreas, usualmente utilizam-se procedimentos de laboratório para a obtenção desse parâmetro. No método da curva característica, considera-se que o potencial matricial equivalente à capacidade de campo é de -10 kPa, para solos de textura grossa (de porosidade elevada), e de -33 kPa, para solos de textura fina (de baixa porosidade), como alguns solos de várzea (Bernardo, 1995). Para a maioria dos solos sob vegetação de Cerrado, assume-se que o teor de umidade do solo em equilíbrio com -10 kPa corresponde à capacidade de campo.

Limite inferior de água disponível ou ponto de murcha permanente

O ponto de murcha permanente é usado para representar o teor de água no solo abaixo do qual a planta não conseguirá retirar água a uma taxa suficiente para suprir a demanda atmosférica, aumentando, a cada instante, a deficiência de água, o que pode até acarretar a morte da planta. Se a planta receber irrigação imediatamente após esse estresse, ela poderá recobrar a turgidez, mas os danos fisiológicos, com provável comprometimento da produtividade, já terão acontecido. Para efeitos práticos, o ponto de murcha permanente representa o limite mínimo de água armazenada no solo que será extraída pelos vegetais (Bernardo, 1995; Or; Wraith, 1997).

Como no caso da capacidade de campo, sabe-se que o ponto de murcha permanente depende de uma série de fatores, entre os quais da espécie e do sistema radicular da planta, da demanda climática e das propriedades de transmissão de água do solo (Allen, 1992). O potencial matricial da água do solo no ponto de murcha permanente pode variar de -700 kPa a -2.000 kPa, e o valor de -1.500 kPa é, quase sempre, empregado na prática. Ao contrário do que ocorre com o limite superior de água disponível, os erros cometidos na determinação do ponto de murcha permanente representam pequenas variações no teor de água no solo e, de fato, podem ser desprezíveis (Andrade et al., 1998).

Não se deve confundir o ponto de murcha permanente com o murchamento temporário que pode ocorrer em certas plantas durante o período da tarde e que não afeta a produtividade da cultura. O murchamento temporário é mais comum durante os dias muito quentes, revertendo-se nos períodos mais frescos.

Finalmente, deve ser lembrado que, na prática, a planta nunca deve ser submetida à murcha permanente, para se evitar o comprometimento da produtividade. Para a maioria das culturas, as irrigações são planejadas para retornarem muito antes de se consumirem 50% da água disponível.

O teor de água relativo ao ponto de murchamento pode ser obtido da curva de retenção, para o ponto equivalente ao potencial matricial de -1.500 kPa. Nessa faixa, é necessária a utilização de um extrator de pressão.

Disponibilidade total de água do solo

Nos conceitos anteriormente apresentados, foi considerado que o conteúdo de água acima da capacidade de campo não pode ser retido no solo por causa da ação das forças gravitacionais, e que não ocorre extração de água do solo pelas plantas quando o teor de água for inferior ao do ponto de murcha permanente. Assim, a disponibilidade total de água do solo é definida pela equação:

$$DTA = 1.000\ (\theta_{CC} - \theta_{PM}) \qquad (23)$$

em que DTA é a disponibilidade total da água no solo (mm m^{-1}); θ_{CC} é o teor de água na capacidade de campo, em base volume ($m^3\ m^{-3}$);

θ_{PM} é o teor de água no ponto de murcha permanente, em base volume ($m^3\ m^{-3}$).

Parâmetros relacionados à disponibilidade de água no solo estão esquematizados na Figura 13.

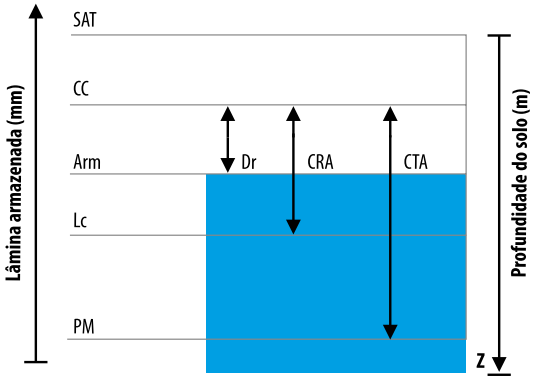


Figura 13. Esquema da disponibilidade de água no solo, para uma coluna de solo de altura igual à profundidade efetiva do sistema radicular.

SAT, conteúdo de água do solo saturado (mm); CC, conteúdo de água na capacidade de campo (mm); PM, conteúdo de água no ponto de murchamento (mm); Lc, conteúdo de água crítico (mm); Arm, conteúdo de água atual do solo (mm); Dr, depleção de água na zona radicular (mm); CRA, capacidade real de água do solo (mm); CTA, capacidade total de água do solo (mm); Z, profundidade efetiva do sistema radicular (mm).

Capacidade total de água do solo

Para manejo da irrigação, é necessário conhecer a capacidade de armazenamento de água do solo na zona radicular.

A capacidade total de água do solo é a quantidade de água que pode ser armazenada no solo, disponível para as plantas, até a profundidade efetiva do sistema radicular (Figura 14). É obtida com a equação:

$$CTA = DTA\ Z \tag{24}$$

em que CTA é a capacidade total de água do solo (mm); DTA é a disponibilidade total de água na zona radicular (mm m^{-1}); e Z é a profundidade efetiva do sistema radicular (m).

Valores médios de profundidade efetiva do sistema radicular das principais culturas podem ser obtidos no *Boletim FAO 56* (Allen et al., 1998). Todavia, como o desenvolvimento do sistema radicular das plantas é afetado por vários fatores, como a presença de camadas de impedimento, níveis de acidez (pH e Al^{+3}) do perfil do solo e grau de tolerância das espécies e cultivares à toxidez por alumínio, deve-se ter o cuidado de se avaliar, mesmo que de forma expedita, a profundidade do sistema radicular de lavouras em campo.

Quando a disponibilidade total de água varia em diferentes camadas do solo na zona radicular, deve-se utilizar a seguinte equação para cálculo da capacidade total de água no solo:

$$CTA = \sum_{i=1}^{n} DTA_i\ Z_i \tag{25}$$

em que i é um número inteiro representando a camada de solo; n é o número de camadas; DTA_i é a disponibilidade total de água na camada i; e Z_i é a profundidade da camada i.

A soma das profundidades Z_i deve ser igual a Z.

Capacidade real de água do solo (água facilmente disponível)

A extração de água pelas plantas é dificultada bem antes que o ponto de murcha permanente seja atingido. Quando o teor de água do solo é reduzido abaixo de um valor crítico (Figura 13), torna-se difícil que a água do solo seja transportada para as raízes a uma taxa suficiente para responder à demanda da transpiração; a cultura começa, então, a sofrer estresse em razão do deficit hídrico. A parcela de CTA que a cultura pode absorver, sem sofrer estresse hídrico, é a capacidade real de água no solo (mm) expressa por:

$$CRA = CTA\ f \tag{26}$$

em que CRA é a capacidade real de água do solo (mm); f é o fator de disponibilidade ou a fração de CTA que pode ser exaurida antes que ocorra o estresse por deficit hídrico, decimal (0 a 1).

Valores de f são encontrados na literatura especializada, como no *Boletim FAO 56* (Allen et al.,

1998). O fator de disponibilidade depende da cultura e demanda de evapotranspiração. Varia, normalmente, de 0,30 para culturas com sistema radicular pouco profundo e numa condição de alta evapotranspiração de referência (ETo > 8 mm dia^{-1}), a 0,70 para plantas com sistema radicular profundo, em condição de baixa evapotranspiração potencial (ETo < 3 mm dia^{-1}). O valor de 0,50 para *f* é comumente usado para muitas culturas (Allen et al., 1998).

Depleção de água na zona radicular

A depleção de água na zona radicular é a lâmina de água necessária para elevar o teor de água atual do solo àquele na capacidade de campo, ou seja,

$$Dr = CTA - 1.000\ \theta\ Z \quad (27)$$

em que Dr é a depleção de água na zona radicular (mm) ($0 \leq Dr \leq CTA$ – Figura 13); e θ é o teor de água atual do solo (m^3 m^{-3}).

Balanço hídrico

O balanço hídrico pode ser aplicado tanto em grandes áreas, como numa bacia hidrográfica, quanto em pequena escala, como numa gleba irrigada. No que concerne ao manejo da irrigação, é usual a aplicação do balanço hídrico em pequena escala, contabilizado para a zona radicular, na dimensão vertical, conforme esquema apresentado na Figura 2 do Capítulo 1.

Os termos do balanço hídrico são expressos em lâmina (mm) e devem ser associados a um intervalo de tempo, geralmente igual a um dia. O balanço hídrico, em base diária, pode ser expresso pela equação (Allen et al., 1998):

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - ES)_i - I_i - FA_i + ET\,r_i + PP_i \quad (28)$$

em que $D_{r,i}$ é a depleção de água na zona radicular ao final do dia i; $D_{r,i-1}$ é a depleção de água na zona radicular ao final do dia $i - 1$; P_i é a precipitação no dia i; ES_i é o escoamento superficial no dia i; I_i é a irrigação real (lâmina bruta de irrigação menos perdas por evaporação, por acúmulo na folhagem e arraste pelo vento) no dia i; FA é o fluxo ascendente oriundo do lençol freático (ascensão capilar) no dia i; ETr_i é a evapotranspiração real no dia i; e PP é a percolação profunda ou lâmina percolada para abaixo da zona radicular no dia i.

Aplicação prática dos conceitos de solo-água

A maioria dos conceitos e parâmetros, descritos neste capítulo, são ferramentas imprescindíveis para desenvolvimento, implantação e gestão de projetos de engenharia nas áreas de irrigação, drenagem e ambiental. Constituem, também, o instrumental básico necessário aos trabalhos de pesquisa que devem ser empreendidos para o desenvolvimento de tecnologias que contribuam para a exploração, de forma sustentável, dos recursos solo e água do País.

Projeto de sistemas de irrigação

Um dos primeiros passos para o dimensionamento de sistemas de irrigação, sejam eles pressurizados ou por superfície, é a coleta de dados de solo, água, planta, clima e topografia. Embora essa seja uma tarefa muitas vezes trabalhosa, é fundamental que se dedique boa parte do tempo gasto no planejamento dos sistemas de irrigação com a obtenção desses dados. Dessa forma, erros e insucessos podem ser evitados em empreendimentos que, em geral, requerem altos investimentos.

Sabe-se que a grande maioria dos sistemas de irrigação no Brasil é dimensionada com base apenas em informações gerais, obtidas em publicações ou empregando-se a técnica da tentativa-erro-acerto, que pode funcionar depois de muitas tentativas realizadas na mesma região. Esse tipo de dimensionamento tem levado a muitos fracassos e frustrações dos agricultores com a irrigação. Projetistas mais

cuidadosos coletam amostras para determinação dos parâmetros físico-hídricos do solo como descrito neste capítulo. Porém, não é comum a prática de ensaios de campo para obtenção de parâmetros como a velocidade de infiltração e o limite superior de água disponível, exceto para pesquisa.

Os métodos para a determinação dos parâmetros de solo-água de interesse para o dimensionamento de sistemas de irrigação estão disponíveis, embora se saiba que muitos têm custo elevado e são trabalhosos. Uma forma de aumentar a disponibilidade desse tipo de informação é a criação de bancos de dados, o que poderia ser viabilizado por meio de cooperação entre instituições de pesquisa, laboratórios de análise, distritos de irrigação, usuários de projetos de irrigação, agências governamentais e não governamentais, prefeituras, enfim, por instituições relacionadas direta ou indiretamente a determinados projetos de irrigação.

Manejo da irrigação

Estratégias de manejo das irrigações baseiam-se em dados de clima, planta, solo ou na combinação de dois ou três desses tipos de dados. Mais detalhes sobre estratégias de manejo de irrigação serão vistos em outro capítulo.

De uma forma geral, utilizam-se dados de solo-água para indicar o momento de irrigar e dados de clima e planta para determinar a lâmina de água a aplicar. Dessa forma, além do monitoramento do teor de água ou do potencial matricial da água do solo, parâmetros de solo-água, como a capacidade de armazenamento de água na zona radicular e o potencial matricial ou teor de água mínimo (crítico) para retorno da irrigação para as culturas, devem ser conhecidos.

O consumo real de água por uma cultura pode ser determinado pelo balanço hídrico na zona radicular (Equação 28). A determinação dos componentes do balanço hídrico exige informações de teor de água do solo em base volumétrica, θ, e, dependendo do modelo utilizado, pode também ser requerida a curva de retenção de água no solo, $\theta(\Psi_m)$, e a relação da condutividade hidráulica não saturada com o teor de água ou o potencial matricial da água no solo, $K(\theta)$ ou $K(\Psi_m)$. De posse dessas informações, pode-se determinar o consumo real de água pela cultura num determinado período, em condição de campo e, assim, o requerimento de irrigação.

Embora outros métodos de determinação da necessidade de água das culturas, como a razão de Bowen, a correlação de *Eddies* e o fluxo de seiva, sejam considerados mais precisos e, por isso, sejam preferidos por muitos pesquisadores em determinadas situações, como é o caso de fruteiras de grande porte, a não disponibilidade de instrumentos e de pessoal treinado impõe dificuldades à difusão desses métodos, o que contribui para que, na prática, o método do balanço hídrico seja o mais utilizado.

O monitoramento do potencial ou teor de água do solo, na parte inferior da zona das raízes, é imprescindível para evitar excessivas perdas de água por percolação profunda, com risco potencial de contaminação do lençol freático por agroquímicos. Finalmente, não se deve esquecer que no Brasil as irrigações são, geralmente, suplementares às chuvas e que a determinação da precipitação efetiva requer o conhecimento de características físico-hídricas dos solos, como a capacidade de infiltração da água.

Limitações e dificuldades relacionadas à utilização dos parâmetros e conceitos de solo-água

Alguns conceitos e metodologias relacionados neste capítulo requerem, ainda, pesquisa para o aprimoramento e apresentam limitações que devem ser consideradas quando forem aplicados.

Qualidade das informações de solo-água

Atualmente boa parte dos parâmetros físico-hídricos de interesse para as engenharias de irrigação e ambiental podem ser medidos ou estimados com razoável precisão. Contudo, parâmetros como a condutividade hidráulica do solo saturado e não saturado estão ainda sujeitos a grandes erros que podem se propagar quando esses dados são utilizados para predizer fluxos de água e/ou de agroquímicos no solo.

Técnicas de laboratório para a obtenção dos parâmetros físico-hídricos estão consolidadas. Entretanto, métodos de campo ainda são inadequados, muito trabalhosos e de custo elevado. Certos parâmetros, como a capacidade de campo e a curva de retenção de água no solo, devem ser determinados em condições de campo ou condições similares (utilizando amostras não deformadas), visando obter melhor representatividade da situação em que os sistemas de irrigação serão operados.

Os métodos para determinação do potencial da água no solo quase sempre requerem que o equilíbrio, em termos de energia, entre solo e o meio poroso do sensor, seja atingido para que o dado seja confiável, o que demanda tempo. Os transdutores de pressão, acoplados a coletores de dados ou a computadores, permitem a leitura de dados de sensores de potencial com grande frequência, o que pode levar a erros pelo não atendimento do requerimento de equilíbrio. Vários sensores disponíveis no mercado são sensíveis às variações da temperatura e da condutividade elétrica do solo e apresentam graus variados de acurácia. Em resumo, a diversidade de equipamentos eletrônicos não garante a coleta de dados de boa qualidade. O técnico deve estar consciente dos conceitos relacionados ao sistema solo-água, quando da utilização de informações coletadas automaticamente, via registros automáticos.

Instrumental para medição de parâmetros de solo-água

Geralmente é necessário mais de um tipo de instrumento para se obter a informação completa em toda a faixa de umidade de interesse, já que os sensores de potencial matricial não operam com precisão razoável. O tensiômetro, um dos instrumentos mais antigos empregados para manejo de irrigação, tem sido rejeitado pelos agricultores e técnicos, no Brasil. As principais razões para essa dificuldade são a qualidade do produto disponível, problemas de contato solo-cápsula, necessidade de escorva e limitada faixa para medição do potencial. Apesar dessas limitações, o tensiômetro ainda é um instrumento que pode ser empregado na maioria das condições em que se pratica agricultura irrigada no Brasil. Há, portanto, um certo grau de desinformação que contribui para a dificuldade de adoção de tecnologia por parte dos usuários. Novos sensores para determinação do teor de água e do potencial de água no solo têm sido desenvolvidos nos últimos anos, empregando-se conceitos de física e de engenharia de materiais, mecânica, elétrica e eletrônica, conforme exemplos já citados.

Finalmente, há uma tendência de se introduzir para os usuários, cada vez mais, produtos eletrônicos automatizados e informatizados e associar isso com qualidade ou precisão na aquisição de dados. A maioria dos usuários necessita de capacitação e de treinamento para operar e manter tais instrumentos eletrônicos, e muitos não fazem uso de todas as funções disponíveis nos aparelhos, o que contribui para a diminuição da relação custo-benefício resultante dos investimentos necessários à aquisição dos equipamentos. Não se deve perder de vista os princípios que regem as relações solo-água, as quais os instrumentos devem, de alguma forma, quantificar. O entendimento do funcionamento dos sensores é um passo fundamental para a sua utilização correta e exploração de toda a sua capacidade.

Variabilidade das propriedades do solo

Ao se utilizar os parâmetros de solo-água, deve ser considerada a variabilidade espacial e temporal a que eles estão sujeitos. O solo apresenta uma heterogeneidade natural, que é agravada pela ação do homem, via preparo e cultivo e em decorrência da desuniformidade na aplicação de insumos, incluindo aí a irrigação. Essa variabilidade levanta as seguintes questões:

a) Qual o número e tamanho das amostras de solo para representar uma determinada área?

b) Como reduzir os efeitos da variabilidade?

c) Como lidar com a variabilidade em um certo campo de produção?

Com relação à variabilidade em um campo de produção, a tendência atual é a utilização da agricultura de precisão, em que a colheita de um determinado produto é monitorada, e um tratamento diferenciado é fornecido às áreas do campo que apresentam diferenças significativas em termos de produtividade da cultura. Entretanto, existem ainda demandas em termos de pesquisa visando ao desenvolvimento de tecnologias viáveis para aplicação precisa de água, mesmo considerando a difusão de sistemas de irrigação localizada no País.

O conhecimento a respeito de alterações temporais nas relações $\theta(\Psi_m)$ e $K(\Psi_m)$, em razão do manejo do solo, manejo de resíduos e práticas culturais, pode ser importante, mas existe ainda um conhecimento limitado a respeito dessas mudanças (Ahuja et al., 1999). A variabilidade temporal das propriedades do solo deve ser acompanhada com o monitoramento periódico dos parâmetros de solo-água de interesse e a atualização deles nos bancos de dados e nos sistemas de controle, sejam eles manuais ou automatizados.

Referências

AGUIAR, J. V.; LIBARDI, P. L.; SAUNDERS, L. C. U.; PAZ, V. P. S. Ajuste da equação de Holtan modificada para um solo Bruno não cálcico da região semi-árida. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 253-256, set./dez. 1998. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v2n3p253-256.

AHUJA, L. R.; RAWLS, W. J.; NIELSEN, D. R.; WILLIAMS, R. D. Determining soil hydraulic properties and their field variability from simpler measurements. In: SKAGGS, R. W.; SCHILFGAARDE, J. van (ed.). **Agricultural drainage**. Madison: American Society of Agronomy, 1999. p. 1207-1234.

ALLEN, R. G. **Irrigation engineering principles**: course lectures notes. Logan: Utah State University, 1992. 297 p.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO, 1998. (FAO. Paper, 56).

ANDRADE, C. de L. T. de; COELHO, E. F.; COUTO, L.; SILVA, E. L. da. Parâmetros de solo-água para a engenharia de irrigação e ambiental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRICOLA, 27., 1998, Poços de Caldas, MG. **Manejo de irrigação**. Lavras: Ed. da UFLA, 1998. p. 1-45.

ANDRADE, C. L. T.; FREITAS, J. A. D.; LUZ, L. R. Q. P. Características físico-hídricas de solos arenosos de tabuleiros litorâneos. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 9., 1991, Natal. **Anais [...]** Fortaleza: ABID, 1992. v. 1, p. 1069-1095.

ARRUDA, F. B.; ZULLO, J. R.; OLIVEIRA, J. B. Estimativa de parâmetros de solos para cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 11-15, 1987.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa, MG: Ed. da UFV, 1995. 596 p.

CASSEL, D. K.; NIELSEN, D. R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis**: Part 1: Physical and mineralogical methods. 2nd ed. Madison: ASA: SSA, 1986. p. 901-924. (Agronomy Series, 9).

COELHO, E. F.; CONCEIÇÃO, M. A. F. Estimativas de parâmetros de solo para fins de drenagem. **Revista Ceres**, v. 15, n. 232, p. 553-565, 1993.

COUTO, L.; SANS, L. M. A. **Características físico-hídricas e disponibilidade de água no solo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 8 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 21).

CRUCIANI, D. E. **A drenagem na agricultura**. São Paulo: Nobel, 1980. 333 p.

CUENCA, R. H. **Irrigation system design**: an engineering approach. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 552 p.

DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. de; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (org.). **Manual**

de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

FERNANDES, B.; SYKES, D. J. Capacidade de campo e retenção de água em três solos de Minas Gerais. **Revista Ceres**, v. 15, p. 1-39, 1968.

FERREIRA, P. A. Drenagem. In: CURSO de engenharia de irrigação: módulo XI. Brasília, DF: Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior, 2001. 167 p.

HILLEL, D. **Solo e água**: fenômenos e princípios físicos. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1970. 231 p.

HOLTAN, H. N.; ENGLAND, C. B.; SHANHOLTZ, V. O. Concepts in hydrologic soil grouping. **Transactions of ASAE**, v. 10, n. 5, p. 407-410, 1967. DOI: 10.13031/2013.39685.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil physics**. New York: John Wiley, 1991. 328 p.

MENG, T. P.; TAYLOR, H. M.; FRYREAR, D. W.; GOMEZ, J. F. Models to predict water retention in semiarid sandy soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 1563-1565, nov. 1987. DOI: 10.2136/sssaj1987.03615995005100060028x.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. Pedotransfer functions to estimate the water retention in some soils of the Rio Grande do Sul state, Brazil. **Ciência Rural**, v. 40, n. 4, p. 848-853, Apr. 2010. DOI: 10.1590/S0103-84782010005000055.

MURPHY, T. A. Sensing the elements: moisture sensors and weather stations. **Irrigation Journal**, v. 46, n. 6, p. 16-19, 1996.

OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. T. K.; RODRIGUES, J. J. V.; MARQUES, F. A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 2, p. 315-323, abr./jun. 2002. DOI: 10.1590/S0100-06832002000200004.

OR, D.; WRAITH, J. M. **Agricultural and environmental soil physics**. Logan: USU, 1997. 218 p.

PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos**. Madrid: Agrícola Española, 1985. 521 p.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; SANTOS, W. L.; RODRIGUES, L. N.; ANTUNES, V. L. Infiltração da água no solo. **Engenharia na Agricultura**, n. 25, p. 1-26, 1997.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 12, p. 211-216, 1988.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: Esalq, 1996. 505 p.

SANTOS, W. J. R.; CURI, N.; SILVA, S. H. G.; ARAÚJO, E. F.; MARQUES, J. J. Pedotransfer functions for water retention in different soil classes from the center-southern Rio Grande do Sul state. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, n. 1, p. 49-60, Jan.-Feb. 2013. DOI: 10.1590/S1413-70542013000100006.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J.; ROMBERGER, J.; PAPENDICK, R. I. Estimating generalized soil water characterisctics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, p. 1031-1036, July 1986. DOI: 10.2136/sssaj1986.03615995005000040039.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J. Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. **Soil Science**, v. 163, p. 765-779, Oct. 1998.

SKAGGS, R. W.; HUGGINS, L. E.; MONKE, E. J.; FOSTER, G. R. Experimental evaluation of infiltration equations. **Transactions of the ASAE**, v. 12, n. 6, p. 822-828, 1969. DOI: 10.13031/2013.38964.

TAVARES-FILHO, J.; FONSECA, I. C. B.; RIBON, A. A.; BARBOSA, G. M. C. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 36, n. 3, p. 996-999, maio-jun. 2006. DOI: 10.1590/S0103-84782006000300045.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer Functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 64, n. 1, p. 327-338, Jan. 2000. DOI: 10.2136/sssaj2000.641327x.

Capítulo 3

Solos e classificação de terras para irrigação

Manoel Ricardo de Albuquerque Filho
Fernando Cezar Saraiva do Amaral
Derli Prudente Santana
Luiz Marcelo Aguiar Sans

Introdução

Os diferentes solos que cobrem a superfície terrestre integram um sistema aberto, em equilíbrio dinâmico com o meio onde se inserem, e desempenham um papel chave no funcionamento dos ecossistemas naturais ou agrícolas, seja como fonte de nutrientes, abrigo ou meio de sustentação e desenvolvimento.

O ambiente tropical apresenta uma grande diversidade de solos, onde cada unidade apresenta propriedades e características intrínsecas. Em conjunto, essas peculiaridades determinam as potencialidades e limitações ao uso do solo. A disponibilidade de água, nutrientes e ar nos solos varia bastante, condicionando, nos vários solos, uma produtividade diferente das culturas, quando outros fatores são considerados constantes. Além disso, algumas das características dos solos, como teor de matéria orgânica, fertilidade, estrutura, porosidade e disponibilidade de água, influenciam e são influenciadas pelo manejo empregado, tornando essencial conhecer os diferentes solos na propriedade para proporcionar o uso mais adequado à sua aptidão.

Com relação à água, o solo funciona tanto como filtro e regulador da qualidade, quanto como reservatório para o suprimento às culturas. A água no solo passa por vários processos físicos, químicos e biológicos, antes mesmo de interagir com a planta e, assim, solo, água e planta são fatores críticos e interdependentes na prática da irrigação. O balanço adequado desse trio deverá propiciar sucesso naquela prática. Portanto, é relevante a compreensão das estruturas de formação e classificação de solo para o contexto da agricultura irrigada para a análise de disponibilidade de água, retenção e drenagem no solo, além da sistematização da classificação de terras para irrigação.

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos conceitos básicos para a caracterização e classificação de solos, com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018) e no Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para a Irrigação (Amaral, 2011), visando subsidiar o conhecimento dos diferentes solos em uma propriedade agrícola para o manejo mais adequado em sistemas de produção irrigados.

Gênese do solo

Estudos de solos em diversas partes do mundo têm mostrado que eles têm propriedades que representam o efeito integrado do clima e organismo no material de origem (rocha, sedimentos e material orgânico) em uma posição física na paisagem (relevo), durante um determinado período de tempo (Solo = f(clima, organismos, material de origem, relevo e tempo)) (Jenny, 1941), e estudos mais recentes têm considerado o fator humano de formação do solo (h), evidenciando que o solo não é apenas fruto de processos naturais (Dudal et al., 2002). Esses fatores proporcionam uma evolução contínua do solo na paisagem, por meio de processos

físicos, químicos, biológicos, de manejo e ocupação, dos quais resultam os vários solos na superfície da crosta terrestre. A Figura 1 ilustra a interdependência entre os fatores e os processos de formação do solo (pedogênese), que determina as características e propriedades de cada solo. Como os fatores variam pronunciadamente na superfície terrestre, tem-se, necessariamente, uma variação das características dos solos nas diferentes porções das paisagens que eles ocupam.

Ao longo do tempo de evolução, o solo passa por processos de adição, em que são incorporados materiais minerais e orgânicos de fontes externas, processos de remoção, em que ocorrem perdas de material sólido e solúvel, principalmente pela erosão e lixiviação, além de processos de transformação, em que alterações físicas, químicas e biológicas ocorrem nos materiais minerais e orgânicos do solo. Assim, quanto mais evoluído é o solo, menor a sua relação com o material de origem e maior é a homogeneidade do perfil dele.

O perfil do solo é uma seção transversal composta por camadas ou horizontes resultantes dos processos pedogenéticos (Figura 2). As características e propriedades preponderantes dos perfis dos diferentes solos no mundo vêm sendo conceituadas e agrupadas de maneira a constituir uma coleção de critérios que permite classificar taxonomicamente e caracterizar esses solos na paisagem em que se encontram, sua diversidade, distribuição espacial e funcionalidades ecossistêmicas (FAO, 2014; Montanarella et al., 2015). Para fins de padronização acerca da qualidade dos solos, a norma ISO 11074 (International Organization for Standard, 2015) foi estabelecida com base no conhecimento global organizado e determina os conceitos gerais sobre descrição, caracterização, amostragem, classificação, mapeamento e manejo dos solos.

No Brasil, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos et al., 2018) é o sistema taxonômico oficial, que está organizado em níveis categóricos que hierarquizam as classes de solos de acordo com propriedades que possam ser identificadas no campo ou inferidas com base no conhecimento de campo, da Ciência do Solo ou disciplinas correlatas. São seis níveis categóricos: ordens, subordens, grandes grupos, subgrupos, famílias e séries, em que preponderam, nos níveis mais elevados, as propriedades

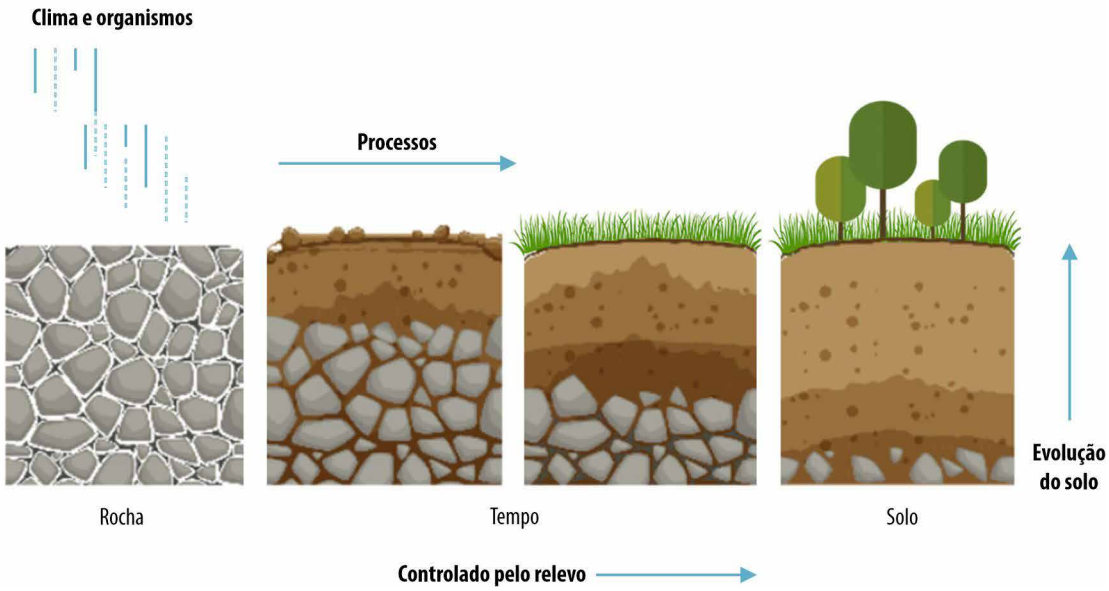


Figura 1. Fatores de formação do solo e pedogênese.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

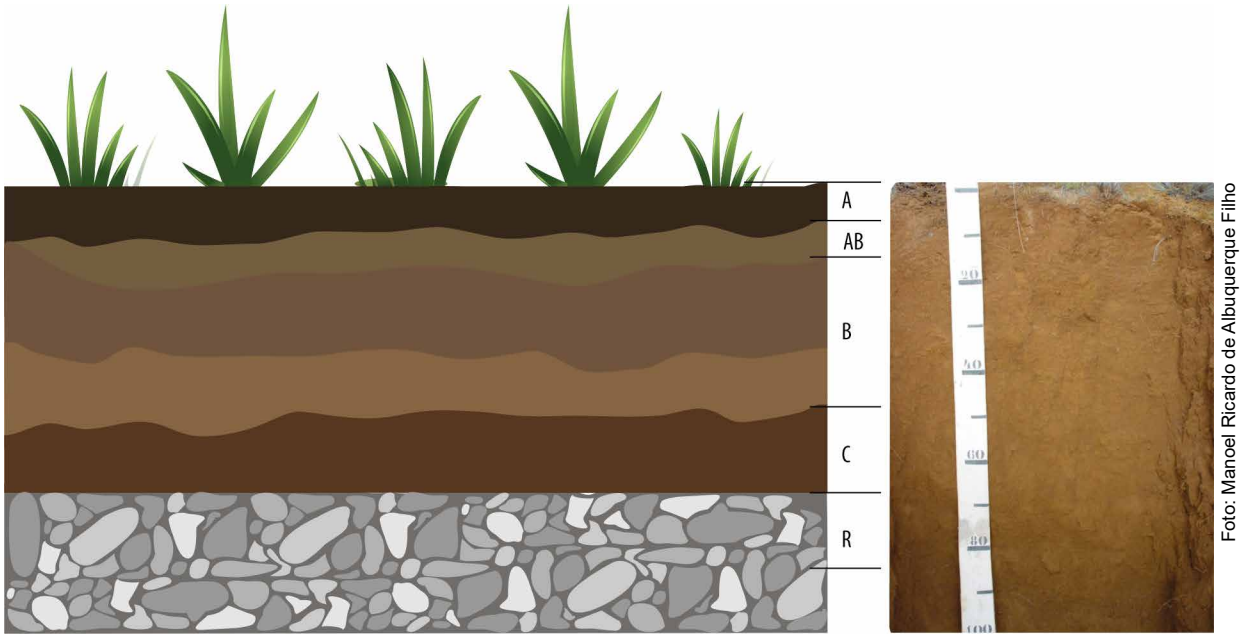


Foto: Manoel Ricardo de Albuquerque Filho

Figura 2. Perfil de solo profundo, homogêneo e sem distinção clara entre os horizontes (à direita). À esquerda, uma representação genérica da sequência de horizontes do solo, em que A é o horizonte superficial; AB é um horizonte de transição para o horizonte subsuperficial B; C representa um horizonte mineral pouco desenvolvido não diagnóstico; e R representa a rocha ou material de origem.

Ilustração: Paula Cristina Rodrigues Franco.

resultantes diretamente dos processos pedogenéticos (Santos et al., 2018). No primeiro nível (ordem), os solos brasileiros são agrupados em 13 classes: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Espodossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvissolos, Neossolos, Nitossolos, Organossolos, Planossolos, Plintossolos e Vertissolos.

O SiBCS detalha e define as bases, os critérios e os métodos específicos para o enquadramento de determinado solo em cada uma dessas classes e seus subníveis categóricos, levando em conta a ocorrência e inter-relações dos horizontes diagnósticos do solo, dos atributos diagnósticos que são as características mais destacadas, resultantes dos processos pedogenéticos naquele solo, além de características remanescentes do material de origem no perfil do solo (Santos et al., 2018).

Horizontes diagnósticos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

Os horizontes do solo são seções de constituição mineral, orgânica ou intermediária, aproximadamente paralelas à superfície do terreno, com espessura e propriedades variáveis, que compõem o perfil do solo desde a superfície até o contato com a rocha consolidada ou outras camadas subsuperficiais que apresentem pouca ou nenhuma atuação dos processos pedogenéticos (FAO, 2014). No SiBCS, os horizontes do solo estão organizados em Horizontes diagnósticos superficiais e Horizontes diagnósticos subsuperficiais, conceituados de maneira resumida a seguir.

Horizontes diagnósticos superficiais

Horizonte hístico: é um tipo de horizonte constituído predominantemente de material orgânico derivado de acumulações de resíduos vegetais em graus variáveis de decomposição (Figura 3) e com teor de carbono igual ou superior a 80 g kg^{-1}, que pode ocorrer em superfície ou estar enterrado por material mineral, desde que atenda aos demais critérios definidos no SiBCS (Santos et al., 2018).

Foto: Manoel Ricardo de Albuquerque Filho



Figura 3. Horizonte hístico de ambiente altomontano da Ilha de Trindade, Atlântico Sul.

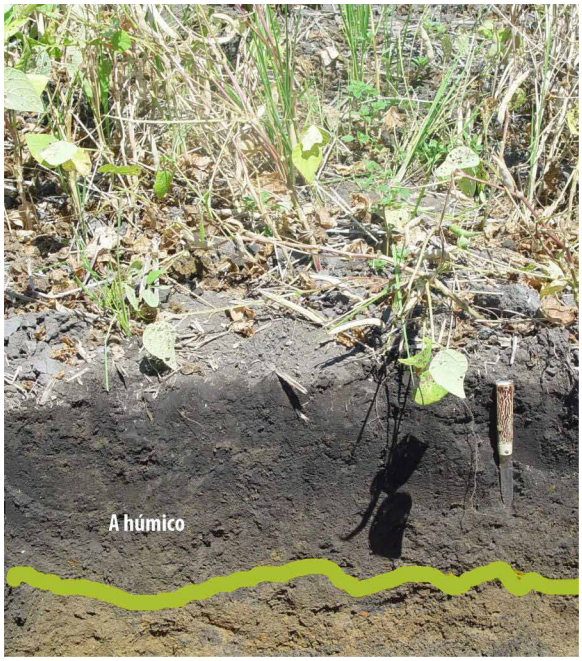


Foto: Manoel Ricardo de Albuquerque Filho

Figura 4. Horizonte A húmico em solo de várzea do Rio Javaés, Lagoa da Confusão, TO.

Horizonte A: os agentes de intemperismo atuam na rocha de cima para baixo. À medida que aumenta a intensidade de intemperismo, formam-se camadas mais ou menos paralelas à superfície, chamadas horizontes. O horizonte A é a primeira camada terrosa (constituída predominantemente por material mineral) que se forma a partir da superfície do solo e é mais rica em matéria orgânica, bem como é mais afetada por fatores externos.

Os principais tipos de horizonte A descritos no SiBCS (Santos et al., 2018) são: A húmico (Figura 4); A chernozêmico; A proeminente; A moderado; A fraco; e horizonte A antrópico. Esse último leva em conta as interferências decorrentes de atividades humanas que podem modificar desde a estrutura até os processos físico-químicos e biodinâmicos do solo, por meio de ações como a remoção da cobertura vegetal, o revolvimento mecânico (aração, gradagem, sistematização da superfície), a drenagem de áreas encharcadas, ou a incorporação de corretivos e fertilizantes. O horizonte A antrópico corresponde ao horizonte superficial formado ou modificado pela ação do homem, como lugar de residência ou de cultivos prolongados, com adição de material orgânico, em mistura ou não com material mineral. Concentra fragmentos de cerâmica e/ou artefatos líticos e/ou restos de ossos e/ou conchas (Santos et al., 2018).

Horizontes diagnósticos subsuperficiais

A ação continuada do processo de intemperismo resulta na fragmentação e alteração da rocha matriz (material de origem); e, à medida que aqueles processos de adição, remoção e transformação vão ocorrendo em subsuperfície, o material terroso passa a predominar sobre o material que ainda guarda a estrutura da rocha. Ao se atingir esse ponto, nova camada adquire uma estrutura típica do solo; embora ainda possa apresentar algum vestígio de estrutura da rocha, dizemos que temos um novo horizonte subsuperficial. No SiBCS, os horizontes diagnósticos subsuperficiais conceituados são o horizonte B, horizonte E, horizonte plínti-

co, horizonte concrecionário, horizonte litoplíntico, horizonte glei, horizonte cálcico, horizonte petrocálcico, horizonte sulfúrico, horizonte vértico, fragipã e duripã.

Horizonte B: horizonte mineral subsuperficial, com diferentes graus de desenvolvimento em espessura, estrutura, mineralogia e propriedades físicas e químicas. Os principais tipos de horizontes B definidos no SiBCS (Santos et al., 2018) são: B incipiente, típico dos Cambissolos (Figura 5), é um horizonte em estágio inicial de desenvolvimento com 4% ou mais de minerais primários alteráveis e espessura menor que 50 cm; B textural (Figura 6), horizonte de acumulação de argila em relação ao horizonte sobrejacente, cria um gradiente textural (resultado da divisão do teor de argila do horizonte B

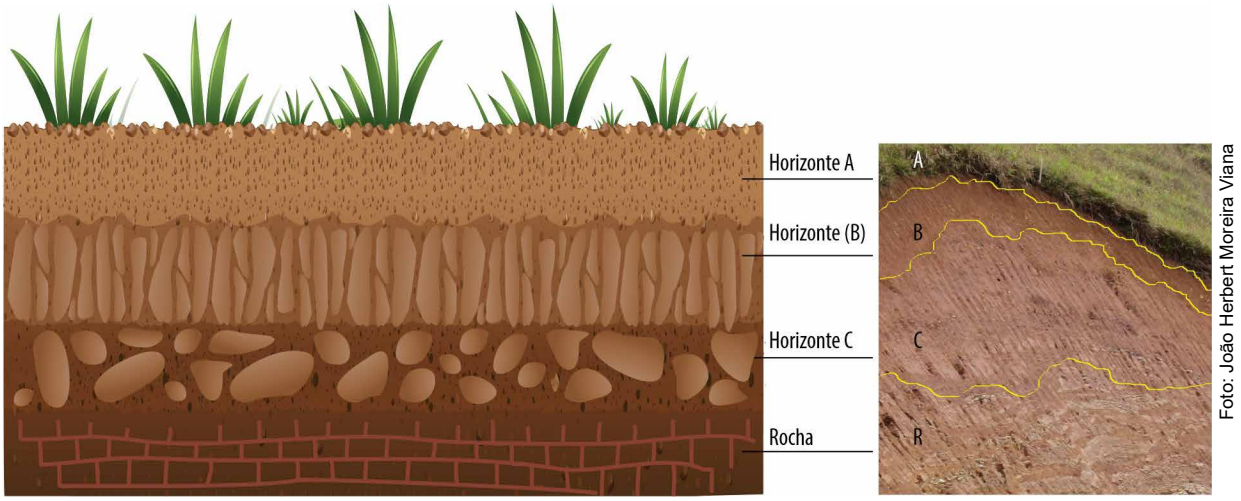


Figura 5. Cambissolo – solo com horizonte B incipiente.

Ilustração: Paula Cristina Rodrigues Franco.

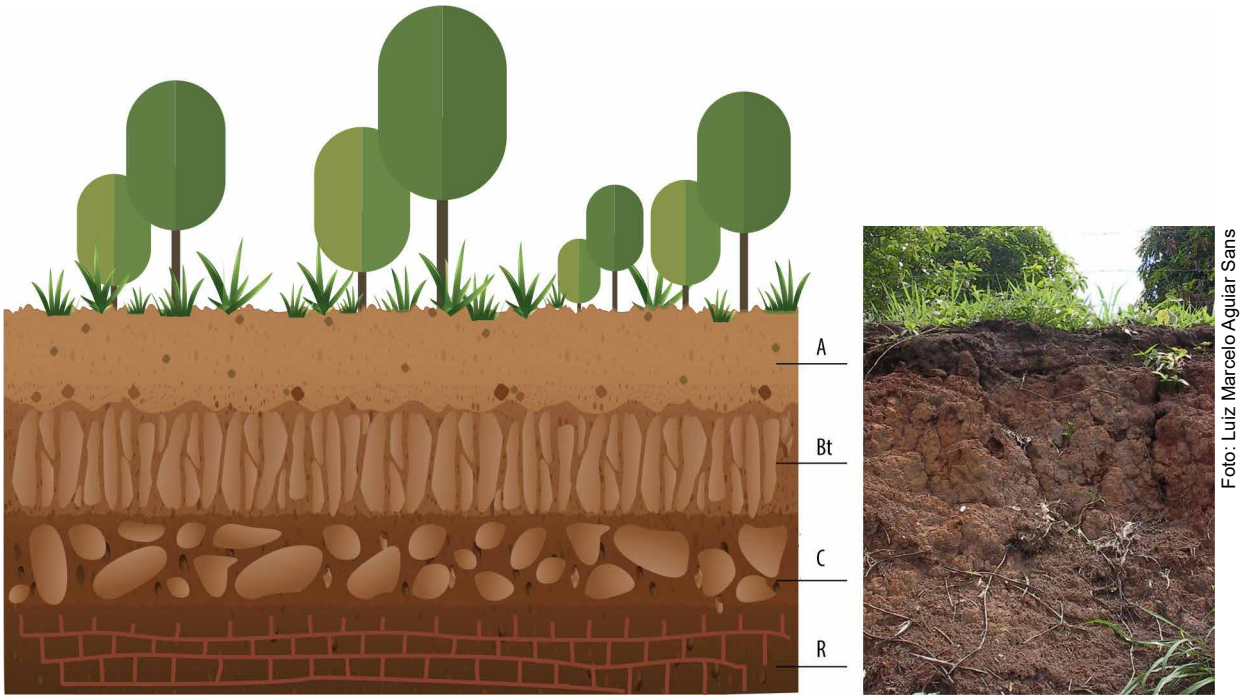


Figura 6. Solo com horizonte B textural (Bt).

Ilustração: Paula Cristina Rodrigues Franco.

pelo teor de argila do horizonte sobrejacente, superior a 1,5) que normalmente acarreta diminuição da permeabilidade. O horizonte B plânico é uma variação do B textural, afetado por elevação do lençol freático por causa de uma transição abrupta do teor de argila que resulta em maior adensamento da estrutura física e baixa permeabilidade subsuperficial, podendo apresentar estrutura maciça e elevado teor de sódio, entre outros fatores limitantes descritos no SiBCS. Horizonte B nítico é semelhante ao B textural, mas sem gradiente textural igual ou maior que 1,5 em relação ao horizonte sobrejacente. Horizonte B espódico se trata de um horizonte de acumulação iluvial de matéria orgânica, associada a complexos de sílica-alumínio-ferro. Além das características resumidas aqui, esses horizontes apresentam outras peculiaridades e critérios de classificação detalhados no SiBCS (Santos et al., 2018).

Dentre os horizontes diagnósticos subsuperficiais, o horizonte B latossólico caracteriza os solos mais amplamente conhecidos da paisagem brasileira, os Latossolos (Figura 7). Na maior parte dos casos, o B latossólico é espesso (espessura superior a 50 cm), friável e bem drenado, com estrutura bem desenvolvida, conferindo estabilidade ao solo. Por ser um horizonte mais intemperizado, apresenta maior concentração de óxidos em relação a minerais de argila mais intemperizáveis, definindo uma relação SiO_2/Al_2O_3 menor que 2,2, bem como uma capacidade de troca de cátions (CTC) menor que 17 $cmol_c\ kg^{-1}$ de argila, entre outros critérios detalhados no SiBCS (Santos et al., 2018).

Horizonte glei: é um horizonte mineral que, eventualmente, pode estar na superfície do solo, com espessura mínima de 15 cm, caracterizado por redução de ferro e prevalência do estado reduzido, em razão principalmente da água estagnada. Caracteriza os Gleissolos, solos típicos de várzeas, com drenagem deficiente e sujeitos a inundações temporárias, que são muito utilizados em cultivos de arroz de várzea (irrigação por inundação), feijão, melancia e produção de sementes de soja em sistema de subirrigação em várzeas sistematizadas do Tocantins.

Horizonte vértico: caracteriza-se pela expansão e contração das argilas em função da umidade do perfil, que resulta em fendilhamento da estrutura (superfície de fricção ou *slickensides*). Solos com horizonte vértico apresentam elevada capacidade de retenção de água, mas uma estreita faixa de disponibilidade hídrica para as culturas, bem como para o manejo do solo.

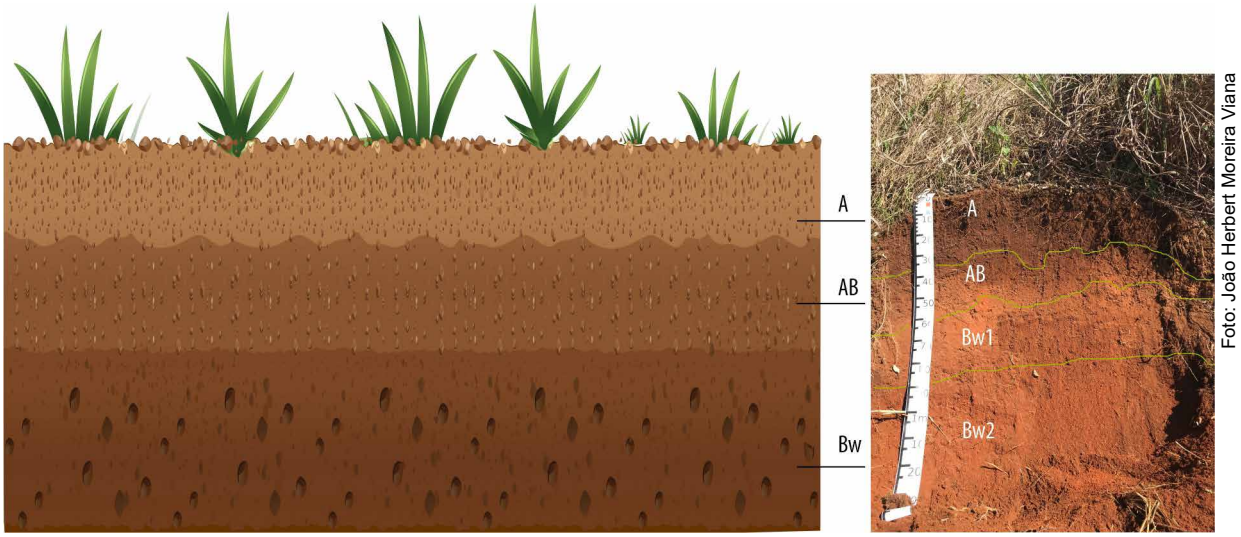


Foto: João Herbert Moreira Viana

Figura 7. Latossolos e seus perfis muito profundos e transições difusas entre os sub-horizontes.

Ilustração: Paula Cristina Rodrigues Franco.

Horizonte plíntico: horizonte com no mínimo 15 cm de espessura com presença de plintita, em quantidade igual ou superior a 15% (por volume), que se forma, geralmente, em terrenos com lençol freático alto ou em solos que apresentem restrição temporária à percolação de água. Predominam em regiões de clima quente e úmido, com relevo plano a suave, de áreas de baixadas sujeitas à flutuação do lençol freático em, ao menos, uma parte do ano.

Horizontes concrecionário e litoplíntico: com a sucessão de ciclos de umedecimento e secagem (redução e oxidação) no perfil do solo, a plintita tende a um endurecimento irreversível, originando concreções de ferro ou ferro e alumínio, denominadas petroplintita. Quando essas concreções e nódulos ferruginosos, com ou sem presença de outros materiais grosseiros, ocupam 50% ou mais do volume do horizonte, com espessura mínima de 30 cm, esse horizonte é classificado como concrecionário (Figura 8). Nos casos em que a petroplintita forma um contínuo ou predomina em blocos com, no mínimo, 20 cm de tamanho, com espessura mínima de 10 cm, constitui-se então o horizonte litoplíntico (Figura 9). Quando esse horizonte ocorre em profundidades acima de 50 cm, confere ao solo uma camada de retenção da umidade que pode resultar em vantagem para o manejo da água para as culturas.

Outros horizontes subsuperficiais descritos no SiBCS, importantes para a classificação do solo, mas de ocorrência restrita, são o horizonte E álbico, horizonte cálcico e petrocálcico, horizonte sulfúrico, fragipã e duripã, cujas pequenas dimensões espaciais não reduzem a importância do conhecimento dos solos onde ocorrem, principalmente para sistemas de produção irrigados, por causa da estreita relação de suas características preponderantes com a água do solo.

Horizonte C: não se trata de um horizonte diagnóstico, contudo, é característico da evolução dos



Foto: Manoel Ricardo de Albuquerque Filho

Figura 8. Superfície concrecionária de petroplintita, exumada a partir da erosão diferencial do horizonte superficial.

Foto: Manoel Ricardo de Albuquerque Filho



Figura 9. Solo com horizonte litoplíntico em área de Projeto de Produção Irrigada de Frutas, no estado do Tocantins.

solos e dos estádios de intemperismo. É um horizonte mineral composto predominantemente de fragmentos de rochas e algum material terroso. Dá-se o nome de horizonte C a essa camada. Solos em que o horizonte A ocorre diretamente sobre a rocha (R) ou horizonte C são classificados como Neossolos Litólicos (Figura 10). O prefixo lito (= rocha) indica que o solo tem suas características diretamente herdadas da rocha matriz (material de origem). Caracterizam solos com reservatório de água limitado, em função da pequena espessura. A água é retida predominantemente no horizonte A, já que o horizonte C não apresenta estrutura desenvolvida.

Nos solos Neossolos Flúvicos, aqueles formados em depósitos aluviais recentes e caracterizados por uma sucessão de camadas estratificadas sem relação pedogenética entre si, é comum a presença de horizonte glei a maiores profundidades (Figura 11).

As definições e a caracterização desses horizontes e camadas dos solos possibilitam interpretações práticas, não apenas para a classificação taxonômica dos solos na paisagem, mas também para o seu uso e manejo agrícola. Da mesma forma, os demais atributos diagnósticos descritos no SiBCS devem ser considerados na implantação e no manejo de sistemas de produção, especialmente quando tratam de características do solo que afetam sistemas irrigados, como caráter coeso, concrecionário, retrátil, redóxico, sálico, salino, sódico, vértico, matérias sulfídricas e teor de óxidos de ferro, saturação por bases, textura do solo (granulometria) e atividade das argilas (Santos et al., 2018).

Atributos diagnósticos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

Os atributos diagnósticos do SiBCS (Tabela 1) são determinados por análises morfológicas e descrição do perfil do solo no campo (por exemplo: cor,

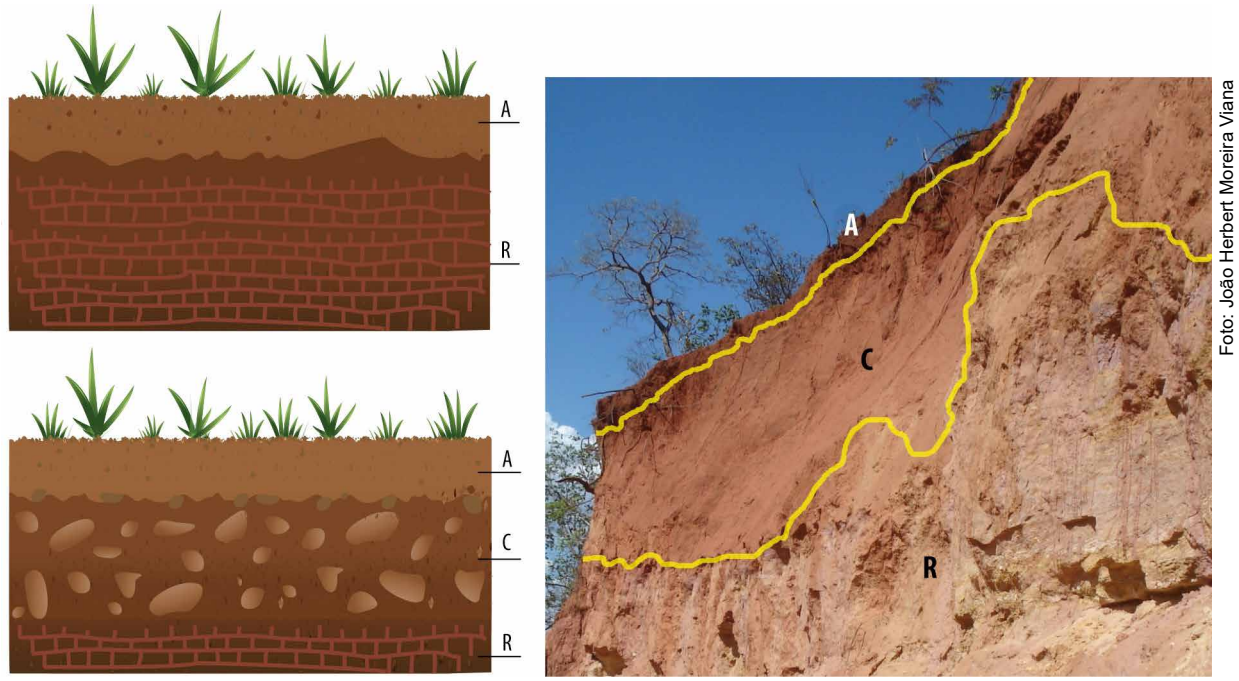


Figura 10. Sequência de horizontes tipo AR e ACR, típica de Neossolos Litólicos.

Ilustração: Paula Cristina Rodrigues Franco.

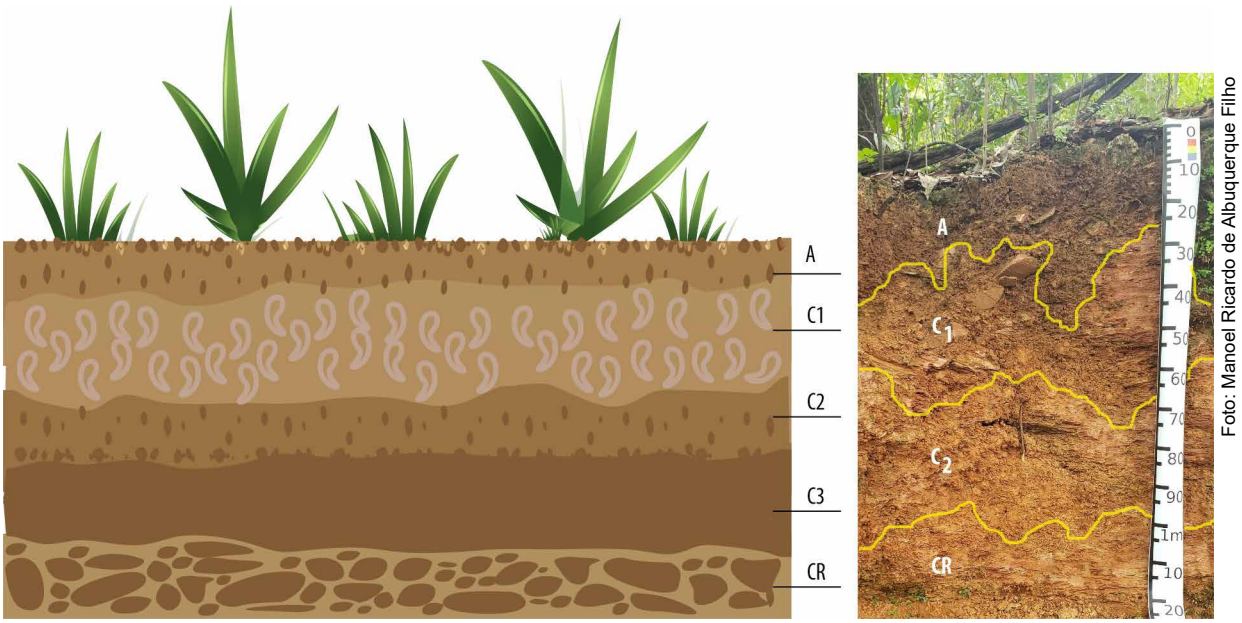


Figura 11. Sucessão de camadas sem relações pedogenéticas entre si em Neossolos Flúvicos (aluviais).

Ilustração: Paula Cristina Rodrigues Franco.

espessura dos horizontes e camadas, estrutura, profundidade, pedregosidade) e por análises laboratoriais complementares (por exemplo: pH, teor de matéria orgânica, saturação por bases, salinidade), além daqueles cuja determinação é complementada por tabelas de comparação, como no caso da cor do solo, que usa a *Carta de cores de Munsell* (Munsell Color, 2015) como padrão. Esses atributos são determinantes tanto para a classificação taxonômica do solo, como

Tabela 1. Atributos diagnósticos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS).

Atributo	Definição[1]
Atividade da fração argila	Capacidade de troca de cátions (CTC) da fração argila no horizonte B (inclusive BA e BC) ou C, quando não existir o horizonte B. CTC x 1.000/conteúdo de argila. Atividade alta (Ta) tem valor igual ou maior que 27 $cmol_c\ kg^{-1}$ e atividade baixa (Tb) tem valor menor que esse
Autogranulação	Agregados granulares ou soltos que se formam naturalmente em camadas superficiais de alguns solos argilosos, em razão de características inerentes ao próprio material
Caráter ácrico	Baixa CTC do solo (soma de bases (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+ e Na^+) mais Al^{3+} menor ou igual a 1,5 $cmol_c\ kg^{-1}$ de argila), associada a pH em KCl 1,0 mol L^{-1} igual ou maior que 5,0 e/ou ΔpH positivo ou nulo (pH em KCl – pH $H_2O \geq 0$)
Caráter alítico	Solo com baixa saturação por bases e com alumínio trocável igual ou maior que 4 $cmol_c\ kg^{-1}$ de solo, associado à atividade de argila igual ou maior que 20 $cmol_c\ kg^{-1}$ de argila e saturação por alumínio igual ou maior que 50% e/ou saturação por bases menor que 50%
Caráter alumínico	Solo com teor de alumínio trocável no horizonte B igual ou maior que 4 $cmol_c\ kg^{-1}$ de solo, associado com baixa saturação por bases (menor que 50%) e saturação por alumínio igual ou maior que 50%
Caráter argilúvico	Concentração de argila no horizonte B que caracteriza um gradiente textural (B/A) igual ou maior que 1,4, mas que não é suficiente para identificar um horizonte B textural, plânico ou espódico
Caráter carbonático	Presença de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) em quantidade igual ou maior que 150 g kg^{-1} de solo
Caráter coeso	Adensamento do horizonte subsuperficial de textura média a muito argilosa, mas com fraca organização estrutural e que se apresenta muito duro a extremamente duro quando seco, passando a friável quando úmido
Caráter concrecionário	Quantidade de petroplintita na forma de nódulos ou concreções igual ou superior a 5% do volume de solo em um ou mais horizonte subsuperficial, mas em quantidade insuficiente para caracterizar um horizonte concrecionário
Caráter crômico	Cor bem desenvolvida, que se expressa nitidamente no perfil do solo, podendo ser mais avermelhada ou mais amarelada, de acordo com critérios definidos no SiBCS (Santos et al., 2018)
Caráter dúrico	Endurecimento, causado por cimentação forte em um ou mais horizontes do solo, incluindo duripã, ortstein, plácico e outros horizontes com cimentação forte que não se enquadrem como horizontes litoplíntico, concrecionário e petrocálcico
Caráter ebânico	Dominância de cores escuras, quase pretas, na maior parte do horizonte diagnóstico subsuperficial, com predominância de cores conforme definidas no SiBCS (Santos et al., 2018)
Caráter espódico	Acúmulo de compostos organometálicos (provenientes de reações de ácidos orgânicos com argila, minerais e óxidos no solo). O acúmulo ocorre em subsuperfície, a partir do material que migra de horizontes sobrejacentes (iluviação)
Caráter êutrico	Característica de solos arenosos com ligeiro enriquecimento em bases, mas que não apresenta fertilidade natural acentuada. Solos com pH em água igual ou maior que 5,7 e soma de bases igual ou maior que 2 $cmol_c\ kg^{-1}$
Caráter flúvico	Camadas estratificadas ou deposição irregular (errática) de material mineral e/ou orgânico, aluvionar ou colúvio-aluvionar, evidenciando clara influência fluvial
Caráter hipocarbonático	Presença de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) em quantidade maior que 50 g kg^{-1} de solo e menor que 150 g kg^{-1} de solo
Caráter litoplíntico	Distribuição de petroplintita de forma contínua e consolidada em um ou mais horizontes, mas com espessura insuficiente para caracterizar um horizonte litoplíntico

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Atributo	Definição[1]
Caráter plânico	Horizonte adensado, com baixa permeabilidade, cores acinzentadas, escurecidas ou neutras, com ou sem mosqueados, semelhante ao horizonte plânico, mas que não satisfaz todos os critérios deste. Horizonte intermediário a horizonte plânico
Caráter plíntico	Acumulação de plintita mínima de 5% por volume, mas insuficiente para caracterizar o horizonte plíntico, seja pela quantidade ou pela espessura da camada ou horizonte
Caráter redóxico	Camada ou horizonte de coloração variegada ou de mosqueados, típica de ambiente redutor (com saturação temporária com água). Decorre de processo de oxirredução, mas não é suficiente para caracterizar horizonte plíntico ou glei
Caráter retrátil	Retração acentuada da massa de solo quando exposta a secamento por algumas semanas, resultando em fendilhamento vertical pronunciado, mas friável e facilmente desagregado por pressão. É usado para as classes Latossolo e Nitossolo, mas com possível presença de minerais 2:1
Caráter rúbrico	Avermelhamento do perfil do solo em profundidade, observado nos Latossolos Brunos e Nitossolos Brunos, com definição de cor segundo os critérios do SiBCS (Santos et al., 2018)
Caráter sálico	Presença de sais mais solúveis em água fria que o gesso, em quantidade tóxica à maioria das culturas. Determinada no extrato de saturação, por condutividade elétrica igual ou maior que 7 dS m^{-1} (a 25 °C), em alguma época do ano
Caráter salino	Semelhante ao caráter sálico, mas com menor condutividade elétrica no estrato de saturação (igual ou maior que 4 dS m^{-1} e menor que 7 dS m^{-1} (a 25 °C), em alguma época do ano
Caráter sódico	Horizonte ou camada que apresenta saturação por sódio igual ou maior que 15%
Caráter solódico	Horizonte ou camada que apresenta saturação por sódio variando de 6% a 15%
Caráter sômbrico	Acumulação subsuperficial de húmus, de cor escura e com espessura maior que 10 cm, mas que não atende à definição de horizonte espódico, não caracteriza um horizonte A enterrado, levando-se ainda em consideração outros critérios descritos no SiBCS (Santos et al., 2018)
Caráter vértico	Horizonte com superfície de fricção, com fendas ou estruturas cuneiformes e/ou paralelepipédicas em quantidade e expressão insuficiente para caracterizar o horizonte vértico
Cerosidade	Concentração de argilas e outros materiais inorgânicos na forma de preenchimento de poros, revestindo unidades estruturais ou de partículas das frações grosseiras e conferindo a essas, um aspecto lustroso e brilho graxo, similar a cera derretida e escorrida
Constituição esquelética do solo	Volume de material mineral maior que 2 cm em proporção entre 35% e 90% do volume total da massa do solo
Contato lítico	Presença de material rochoso muito fracamente alterado (pouco intemperizado) subjacente ao solo que impede ou limita o livre crescimento de raízes e a circulação de água
Contato lítico fragmentário	Contato lítico que apresenta fragmentação natural que permite a penetração de raízes e circulação de água
Distribuição de cascalhos no perfil	É a proporção de cascalho (material inorgânico com tamanho entre 2 mm e 2 cm) em relação à fração terra fina (menor que 2 mm) e que pode determinar mudança no grupamento textural, conforme os critérios do SiBCS (Santos et al., 2018)
Gilgai	Saliências convexas ou alternância de pequenas depressões e elevações em áreas quase planas, caracterizando um microrrelevo típico de solos argilosos que têm alto coeficiente de expansão com aumento da umidade

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Atributo	Definição[1]
Grau de decomposição do material orgânico	Utilizado apenas na classe dos Organossolos, refere-se ao estágio de decomposição predominante do material orgânico do solo em estudo. Compreende os estágios fíbrico, hémico e sáprico de decomposição, de acordo com critérios descritos no SiBCS (Santos et al., 2018)
Grupamento textural	É a reunião de uma ou mais classe de textura, agrupadas em textura arenosa, média, argilosa, muito argilosa e siltosa, conforme os critérios do SiBCS (Santos et al., 2018)
Material mineral	Formado predominantemente por compostos inorgânicos, em vários estágios de intemperismo
Material orgânico	Resíduos vegetais em diferentes estágios de decomposição, inclusive carvão e biomassa no solo, decorrente de processos naturais, em quantidade igual ou maior que 80 g kg^{-1} na fração terra fina seca ao ar (TFSA)
Material sulfídrico	Materiais que contêm compostos de enxofre oxidáveis, que ocorrem em solos minerais ou orgânicos, em locais permanentemente encharcados, geralmente de áreas com água salobra
Minerais alteráveis	São minerais instáveis, mais facilmente intemperisáveis que o quartzo e argilas do grupo das caulinitas, principalmente em clima úmido, tais como feldspatos, anfibólios e outros descritos no SiBCS (Santos et al., 2018)
Mudança textural abrupta	Aumento do teor de argila em pequena distância de transição entre o horizonte A ou E e o subjacente B
Petroplintita	Material endurecido, normalmente proveniente da consolidação da plintita após sucessivos ciclos de umedecimento e secagem. Com o tempo e a aglomeração de mais material, originam nódulos e concreções ferruginosas (cangas lateríticas)
Plintita	Matéria de forma laminar, cilíndrica, esferoidal ou irregular constituída de mistura de argila e ferro, ou ferro e alumínio, que ocorre como mosqueado na matriz do solo. É formada em ambiente úmido, onde permanece macia e facilmente cortada
Relação silte/argila	É o quociente obtido pela divisão do teor de silte pelo de argila, determinados pela análise granulométrica da fração terra fina seca ao ar do solo (TFSA). É utilizada para o horizonte B e serve de indicativo para o grau de intemperismo dos solos, segundo critérios descritos no SiBCS (Santos et al., 2018)
Saturação por bases	É a taxa percentual (V%) de cátions básicos em relação à CTC (V% = 100 x soma de bases/CTC total) e caracteriza solos eutróficos quando igual ou maior que 50%, ou distróficos quando menor que esse valor
Superfície de compressão	Superfícies alisadas, virtualmente sem estriamentos, provenientes de compressão na massa do solo em decorrência da expansão do material por ação de hidratação. São comuns em solos argilosos ou muito argilosos, podendo ser brilhantes ou foscas
Superfície de fricção (*slickensides*)	Superfícies alisadas e lustrosas observadas na matriz do solo, resultantes da expansão e contração do material argiloso por causa da variação da umidade no solo
Teor de óxido de ferro	Teor de Fe_2O_3 obtido por extração com ataque sulfúrico, utilizado para separar as classes de solos com baixo, médio, alto e muito alto teor de óxidos de ferro, de acordo com os critérios do SiBCS (Santos et al., 2018)

[1] Definição resumida ou adaptada do SiBCS (Santos et al., 2018).

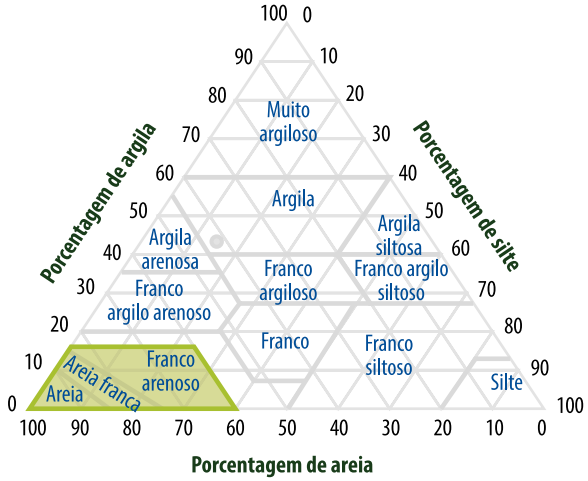
para interpretações acerca do seu funcionamento no meio natural ou sob um determinado manejo em sistemas de produção, notadamente os atributos relacionados à fertilidade do solo (CTC, pH, textura, matéria orgânica, etc.), rotineiramente utilizados para a recomendação de aplicação de corretivos e fertilizantes nos solos.

Classes de solo e disponibilidade de água

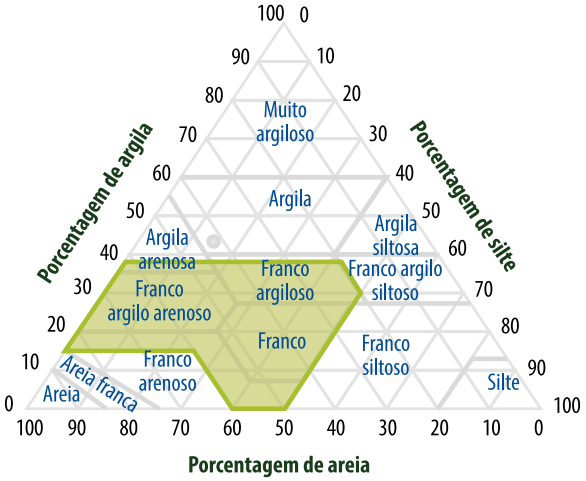
Assim que termina a chuva e/ou irrigação, se a água que tenha ficado na superfície desaparecer, dizem que o processo de infiltração ter-

minou. Na realidade, o processo de infiltração não para bruscamente como se tivesse fechado uma torneira. Num solo saturado, a água tem diferentes caminhos. Parte se move para baixo, ou seja, para camadas mais profundas do solo sob a ação do potencial gravitacional, outra parte se move segundo outros potenciais, os que denominamos de redistribuição.

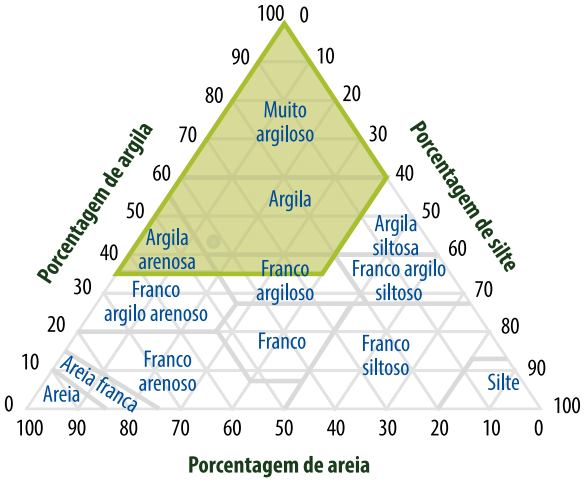
A infiltração é uma das características físicas que diferenciam os solos, que apresentam diferenças na condutividade hidráulica, permeabilidade e capacidade de retenção dependentes de fatores como estrutura, grupamento textural, macro e microporosidade, profundidade e declividade. Utilizando-se curvas características de umidade provenientes de estudos de solos brasileiros desenvolvidos em diferentes locais definiram-se funções que podem ser utilizadas para estimar a disponibilidade de água no solo. Sans et al. (2001) estabeleceram funções que permitiram agrupar as classes de solos segundo as disponibilidades de água para a cultura do milho, sugerindo a seguinte classificação (Figura 12).



Tipo 1 - Solo de baixa retenção de água: solos com menos de 5% de água disponível (representado por solos com mais de 60% de areia e teores de argila menores do que 15%).



Tipo 2 - Solo de média retenção de água: solos entre 5% e 15% de água disponível (teores de argila entre 15% e 35%).



Tipo 3 - Solo de alta retenção de água: solos com mais de 15% de água disponível (teores de argila maiores do que 35%).

Figura 12. Classes de solos segundo as disponibilidades de água para a cultura do milho.

Fonte: Sans et al. (2001).

Em sistemas de produção irrigados, ao contrário do que sugere o modelo de Sans et al. (2001), Katerji e Mastrorilli (2009) mostraram que, quando apenas a textura foi considerada, a eficiência no uso da água pela cultura reduziu-se significativamente com o aumento da textura, resultando em decréscimo de 22% a 25% na produtividade de milho, batata e girassol.

Os autores, portanto, consideraram apenas três grupos, quando a textura é a única característica considerada, ou seja, baixa, média e alta retenção de água, segundo o armazenamento de água na zona radicular (40 cm de profundidade) (Tabela 2). Nesse modelo simplificado, solos que armazenam até 20 mm de água apresentam baixa retenção de água e são normalmente arenosos. Solos que armazenam até 40 mm têm média retenção e textura média, enquanto aqueles que retêm 60 mm ou mais são solos de alta retenção de água, normalmente de textura argilosa ou mais fina. Contudo, conforme já destacado, outras características necessitam ser levadas em conta, mesmo quando se trata de textura, conforme destacado por Reichert et al. (2009, 2011), que demonstraram haver maior disponibilidade de água em solos com maior teor de silte e menor teor de areia e sugeriram uma grande amplitude de água disponível para cada classe textural.

Características de algumas classes de solo e irrigação

Solos profundos e bem drenados

São solos que ocorrem tipicamente em relevo nos chapadões, em relevo plano, embora também predominem nos mares de morros da Zona da Mata mineira e nos Tabuleiros Costeiros do Nordeste. Normalmente, apresentam baixa fertilidade natural e excelentes condições para mecanização. Mesmo quando muito argilosos, podem apresentar uma grande permeabilidade, em razão da estrutura granular muito pequena e muito bem expressa.

Embora muitos solos possam se enquadrar nesse grupo, os Latossolos compreendem a principal classe, apresentando boa conformação mesmo sob relevo um pouco mais ondulado. A boa estruturação, profundidade e permeabilidade desses solos lhes conferem uma elevada taxa de infiltração e capacidade de armazenamento de água, fazendo com que a água das chuvas ou de irrigação percole sob a forma de uma lâmina uniforme não localizada, o que é de grande importância para a disponibilidade de água às culturas e resistência à erosão. Tal fato explica o aproveitamento de água pelas raízes e grande profundidade, proporcionan-

Tabela 2. Referência prática para a capacidade de retenção de água para as principais classes de solos agricultáveis do Brasil.

Capacidade de retenção de água	Classes de solo
Baixa a média	Latossolos Ácricos, Acriférricos, Aluminoférricos e Distroférricos, psamíticos (arenosos) ou de textura média (franco-arenosa), Argissolos Vermelhos, Vermelho-Amarelos ou Acinzentados Distróficos, espessarênicos, arênicos e latossólicos, Cambissolos Distróficos ou Eutróficos latossólicos, Neossolos, Plintossolos Pétricos litoplínticos e concrecionários
Média	Latossolos Distróficos e Eutróficos, Argissólicos, de textura argilosa/média, Argissolos Distróficos, Eutróficos, Latossólicos, de textura argilosa/média, Luvissolos, Cambissolos Argissólicos, Nitossolos Vermelhos e Háplicos, Aluminoférricos e Distroférricos, Planossolos de textura arenosa/média, Plintossolos textura média, Gleissolos textura média
Alta	Latossolos textura argilosa/muito argilosa, Argissolos e Luvissolos textura argilosa/muito argilosa, Nitossolos textura argilosa, Planossolos, Gleissolos, Vertissolos

Fonte: Sans et al. (2001).

do-lhe umidade suficiente durante praticamente todo ano.

O tipo especial no arranjo das partículas de argila nos Latossolos pode também influir na disponibilidade de água. Isto é, quando se trata de Latossolos, não há muita diferença de disponibilidade de água entre os solos quando se varia a textura, desde que a areia seja dominantemente mais fina (Assad et al., 2001). Isso ocorre porque o grau de desenvolvimento da estrutura dos Latossolos determina alta porosidade e uma boa relação entre os macroporos, mais associados à drenagem e aeração do perfil, e os microporos, responsáveis pela retenção da água no perfil e disponibilização às plantas, por capilaridade. Em alguns Latossolos mais argilosos, há um aumento no teor de argila e silte em profundidade, aumentando a sua capacidade de retenção de umidade.

Nos Latossolos de textura franco-arenosa, assim como nos Neossolos Quartzarênicos, a predominância da fração areia implica um sistema extremamente aberto, e a capacidade de retenção de água é muito reduzida, mesmo sob umidade elevada.

Solos com horizonte B textural

Nos solos com B textural, a mudança na textura entre o horizonte superficial e o subsuperficial origina uma descontinuidade no perfil e uma diferença no sistema de poros entre os horizontes. Isso quase sempre significa uma mudança (diminuição) na permeabilidade com a profundidade, principalmente nos Argissolos, que são os solos com horizonte B textural mais comuns no Brasil.

Nos Planossolos, a influência do horizonte B plânico na deficiência da drenagem se mostra ainda mais evidente, formando, por vezes, um lençol d'água suspenso no período chuvoso. Os Planossolos Háplicos, não sálicos, podem ser utilizados sem restrição em sistemas de irrigação, principalmente por inundação para cultivo de arroz, enquanto os Planossolos Nátricos apresentam sério risco de toxicidade para a maioria dos cultivos, por causa da elevada saturação por sódio trocável.

Foi registrado no levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul, representando aproximadamente 5% da área mapeada, o Brunizem Hidromórfico (Brasil, 1973), atualmente agrupado na classe dos Chernossolos (Santos et al., 2018) e que apresenta horizonte B textural ou B incipiente. Esse solo apresenta o manejo difícil, em razão da estreita faixa de umidade para o preparo, bem como de disponibilidade de águas à cultura, pela presença de argilo-minerais expansíveis, mas o arroz irrigado apresenta alta produtividade quando cultivado nesses solos (Klamt et al., 1985).

Solos hidromórficos[1]

Ocupam, geralmente, as partes de depressão da paisagem. Em condições de lençol freático elevado (Figura 13), a irrigação por superfície deve ser preferida (Scaloppi, 1986). Segundo Finkel e Nir (1959), somente quando houver um sistema de drenagem subterrânea efetivo e um controle rigoroso do volume de água aplicada é que se justificaria a irrigação superficial. Há, no entanto, a presença de solos hidromórficos de surgente (formados nas cabeceiras das



Foto: Manoel Ricardo de Albuquerque Filho

Figura 13. Solo hidromórfico (Gleissolo) da várzea do Rio Tocantins, Palmas, TO.

[1] Solos que apresentam excesso de água no perfil, ainda que esporadicamente.

veredas-várzeas ou clareiras de vegetação rasteira, com palmáceas), que apresenta inclusive declives acentuados.

Os solos hidromórficos gleizados, de coloração cinza e esbranquiçada, possuem permeabilidade muito baixa. Ao longo dos canais de drenagem, é comum a ocorrência de desbarrancamento, o qual é criado pelo desnível entre o fundo do canal e a superfície do terreno.

Os Gleissolos são solos minerais, hidromórficos, que apresentam horizonte glei dentro de 50 cm a partir da superfície ou a profundidades entre 50 cm e 150 cm, desde que imediatamente abaixo de horizonte A ou E ou horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos e atendendo, ainda, às demais exigência descritas no SiBCS (Santos et al., 2018).

São solos aptos para cultivo com arroz irrigado ou sistemas de subirrigação, uma vez que se encontram permanentemente ou periodicamente saturados por água. Se drenados, podem ser utilizados para pastagem, para hortaliças, para milho, para feijão, para cana-de-açúcar, etc. Como sugestões básicas de manejo, tem-se a drenagem artificial das partes mais alagadas e a correção da fertilidade por meio de calagens e adubações, conforme as recomendações baseadas na análise de solo, observados os demais aspectos econômicos.

O Gleissolo Tiomórfico apresenta compostos de enxofre e mosqueados (comumente alaranjados) de sulfatos e sulfetos, cuja oxidação após a drenagem artificial desses solos resulta em pH bastante ácido (pH em H_2O (1:1) < 3,5), o que torna a área inapta a qualquer uso agrícola.

Já nos Plintossolos, a presença do horizonte plíntico (Santos et al., 2018) é o principal indicativo de restrições temporárias à percolação da água ou oscilação do lençol freático. Contudo, quando o horizonte se apresenta abaixo de 40 cm de profundidade, em relevo plano, a restrição à drenagem pode representar economia no uso de água, em sistemas irrigados.

Deve ser utilizado preferivelmente com arroz irrigado ou pastagens, em razão da possibilidade de endurecimento irreversível da plintita quando esse solo sofre ressecamento no horizonte B, o que vai limitar a profundidade efetiva desses solos com relação ao desenvolvimento do sistema radicular, ao longo do tempo (Klamt et al., 1985).

Solos halomórficos[2]

Encontram-se em depressões onde pode ocorrer acumulação e excesso de sais solúveis, que são carreados pela enxurrada ou pelo lençol freático, podendo ainda ter uma origem local (autóctone), como resultado da formação do solo em áreas de influência marinha pretérita. Além disso, esses solos podem ser salinizados pelo manejo incorreto do sistema de produção, como a drenagem incompleta da água de irrigação, o uso de água com alto teor de sais solúveis, excesso de fertilizantes e outros insumos salinos.

A remoção dos sais solúveis, através de lixiviação utilizando-se água não salina, favorece a germinação de sementes e o desenvolvimento radicular. A tolerância da cultura ao excesso de sais é também um fator crítico. Geralmente, as culturas de feijoeiro, de rabanete, de rosáceas, de citros, de morango e de abacateiro são enquadradas como culturas sensíveis; a maioria dos cereais e das culturas olerícolas, como figueira, videira, melão, etc., como tolerantes; e cevada, beterraba açucareira, algodão, capim-rhodes, capim-bermuda, aspargo, espinafre, etc., como plantas muito tolerantes.

Classes de drenagem dos solos

Nos levantamentos de solos, o arejamento é inferido a partir da classe de drenagem do solo, que é determinada por um critério de avaliação comparativa entre cada solo e um conjunto de

[2] Solos com salinidade acentuada.

oito padrões referenciais. A descrição sumária desses padrões (Tabela 3) tende, na prática, a ser substituída por alguns referenciais (os exemplos), aferidos por um processo de comparação, principalmente visual. Esse processo é chamado de correlação, nas geociências.

Uma vez que as trocas gasosas e as interações do ar do solo com a fase líquida (incluindo ácidos orgânicos e exsudatos radiculares) são de difícil determinação, os critérios de correlação mencionados são muito baseados na cor, em particular nas cores gleizadas, isto é, a cor cinza é indicadora, por esse critério, de deficiência de oxigênio (estagnação de água, ainda que temporária), enquanto cores mais avermelhadas e/ou amareladas evidenciam solos bem drenados.

Mesmo considerando esse aspecto, é facilmente constatado na paisagem brasileira que os solos ricos em ferro dificilmente têm cores cinzentas, isto é, suas cores são mais vivas do que aquelas dos mais pobres em ferro, quando situados nas mesmas condições em termos de lençol freático. Assim, os solos dos terraços da Zona da Mata de Minas Gerais, de cores vivas e até um pouco avermelhadas, pelos relativamente altos teores de ferro que possuem, apresentam considerável deficiência de oxigênio na época chuvosa, prejudicando algumas culturas, como o feijoeiro, sendo até mesmo um ambiente não muito favorável às culturas mais sensíveis, como o abacateiro.

Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação

No SiBCS, embora as informações permitam, além da classificação, sua caracterização para uso e manejo em todo o território nacional, a

Tabela 3. Descrição das classes de drenagem e exemplos.

Renovação	Classe	Exemplo
Muito rápida, por excessiva permeabilidade, declives muito íngremes ou ambos	Excessivamente drenado	Solos muito arenosos e Latossolos gibbsíticos (“pó de café”)
Rápida, em perfis permeáveis com pequena diferenciação	Fortemente drenado	Latossolos de textura média
Rápida em perfis permeáveis com pequena diferenciação	Acentuadamente drenado	Latossolos de textura argilosa a média
Fácil, mas não rapidamente, tem mosqueado de redução, exceto a grandes profundidades	Bem drenado	Nitossolos, Argissolos, e Latossolos com baixos teores de ferro e cauliníticos
Lenta, perfil permanece molhado por pequena parte do tempo, camada de permeabilidade lenta e lençol freático no horizonte B, ou logo abaixo, e/ou remoção da lateral interna	Moderadamente drenado	Argissolos e Cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas
Lenta, perfil molhado por muito tempo, indício de gleização nas partes baixas	Imperfeitamente drenado	Vertissolos, Planossolos
Lençol freático na superfície ou próximo a ela em boa parte do ano	Mal drenado	Gleissolos
Lençol freático na superfície ou próximo a ela na maior parte do ano; estagnação de água	Muito mal drenado	Orgânicos, Glei Húmico (alguns), Glei Tiomórfico

Fonte: Resende (1986).

maneira complexa como os conceitos são apresentados dificulta a compreensão das pessoas menos relacionadas à pedologia. Desse modo, frequentemente essas informações não são consideradas, ou são avaliadas superficialmente ou, ainda, são interpretadas erroneamente, afetando o uso e o manejo sustentável do solo nos sistemas de produção agrícola.

Além disso, nesses sistemas de produção, é necessário levar em conta variáveis sobre características das culturas, das tecnologias e até mesmo do perfil do produtor, que não são objeto do SiBCS. Dessa forma, os manuais de interpretações técnicas complementam o SiBCS e proporcionam a interpretação mais prática das suas informações.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação (SiBCTI), com enfoque no Semiárido brasileiro (Amaral, 2011), é uma metodologia que define a potencialidade do ambiente para desenvolver determinada cultura vegetal sob determinado tipo de irrigação. Procura classificar as terras segundo a interação de vários planos de informação: solo e edafológicas, água e especificidades da planta; de modo que o ambiente seja avaliado de forma integrada, maximizando o manejo da agricultura irrigada, conforme ilustrado na Figura 14.

O objetivo do SiBCTI é, a partir de informações sistematizadas, classificar a aptidão agrícola do solo em uma propriedade para a implantação de sistemas irrigados de produção, proporcionando ao usuário um leque de alternativas para a tomada de decisão a respeito de culturas e sistemas de irrigação a serem implantados. A metodologia SiBCTI[3] disponibiliza em seu sítio diversas informações, além de um software de apoio em ambiente web, que objetiva agilizar e evitar erros na classificação. Ainda como apoio, disponibilizou-se no endereço[4] diversos ambientes didati-

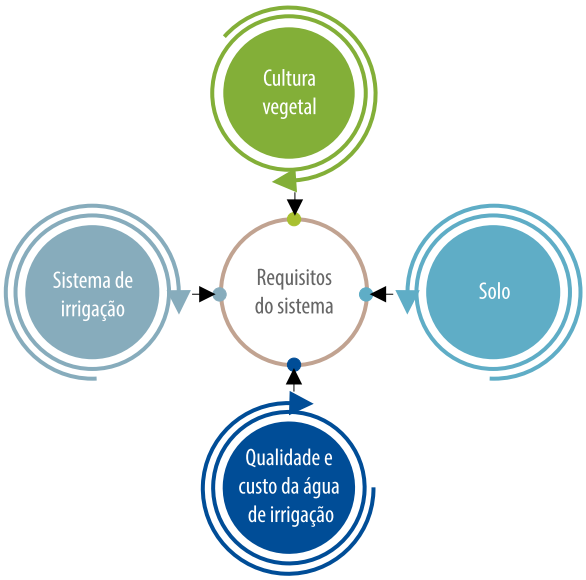


Figura 14. Planos de informação que fornecem os requisitos do Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação (SiBCTI).

Fonte: Amaral (2011).

camente classificados e comentados, utilizando a metodologia SiBCTI (Amaral; Botelho, 2015).

A base conceitual do SiBCTI é a metodologia do Bureau of Reclamation (Burec) (Estados Unidos, 1953), em que a classe de solo para irrigação é determinada por uma relação complexa de parâmetros relativos a diferentes níveis de deficiência do solo quanto à drenagem e permeabilidade, à topografia e necessidade de sistematização, à aptidão agrícola, ao uso e manejo do solo e à condutividade hidráulica, principalmente. Contudo, a experiência acumulada, no Brasil, destacadamente no manejo dos solos e sistemas de irrigação da região semiárida, possibilitou o aperfeiçoamento do método Burec, com eliminação de informações desnecessárias, ponderação de parâmetros considerados redundantes e estabelecimento de novos enfoques para a relação custo-benefício potencial da área analisada. Desse modo, o SiBCTI sintetiza as classes de terras para irrigação conforme o parâmetro mais limitante ligado ao solo ou à qualidade e ao custo de captação da água de irrigação para cada classe (Tabela 4).

[3] Disponível em: http://sibcti.cnps.embrapa.br.

[4] Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1039482/curso-sobre-o-sibcti-embasamento-teorico-e-pratico-com-enfoque-na-regiao-semiarida.

Tabela 4. Simbologia referente aos parâmetros relacionados ao solo e à qualidade e ao custo de captação da água para irrigação no Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação (SiBCTI).

Parâmetros ligados ao solo	
Simbologia	**Parâmetro**
Z	Profundidade (cm)
V	Textura (g dag^{-1})
C	Capacidade de água disponível (mm)
Y	Ca + Mg ($cmol_c\ dm^{-3}$)
T	CTC Total ($cmol_c\ dm^{-3}$)
M	Alumínio trocável ($cmol_c\ dm^{-3}$)
H	pH em água
S	Saturação por sódio trocável (%)
E	Condutividade elétrica no extrato saturado ($dS\ m^{-1}$)
K	Condutividade elétrica ($cm\ h^{-1}$)
I	Velocidade de infiltração básica ($cm\ h^{-1}$)
W	Profundidade da zona de redução (cm)
A	Mineralogia da argila
D	Espaçamento entre drenos (m)
G	Declividade do terreno (%)
P	Pedregosidade
R	Rochosidade
B	Posição na paisagem, zona abaciada.
Parâmetros ligados à qualidade e custo de captação da água de irrigação	
Simbologia	**Parâmetro**
e	Condutividade elétrica ($dS\ m^{-1}$)
s	Relação de absorção de sódio, RAS ($mmol_c\ L^{-1}$)
c	Concentração de cloreto ($mg\ L^{-1}$)
f	Concentração de ferro ($mg\ L^{-1}$)
b	Concentração de boro ($mg\ L^{-1}$)
d	Distância de captação da água (km)
h	Diferença de cota da captação

Fonte: Amaral (2011).

Parâmetros do Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação relacionados ao solo

Profundidade do solo (Z): é a espessura que o perfil apresenta sem impedimento à livre penetração do sistema radicular, ou seja, sem barreira física como rocha consolidada, duripã, fragipã, horizontes litoplíntico, plânico, plíntico ou elevado lençol freático. É determinada em cm e considera duas situações: profundidade até a camada semipermeável (permeabilidade limitada, mas existente) e profundidade até a camada impermeável (rocha consolidada, por exemplo). Esse parâmetro influencia tanto na propensão da terra à salinização pela altura do lençol freático, quanto no manejo mecanizado do solo, como instalação de drenagem entubada, quando a camada permeável se encontra a menos de 100 cm de profundidade.

Textura (V): diz respeito ao grupamento textural, conforme descrito no SiBCS. Considerando-se apenas esse parâmetro, solos com textura médio-arenosa ou mais grosseira (franco-arenosa e arenosa) são considerados de melhor resposta econômica em sistemas irrigados que aqueles de textura mais fina e com mineralogia de argilas 2:1, como os Vertissolos.

Capacidade de água disponível (C): é o teor de água do solo compreendido entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). É o conteúdo de água que o solo pode reter em seu perfil depois de cessada a drenagem natural e que está disponível às plantas.

$$Cz = (CC - PMP)DZ/100 \quad (1)$$

em que C é a camada ou capacidade ou lâmina de água disponível para a camada Z; CC é o teor de água na capacidade de campo ou umidade equivalente, dependendo da textura do solo (%); PMP é o teor de água no ponto de murcha permanente (%); D é a densidade do solo; e Z é a camada considerada (20 cm, 60 cm ou 120 cm).

Ca + Mg (Y): embora sejam macronutrientes muito importantes e requeridos em grandes quantidades pelas culturas, as tecnologias modernas de correção e fertilização do solo reduziram o peso desse parâmetro no sistema, mas

as informações ainda são requeridas, para as camadas 0–20 cm, 20 cm–60 cm e 60 cm–120 cm.

Valor T (*T*): refere-se à capacidade de troca de cátions, conforme descrita no SiBCS e também perdeu importância relativa no sistema em função do avanço tecnológico e consequente facilidade de correção por meio da fertilização do solo.

Alumínio trocável (*M*): parâmetro descrito conforme SiBCS, considerado pouco restritivo em função da fácil correção por calagem e gessagem.

pH do solo medido em água (*H*): caracteriza a acidez ou alcalinidade do solo, sendo considerado ideal para a maioria das culturas quando se encontra na faixa de 5,0 a 7,0. Sua correção é fácil e considerada de baixo custo apenas quando está na faixa de acidez moderada a neutra. Em solos com problema de alcalinidade ou excesso de sódio, o problema é de difícil solução, comprometendo tanto a qualidade do solo quanto a produtividade da cultura.

Saturação por sódio trocável (*S*): expressa em porcentagem de sódio trocável (100 $Na\ T^{-1}$), indica a presença de solos salino-sódicos ou sódicos e tem elevado custo de recuperação, podendo tornar a terra inapta ao uso agrícola em função da severidade do problema, frente às tecnologias atuais de manejo. As culturas apresentam sensibilidade variável à concentração do sódio na solução do solo, sendo consideradas sensíveis aquelas com intolerância a teores menores de 15%, como o milho e o feijão, e semitolerantes aquelas que suportam teores de 15% a 40%, como a cana-de-açúcar.

Condutividade elétrica (*E*): é uma medida indireta da salinidade do meio, relacionada aos constituintes iônicos totais na solução. Complementada pela saturação por sódio trocável e o pH do solo, fornece informação sobre a salinidade ou sodicidade, bem como situações transicionais. A salinidade é considerada negligenciável a valores de E entre 0 e 2,0 dS m^{-1} (a 25 °C), enquanto somente poucas culturas, muito tolerantes, produzem satisfatoriamente em solos com E maior que 16 dS m^{-1} (a 25 °C). A maioria das culturas agrícolas tem sua produtividade afetada em algum nível com valores de E entre 2,0 dS m^{-1} e 8,0 dS m^{-1} (a 25 °C).

Condutividade hidráulica (*K*): é o volume de água que atravessa por unidade de tempo uma determinada área do solo, impulsionada por uma diferença de potencial. Dá ideia da facilidade com que a água é transportada no perfil do solo. É função de propriedades como distribuição, tamanho e forma dos constituintes sólidos do solo, tortuosidade, tamanho e distribuição dos poros. É definida como muito lenta quando menor que 0,4 cm h^{-1}, lenta (entre 0,4 cm h^{-1} e 2,0 cm h^{-1}), moderada (entre 2,0 cm h^{-1} e 8,0 cm h^{-1}), rápida (entre 8,0 cm h^{-1} e 12 cm h^{-1}) ou muito rápida, quando maior que 12 cm h^{-1}.

Velocidade de infiltração (*I*): é uma determinação complementar à condutividade hidráulica, constituindo na aferição da velocidade de entrada da água no solo, sendo fundamental para a escolha do método de irrigação a ser empregado, principalmente o sistema por superfície, em que subsidia os cálculos de comprimento de sulco. Para sistemas irrigados por aspersão, por exemplo, os valores menos limitantes de velocidade básica de infiltração (VIB) na classe 01 do SiBCTI ficaram entre 1,2 cm h^{-1} e 20 cm h^{-1} para as culturas da cebola e do melão (Amaral, 2011).

Profundidade da zona radicular de redução (*W*): compreende a superfície superior de uma zona de saturação, ou seja, representa a variação da altura do lençol freático e tem grande efeito sobre o desenvolvimento do sistema radicular da maioria das culturas. Assim, quanto mais próxima à superfície do solo, mais prejudicial ao sistema de produção.

Mineralogia da argila (*A*): fornece informações para o entendimento do comportamento físico do solo e, consequentemente, sobre a condutividade hidráulica, drenagem, adaptação a dife-

rentes tipos de sistemas de irrigação, manejo da fertilidade e desenvolvimento das culturas.

Espaçamento entre drenos (*D*): é relacionado à necessidade de implementação de obras de drenagem subterrânea e afeta diretamente a economicidade da implantação e manutenção da irrigação eficiente do sistema. Quanto menor a condutividade hidráulica de um solo, menor o espaçamento entre drenos e maior o custo do sistema.

Declividade (*G*): relacionada ao gradiente de inclinação do terreno, esse parâmetro influencia, principalmente, os sistemas de irrigação por superfície, podendo tanto afetar a distribuição da lâmina d'água aplicada quanto provocar a erosão do solo. Incide diretamente sobre os custos do sistema e pode tornar inviável o uso da terra para a produção irrigada.

Pedregosidade (*P*): afeta tanto o volume útil explorado pelo sistema radicular das culturas, quanto a uniformidade da lâmina d'água, podendo ainda tornar inviável o preparo do terreno. Contudo, é contornável, dependo da intensidade e profundidade da ocorrência no solo.

Rochosidade (*R*): é um parâmetro de efeitos mais severos que a pedregosidade, que interfere fortemente no uso de implementos agrícolas e irrigação por superfície.

Posição na paisagem (*B*): refere-se, principalmente, às restrições de terrenos em áreas abaciadas e depressões, onde não existe a possibilidade de drenagem natural para eliminação do excesso de sais. Essas áreas apresentam elevado risco de salinização em sistemas irrigados, sendo esse um parâmetro restritivo para enquadramento em outras classes do sistema, que não a classe 6 (apresentada no item Classes de Irrigação do Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação (SiBCTI) deste capítulo).

Em suma, a classificação das terras para irrigação proposta no SiBCTI não prescinde do SiBCS. Ao contrário, a precisão do método é tanto maior quanto mais aprofundada for a caracterização do solo e das unidades de mapeamento nos níveis categóricos do SiBCS. É desejável, assim, utilizar informações de levantamentos pedológicos detalhados ou ultradetalhados (de alta intensidade e com escala grande), a fim de determinar os parâmetros de solos exigidos no SiBCTI. O sistema foi formulado de maneira similar à classificação por árvore de decisão, com regras e parâmetros pré-estabelecidos por critérios especialistas para cada classe de terra, ou seja, regras construídas pelo conhecimento relativo à terra (solo e ambiente) e à água, que permite a entrada ou seleção de dados para cada atributo do sistema. Em suma, o sistema define, para cada situação específica (solo x sistema de irrigação x cultura vegetal e qualidade e custo da água), um intervalo de produtividade esperada, baseado em informações de campo, complementado ou não com bibliografia (Amaral, 2011).

Da mesma forma dos parâmetros relacionados ao solo, descritos acima, o SiBCTI (Amaral, 2011) apresenta, detalhadamente, os parâmetros do sistema relacionados à qualidade e ao custo de captação da água para irrigação, resumidos na Tabela 4.

Parâmetros do Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação relacionados à água de irrigação

Não só as variáveis de solo devem ser consideradas em um sistema de classificação de terras para irrigação, mas também aquelas referentes ao principal insumo, que é a água, bem como a interação entre elas, uma vez que de nada adianta a existência de solos de boa aptidão se a água não apresenta a mesma qualidade ou apresenta alto custo de captação. Portanto, o sistema de classificação de terras deve ser entendido como um ente único, em que as características da água fazem parte do todo.

Condutividade elétrica (*e*): a determinação da condutividade elétrica é uma maneira indireta de inferir a quantidade de sais presentes em uma solução. Quanto maior a condutividade, maior a concentração. A adequação da água para fins de irrigação não depende

apenas do teor total dos sais dissolvidos, mas também dos tipos presentes. À medida que o conteúdo total dos sais aumenta, os problemas no solo e nas plantas se agravam, o que requer o uso de práticas especiais de manejo, com o objetivo de manter a produtividade das culturas em níveis aceitáveis. As águas de alta salinidade requerem lixiviação contínua, a fim de que não ocorra risco de nível freático alto, o que torna praticamente impossível manter por longo prazo a agricultura irrigada, sem a instalação de adequado sistema de drenagem. Se a drenagem for suficiente, o controle da salinidade exigirá apenas bom manejo para assegurar a água necessária às culturas e à lixiviação dos sais dentro dos limites de tolerância das plantas.

Relação ou razão de adsorção de sódio (*s*): esta variável expressa o risco que o alto teor de sódio na água de irrigação poderá trazer não só ao solo (sodificação) como, nesse caso, também às plantas cultivadas, principalmente se o sistema de irrigação considerado for o de aspersão, bem como poderá trazer danos ao próprio sistema de irrigação.

Teores relativamente altos de sódio em relação aos de cálcio e magnésio na água de irrigação, normalmente superiores a 3:1, ou mesmo baixos valores absolutos de cálcio no solo, tendem a prejudicar suas propriedades físico-químicas, desequilibrando-o estruturalmente e por fim reduzindo sua permeabilidade. Esse impacto geralmente ocorre de forma mais intensa nas camadas superficiais.

Cloreto (*c*): variável importante por originar a toxicidade mais frequente em água de irrigação. É um elemento tóxico para boa parte das plantas cultivadas quando presente em grande quantidade, principalmente se o sistema de irrigação considerado for o de aspersão.

Ferro (*f*): variável que tem sua importância relacionada mais à distribuição de água no sistema de irrigação do que pela sua fitotoxicidade propriamente dita. Ainda assim, seu maior impacto está restrito ao sistema de irrigação do tipo localizado, porque pode obstruir os emissores e formar incrustações nas tubulações por causa da baixa velocidade do fluxo de água nesse sistema, não tendo praticamente influência nos sistemas convencionais.

A qualidade da água de irrigação, com relação a essa variável, é influenciada pela natureza dos solos das áreas de captação, naturalmente ricos em ferro, destacando-se os Latossolos e Espodossolos Ferrocárbicos, compondo a bacia hidrográfica ou mesmo, se a água de irrigação é proveniente de represas e açudes com muita matéria orgânica em decomposição, oriunda de capins, taboa (*Typha latifolia*), junco (*Cyperus giganteus* ou *Papyrus radiatus*) e aguapés (*Eicchornia crassipes*) principalmente, normalmente ricos em ferro.

Boro (*b*): o boro é um elemento essencial para a nutrição vegetal, embora seja requerido em quantidades diminutas (0,03 mg L^{-1} a 0,04 mg L^{-1}). Porém, em concentrações um pouco maiores, pode ser muito fitotóxico. Logicamente, o nível de concentração que o torna tóxico varia de acordo com a espécie vegetal.

Dependendo da quantidade, pode afetar as culturas quando presente no solo nos três sistemas de irrigação contemplados no sistema, e não apenas no de aspersão, como salientado para as variáveis anteriores.

Diferença de cota (*h*) e Distância da captação d'água (*d*): variáveis importantes não só pelo aspecto da sustentabilidade do sistema solo x planta x qualidade da água x sistema de irrigação, mas também por questão de economicidade. Dessa forma, de nada adianta haver um solo de elevado potencial agrícola ou mesmo água para irrigação de boa qualidade, se o custo de captação for elevado. É uma variável difícil de se ponderar, pois, com o barateamento do maquinário e da energia, tarifas diferenciadas por horário e agricultor, a economicidade da captação torna-se extremamente dinâmica, variando de acordo com o tempo e com a região considerada.

Classes de irrigação do Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação

De acordo com a intensidade e interação de cada parâmetro do solo, da água de irrigação e do sistema de irrigação afeitos à especificidade de cada cultura vegetal componente de seu banco de dados, o SiBCTI classifica essa situação, esse ambiente, esse cenário em seis classes de irrigação. Cada classe é definida de acordo com o desvio, com a perda de produtividade sustentável proporcionada por cada parâmetro citado, em relação a uma classe sem limitações ou poucas limitações produtivas ou ambientais (Figura 15).

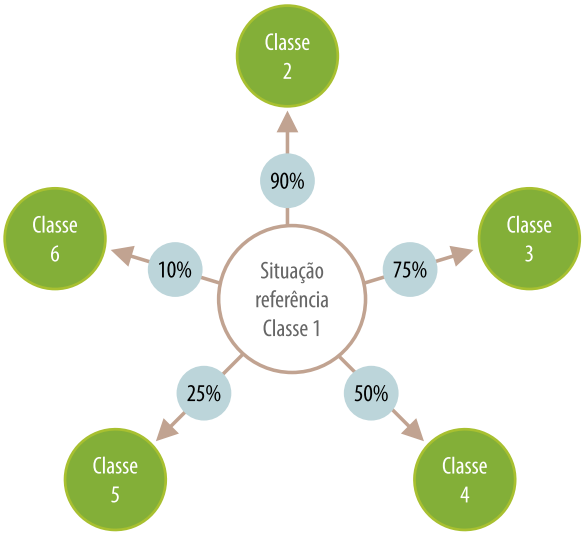


Figura 15. Conceituação das classes de irrigação do Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação (SiBCTI).

Fonte: Amaral (2011).

Classe 1: terra que, explorada em alto nível tecnológico, para determinada cultura, em determinado sistema de irrigação, apresenta a mais alta produtividade sustentável e baixo custo de produção. Situação referência.

Classe 2: terra que, explorada em alto nível tecnológico, para determinada cultura, em determinado sistema de irrigação, apresenta um ou mais fatores que afetam os custos de desenvolvimento e/ou produção sustentável, de tal modo que a produtividade média corresponda aproximadamente a 90% da situação de referência.

Classe 3: terra que, explorada em alto nível tecnológico, para determinada cultura, em determinado sistema de irrigação, apresenta um ou mais fatores que afetam os custos de desenvolvimento e/ou produção sustentável, de tal modo que a produtividade média corresponda aproximadamente a 75% da situação de referência.

Classe 4: terra que, explorada em alto nível tecnológico, para determinada cultura, em determinado sistema de irrigação, apresenta um ou mais fatores que afetam os custos de desenvolvimento e/ou produção sustentável, de tal modo que a produtividade média corresponda aproximadamente a 50% da situação de referência.

Classe 5: terra que, explorada em alto nível tecnológico, para determinada cultura, em determinado sistema de irrigação, apresenta um ou mais fatores que afetam os custos de desenvolvimento e/ou produção sustentável, de tal modo que a produtividade média corresponda aproximadamente a 25% da situação de referência. São terras que requerem estudos complementares para avaliação de seu aproveitamento sustentável sob irrigação.

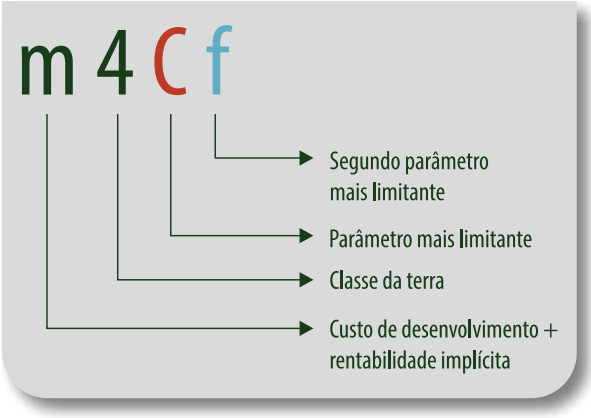
Classe 6: terra que, mesmo explorada em alto nível tecnológico, para determinada cultura, em determinado sistema de irrigação, apresenta um ou mais fatores que implicam uma produção não sustentável e/ou gravosa, correspondendo a uma produtividade média equivalente a 10% da situação de referência.

Categorização do Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação

Após o usuário preencher todos os campos das variáveis de solo e água, ele tem à sua escolha um conjunto de culturas vegetais e diferentes sistemas de irrigação. Caso o usuário não queira uma avaliação específica, ele ainda pode optar por uma classificação generalizada, que funcio-

na aproximadamente como a classificação proposta pelo Burec.

Feita a solicitação da classificação do ambiente para irrigação, o programa fará uma crítica das informações fornecidas pelo usuário. Estando sem pendências e sem valores anormais, o programa cruzará todos os dados relacionados aos diferentes planos de informação: solo x cultura vegetal x qualidade e custo da água x sistema de irrigação e apresentará a classificação do ambiente com uma fórmula do tipo (Amaral, 2011):



em que *m* é o subscrito antes da classe, dá ideia da ordem de grandeza da possível rentabilidade esperada com base no cruzamento de dois temas: rentabilidade clássica de dois grupos de culturas em que foram divididas todas as culturas componentes da base de dados do SiBCTI; e custo da captação da água, representada pela distância e diferença de cota; *4* é a classe, representa a produção relativa do ambiente avaliado em relação a uma situação de referência; *C* é o primeiro subscrito após a classe, representa o parâmetro com maior grau de limitação, portanto, aquele com maior importância na definição da classe. Pode ser parâmetro ligado ao solo (letra maiúscula) ou a água de irrigação (letra minúscula); e *f* é o segundo subscrito após a classe, representa o segundo parâmetro com maior grau de limitação, portanto, aquele com importância superada apenas pelo parâmetro principal na definição da classe. Pode ser parâmetro ligado ao solo (letra maiúscula) ou a água de irrigação (letra minúscula).

Referências

AMARAL, F. C. S. do (ed.). **Sistema brasileiro de classificação de terras para a irrigação**: enfoque na região semiárida. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 164 p.

AMARAL, F. C. S. do; BOTELHO, F. P. (org.). **Curso sobre o SiBCTI**: embasamento teórico e prático com enfoque na região Semiárida. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2015. 73 p. (Embrapa Solos. Documentos, 190).

ASSAD, M. L. L.; SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; ZULLO JÚNIOR, J. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 588-596, 2001. Número especial.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro, 1973. 431 p. (Boletim técnico, 30).

DUDAL, R.; NACHTERGAELE, F. O.; PURNELL, M. F. The human factor of soil formation. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 17., 2002, Bangkok, Thailand. **Abstracts**. Bangkok: Soil Science Society, 2002. v. 2, p. 93. (Symposium, 18).

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83 p. (EMBRAPA-SNLCS. Miscelanea, 1).

ESTADOS UNIDOS. Department of the Interior. **Reclamation manual**: irrigated land use: land classification. Denver, 1953. v. 5, pt. 2, 54 p.

FAO. **World reference base for soil resources**. Rome, 2014. 120 p. (FAO. World Soil Resources Report, 106).

FINKEL, H. J.; NIR, D. Gravity vc. Sprinking methods of irrigation a comparative study. **Soil Science**, v. 87, p. 16-24, July 1959.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11074**: soil quality: vocabulary. Geneva, 2015. 5 p.

JENNY, H. **Factors of soil formation**: a system of quantitative pedology. New York: McGraw-Hill, 1941. 191 p.

KLAMT, E.; KAMPF, N.; SCHNEIDER, P. **Solos de várzeas no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1985. 42 p. (Boletim técnico, 4).

MONTANARELLA, L.; BADRAOUI, M.; CHUDE, V.; COSTA, I. dos S. B.; MAMO, T.; YEMEFACK, M.; AULANG, M. S.; YAGI, K.; HONG, S. Y.; VIJARNSORN, P.; ZHANG, G. L.; ARROUAYS, D.; BLACK, H.; KRASILNIKOV, P.; SOBOCA, J.; ALEGRE, J.; HENRIQUEZ, C. R.; MENDONCA-SANTOS, M. de L.; TABOADA, M.; VICTORIA, D. E.; ALSHANKITI, A.; PANAH, S. K. A.; EL MUSTAFA EL SHEIKH, E. A.; HEMPEL, J.; PENNOCK, D.; CAMPS ARBESTAIN, M.; MCKENZIE, N. (ed.). **Status of the world's soil resources**: main report. Rome: FAO, 2015. 648 p.

MUNSELL COLOR. **Munsell soil color charts**. Grand Rapids, 2015. Disponível em: <http://jmnvvs.dik61.ru/imge?key=munsell+soil+color+chart+download>. Acesso em: 20 out. 2017.

REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; GUBIANI, P. I.; KAISER, D. R.; MINELLA, J. P. G.; REINERT, D. J. Hidrologia do solo, disponibilidade de **á**gua às plantas e zoneamento agroclimatico. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 7, p. 1-54, 2011.

REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; URACH, F. L.; CARLESSO, R. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1547-1560, Nov./Dec. 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000600004.

RESENDE, M. Clima do solo: suas relações com o ambiente agrícola. **Informe Agropecuário**, v. 12, p. 43-59, 1986.

SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; GUIMARÃES, D. P.; AVELLAR, G. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura de milho na Região Centro-Oeste do Brasil e para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 527-535, 2001. Número especial.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181234/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358172.epub>. Acesso em: 10 ago. 2018.

SCALOPPI, E. J. Critérios básicos para seleção de sistemas de irrigação. **Informe Agropecuário**, v. 12, p. 54-63, 1986.

Capítulo 4

Dinâmica da água na planta

Frederico Ozanan Machado Durães
Paulo César Magalhães

Introdução

A água é um insumo fundamental para a produção vegetal por participar dos processos vitais da planta. Neste capítulo, descrevem-se o movimento de água e de solutos por meios do sistema-sol-planta-atmosfera, e, depois, o movimento de solutos e da água dos locais de fotossíntese às partes não assimiladoras da planta. Descreve-se ainda toda a estrutura hidrológica de plantas vasculares envolvidas na transferência de água do solo para a atmosfera, especialmente para o processo da transpiração, que é o principal fator determinante do movimento da água através da planta.

O conteúdo abordado permite uma extensa compreensão e análise da água de passagem no sistema solo-planta-atmosfera e dos diversos fatores envolvidos nesse transporte.

Água no sistema solo-planta-atmosfera

A água atinge o solo principalmente como chuva. Uma parte é armazenada no próprio solo, outra parte é drenada através de seu perfil para as camadas mais profundas e, uma vez estando o solo já saturado, outra parte pode fluir através da superfície para drenos e cursos d'água. Da água contida no solo, uma porção evapora através de sua superfície e outra é absorvida pelas raízes das plantas e transpirada para a atmosfera através de suas folhas. Essa circulação da água da atmosfera para o solo e seu retorno à atmosfera compreende o ciclo hidrológico.

As diversas formas de fornecimento de água para as plantas são derivadas principalmente da precipitação, do lençol freático ou do movimento de água para cima ou lateralmente dentro do solo. A água suplementar para irrigação pode ser obtida de cursos d'água, lagos, poços comuns ou poços artesianos.

Apenas parte da água que um solo pode reter fica disponível para as plantas. Essa parte é comumente aceita como sendo a água retida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. É fundamental, entretanto, que se compreendam as forças responsáveis pelo movimento de água no sistema solo-planta-atmosfera, que são os gradientes de potenciais gravitacional, matricial, de pressão e osmótico, sendo o movimento da água um processo espontâneo à procura de um potencial (ou estado de energia) mais baixo.

Em plantas que se encontram transpirando água em taxas médias e altas, o potencial muito negativo da água da atmosfera é o responsável pela grande perda de água pelas folhas, e, em consequência, a água líquida nos terminais do xilema na folha assume potenciais bem negativos. Essa grande diferença de potencial de água entre as folhas e o solo é que causa o grande fluxo de água na planta, isto é, da absorção de água. Essa absorção é geralmente denominada absorção passiva.

Em plantas que se encontram baixas taxas de transpiração, o que acontece em casos de: a) atmosfera saturada (ou perto da saturação); b) pouca energia disponível para o processo de evaporação; c) plantas em dormência (sem ou quase sem folhas), a principal força responsável pelo fluxo de água é o gradiente de potencial osmótico. A água na planta assume pressão positiva (pressão de raiz, por exemplo, gutação

nas bordas das folhas, que acontece pela madrugada, quando praticamente não há transpiração, e o caso da seiva que escorre de plantas dormentes recém-podadas). Essa absorção é denominada absorção ativa.

A estrutura de partes das plantas vasculares envolvidas na transferência de água do solo para a atmosfera, i.e., o sistema radicular, tem tecidos capazes de absorver água líquida e transferi-la para os vasos do xilema e para as células das folhas, que recebem a água das extremidades superiores dos vasos do xilema e a evaporam através de suas superfícies, para os espaços intercelulares, de onde ela retorna à atmosfera principalmente através dos estômatos (Taiz; Zeiger, 2004).

A maior ênfase neste capítulo é dada para os processos de absorção e transporte de água em plantas vasculares; transpiração e medição do status de água na planta.

Movimento de água

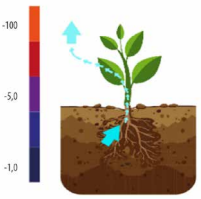
A energia potencial total da água é a soma de todas as energias. Por simplicidade, ela é chamada de potencial total, e o símbolo mais frequente é ψ. Cada uma de suas partes é uma componente, e assim temos:

$$\psi = \psi_g + \psi_p + \psi_m + \psi_{OS} + ... \quad (1)$$

em que ψ_g é o componente gravitacional; ψ_p é o componente de pressão; ψ_m é o componente matricial; ψ_{OS} é o componente osmótica; e as reticências (...) indicam que podem existir outras formas de energia, mas em geral elas são desprezíveis.

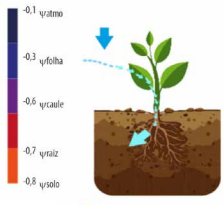
Portanto, para calcular o estado de energia da água, em dado ponto no solo, é necessário calcular cada componente e fazer a soma.

Diferenças de potencial são um indicativo da tendência de movimento da água. Toda vez que no sistema em consideração houver diferenças de potencial total ψ, pode haver movimento de água, uma vez que a diferença de potencial cria um gradiente de potencial, e, como este é uma força, então a água pode se mover. Ao contrário, quando o ψ não varia entre os pontos de um sistema, gradiente ($grad$) $\psi = 0$, a água encontra-se em equilíbrio (Resende et al., 2003).



Por exemplo, em uma cultura agrícola, em pleno desenvolvimento, se o potencial da água no solo é da ordem de -1 atm (-0,1 MPa), na planta da ordem de -5 atm (-0,5 MPa) e na atmosfera da ordem de -100 atm (-10 MPa), a tendência natural da água é passar do solo para a planta e da planta para a atmosfera. Desse movimento resulta o fluxo de evapotranspiração.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.



Assim, se as camadas superficiais do solo estiverem mais úmidas que as camadas mais profundas, Ψ é maior que nas primeiras, e a água tende a drenar dentro do perfil do solo. Isso é comum logo após uma chuva não muito intensa.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.



No caso de uma chuva prolongada e intensa, o perfil fica úmido até grandes profundidades, e Ψ_m é praticamente nulo. Nessas condições, Ψ_g é importante, e grad Ψ é praticamente igual a grad Ψ_g, e a água drena dentro do perfil (drenagem interna).

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Quando a superfície do solo se seca por causa do processo de evaporação, o potencial total ψ das camadas superficiais fica mais negativo que o das camadas mais profundas. Como resultado, aparece um movimento ascendente de água no perfil do solo. Assim, vê-se que a água pode mover-se em qualquer sentido e direção, de cima para baixo, de baixo para cima, lateralmente, etc., mas sempre de acordo com a distribuição do potencial total ψ.

Além do potencial total da água ψ, uma característica do solo, denominada condutividade hidráulica, afeta o movimento da água. A condutividade hidráulica é um parâmetro que mede a facilidade com a qual o solo transmite água. Portanto, quanto maior a condutividade hidráulica, tanto maior a facilidade com que a água se move em um solo.

A condutividade hidráulica do solo K é medida em volume de água Q (cm^3) que passa pela unidade de área A (cm^2) na unidade de tempo t (s). Assim:

$$K = Q/A \times t = cm^3/cm^2 \times s = cm/s \quad (2)$$

resultando uma altura de água por unidade de tempo. Na prática, como a água do solo se move relativamente devagar, são comuns as unidades cm min^{-1}; cm h^{-1}; cm dia^{-1}; mm min^{-1}; mm h^{-1} e mm dia^{-1}.

Para um dado solo, K é tanto maior quanto maior sua umidade θ. O valor máximo de K é quando o solo se encontra saturado ($\theta = \theta_s$) e é denominado de condutividade hidráulica saturada K_0 (infiltração básica). Com o secamento do solo, i.e., com o decréscimo de θ, a condutividade hidráulica diminui drasticamente até que seu valor chega a ser praticamente zero para um solo seco. Isso significa que um solo molhado tem a capacidade de conduzir mais água que um solo seco.

Um fluxo de água no solo q, dado em mm dia^{-1}, integrado sobre um período de n dias, resulta em um total de água dado em mm. O fluxo de água é descrito pela equação de Darcy (que quantifica o movimento de água no solo):

$$q = -K \times grad\ \Psi \quad (3)$$

em que o fluxo de água q é igual ao produto da condutividade hidráulica K pelo gradiente de potencial total Ψ. O sinal menos aparece apenas porque a força F que move a água é igual a $-grad\ \Psi$.

O fluxo de água q tem a mesma dimensão da condutividade hidráulica K, i.e., cm min^{-1}, cm h^{-1}, pois se trata também de uma quantidade de água que passa por uma dada área em dado tempo. Assim, se tivermos um fluxo de água de 0,5 cm h^{-1}, isso significa que 5 L de água passam por uma área de 1 m de solo em 1 hora.

A Equação de Darcy nos mostra que o movimento de água no solo, medido por meio de um fluxo, é o produto de K por $grad\ \Psi$. Portanto, o produto dos dois fatores é que determina o fluxo.

Isso é importante de ser notado, pois se a condutividade hidráulica do solo for grande, isso não implica necessariamente um fluxo grande. Se o gradiente de Ψ for muito pequeno, não haverá fluxo grande, mesmo se a condutividade hidráulica for grande.

O fluxo de água na planta e na atmosfera obedece a leis semelhantes, sendo que a condutividade hidráulica desses sistemas é sempre bem grande, não havendo limitação para o fluxo. Na maioria dos casos, quem determina o fluxo de água é o $grad\ \Psi$.

A fim de exemplificar melhor o que foi visto, faremos a análise do movimento de água em um sistema constituído de uma cultura qualquer



Assim, em um solo seco, mesmo na preença de um gradiente de potencial relativamente grande, o fluxo de água é praticamente nulo. Pode, portanto, haver uma variedade grande de combinações de K e de $grad\ \Psi$, cada uma determinando um fluxo q de água.

(por exemplo, milho) em pleno desenvolvimento. A Figura 1 mostra esquematicamente uma cultura de milho, indicando um ponto genérico A no solo, outro B na raiz da planta, outro C na folha e outro D na atmosfera. Durante um dia normal, ensolarado, o potencial total de água no solo Ψ_A gira em torno de -0,1 atm a -2 atm (-0,01 MPa a -0,02 MPa), na raiz Ψ_B em torno de -1 atm a -5 atm (-0,1 MPa a -0,5 MPa), na folha Ψ_C em torno de -3 atm a -10 atm (-0,3 MPa a -1 MPa) e na atmosfera Ψ_D em torno de -50 atm a -200 atm (-5 kPa a -20 kPa). Como:

$$\Psi_{A\ (solo)} > \Psi_{B\ (raiz)} > \Psi_{C\ (folha)} > \Psi_{D\ (atmosfera)}$$

O movimento da água dá-se de A para B, para C e, finalmente, para D, i.e., do solo para a planta e desta para a atmosfera. Esse movimento dá-se espontaneamente, uma vez que a água move-se sempre para um estado de energia mais baixo, que no caso está na atmosfera; daí a demanda atmosférica. É, portanto, errado dizer que a planta retira água do solo. A água vai espontaneamente do solo para a planta e, para o observador, tudo se passa como se a planta succionasse a água do solo. As plantas não consomem energia nesse processo. É, porém, comum falar-se em absorção de água pelas plantas.

Na Figura 1, o movimento de água de A para B é o movimento no solo. Ele é regido pela Equação de Darcy ($q = -K \times grad\ \Psi$) e é, portanto, proporcional ao $grad\ \Psi$ entre A e B e à condutividade hidráulica do solo K entre A e B. Enquanto esse fluxo de água $q = -K\ grad\ \Psi$ atender à demanda atmosférica, o que significa que toda água perdida por transpiração nas folhas é reposta pelo solo, a planta se desenvolve adequadamente, permanece túrgida, sem entrar em murcha. Quando o fluxo de água q no solo não atender à demanda evaporativa da atmosfera, a plan-

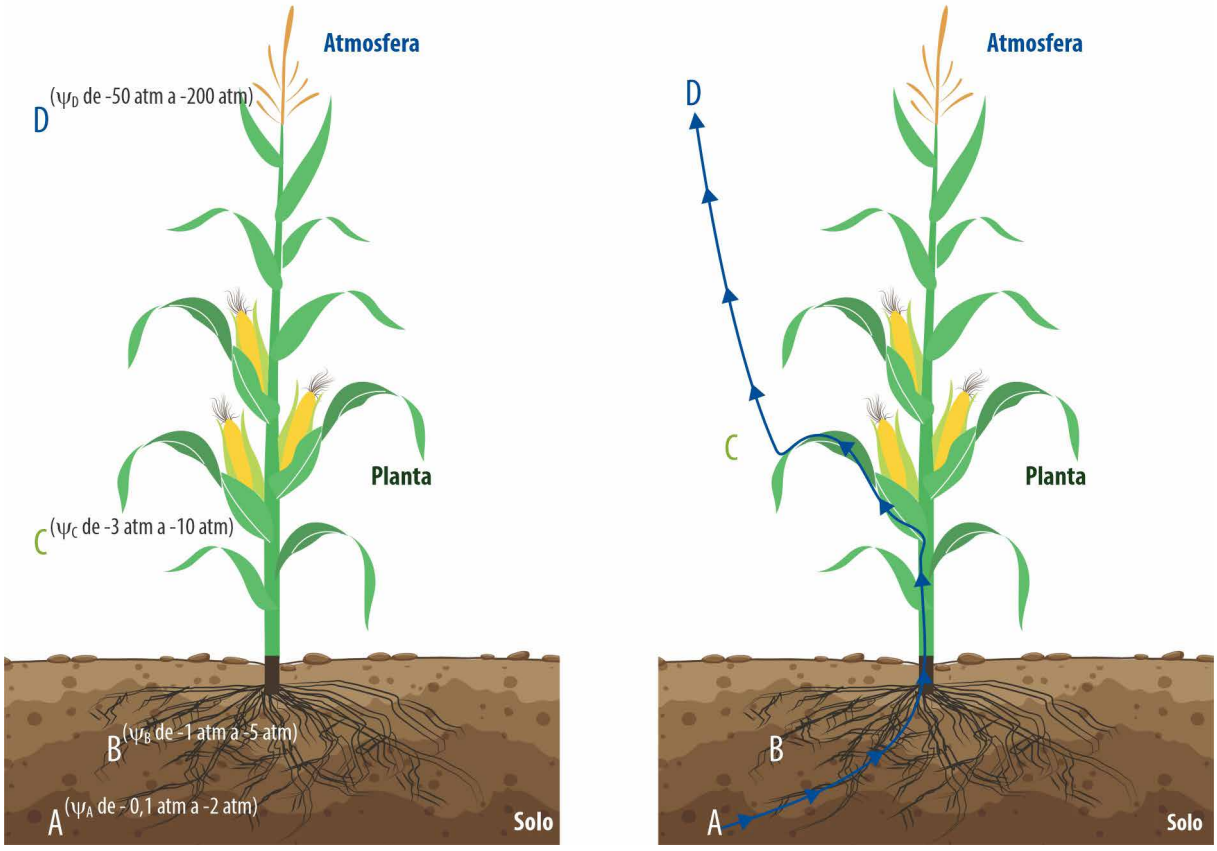


Figura 1. Esquema do movimento de água no sistema solo-planta-atmosfera.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

ta passa a perder sua própria água e entra em murcha. Uma pequena murcha nas horas mais quentes do dia é comum e tolerável, não afetando sensivelmente a produtividade agrícola. Quanto maior a perda de água e mais longo o período de murcha, tanto mais irreversível o processo, ficando a produtividade ameaçada e, em casos extremos, a planta morre. Em razão disso, deve-se procurar saber quais os níveis de água no solo, nos quais a água é disponível às plantas, não havendo falta nem excesso.

O movimento de água na planta, de B para C, dá-se através do sistema condutor de água da planta, denominado de xilema. Trata-se de feixes de células de forma tubular, próprios para a condução de água. Uma equação do mesmo tipo $q = -K\ grad\ \Psi$ rege o movimento, sendo que a condutividade K do xilema é alta em comparação à do solo, e seu valor é praticamente constante. Apenas em casos extremos de murcha severa a continuidade dos feixes de tubos do xilema é quebrada, e a condutividade da planta assume valores mínimos, não permitindo mais o fluxo. Também em condições patológicas, fungos e/ou bactérias podem afetar o xilema e, assim, a condutividade. Porém, em condições normais, K na planta é constante e o fluxo q fica uma função apenas de $grad\ \Psi$ entre os pontos B e C.

O movimento de água de A até C dá-se na fase líquida, e em C a água passa para a fase de vapor, saindo da folha e passando para a atmosfera. Para a passagem da fase líquida para a gasosa, é necessária energia (583 cal ou 2.436 J a 20 °C), e esta vem do sol. Por isso, o processo de transpiração é tanto maior quanto mais quente o dia.

A passagem da água do estado líquido para gasoso dá-se dentro da folha em câmaras subestomatais, nas quais termina o xilema. Essas câmaras têm contato com a atmosfera através dos estômatos que são pequenas aberturas constituídas de células de forma especial. Quando a planta está túrgida, a forma das células do estômato é tal que a abertura do orifício é máxima (da ordem de 2 a 10 mícrons), e, com a perda de turgor, as paredes vão ficando flácidas, fechando quase completamente o orifício (Figura 2). Dessa forma, a planta tem algum controle sobre o fluxo de água q, podendo evitar perdas por transpiração. Porém, o controle não é total, primeiro porque os estômatos nunca se fecham totalmente, e, segundo, porque a planta também perde água através da cutícula de sua epiderme. Essa cutícula que cobre a planta toda é resistente à perda de água, mas uma parte da água da planta sempre é perdida através dela (Resende et al., 2003).

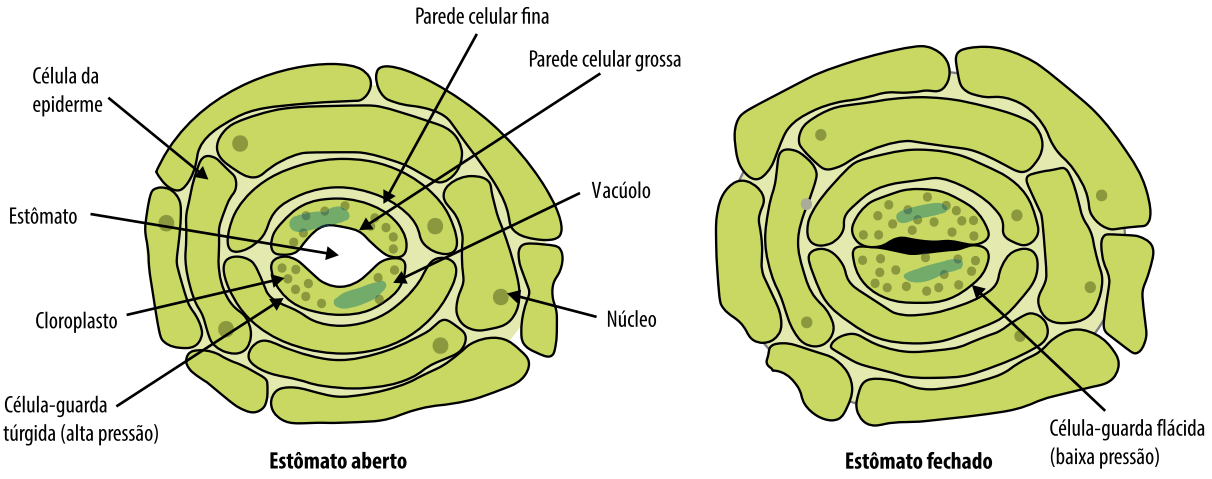


Figura 2. Representação do estômato aberto e fechado.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

O problema do fechamento dos estômatos também está ligado à fotossíntese. É através dos estômatos que entra o CO_2 necessário para a fotossíntese dentro da folha, e, por isso, longos períodos de estômato fechado vão afetar a fotossíntese e, consequentemente, a produtividade. Assim, o ideal é a condição de água suficiente no solo para que a planta não precise fechar os estômatos. Nessas condições, a fotossíntese é máxima, a absorção de nutrientes (que são arrastados pela água) é máxima, e a produtividade também o é (Taiz; Zeiger, 2004).

O movimento de água de C para D, que se dá na fase gasosa, é também regido por uma equação do tipo $q = -K\ grad\ \Psi$. Pelo fato de se tratar de movimento gasoso, i.e., movimento de vapor d'água em ar, geralmente não se fala em condutividade hidráulica K, mas sim em difusividade D do vapor em ar. Mas o fenômeno é semelhante. Fica apenas complicado, por causa de variações da umidade do ar que afetam a difusividade D e do vento que introduz o fenômeno de turbulência. De qualquer forma, o fator $grad\ \Psi$ é importantíssimo, uma vez que Ψ na atmosfera assume quase sempre valores bem negativos, da ordem de -100 atm a -500 atm (-10 MPa a 50 MPa).

Vemos, assim, que o movimento de água do ponto A para o ponto D, esquematizado na Figura 1, é afetado por fatores de solo, de planta e de atmosfera. Fatores importantes do solo são: umidade (θ), relação entre θ e Ψ_m (curva característica de água) e condutividade hidráulica, os quais são afetados pela textura, estrutura, densidade global, etc. Fatores importantes da planta são: atividade radicular, distribuição radicular, principalmente em profundidade, condição de sanidade do xilema, área foliar, arquitetura foliar, etc. Na atmosfera, os fatores mais importantes são: a radiação solar, o vento e a umidade relativa do ar. Vê-se que a perda de água pelas plantas é um processo complexo, e sempre é necessário analisar o conjunto: solo-planta-atmosfera.

Água disponível no solo

O movimento de água do ponto A ao ponto D, esquematizado na Figura 1, mostra que o solo ocupa uma posição muito importante. Se houver água disponível no solo, o movimento de água prossegue da planta para a atmosfera. Não havendo água disponível, o movimento cessa. Quais serão, então, os níveis ótimos de água no solo? A procura desses níveis é que levou ao conceito de água disponível (AD).

É grande a complexidade do processo pelo qual a água sai do solo, passa pela planta indo finalmente para a atmosfera, e também são inúmeros os fatores que afetam o processo. Assim, qualquer tentativa de quantificar a água disponível no solo, baseando-se apenas em parâmetros do solo, não pode dar resultados universais. Existe, no entanto, a necessidade da definição da água disponível para a possibilidade de um manejo agrícola racional. Definiu-se, então, uma quantidade de água disponível baseada em parâmetros do solo, de grande utilidade desde que se reconheçam suas limitações.

Vasos condutores de água

São construídos de sequências de células mortas, grandes e alongadas, cujas paredes laterais, por diferentes processos, se tornaram espessas e impermeáveis à água e com padrões distintos de poros sobre elas distribuídos. As paredes transversais das células se desintegraram de tal forma que o resultado é uma série de tubos que comunicam diretamente a fonte de água nas raízes com seu destino final, a atmosfera que envolve a folhagem. Os vasos terminam fechados em suas extremidades inferiores entre as células absorventes das raízes, e, em suas extremidades superiores, eles terminam entre as células fotossintéticas das folhas (Taiz; Zeiger, 2004).

Vasos condutores de água

Entre os vasos do xilema existem fibras mais curtas quase sólidas, que têm aparentemente função

puramente mecânica e células de parênquima vivo que envolvem os raios medulares, que, por sua vez, comunicam os vasos com tecidos de partes externas do caule, incluindo-se o floema de onde se extraem materiais para armazenamento temporário.

Sistema radicular

A arquitetura (aparência e conformação) do sistema radicular depende das condições externas. É proposto que culturas estabelecidas com suprimento adequado de água tendem a produzir um sistema radicular confinado à superfície do solo, ao passo que culturas submetidas a indiferentes suprimentos de água têm desenvolvimento radicular mais profundo. Alguma evidência dessa sugestão foi encontrada, mas frequentemente existe uma variação maior entre sistemas radiculares submetidos a dado regime de água, do que entre profundidade radicular média de plantas de regimes de água contrastantes.

O comprimento total e a taxa de crescimento das raízes fornecem parâmetros convenientes para comparar o comportamento de plantas sob diferentes tratamentos.

A rizosfera é confinada principalmente a um volume de solo úmido suficiente para suprir a demanda evaporativa da parte aérea; enquanto a água é extraída do solo, as raízes tendem a se expandir ao longo de gradientes de água, mas permanece a possibilidade de absorção de água de qualquer parte do solo previamente esgotada, caso esta seja remolhada.

Os órgãos extremos das raízes que entram em contato com o solo são os pelos absorventes; cada um é uma protuberância de uma única célula da epiderme. Os pelos absorventes têm vida curta e desaparecem depois de alguns dias para serem repostos por novos, formados imediatamente após a zona de alongamento, na zona pilífera.

Cada raiz termina em um ponto de crescimento sobreposto por uma coifa razoavelmente distinta, que é uma proteção de células mucilaginosas, cuja finalidade é dita como auxiliar ao avanço da extremidade em crescimento, lubrificando os agregados do solo.

Caules e folhas

Os caules sustentam os órgãos fotossintéticos e reprodutivos no meio ambiente apropriado para suas funções e também contêm os sistemas de transporte que os comunicam com as raízes. A parte aérea consiste normalmente em caules e folhas verdes. A estrutura da folha reflete sua tão importante função fotossintética. Na superfície superior, imediatamente abaixo da epiderme, está o parênquima paliçádico, constituindo-se de células em contato estreito, providas de cloroplastos. Entre este e a epiderme inferior está uma zona de células livremente dispostas em espaços vazios entre elas, chamado parênquima lacunoso ou esponjoso, também fotossintético. O contato entre os espaços vazios do parênquima esponjoso e a atmosfera externa é feita pelos poros estomatais.

Estômatos

Cada estômato consiste num par de células-guarda alongadas, ocasionalmente sendo suplementadas com células subsidiárias, como acontece nas gramíneas. Ao contrário do restante das células epidermais, as células-guarda contêm cloroplastos. A forma das células-guarda é tal que, quando túrgidas, suas paredes adjacentes se separam para formar um poro. A forma e largura do poro determinam sua habilidade em permitir a passagem de vapor e gases. A abertura do poro diminui proporcionalmente à redução de pressão de turgor nas células-guarda; quando elas estão flácidas, o estômato está completamente fechado. Os estômatos, em grande número por cm^2, estão geralmente dispostos na face inferior das folhas, mas em algumas espécies eles também poder estar presentes na face superior, mas em menor número. Estômatos podem ser encontrados em alguns caules, mas nunca em raízes.

Sistema condutor

Consiste em grupos superiores e inferiores de células vivas de paredes finas, em íntimo contato com os terminais de tubos mortos de paredes espessas que contêm poros no sentido lateral, o que permite comunicação entre eles e os outros tecidos nos caules. Na extremidade inferior do sistema, as células de paredes finas mais externas estão em contato com as camadas de água que envolvem as partículas do solo, enquanto na extremidade superior as células de paredes finas formam os limites de cavidades de ar dentro das folhas; essas cavidades comunicam-se com a atmosfera externa através de poros, que se podem fechar ao receber estímulo apropriado. Assim, existe uma coluna contínua de água ligando a água do solo à atmosfera, tendo mecanismos de regulagem em ambas as extremidades (células vivas nas quais a passagem de água depende do potencial osmótico, de seu conteúdo e do potencial da água da atmosfera ou do solo), e um mecanismo secundário de regulagem (os estômatos) colocado entre o ar contido dentro da folha e o ar da atmosfera externa. A Figura 3 mostra uma representação esquemática do sistema de condução.

Absorção e transporte de água em plantas vasculares, transpiração e medição do status de água na planta

Entrada de água na planta

O movimento de água no ciclo hidrológico toma lugar em resposta a uma série de gradientes de potencial. Obviamente, em certo ponto do ciclo, uma quantidade substancial de energia deve ser injetada, e ela vem do sol e é usada quase totalmente na conversão de água

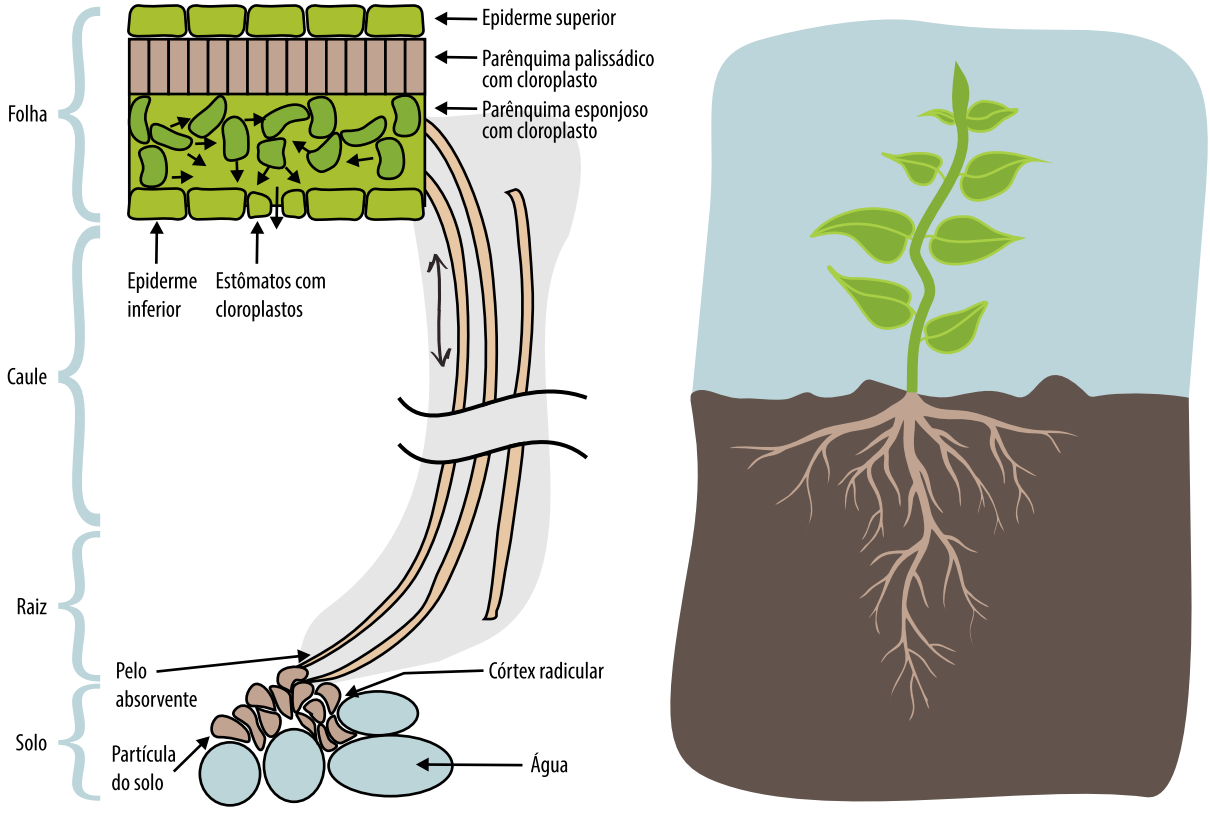


Figura 3. Representação esquemática do sistema vascular da planta.

Ilustração: Paula Cristina Rodrigues Franco.

líquida em vapor nas superfícies de evaporação e transpiração da planta e do solo. Todo o resto dos movimentos ocorre porque o potencial no final de cada estágio é menor que no estágio inicial, e, assim, a água se move. Seu movimento dentro da planta depende das propriedades de coesão da água para permanecer em colunas intactas, mesmo quando sujeita à tensão, por causa da perda (evaporação) de água por suas partes superiores. Esse conceito é, por isso, conhecido como teoria da coesão-tensão.

A água se move na direção do sistema radicular em resposta a gradientes de potencial de água que se iniciam com a evaporação da água nas células úmidas das superfícies internas das folhas. A osmose toma apenas parte limitada na absorção de água (Resende et al., 2003).

Entrada de água na raiz

Qualquer parte do sistema radicular absorve água em resposta a seu ambiente local; se existir um gradiente de potencial de água localizado do solo para dentro da raiz, a água entra na raiz independentemente das condições reinantes nas demais partes do sistema radicular. Assim, em um sistema radicular disperso no solo úmido, a água entra uniformemente por todas as raízes, criando um deficit de água uniforme que prevalece em toda a rizosfera. Quando ocorre chuva ou irrigação e sua quantidade excede o deficit, a rizosfera inteira é reumedecida, e o sistema radicular continua a absorver água uniformemente. Se, como acontece mais frequentemente, a precipitação é menor que o deficit de água, apenas uma porção do solo, a partir de sua superfície, é levada à capacidade de campo. A profundidade assim umedecida é proporcional à quantidade de chuva, e o solo abaixo dessa camada permanece ressequido.

Embora a absorção mais rápida se dê nas proximidades dos ápices radiculares, essa região corresponde a uma pequena fração da superfície absorvente do sistema radicular, e a maior parte da satisfação da necessidade de água da planta é obtida por absorção através das raízes mais velhas, parcialmente suberizadas.

A resistência ao movimento de água na direção das raízes aumenta bruscamente com a diminuição da umidade do solo. A maior resistência ao movimento de água no sistema solo-planta é provavelmente o ponto de passagem entre o solo e o córtex radicular.

Hidrotropia e geotropia são demonstráveis, mas a resposta das raízes a eles não é inflexível. As raízes se proliferam em regiões de solo úmido, crescendo para cima; raízes crescem horizontalmente em meios não úmidos.

A absorção da água pelo sistema radicular é preferencial em regiões mais úmidas, e, assim, a rizosfera é autoequilibrante com respeito à umidade do solo. A capacidade de água disponível descreve a quantidade de água que um solo pode reter depois de precipitação excessiva; a água disponível pode ser explorada em sua totalidade apenas quando o sistema radicular se ramifica pelo perfil todo.

Não existe diferença entre raízes que absorvem água e raízes que absorvem nutrientes; a maioria das raízes pode executar ambas as funções virtualmente de maneira independente. A falha do crescimento de raízes em solo seco está mais associada à impedância mecânica do que à falta d'água.

Murchamento temporário (deficit do meio-dia) é o resultado de uma taxa de transpiração que excede a máxima capacidade de absorção do sistema radicular. Ele não pode ser amenizado pela adição de água ao solo, mas, sim, pela redução da taxa de transpiração.

Medida da entrada de água na planta

A medida direta da entrada da água em raízes não é possível por métodos simples; é usual inferir a entrada de água no sistema radicular pelo estudo das variações do status de água nas diferentes zonas do solo. Isso pode ser feito quantitativamente por meio de medidas repe-

tidas de umidade do solo, mas a amostragem destrói raízes e deixa canais artificiais para a distribuição da água. Como uma alternativa, tensiômetros podem ser instalados permanentemente a várias profundidades e distâncias da planta, ou tubos de acesso para sonda de nêutrons podem também ser instalados.

Água dentro da planta

A água dentro da planta forma um contínuo, i.e., existe um contato contínuo entre a água presente nas superfícies das células dos espaços intercelulares da folha (virtualmente a atmosfera), as contínuas colunas de água dentro dos vasos do xilema e as células do córtex radicular e pelos absorventes (Figura 4). As paredes das células externas das raízes estão em contato com a água que envolve as partículas de solo. Consequentemente, a retirada da água por evaporação (transpiração) das células da folha estabelece um gradiente de potencial que é transmitido para baixo através da planta e para o solo; a água do solo tende, por isso, a se mover no sentido ascendente ao longo desse gradiente.

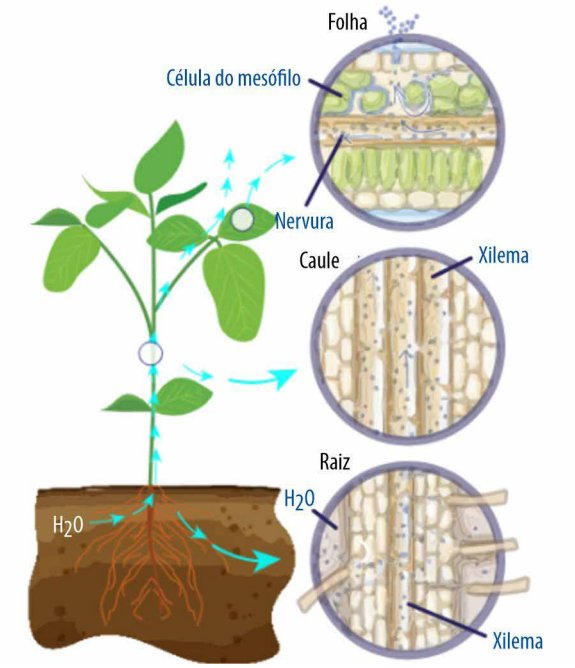


Figura 4. Representação da passagem da água pela planta, colunas de água dentro dos vasos do xilema e das células do córtex radicular e pelos absorventes.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

O potencial de água de um tecido ou de um material, como o solo, expressa sua habilidade em permitir a passagem da água a outro tecido ou material a um potencial mais baixo ou estresse de água mais baixo. A redução do potencial de água da planta tende a reduzir a abertura dos estômatos, o que interfere com o fluxo de CO_2 e, consequentemente, com o crescimento.

Transpiração

Transpiração é a perda de água das plantas na forma de vapor. Embora basicamente um processo de evaporação, ele é afetado pela estrutura da folha e abertura estomática tanto quanto por fatores ambientais. A perda de água é um processo de difusão e ocorre via duas rotas em paralelo: a estomática e a cuticular. A estomática é quantitativamente a mais importante. Transpiração é um processo dominante nas relações solo-planta porque ela produz o gradiente necessário que causa o movimento de água dentro e através das plantas.

Nos vegetais, o intercâmbio de gás carbônico e de oxigênio é diretamente proporcional ao do vapor d'água. Logo, as plantas com altas taxas de absorção de CO_2 apresentam altas perdas por transpiração, o que torna implícito que elevados consumos de água aumentam a produtividade.

A fotossíntese e a respiração envolvem processos químicos complexos, sensíveis a muitas variáveis, diferentemente da transpiração, que é mais simples, controlada principalmente por variáveis físicas ligadas à difusão dos gases. Pode-se considerar a transpiração como o fluxo de água proveniente de um reservatório de capacidade limitada, sendo a força impulsora o gradiente de potencial de água.

A água é o constituinte mais abundante dos tecidos das plantas. Porém, a planta retém uma pequena parte daquela absorvida. Grandes quantidades de água são continuamente absorvidas do solo, translocadas através da planta e passadas para a atmosfera sem estar envolvida em ne-

nhuma função aparente. Uma das curiosidades da natureza é a terrível ineficiência da economia de água pelas plantas. Embora plantas necessitem de água em quantidade relativamente grande para sobreviver, a estrutura anatômica foliar é tal que grandes quantidades de água são continuamente perdidas. Apenas uma pequena fração, geralmente menos de 1% da água absorvida, é usada nas reações metabólicas.

Taxas de transpiração

O fluxo potencial máximo de água pela planta (taxa de transpiração potencial) é determinado primariamente pela diferença entre o potencial da água nas superfícies radiculares e aquele nos pontos de evaporação dentro das folhas; a taxa atual é reduzida em proporção às resistências dentro das raízes, caules e folhas. Medidas dessas resistências individuais são difíceis, mas o valor da resistência da folha é provavelmente da mesma ordem de grandeza da resistência do caule e bem menor que a resistência radicular.

Durante a noite, o potencial de água das superfícies das paredes celulares em contato com o ar nos espaços intercelulares é igual àquele dentro das células porque, praticamente, nenhuma evaporação toma lugar – a planta não está transpirando. Nessas condições, não há movimento ascendente de água no xilema, e existe então uma tensão descendente, resultante de atração gravitacional atuando sobre as colunas estacionárias de água. Durante o dia, a evaporação das paredes celulares se inicia, um gradiente de potencial é estabelecido entre a parte externa das paredes e o conteúdo celular que implica perda inicial de água dos próprios tecidos (Figura 5). Pelo fato de as paredes celulares serem elásticas, ocorre uma variação inicial em seu tamanho, mas, eventualmente, se estabelece uma diferença de potencial entre os interiores das células e as extremidades superiores dos vasos do xilema. Isso estabelece uma diferença semelhante entre as extremidades inferiores e superiores dos vasos e um movimento geral, ascendente, de água, se inicia. Existe agora diferença de potencial entre as extremidades inferiores dos vasos e as células das raízes que então perdem água; a parte de suas paredes, inclusive os pelos absorventes, em contato com a água do solo, estará a um potencial menor do que a água do solo, e a água move-se para dentro da planta.

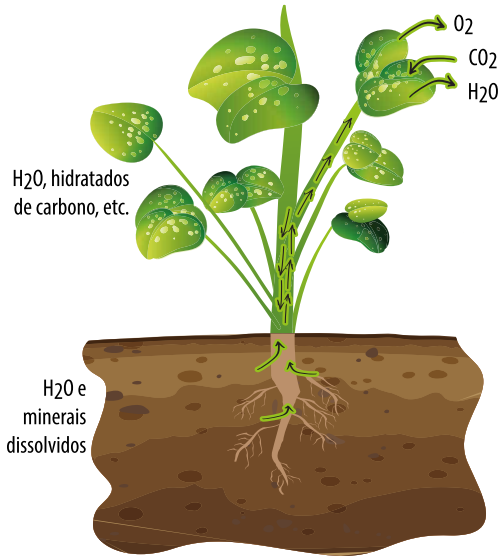


Figura 5. Fluxo de passagem da água e gases pela planta.
Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

A taxa de transpiração atual varia irregularmente como um resultado de mudanças transitórias no ambiente. Há também variações diárias regulares no conteúdo de água das plantas, que atinge um mínimo à tarde e um máximo durante a noite; são essas pelo menos parcialmente relacionadas com as mudanças na taxa de transpiração. Variações cíclicas na taxa de transpiração, de periodicidade muito mais curta do que variações diurnas, foram observadas em girassol, acompanhadas por variações de temperatura de folha e abertura de estômatos. Essas relações poderiam ser explicadas por um mecanismo de cadeia; se as condições atmosféricas fossem tais que a taxa de transpiração potencial excedesse à capacidade da planta de atendê-la, estômatos tenderiam a se fechar; as taxas de transpiração e esfriamento por evaporação também tenderiam a cair, e, portanto, a temperatura da folha tenderia a subir. A redu-

ção da taxa de transpiração aumentaria o potencial da água na folha, estômatos se abririam, e assim a série cíclica de eventos recomeçaria.

Transpiração potencial e real

Estimado ou medido, o resultado aparece como a evaporação de uma superfície aberta de água ou diretamente como transpiração potencial. A evaporação de uma superfície aberta de água é geralmente maior do que a transpiração de uma cultura submetida a condições semelhantes de exposição, por causa da intervenção de resistências ao movimento de vapor, como aquelas impostas por abertura de estômatos e permeabilidade baixa da cutícula da folha. Em alguns casos foi medida uma transpiração em excesso à evaporação de superfície aberta de água. Isso deve ser em razão parcialmente do movimento horizontal do ar sobre a vegetação, o que pode ter introduzido e provocado a utilização de energia advectiva que não seria interceptada pela superfície de água e, parcialmente, por causa da eficiência do sistema evaporante das plantas, altamente dividido e disperso em contraste com a superfície plana e horizontal de água.

A relação entre a transpiração atual e potencial pode ser medida experimentalmente, por exemplo, utilizando-se lisímetros de balança para medir a taxa atual de perda d'água de um sistema confinado planta-solo para comparação com a estimativa e utilizando-se perdas medidas por evaporímetros. Entretanto, as condições em todos os lisímetros são inerentemente artificiais pelo fato de o sistema radicular estar confinado e não estar livre para absorção de água. Além do mais, o solo é isolado do subsolo e, assim, não está sujeito às mesmas tensões e aos fenômenos de drenagem como no solo não confinado. A fim de contornar essas dificuldades, lisímetros têm sido equipados com instrumentos de sucção para tornar o potencial da água dentro igual ao de fora.

A maioria dos métodos descritos, inclusive o de Penman-Monteith, fornece estimativas da transpiração de uma cultura verde, cobrindo uniforme e inteiramente o solo, com suprimento não limitado de água. Na prática, a cultura nem sempre cobre totalmente o solo; existe solo nu entre as linhas de culturas anuais durante 80% do seu ciclo de cultivo. Além disso, a redução do potencial d'água ocorre normalmente em condições de campo.

Transpiração relativa

Transpiração relativa é a relação entre a transpiração real e a transpiração potencial. A planta como o solo são condutores hidráulicos nos quais a taxa de fluxo é proporcional à força e à condutibilidade. Se essa condutibilidade se mantiver constante, a variação na taxa de fluxo provém da força impulsora que é, principalmente, a transpiração. No entanto, a condutibilidade não parece ser constante, sendo o seu decréscimo acompanhado por uma progressiva redução nos potenciais de água da folha e do fechamento dos estômatos. Os principais fatores, atuando na transpiração real, são o potencial de água no solo (ψ_s), a condutibilidade hidráulica do solo (K), o volume e a densidade das raízes, a resistência interna da planta, o potencial crítico de fechamento dos estômatos e a transpiração potencial.

Importância da transpiração

A transpiração é um processo passivo que ocorre como um resultado da incidência diária da radiação de onda curta sobre uma estrutura constituída principalmente de água e que possui uma superfície mais ou menos permeável; a perda de água na extremidade superior dessa estrutura cheia de água estabelece um gradiente de potencial que induz um movimento ascendente de água e, consequentemente, uma redução no potencial da extremidade inferior em relação àquele no solo. Assim a água entra na planta e caminha

na forma de fluxo de transpiração, no sentido ascendente, durante todas as horas de brilho solar. O fluxo de transpiração tem uma função de transporte, que poderia sem dúvida alguma ser satisfeita pelo movimento de um volume bem menor de água, pois a quantidade de água armazenada nos tecidos é relativamente pequena e desprezível. O fluxo de transpiração é a fonte de água que mantém a turgescência e a postura, mas esse fato implica uma entrada de água não maior do que o volume dos tecidos que devem permanecer túrgidos. A evaporação da água das superfícies expostas as mantém frescas, utilizando e, assim, neutralizando a radiação incidente que aqueceria os tecidos. O fluxo de transpiração é a fonte dessa água de refrigeração, mas, mesmo sendo esse efeito significante, ele não deve ser superestimado, pois plantas adaptadas para climas áridos sobrevivem sem um superaquecimento, mesmo possuindo uma taxa de transpiração muito pequena. O fato de que tais cactáceas e suculentas crescem muito devagar, contrabalançando a exposição a generosas quantidades de radiação que poderiam ser utilizadas pela fotossíntese, indica a função mais importante da transpiração que, em efeito, é quase acidental. A alta turgescência mantém os estômatos abertos, permitindo não apenas uma saída máxima de vapor, mas também de ingresso máximo de dióxido de carbono para fotossíntese.

É necessário se perder tanta água por transpiração para se chegar ao final do ciclo de uma cultura como o milho, por exemplo, porque, provavelmente, uma parte essencial daquelas sementes de milho e de todas as outras partes da planta são átomos de carbono que formam os esqueletos das moléculas orgânicas, as quais vão compor partes das plantas, e virtualmente todo esse carbono tem que vir da atmosfera. Ele entra na planta como CO_2 através dos poros estomáticos, na maioria das superfícies foliares, e através dessas mesmas aberturas a água se difundirá para a atmosfera.

Medição da transpiração

Vários métodos têm sido empregados para medir transpiração. Esses métodos geralmente envolvem ou uma medida da água absorvida ou uma medida do vapor d'água transpirada por uma planta. Dentre os métodos destacam-se:

- Métodos gravimétricos (pesagens).
- Potômetro.
- Medições gasométricas rápidas.
- Coleta e pesagem do vapor d'água.
- Medição por absorção de radiação infravermelha.
- Método do cloreto de cobalto.
- Medição por psicrometria.
- Higrômetros de resistência.

A medida direta do fluxo de vapor que abandona a planta, apesar de possível, requer equipamento sofisticado. Entretanto, métodos de inferência que dependem da variação de peso da unidade total planta-solo ou planta-água não requerem nada mais do que uma balança sensível; esses métodos justificavelmente atestam que a variação de peso em razão da fotossíntese é desprezível em comparação com a variação de peso por causa da transpiração. Máquinas capazes de pesar com precisão volumes extensos de solo são caras; consequentemente, existe a corrida para o desenvolvimento de novos sistemas de pesagem para lisímetros. Para o caso de casa de vegetação ou culturas de laboratório em pequenos vasos, balanças convencionais são adequadas, mas a grande repetição necessária para atender à variabilidade do material vegetal estimulou o interesse por sistemas de pesagem de baixo custo, tal como a balança eletromagnética de registro de transpiração.

Caminhamento do vapor d'água

As perdas de água por transpiração ocorrem em qualquer parte da planta exposta à atmosfera

externa, ressaltando-se os estômatos, seguidos, em pequena escala, da cutícula das folhas. O conjunto solo-planta-atmosfera, em termos práticos, é uma série de condutores, por onde flui a água com resistências variáveis. A abertura dos estômatos varia com a turgescência das células-guarda, de modo que quanto mais túrgidas, maior a abertura e menor a resistência; esta depende ainda da frequência dos estômatos e da posição deles na folha. Assim, os estômatos podem se localizar nas duas faces (abaxial e adaxial) da folha, (anfiestomática, por exemplo, milho); nesse caso, o número de estômatos nas duas faces é semelhante; somente na face abaxial (hipoestomática, por exemplo, aquáticas); e por último quando os estômatos se encontram nas duas faces, porém com predominância de maior número para a face abaxial (anisoestomática, por exemplo, feijão).

A água que evapora das paredes das células do mesófilo foliar difunde-se pelos espaços intercelulares até os estômatos e daí ao exterior. A Figura 6 indica as resistências encontradas ao fluxo da água. Observam-se as resistências do solo, da raiz, do xilema, do mesófilo, dos espaços intercelulares, dos estômatos, da camada limite e resistência da cutícula. As resistências dos espaços intercelulares (r_i) e dos estômatos (r_s) ocorrem em série, sendo uma simples soma de resistências ($r_i + r_s$), que está em paralelo com a resistência cuticular (r_c). O fluxo do vapor d'água pode ser visto em analogia ao circuito elétrico.

Resistência ao fluxo e assimilação de CO_2

O caminhamento do CO_2 é um pouco mais complicado que o do vapor d'água, pois o CO_2 vindo do ar atmosférico deve ultrapassar a camada limite adjacente à folha, aos estômatos, aos espaços intercelulares até as células do mesófilo e eventualmente adentrar os cloroplastos (Figura 7). Logo, o CO_2 deve ultrapassar a parede celular de uma célula do mesófilo, a plasmalema, parte do citoplasma, as membranas envolvendo o cloroplasto e outra do estroma do cloroplasto.

Estado de água dos tecidos vegetais

Pelo fato de existir um gradiente de potencial do solo à atmosfera, através da planta, a água dentro da planta está sempre sob alguma tensão ou estresse, que se origina de duas maneiras distintas: a) estresse osmótico relacionado com a concentração salina no solo; b) simples deficit de água resultante da falta de água no solo ou da alta condição evaporativa da atmosfera.

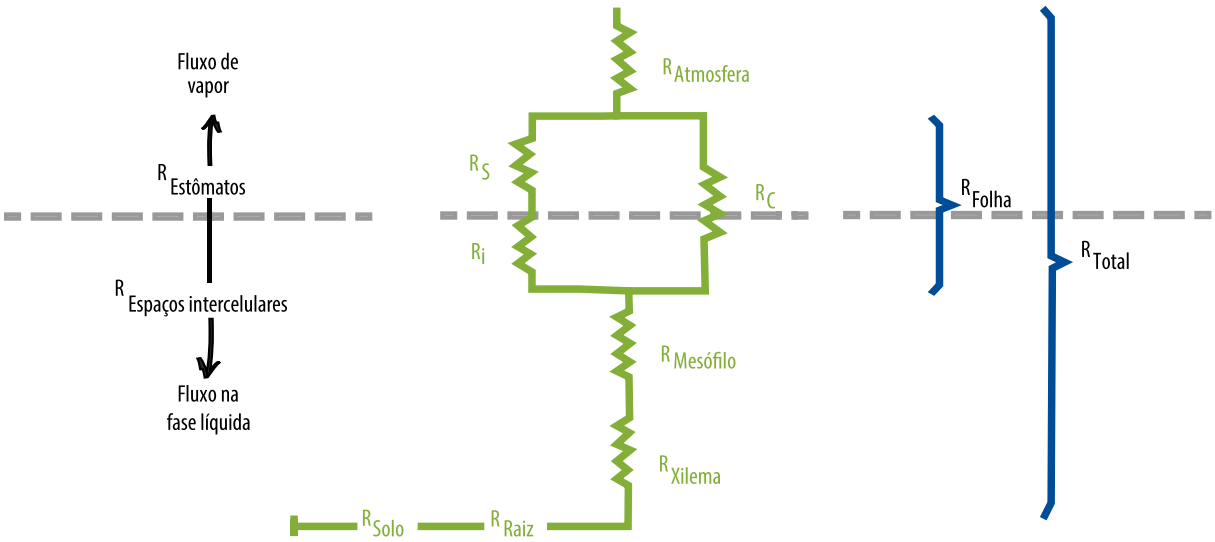


Figura 6. Resistências aos fluxos de água.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

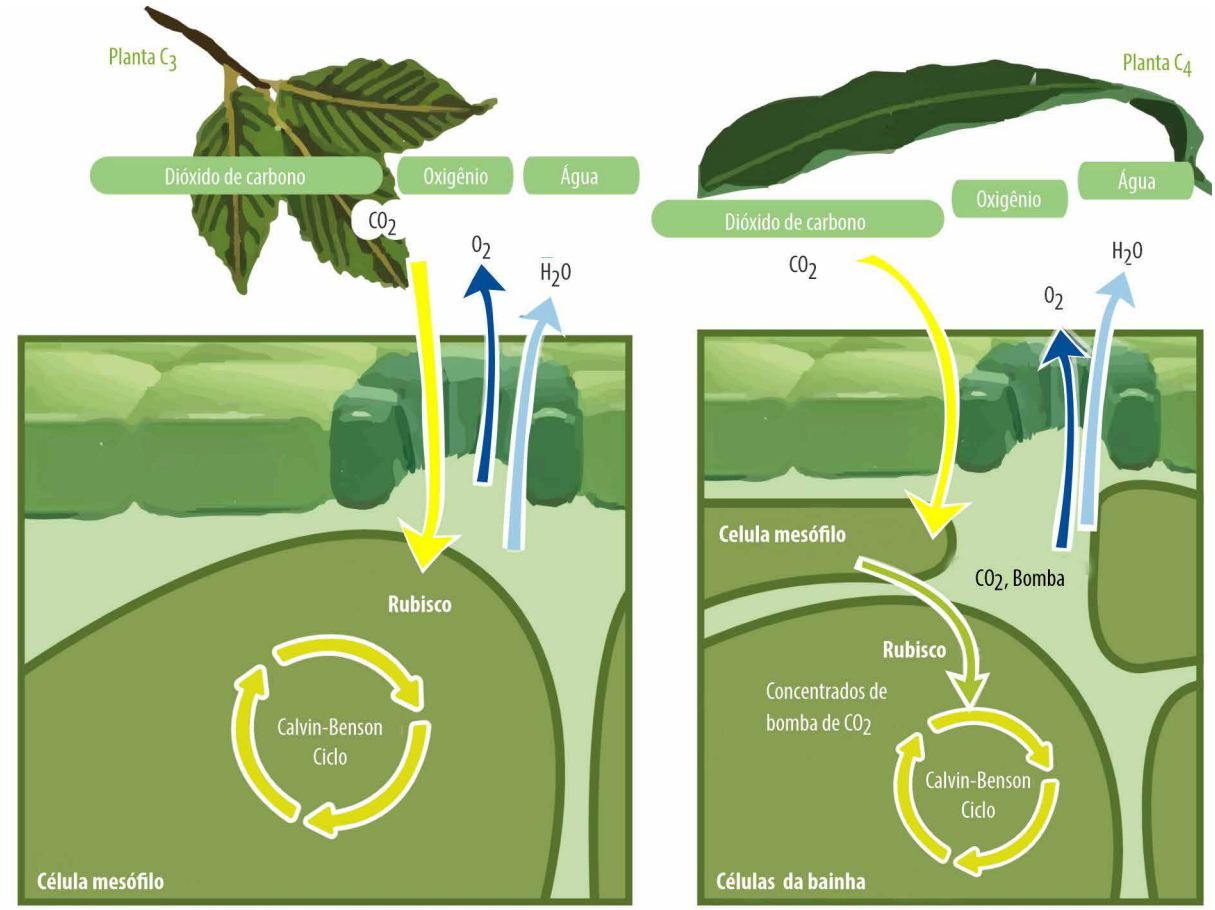


Figura 7. Caminhamento do CO_2 na planta.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Os sintomas de estresse interno de água produzidos por essas duas fontes diferem pelo fato de o estresse induzido por salinidade se manifestar por um engrossamento e escurecimento de tecidos verdes, às vezes sem murchamento, enquanto o deficit de água pura resulta em murchamento temporário ou permanente, redução na taxa de crescimento, escurecimento da cor da folhagem e eventualmente a intensificação de um florescimento ceroso sobre as superfícies das folhas.

Medida de água na planta

A natureza do potencial de água é compreendida de forma mais adequada a partir dos métodos comumente utilizados para medi-lo. O potencial da água pode ser medido em termos do conteúdo total da água dos tecidos ou do estado de energia da água. Não é suficiente designar apenas a porcentagem do conteúdo de água da amostra; o conteúdo de água deve ser relacionado com um padrão tal como o conteúdo da amostra quando inteiramente túrgida, armazenada a máxima quantidade possível de água. Esse parâmetro pode ser obtido, pesando-se discos de folha imediatamente após retirados da folha e tornando a pesá-los após permanecerem flutuando sobre água até turgescência completa, e depois ainda determinando seu peso seco. O potencial de água ou deficit de água ou deficit de saturação do tecido original pode depois ser calculado em relação à quantidade de água no tecido completamente túrgido. O termo turgescência relativa tem sido utilizado para a relação entre a turgescência atual do tecido e a turgescência máxima dos discos flutuantes na água.

Uma alternativa baseia-se no fato de que, quando um tecido não está totalmente túrgido, isto é, quando seu potencial de água não é máximo, suas células absorverão água de qualquer solução de potencial mais alto e assim aumentarão de tamanho (Figura 8). Amostras de tecidos são colocadas em uma série de soluções de conteúdo crescente em sal (e, portanto, crescentes em pressão osmótica). A solução na qual não existe variação nas dimensões, volume ou peso da amostra tem o mesmo potencial de água. Pode-se também observar qual das soluções não sofreu mudança em densidade depois da amostra de tecido ter permanecido dentro dela.

O potencial da água ou deficit interno de água na planta pode também ser determinado a partir de mudanças associadas em algumas propriedades físicas do tecido, de fácil medida, como o diâmetro do caule, a espessura da folha ou o tamanho da fruta.

O potencial total geral de um ramo intacto, resultante da soma dos potenciais dos tecidos componentes, pode ser medido colocando-se o ramo inteiro em uma câmara, com a extremidade cortada para fora. A pressão do gás dentro da câmara é aumentada até que a água é forçada de volta no sentido descendente do caule, aparecendo como exsudado no corte externo. A pressão do gás, atuando nas partes externas das células, contrabalança seu potencial de água e reverte o fluxo de transpiração. A força necessária para fazer isso é evidentemente igual ao potencial da água. Ele pode ser descrito como a pressão hidrostática negativa da seiva do xilema, que pode ser da ordem de 20 bars a 30 bars (2 MN m^{-2} a 3 MN m^{-2}); o aparelho precisa ser suficientemente resistente para suportar pressões muito mais altas do que esta, de até 50 bars. Pressão da seiva em plantas vasculares, vide Scholander et al. (1965).

Resultados da redução no potencial da água na planta

Efeitos nos estômatos

É bem conhecido o fato de que os estômatos das plantas tendem a se fechar quando existe carência de água e que existe evidência substancial de que isso constitui o principal mecanismo de regulagem contra a perda excessiva de água. O funcionamento mecânico dos estômatos é bem conhecido; a estrutura do par de células-guarda é tal que mudanças em seu turgor mudam sua forma e assim o tamanho do poro entre elas. A variação do turgor é acompanhada por variação na concentração de grânulos de amido dentro delas. O amido não está em solução e, por isso, não contribui para a pressão osmótica; existe uma variação recíproca na concentração de açúcar do suco celular e, portanto, do potencial da água. A luz solar causa a conversão de amido em açúcar e assim abre os estômatos. Uma teoria para explicar isso postula que a luz favorece a utilização do CO_2

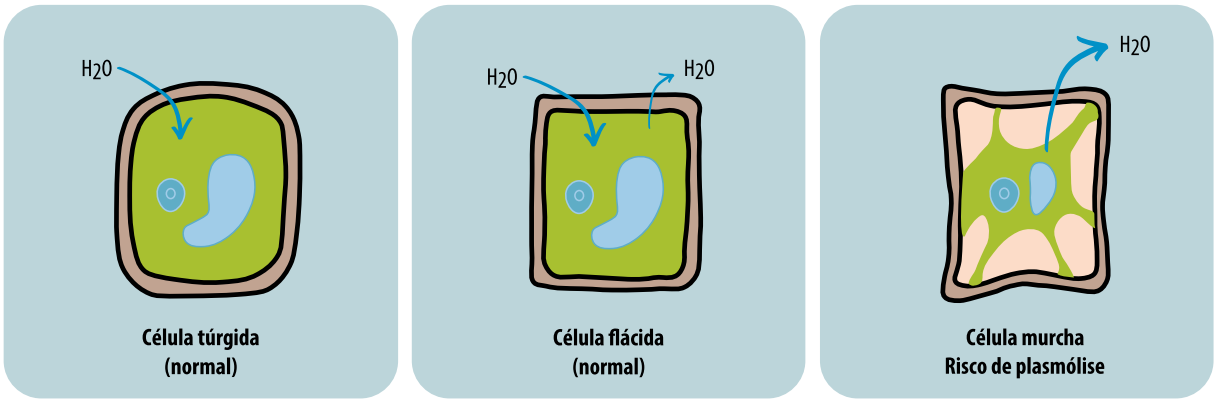


Figura 8. Representação da turgescência da célula vegetal em condições normais e de estresse hídrico.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

na formação do açúcar; a remoção do CO_2 torna as condições menos ácidas e isso, por sua vez, favorece a transformação de amido em açúcar pela enzima fosforilase. Experimentos, nos quais a concentração de CO_2 dentro da folha foi artificialmente modificada, confirmaram que alta concentração de CO_2 causa o fechamento dos estômatos, enquanto concentrações baixas (menos ácidas) causam abertura.

Gases podem mover-se por diminutos poros por difusão; a difusão, que toma lugar em razão do movimento casual das moléculas do gás, pode ser um processo muito mais rápido através de poros pequenos, do que fluxo de massa. Se os poros em uma membrana estão suficientemente próximos uns aos outros, a difusão se processa quase tão rapidamente como se não existisse membrana. A distância entre estômatos na superfície foliar é muitas vezes igual a dez vezes seu diâmetro, e, nesse espaçamento, quando completamente abertos, a resistência foliar à difusão é desprezível.

Toda a água perdida por uma planta para a atmosfera passa na forma de vapor pela cutícula ou estômatos ou, como em algumas poucas plantas, por hidatódios na forma líquida. A comparação entre perdas cuticulares e estomatais é obviamente muito difícil tecnicamente; foram feitas comparações entre perdas de água por folhas intactas, folhas cuja cutícula foi retirada e folhas sob luz solar e sob escuridão quando os estômatos estão mais ou menos fechados. Desses experimentos, estimou-se que a transpiração através de estômatos é de 3 a 150 vezes maior que a transpiração cuticular. Independentemente do valor exato, é sabido que a maior parte da água passa pelos estômatos e que estes, portanto, representam um meio de controle da transpiração; eles se constituem de hidrostatos efetivos no controle do estado interno da água da folha, mesmo havendo perda substancial de água pela cutícula, quando os estômatos estão bem fechados.

Muitas espécies têm adaptações como coberturas com substâncias cerosas, folhas enroladas ou dobradas, que reduzem a transpiração cuticular. Em Glycine, estimou-se que os pelos reduzem a transpiração de 40% em condições de vento moderado. De maneira similar, foi calculado que estômatos localizados dentro de cavidades, como em Agave, perdem água em uma taxa cinco vezes menor do que se estivessem situados sob superfície plana, mesmo quando totalmente abertos.

Efeitos fisiológicos

O fechamento dos estômatos não reduz apenas a saída da água, mas também a entrada de dióxido de carbono, e isso reduz a taxa de fotossíntese. O ganho em peso como um resultado da assimilação de carbono é menor em tecido murcho do que em tecido túrgido. A redução da taxa de síntese de proteínas também tem sido associada à diminuição do teor de água dos tecidos; na verdade o metabolismo completo da planta parece diminuir com a redução do potencial de água. Por meio, entretanto, do decréscimo de crescimento resultante, são facilmente demonstradas as razões por que não se sabe como o baixo potencial interfere nos muitos processos que contribuem para o crescimento vegetal.

A relação entre a abertura dos estômatos, perda de água e fotossíntese é muito bem ilustrada pelo comportamento peculiar da cultivar de batata Droopy que é geneticamente incapaz de fechar estômatos. Consequentemente, ela continua a perder água e murcha prematuramente sob condições nas quais outras cultivares se mantêm túrgidas por fechamento de estômatos. As folhas perdem a postura correta para interceptar a radiação solar, e assim a fotossíntese e o crescimento são reduzidos mesmo com os estômatos abertos.

Efeitos no crescimento e desenvolvimento

Um abaixamento do potencial da água na planta afeta diferentes órgãos de diferentes formas. O efeito mais comum do estresse de umidade é uma redução na taxa de crescimento e desen-

volvimento da folhagem, e, de maneira inversa, uma diminuição no estresse causa um aumento na produção de folhagem. Em beterraba e gramíneas, uma redução no estresse induz uma taxa maior de crescimento geral do que em plantas que nunca estiveram sujeitas a estresse; mas a produção final das plantas, nas quais o estresse foi diminuído, nunca chega a superar a produção daquelas que nunca estiveram sujeitas a estresse.

O abaixamento do potencial da água em certos estágios de crescimento tem efeitos específicos; um exemplo óbvio é a falha das sementes de germinar ou de *seedlings* se desenvolverem, mas a falta de água na floração de muitas espécies contrastantes, incluindo-se ervilhas, cereais e café, influencia a produtividade de sementes. Com ervilhas, o estresse de água durante a queda das pétalas e intumescência das vagens afeta, de maneira ainda não compreendida, a eficiência de fertilização e subsequente crescimento, de tal forma que um número reduzido de sementes menores é produzido.

Um fenômeno mais importante é que os tecidos apicais e as folhas muito novas parecem ter maior facilidade em suportar efeitos adversos de potencial temporariamente baixo, do que tecidos mais velhos. Em plantas que estiveram sujeitas à seca severa e depois foram molhadas, as folhas velhas caem e são repostas pela rápida expansão das folhas mais jovens e pelo desenvolvimento de mais folhas no ápice da planta. Quando as raízes de plantas transplantadas são danificadas por técnicas ruins de transplante e, por causa disso, são sujeitas a estresse de água temporário, as folhas velhas são as que morrem e as mais novas sobrevivem e eventualmente substituem as primeiras.

Transporte

Uma função do fluxo de transpiração é trazer nutrientes inorgânicos dissolvidos, das raízes para os locais de atividade metabólica; esse processo cessa à noite, quando existe pouca ou nenhuma transpiração. A distribuição de material elaborado e dos produtos da fotossíntese na direção oposta toma lugar principalmente pelos vasos do floema, mas a reutilização desses materiais armazenados, em tecidos de armazenamento, ocorre em ambos, xilema e floema. O baixo potencial interfere em ambos os processos.

Medidas de fatores associados com o movimento de água dentro da planta

Absorção de água pela parte aérea da planta

A absorção de água e, portanto, a transpiração de um ramo cortado podem ser demonstradas fixando-se a parte cortada a um potômetro de bolha, que se constitui de um tubo capilar horizontal cheio de água (Figura 9). A velocidade do movimento da bolha introduzida indica a taxa de absorção de água. O corte e a adaptação do tubo ao corte devem ser executados debaixo d'água, para prevenir a entrada de ar no xilema. A medida precisa do potencial da água da parte aérea da planta e pode-se fazer pelo uso da bomba de pressão (Scholander et al., 1965).

Potencial da água de tecidos

Existe uma série de métodos isopiésticos o que significa que a pressão é a mesma em todos os pontos do sistema; consequentemente, métodos isopiésticos para medir o potencial da água na folha dependem de igualar a pressão osmótica entre amostras e padrões. Um simples e efetivo método é preparar um número de pares de tubos contendo uma série de concentrações de um soluto não penetrante, como manitol ou carbowax, em água. Amostras de discos de folha de tamanho conveniente são embebidas, por algumas horas, em um de cada par de tubos; uma gota de corante é então adicionada ao outro tubo de cada par. Usando uma pipeta fina, um pouco da solução colorida é introduzido abaixo da superfície de

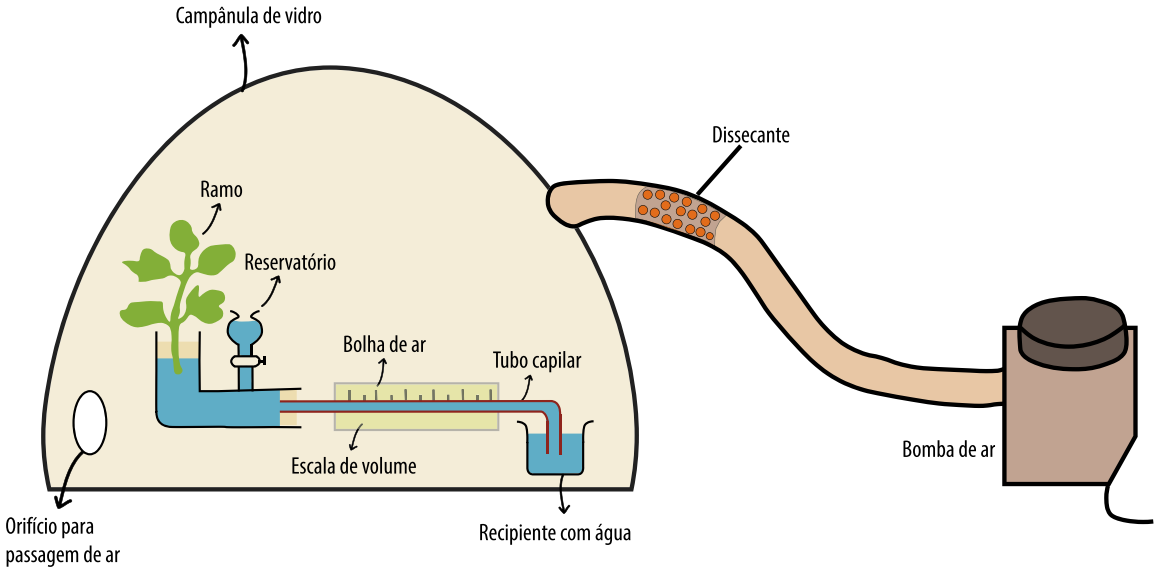


Figura 9. Representação de um potômetro de bolha.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

seu par no qual a amostra foi embebida. Se a solução colorida sobe, a amostra absorveu água e reduziu a densidade da solução original; seu potencial de água é por isso maior do que aquele da solução. Se a solução colorida afundar, o potencial da água é menor. Achar soluções de concentração adequada para um experimento em particular pode consumir muito tempo.

No método de radiação beta, uma folha é interposta entre uma fonte de radiação beta e um detector; a atenuação dos raios beta é proporcional à massa da folha e é detectada como uma redução na taxa de contagem. Mudanças em massa em curtos períodos de tempo são apenas em razão da variação na umidade da folha; o método não danifica tecidos e pode ser usado em plantas intactas no campo.

O potencial da água de qualquer solução está relacionado com a pressão de vapor da atmosfera em contato com ela. Esse fenômeno é explorado em muitos métodos de medida do potencial de água. Uma amostra é deixada entrar em equilíbrio com o vapor do ar de uma câmara fechada; a pressão de vapor desse ar é depois medida, por exemplo, observando-se qual solução de uma série de soluções de pressões osmóticas diferentes, também fechadas na cápsula, não sofre variação em volume. As soluções são convenientemente sustentadas em curtos tubos capilares. Outra forma é o uso do psicrômetro de par termelétrico, para medir a pressão de vapor do ar da câmara.

No método da gota suspensa, uma pilha de anéis de tecido foliar é colocada em uma pequena câmara fechada imersa em banho de temperatura constante. Uma pipeta capilar é selada dentro da tampa da cápsula. Depois de equilibrar por aproximadamente 3 horas, uma gota de água é parcialmente exsudada de tal forma que fique pendurada na extremidade da pipeta; a gota é depois retirada e seu menisco superior no capilar é alinhado com um ponto de referência. A posição do menisco inferior (e, portanto, o volume da gota) é anotada. A gota é agora novamente exsudada por um período de tempo exatamente medido, depois do qual seu volume é novamente medido. A perda de água por evaporação está relacionada com o potencial da água dos discos dentro da câmara. O aparelho é calibrado, expondo-se a gota a soluções salinas de potencial conhecido.

Relação solo-planta (absorção e transporte de água em plantas vasculares)

A água dentro da planta forma um contínuo, i.e., existe um contato contínuo entre a água presente nas superfícies das células dos espaços intercelulares das folhas (virtualmente a atmosfera), as contínuas colunas de água dentro dos vasos do xilema e as células do córtex radicular e pelos absorventes. As paredes das células externas das raízes estão em contato com a água que envolve as partículas do solo (Figura 10). Consequentemente, a retirada da água por evaporação (transpiração) das células da folha estabelece um gradiente de potencial que é transmitido para baixo através da planta e para o solo; a água do solo tende, por isso, a se mover no sentido ascendente ao longo desse gradiente.

O potencial de água de um tecido ou de um material, como o solo, expressa sua habilidade em permitir a passagem da água a outro tecido ou material a um potencial mais baixo ou estresse de água mais baixo.

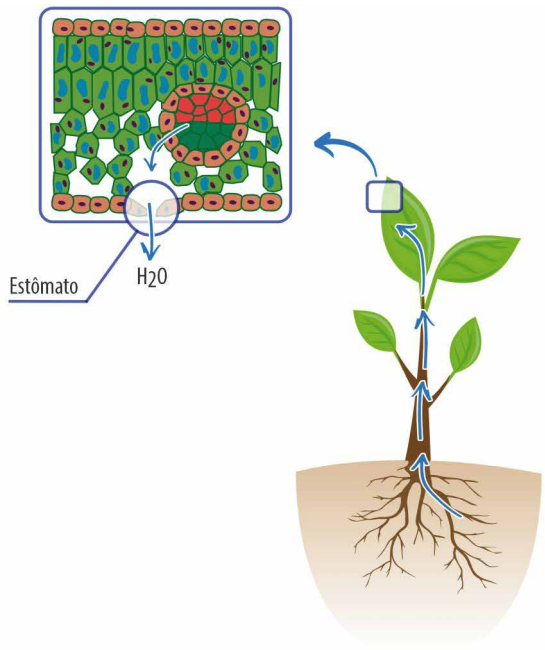


Figura 10. Contato contínuo entre a água presente nas superfícies das células dos espaços intercelulares das folhas, as contínuas colunas de água dentro dos vasos do xilema e as células do córtex radicular e pelos absorventes.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

A redução do potencial da água da planta tende a fechar os estômatos, o que interfere com o fluxo de dióxido de carbono e, consequentemente, com o crescimento.

Movimento da água para fora do sistema solo-planta

A água se move em torno do ciclo hidrológico em resposta à energia fornecida principalmente no ponto, no qual a água no estado líquido passa para vapor, dentro da parte aérea da planta ou na superfície do solo. A maior parte dessa energia entra na forma de radiação de onda curta do sol. Uma componente comparativamente pequena entra como energia advectiva, i.e., energia proveniente das variações de temperatura do ar quando este passa sobre superfícies evaporantes ou transpirantes.

A evaporação pode ser medida, em vez de estimada, por meio de lisímetros e evaporímetros, mas a exposição adequada desses instrumentos é difícil; estimativas da evaporação a partir de dados meteorológicos são comumente consideradas mais corretas do que medidas diretas.

Camada-limite

A camada-limite é a camada da atmosfera, adjacente à superfície do solo, dentro da qual parâmetros como vapor e fluxo de calor variam com a altura, regularmente e de forma previsível. É dentro dessa camada-limite que estimativas precisas de evaporação podem ser feitas. A camada-limite é perturbada por descontinuidades em vegetação ou topografia, e isso implica o fato de que o ponto de medida ou estimativa deve estar dentro de uma área uniforme. Para uma camada-limite de 0,5 m de altura, é necessário que exista um contorno uniforme de vegetação ou solo de aproximadamente 70 m de diâmetro; uma camada-limite de 2 m exige, teoricamente,

um contorno de 400 m de raio. Essas condições raramente ocorrem na prática, o que nos leva a concluir que lisímetros realmente não satisfazem essas exigências, de tal forma que seus resultados devem ser suspeitos e que estimativas meteorológicas são apenas precisas quando relativas a grandes áreas de vegetação uniforme.

Constante de raiz ou cultura

O volume de água que pode ser extraído de um solo, antes que a atenuação das reservas comece a limitar a transpiração, depende da textura do solo, da profundidade, do estado inicial de umidade e da profundidade alcançada pelas raízes.

A constante de raiz é definida como o máximo deficit de água do solo que pode ocorrer sem interferir na transpiração. A constante da raiz é, primariamente, mas não completamente, uma característica da planta e ela varia com seu crescimento e desenvolvimento e com a densidade do sistema radicular. A constante da raiz é expressa nos mesmos termos como a precipitação, i.e., a altura de água corresponde à quantidade de água em consideração, que cobriria uniformemente a superfície do solo. Para pastos permanentes, ela é da ordem de 75 mm a 120 mm; para culturas herbáceas sobre solo de textura média, 50 mm; enquanto para árvores frutíferas com sistemas radiculares profundos pode ser acima de 200 mm. Deve ser dada ênfase ao fato de que estes são apenas exemplos, a constante de raiz de uma cultura relativamente resistente à seca, como a da alfafa, pode exceder 100 mm, enquanto aquela de árvores frutíferas cujas raízes estão confinadas a camadas superficiais pode ser menor que 75 mm.

Cobertura incompleta da cultura

Onde existem manchas de solo nu entre as plantas e superfície do solo molhada, há perda de água por evaporação na mesma taxa que uma superfície aberta de água e, consequentemente, nenhuma ou pouca modificação precisa ser feita sobre a perda de água estimada (aqui a diferença entre a taxa de transpiração e a taxa de evaporação de superfície aberta é ignorada). Mas, quando a superfície descoberta do solo se torna seca, ela virtualmente não perderá água por evaporação, e, nessas circunstâncias, o volume calculado de água perdida pela cultura deve ser reduzido em proporção à área livre de folhagem. Esse é o princípio no qual se baseia a prática tradicional de conservação de água do solo pela manutenção de uma crosta seca. Quando se aplica essa técnica, o cultivo para produzir essa camada deve-se limitar à profundidade menor possível porque, se solo úmido for levado à superfície, este perderá sua água, e o resultado será perda e não conservação de água. É fácil observar a propriedade de reter água por meio de uma superfície seca, no fim da primavera, quando solo úmido pode ser encontrado a alguns centímetros abaixo da superfície seca; esse solo permanecerá úmido até tarde no verão, caso não haja crescimento vegetal e seu cultivo seja evitado.

Deficit de água do solo

A água sai da planta e da superfície do solo a uma taxa que depende principalmente das condições meteorológicas. O solo da rizosfera contém uma quantidade finita de água, a redução da qual pode ser reposta pela precipitação por cima, lateralmente por movimento através de rachaduras ou, muito vagarosamente, mesmo lateralmente e no sentido ascendente por movimento capilar de água em resposta a gradientes de potencial. Esse fluxo de água dentro do solo é denominado redistribuição e é um processo contínuo em solo no qual plantas se desenvolvem. Em uma estação normal, diferente das condições de monção, a taxa de perda de água do sistema excede consideravelmente a taxa de reabastecimento a partir dessas outras fontes, e, consequentemente, o conteúdo de água no solo e seu potencial associado são progressivamente abaixados, e daí um deficit de água resulta.

O deficit de água é a quantidade pela qual diminui o estado de umidade do solo abaixo da capacidade de campo. Ele é normalmente expresso em termos de precipitação, e, consequentemente, o deficit equivale à precipitação máxima ou irrigação que um solo pode absorver sem perdas por drenagem.

O deficit de umidade do solo não é relacionado com o tipo de solo; dadas condições meteorológicas produzirão o mesmo deficit em um solo arenoso, como em um solo de boas propriedades de retenção, mas o efeito desse deficit idêntico sobre o crescimento vegetal é bem diferente nos dois tipos de solo. Por exemplo, 25 mm de deficit podem representar o uso de quase toda a água disponível nos primeiros 40 cm de um solo arenoso, ao passo que em um solo barrento apenas metade da água disponível teria sido utilizada. Assim, um parâmetro relacionado com as condições às quais uma cultura está sujeita é a porcentagem de uso da água disponível. Essa é frequentemente utilizada como um critério para determinar quando aplicar água em experimentos de irrigação. Pode ser observado que um dado uso da água disponível corresponde aproximadamente ao mesmo potencial de água em qualquer solo, mas ele aumenta como resultado de perdas diferentes de água em diferentes solos e a acumulação de diferentes deficits de umidade do solo.

Relação planta-atmosfera

A água move-se pela planta e para a atmosfera como um resultado da evaporação da água pela folhagem por causa da incidência de energia solar.

A evaporação pode ser medida por lisímetros de balança e evaporímetros, mas, por causa de problemas de localização e exposição desses instrumentos, é normalmente mais satisfatório estimar esses parâmetros a partir de dados meteorológicos e físicos.

Métodos de estimativa baseados em partição de energia ou balanço de energia requerem medidas de energia líquida, dissipação de calor no solo e mudanças na temperatura e umidade do ar.

Métodos de correlação aerodinâmicos e de turbulência requerem medidas diretas do fluxo ascendente de vapor d'água na atmosfera.

Métodos de combinação, incluindo-se o de Penman, combinam o balanço de energia relativo com o sistema ar-planta-solo e fatores que influenciam a transferência de calor e água para fora do sistema.

A transpiração e a evaporação atuais são geralmente menores do que as estimativas potenciais, por causa das restrições impostas pela falta de água no solo, limitação na extensão radicular e cobertura incompleta do solo pela folhagem.

A magnitude do efeito de um dado deficit de água no solo depende do tipo de solo e da porcentagem de esgotamento da água disponível e, consequentemente, do estresse ao qual a cultura é submetida. Normalmente quanto maior o estresse, tanto maior a redução no crescimento por causa da interferência na absorção de dióxido de carbono.

Efeitos do estresse de água em culturas

Altos valores de tensão de água no solo ou estresse (baixo potencial de água no solo), causados por teores baixos de água no solo, se opõem à passagem da água para a planta e através de suas superfícies transpirantes para a atmosfera. O resultado dessa oposição é o aumento do deficit de pressão de sucções dentro dos tecidos da planta e isto é ainda intensificado por condições de alta demanda evaporativa – forte radiação solar, alta temperatura, baixa umidade e movimento rápido de ar (altas velocidades de vento). Essas condições são típicas em ambientes tropicais e subtropicais (e assim em casa de vegetação e em região temperada) e necessitam apenas que a demanda evaporativa seja satisfeita para transformá-las de condições quase que letais em plantas para condições de máximo crescimento.

A restrição no suprimento de água diminui a entrada de dióxido de carbono, e, assim, uma planta com suprimento limitado de água é menor do que uma com suprimento não limitado de água. O desenvolvimento de órgãos é frequentemente mais lento em plantas sob estresse, mas há exceções como o amadurecimento de ervilhas que é provocado pela conversão de açúcar em amido nos cotilédones das sementes em desenvolvimento. O alívio ao estresse de umidade no momento da intumescência das sementes atrasa o amadurecimento e prolonga o período no qual as ervilhas são suficientemente doces para atender às exigências da indústria de produtos congelados.

O efeito mais óbvio que aparece na maioria das culturas com suprimento adequado de água é a produção de mais folhagem, em comparação com culturas em que ocasionalmente a transpiração é limitada. Essa folhagem extra pode ou não vir acompanhada por órgãos florais ou de armazenamento maiores ou em maior quantidade, e nisso diferentes espécies se comportam de modo desigual. O *Pelargonium zonal* produz, prioritariamente, folhas no lugar de flores, se supermolhado, mas couve-flor produz uma inflorescência maior; a ervilha produz mais grãos por vagem, se água extra for adicionada no momento da abertura das flores; mas ervilhas maiores, se a água é fornecida quando as vagens se intumescem. Existe ainda diferença de resposta entre cultivares. Alguns desses efeitos são o resultado da manutenção de determinado tratamento de água durante todo o desenvolvimento da cultura; outros ocorrem quando o estresse de água é aliviado temporariamente, durante um estádio de crescimento sensível à umidade. Em gramíneas, se a cultura for molhada antes desse estádio crítico, a produção requerida é constituída de folhas e não de sementes. Assim, o tratamento de irrigação deve ser dado a uma cultura em função de quais órgãos serão comercializados.

Esses fenômenos nos dão a oportunidade de fazer bom uso do suprimento controlado de água.

Relações solo-água-planta em algumas culturas de expressão econômica

Discutem-se aspectos de crescimento e desenvolvimento das espécies, tanto da parte aérea como do sistema radicular, períodos críticos de demanda de água e as necessidades hídricas.

Milho (*Zea mays* L.)

O milho (*Zea mays* L.) é originário da região andina da América Central e hoje é cultivado em todas as regiões temperadas e tropicais. É um dos cereais mais importantes tanto para o consumo humano como animal, sendo cultivado para grãos e forragem. A produção mundial atualmente é de 335 milhões de toneladas de grãos procedentes e, aproximadamente, 118 milhões de hectares.

Existem muitos tipos de milho adaptados a um amplo espectro de condições de clima e de cultivo. Ele é cultivado em épocas nas quais a temperatura média do ar é superior a 15 °C e livre de geadas. A adaptabilidade do material genético em diferentes climas muda muito, dependendo da seleção correta do material, de tal modo que a duração do ciclo fenológico da cultura coincida com a duração da temporada de crescimento e, ainda, da finalidade para a qual se produz a cultura.

Quando as temperaturas médias durante o ciclo são maiores que 20 °C, os genótipos precoces atingem a maturação entre 80 e 110 dias, e aqueles tardios entre 110 e 140 dias. Quando as temperaturas médias diárias são inferiores a 20 °C, estende-se o período para chegar ao amadurecimento em aproximadamente 10 a 20 dias para cada 0,5 °C de diminuição da temperatura, dependendo do genótipo. A 15 °C, a cultura de milho para grão leva de 200 a 300 dias para amadurecer. Com temperatura média diária de 10 °C a 15 °C, o milho é cultivado, principalmente, como forragem, por causa do problema de formação da semente e de amadurecimento do

grão sob condições frias. Para a germinação, a temperatura média mínima diária é de aproximadamente 10 °C, estando a ótima entre 18 °C e 20 °C. A cultura é muito sensível à geada, particularmente no estágio de plântula, porém tolera condições atmosféricas quentes e secas até enquanto se dispuser de água suficiente para a planta e as temperaturas forem inferiores a 45 °C. As necessidades de temperatura, expressas como soma das temperaturas médias diárias, para as cultivares de ciclo médio, são de 2.500 graus-dia a 3.000 graus-dia, enquanto as precoces necessitam em torno de 1.800 graus-dia, e as tardias de 3.700 graus-dia ou mais.

Com respeito ao fotoperíodo, o milho é considerado como planta neutra ou de dias curtos. Seu desenvolvimento é, porém, muito afetado pela quantidade de radiação solar, e as maiores produtividades são obtidas em condições de alta radiação. As cinco ou seis folhas situadas próximo ou acima da espiga são a fonte de assimilação para o enchimento de grão, e, portanto, a luz deverá penetrá-las. Os métodos de plantio e o espaçamento variam, sendo os fertilizantes e a água fatores decisivos na escolha da ótima população de plantas com relação à interceptação de luz e aos rendimentos máximos. A população varia de 20 mil plantas ha^{-1} a 30 mil plantas ha^{-1} para as cultivares tardias, até 50 mil plantas ha^{-1} a 80 mil plantas ha^{-1} para as cultivares precoces. O espaçamento entre fileiras varia entre 0,5 m e 0,90 m, e a profundidade de semeadura é de 5 cm a 7 cm, com uma ou mais sementes por cova. Quando se cultiva para forragem, a população de plantas é 50% maior.

O solo deve ser bem drenado e arejado, pois a cultura é sensível a condições de saturação de água, mesmo por alguns dias apenas. As necessidades de fertilizantes para o milho em grão são relativamente elevadas, chegando até cerca de 200 kg ha^{-1} de nitrogênio (N), 50 kg ha^{-1} a 80 kg ha^{-1} de fósforo (P) e 60 kg ha^{-1} a 100 kg ha^{-1} de potássio (K) para as cultivares altamente produtivas. Geralmente, a cultura pode ser produzida de forma contínua enquanto for mantida a fertilidade do solo.

A cultura do milho é moderadamente sensível à salinidade. As perdas de produtividade em razão da condutividade elétrica do solo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Perdas de produtividade de milho em função da condutividade elétrica do solo.

Perda (%)	Condutividade elétrica do solo (mmhos cm^{-1} a 25 °C, ou dS m^{-1})
0	0 a 2,5
10	5,0
25	6,0
50	7,0
100	10 ou mais

O sistema radicular é fasciculado, e sua profundidade é determinada geneticamente. De maneira geral, pode-se dizer que cerca de 60% do sistema se encontra na camada superficial de 0 a 30 cm, e que a profundidade média máxima é de 1 m, podendo, às vezes, atingir 1,5 m. A Tabela 2 mostra um exemplo de distribuição radicular para uma cultura de milho não irrigada.

Tabela 2. Extração de água do perfil de solo por uma cultura de milho em função do estádio de desenvolvimento.

Período (dias)	% de ET_a			
	Profundidade (cm)			
	0–30	30–60	60–90	90–120
0–15	100	0	0	0
15–30	70	30	0	0
30–60	60	20	20	0
60–90	60	15	15	10
90–120	60	15	15	10

% de ET_a: porcentagem da evapotranspiração de cada camada de solo.

Verificou-se que, para a maioria das cultivares, o desenvolvimento radicular é proporcional à umidade. Esse aumento também se reflete em aumento de produtividade. Por isso, a cultura é tida como exigente em água. Apesar disso, ela é uma das culturas mais eficientes no uso da água, i.e., produz um grande acúmulo de matéria seca por unidade de água absorvida.

Para produções ótimas, cultivares de ciclo médio (90 a 110 dias) exigem de 500 mm a 800 mm de água por ciclo, dependendo das condições climáticas. O período de máxima exigência é na fase do embonecamento ou um pouco depois dele; por isso, deficits de água que ocorrem nesse período são os que provocam maiores reduções na produtividade. Deficit de água anterior ao embonecamento reduz a produtividade em 20% a 30%; no embonecamento, em 40% a 50%; e após o embonecamento, em 10% a 20%. A extensão do período de deficit também é importante.

O milho tem por coeficientes de cultura os seguintes valores: 0,3 a 0,5 de 0 a 30 dias; 0,7 a 0,85 de 30 a 75 dias; 1,05 a 1,20 de 75 a 120 dias; 0,8 a 0,9 de 120 a 140 dias; e 0,55 na colheita.

Ótimas produtividades de milho variam de 6 t ha^{-1} a 9 t ha^{-1}. Em condições de chuva natural, a produtividade oscila entre 2 t ha^{-1} e 4 t ha^{-1}, dependendo do híbrido e das condições solo-clima.

Necessidades hídricas

Em termos de produção total de matéria seca, o milho utiliza eficientemente a água e, entre os cereais, é potencialmente a cultura de maior rendimento em grãos. Para se obter produção máxima, um cultivo de grãos com período médio de amadurecimento necessita entre 500 mm e 800 mm de água, dependendo do clima. Devem-se acrescentar a essa quantidade as perdas durante o transporte e a aplicação. O coeficiente de cultivo (kc) que relaciona as necessidades hídricas máximas (ETm) com a evapotranspiração de referência (ET_0) para diferentes estágios de crescimento da cultura do milho em grão é o seguinte: no estágio inicial, 0,3–0,5 (15 a 30 dias); no estágio de desenvolvimento, 0,7–0,85 (30 a 45 dias); no estágio intermediário, 1,05–1,2 (30 a 45 dias); no estágio final, 0,8–0,9 (10 a 30 dias); e, na colheita, 0,55–06.

Suprimento de água e rendimento da cultura

A frequência, a lâmina de irrigação e a chuva têm um efeito pronunciado sobre o rendimento em grãos. O milho parece ser relativamente tolerante aos deficits hídricos durante os períodos vegetativo (1) e de maturação (4). A maior diminuição nos rendimentos em grão provocada pelos deficits hídricos ocorre durante o período de floração (2), incluindo inflorescência, estigma e polinização, por causa, principalmente, da redução do número de grãos por espiga. Esse efeito é menos pronunciado quando a planta sofre deficit hídrico no período vegetativo precedente (1). Deficits hídricos severos durante o período de floração (2), particularmente na época de formação da espiga e da polinização, podem resultar num rendimento baixo ou nulo de grãos, em razão do secamento dos estigmas. Durante o período de formação da colheita (3), os deficits hídricos podem traduzir-se em diminuição de rendimento por causa da redução do tamanho do grão; porém, durante o período de maturação (4) tem pouco efeito sobre o rendimento de grãos.

O efeito da limitação de água sobre o rendimento do milho em grãos é considerável, e é necessário o controle cuidadoso da frequência e da lâmina de irrigação para obter rendimentos ótimos em condições de escassez de água. Portanto, onde o suprimento de água for limitado, pode ser mais vantajoso atender, dentro do possível, a todas as necessidades hídricas (ETm) para se obter rendimento próximo do máximo sobre uma área limitada, em vez de se distribuir a água limitada sobre uma área maior.

O milho prospera em solos bem drenados, devendo-se evitar o encharcamento, particularmente durante os períodos de floração (2) e formação da colheita (3). O encharcamento durante a floração (2) pode reduzir o rendimento em grãos em até 50% ou mais.

Absorção de água

Quando as condições de evaporação correspondem a uma ETm de 5 mm dia^{-1} a 6 mm dia^{-1}, o esgotamento da água disponível no solo (Sa) até 55% tem um pequeno efeito sobre o rendimento (p = 0,55). Para se obter um desenvolvimento rápido e profundo das raízes, pode ser vantajoso o esgotamento um pouco maior de água durante os períodos iniciais de crescimento. Durante o período de maturação, pode-se permitir um esgotamento de 80% ou mais.

Embora nos solos profundos as raízes possam atingir a profundidade de 2 m, o sistema mais ramificado fica situado na camada superior de 0,8 m a 1,0 m, e cerca de 80% da absorção da água do solo ocorre dentro dessa camada. A profundidade e a taxa de crescimento das raízes, no entanto, são bastante influenciadas pelo regime pluviométrico e práticas de irrigação adotadas. Além da umidade do solo e níveis dos nutrientes, a estratificação estrutural e textural, os sais e o lençol freático influem fortemente no desenvolvimento das raízes.

Calendário de irrigação

Para se obter boa uniformidade e desenvolvimento rápido das raízes, a zona radicular deve, onde for possível, estar úmida no momento da semeadura ou logo depois. Levando-se em conta o nível da ETm, para atender plenamente às necessidades hídricas, o nível de esgotamento da água fica em torno de 40% no período de estabelecimento (0), entre 55% e 65% durante os períodos 1, 2 e 3, e até 80% durante o período de maturação (4).

Onde a precipitação for baixa e o suprimento de água for limitado, o calendário de irrigação deve ser proposto com o objetivo de evitar os deficits hídricos durante o período de floração (2), seguido pelo período de formação da colheita (3). Quando um deficit hídrico severo é inevitável durante o período de floração (2), pode-se economizar água, reduzindo-se o suprimento durante o período vegetativo (1), bem como durante o de formação da colheita (3), sem provocar perdas adicionais de rendimento.

Em condições de chuvas marginais e suprimento limitado de água de irrigação, o número de irrigações pode variar entre 2 e 5. Em seguida, apresenta-se um calendário para o tempo dessas aplicações de irrigação (Tabela 3). Para se obter boa uniformidade e desenvolvimento adequado das raízes, a zona radicular potencial deve estar úmida, seja mediante chuvas ou irrigação, antes ou logo depois da semeadura.

Produtividade

Em condições irrigadas e produção de grãos para fins de comercialização, é considerada boa produtividade 6 t ha^{-1} a 9 t ha^{-1} (com 10% a 13% de umidade). A eficiência de utilização de água para o rendimento obtido (Ey) em grãos varia entre 0,8 kg m^{-3} e 1,6 kg m^{-3}.

Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)

O sorgo (*Sorghum bicolor*) parece ter sido cultivado na Etiópia há cerca de 5 mil anos. A produção mundial na atualidade é de 52 milhões de toneladas de grãos procedentes de 44 milhões de hectares.

Tabela 3. Calendário de aplicação de irrigação durante o período de desenvolvimento da cultura do milho.

Número de irrigações	Estabelecimento (0)	Vegetativo (1)	Floração (2)	Formação da colheita (3)	Maturação (4)
2	----------		----------		
3	----------	---------	------ ------	------	
4	----------	----------	---------	----------	
5	----------	------	----------	---------- ------	---------

O sorgo possui um número de características que o classifica como cultura resistente à seca. É cultivado extensivamente em condições de sequeiro para a produção de grãos e de forragem. Em zonas secas com precipitações baixas e/ou irregulares, a cultura pode responder de forma favorável à irrigação suplementar. Entretanto, existem diferenças consideráveis entre as diversas cultivares quanto à resposta à irrigação, sendo que aquelas consideradas muito tolerantes à seca respondem ligeiramente, enquanto as outras produzem rendimentos altos com irrigação, porém baixos quando a água é limitada. A temperatura é fator importante na seleção da cultivar. As temperaturas ótimas para as cultivares altamente produtivas são superiores a 25 °C, mas algumas estão adaptadas a temperaturas mais baixas, produzindo rendimentos aceitáveis. Quando as temperaturas médias diárias durante o período de crescimento são superiores a 20 °C, as cultivares precoces de grãos levam de 90 a 110 dias, e as intermediárias de 110 a 140 dias para amadurecer. Quando as temperaturas médias diárias são inferiores a 20 °C, há um prolongamento no período de crescimento de cerca de 10 a 20 dias para cada 0,5 °C de queda na temperatura. Dependendo da cultivar, e a 15 °C, a cultura de sorgo para grãos levaria de 150 a 300 dias até a maturação. Com temperaturas médias diárias na faixa de 10 °C a 15 °C, o cultivo de sorgo somente poderá ser realizado para forragem, em razão dos problemas relativos ao estabelecimento da semente e do amadurecimento do grão em condições frias. Temperaturas baixas (<15 °C) e altas (>35 °C) durante a floração e a formação da colheita provocam um mau estabelecimento da semente, problemas de maturação e rendimentos reduzidos.

Para interceptação ótima da luz, o índice de densidade (razão entre plantas por hectare e espaçamento entre fileiras) é em torno de 3 mil, quando se dispõem de quantidades suficientes de água e fertilizantes (100 mil plantas ha^{-1} a 150 mil plantas ha^{-1}). Em zonas com escassez de água (precipitação + irrigação), quanto maior for a escassez, maior será a vantagem de espaçamento maior. O sorgo é uma planta de dias curtos, porém existem cultivares neutras em relação à duração do dia.

A cultura se adapta bem à maioria dos solos, porém melhor nos de textura leve a média. O solo deve ter, preferencialmente, aeração e drenagem boas. O sorgo é relativamente tolerante a períodos curtos de encharcamento. As necessidades de fertilizantes são de até 180 kg ha^{-1} de N, 20 kg ha^{-1} a 45 kg ha^{-1} de P e 35 kg ha^{-1} a 80 kg ha^{-1} de K.

Necessidades hídricas

Para se obter produção elevada, as necessidades hídricas (Etm) da cultura de sorgo de 110 a 130 dias estão entre 450 mm e 650 mm, dependendo do clima, devendo-se incluir, ainda, as perdas durante a condução e a aplicação da água. O coeficiente de cultivo (kc), que relaciona a evapotranspiração máxima (Etm) com a evapotranspiração de referência (Et_0), possui os seguintes valores: durante o estágio inicial, 0,4 (20 a 25 dias); no estágio de desenvolvimento, 0,7–0,75 (30 a 40 dias); no estágio intermediário, 1,0 a 1,15 (40 a 45 dias); no estágio final, 0,75–0,8 (30 dias); e, na colheita, 0,5–0,55 (Tabela 4).

O sorgo é relativamente mais resistente à seca do que muitas outras culturas, como o milho. Isso se deve a seu sistema radicular extenso, ao controle efetivo da evapotranspiração e aos estômatos com capacidade de recuperação rápida após os períodos de estresse hídrico, assim como à sua capacidade de suportar a estiagem. Entretanto, quando o período de crescimento é longo, as cultivares com perfilhamento são capazes de se recuperar, até certo ponto, dos deficits hídricos anteriores nos períodos iniciais de crescimento, mediante a formação de perfilhos adicionais portadores de panículas. Os deficits hídricos severos durante o período de floração (2) causam o fracasso da polinização ou o secamento da panícula. A diminuição

Tabela 4. Períodos de desenvolvimento da cultura do sorgo.

Período	Período de desenvolvimento	Dia
0	**Estabelecimento** (desde a semeadura até o início da formação da espiga)	15–20
1	**Vegetativo** (desde o início da formação da panícula até a saída desta)	20–30
2	**Floração** (desde o início até o estabelecimento da semente)	15–20
3	**Formação da colheita** (desde o estabelecimento da semente até o amadurecimento fisiológico)	35–40
4	**Maturação** (desde o amadurecimento fisiológico até a colheita)	10–15
	Ciclo total da cultura do sorgo	95–125

de rendimento resultante pode ser compensada parcialmente pelos perfilhos adicionais com panícula.

O sorgo mostra grande flexibilidade com relação às lâminas e à frequência de suprimento de água em razão das suas características de resistência à seca. Quando o suprimento de água é limitado, pode ser vantajoso distribuir água disponível numa área maior. Embora se reduza o rendimento por unidade de área, a eficiência de utilização de água para o rendimento obtido será maior, resultando numa produção global superior em relação ao volume de água fornecido. O momento de suprimento de água deve ser programado com o objetivo de reduzir os deficits hídricos ao mínimo durante os períodos de estabelecimento (0), floração (2) e início de formação da colheita (início de 3).

Absorção de água

O sistema radicular principal, pouco ramificado, cresce rapidamente em solos profundos de 1 m a 1,5 m. O sistema secundário se inicia várias semanas após a emergência e estende-se rapidamente até 2 m, dependendo da profundidade de solo úmido. A profundidade máxima é atingida geralmente no momento da emissão das panículas. Em solos profundos, o sistema radicular extenso permite flexibilidade adicional no calendário de irrigação. Dependendo da lâmina e da frequência de irrigação, 60% (menos frequente) a 90% (frequente) da absorção de água ocorre a partir do primeiro metro de profundidade do solo. Normalmente, quando o sorgo está plenamente desenvolvido, 100% da água é extraída da primeira camada de 1 m a 2 m (D = 1-2 m). Em condições em que a Etm é de 5 mm dia^{-1} a 6 mm dia^{-1}, pode ser esgotado em torno de 55% da água total disponível no solo, sem reduzir a absorção de água (p = 0,55). Durante a maturação (4), pode ser esgotado até 80% da água disponível.

Calendário de irrigação

Quando a chuva não é suficiente e o suprimento de água de irrigação é limitado, para se alcançar a produção ótima, a aplicação de irrigação deve ser baseada no propósito de evitar os deficits hídricos durante os períodos de utilização máxima de água desde a floração (2) até o início do período de formação da colheita (3). Quando o suprimento de água for limitado durante o período de floração, a economia de água pode ser feita sem provocar perdas significativas de rendimento, reduzindo-se o suprimento de água durante o período vegetativo (1), no período final de formação da colheita (final de 3) e no período de maturação (4).

O número de irrigações varia normalmente entre um e quatro, dependendo das condições climá-

ticas e da textura do solo. A eficiência máxima de utilização de água será obtida quando essas irrigações estiverem bem programadas em relação à sensibilidade da cultura aos deficits hídricos.

A irrigação é reduzida, na maioria das vezes, por métodos superficiais (faixas, bacias ou corrugação).

Produtividade

Em condições de irrigação, são considerados bons rendimentos entre 3,5 t ha e 5,0 t ha (12% a 15% de umidade).

A produtividade em grãos, quando irrigado por inundação, com pouca ou nenhuma chuva, tendo período total de crescimento de 90 dias, com Etm de 425 mm a 450 mm e lâmina de aplicação líquida em torno de 300 mm, fica em torno de 800 kg ha^{-1}, com o máximo de 1.300 kg ha^{-1}.

Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa anual cultivada para obtenção de vagens verdes e, principalmente, de sementes secas em forma de grão. Ele é uma excelente fonte de proteína, principalmente nas regiões do terceiro mundo. Originário das regiões semitropicais da América Central, encontra-se adaptado a várias condições climáticas. A maioria das cultivares destinadas para a produção de grãos tem um crescimento determinado. Muitas, porém, têm um crescimento indeterminado, principalmente aquelas cultivadas para a produção de vagens verdes.

Apesar de a leguminosa possuir a capacidade de fixar nitrogênio da atmosfera em seus nódulos no sistema radicular, o feijão é tido como um mau fixador. Raramente mais de 30% de seu nitrogênio provém da fixação biológica simbiótica com as bactérias *Rhizobium* spp.

O feijão desenvolve-se bem em áreas de precipitação pluvial média, não se adapta a condições muito úmidas. Chuva em excesso e temperaturas altas causam a queda de flores e aumentam a incidência de moléstias. O intervalo ótimo de temperaturas médias diárias está entre 15 °C e 20 °C. Abaixo de 10 °C, o crescimento é praticamente inibido, e, acima de 27 °C, seu crescimento começa a ser prejudicado.

O ciclo completo da cultura é de 60 a 90 dias no caso de colheita de vagens verdes, e 90 a 120 dias para produção de grãos. A cultura é sensível à salinidade, e a redução de produção é função da condutividade elétrica (CE) do solo: 0% para CE de 0 a 1 mmhos cm^{-1} a 25 °C; 10% para 1,5 mmhos cm^{-1}; 25% para 2,3 mmhos cm^{-1}; 50% para 3,6 mmhos cm^{-1}; e 100% para valores maiores que 6,5 mmhos cm^{-1}.

O sistema radicular do feijão, apesar de poder atingir a profundidade de 1,0 m, é bastante superficial (80% a 90% nos primeiros 25 cm). Por isso, a cultura responde a frequentes irrigações. De forma geral, pode-se dizer que a cultura é muito sensível à umidade do solo, e sua produtividade pode ser fortemente afetada mesmo com curtos períodos de falta de água. Não existe informação adequada sobre os efeitos de deficit de água no período pré-floral, mas é de consenso geral que deficit de água durante a floração e formação de vagens diminui a produtividade. Em um experimento no qual a cultura foi submetida a um deficit de água correspondente a um potencial matricial de -8 atm em períodos: (a) após floração, (b) pré-floração, (c) floração, as reduções de produtividade foram, respectivamente, 35%, 53% e 71%.

Os coeficientes de cultura K, médios, variam de 0,3 a 0,4 de 0 a 20 dias; 0,65 a 0,75 de 20 a 40 dias; 0,95 a 1,05 de 40 a 70 dias; 0,9 a 0,95 de 70 a 90 dias; e 0,85 a 0,9 nos restantes até a colheita.

A necessidade de água da cultura para ciclos de 60 a 120 dias é de 300 mm a 500 mm; a falta de água pode, porém, reduzir sensivelmente a produtividade da cultura. Boas produtividades de feijão estão entre 1.500 kg ha^{-1} a 2.000 kg ha^{-1} de sementes secas, mas podem chegar a 3.000 kg ha^{-1}.

Referências

RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. (ed.). **A cultura do milho irrigado**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. 317 p.

SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; BRADSTREET, E. D.; HEMMINGSEN, E. A. Sap pressure in vascular plants: negative hydrostatic pressure can be measured in plants. **Science**, v. 148, p. 339-346, 1965. DOI: 10.1126/science.148.3668.339.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. (ed.). **Técnicos, fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.



Capítulo 5

Clima na irrigação

Reinaldo Lúcio Gomide

Introdução

As alterações climáticas se agravam a cada ano com extremos de temperatura, longos períodos de estiagem e fortes chuvas, provocando grandes catástrofes, como se pode observar em várias partes do Brasil e do mundo. Esse fato tem desafiado pesquisadores e ambientalistas a registrar/monitorar as condições climáticas locais e regionais para, com o uso de modelagem, simular situações e cenários adversos, bem como identificar possíveis ações mitigadoras. O estudo do clima, seus componentes e sua variabilidade espaço-temporal, tem despertado nesse sentido um grande interesse global e generalizado. Por se tratar de um componente ambiental, suas bruscas e intensas variações têm provocado inúmeros transtornos e prejuízos a todos os setores da atividade humana, principalmente ao agronegócio.

As condições climáticas local e regional, que são praticamente incontroláveis, estão entre os principais fatores que influenciam a produção agropecuária. Vários são os exemplos de quebras de safras no Brasil e em outros países, com enormes prejuízos ao agronegócio e à sociedade, em razão da ocorrência de adversidades climáticas, como chuva, seca, geada, granizo, entre outros (Figura 1). Assim, para que qualquer empreendimento agropecuário seja revertido em sucesso, as respostas interativas relativas às condições climáticas atuando na passagem da água no contínuo solo-planta-atmosfera precisam ser adequadamente quantificadas, monitoradas e caracterizadas, ao longo dos dias e dos anos.

O uso desses dados asseguraria aos sistemas agrícolas irrigados uma prevenção de estresse hídrico das plantas, por meio de aplicações de quantidades adequadas de água às culturas, assegurando tanto em quantidade como em qualidade boas produções.

Além disso, consideraria o contínuo solo-planta-atmosfera como um sistema dinâmico, biofisicamente integrado, em que os processos de transporte ocorrem interativamente, regidos pelos elementos climáticos de superfície, que

Infelizmente a grande maioria dos técnicos e usuários da agricultura irrigada no Brasil ainda não utiliza dados de elementos climáticos de superfície, para que se tenha qualquer tipo de critério e/ou estratégia de uso e manejo eficiente da água na irrigação.

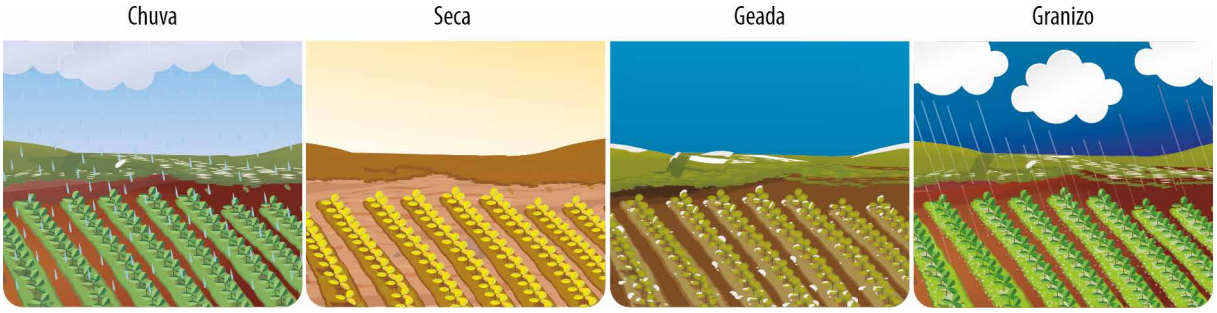


Figura 1. Ocorrência de adversidades climáticas (chuva, seca, geada, granizo) com enormes prejuízos ao agronegócio e à sociedade no Brasil e em outros países.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

atuam como força de demanda hídrica (dreno), além de parâmetros físico-hídricos de solo, que determinam o solo como fonte de água às plantas e de características fisiológicas ligadas a elas, que exercem influência direta sobre a transmissão e o transporte de água da fonte para o dreno.

Os principais elementos climáticos de superfície, alguns de forma indireta, com importância para o manejo da irrigação são: temperatura e umidade relativa do ar, precipitação (chuva), velocidade e direção do vento, irradiância solar ou radiação solar (Rs) global (mais comum), saldo de radiação (Rn), albedo (α), nebulosidade, pressão atmosférica, evaporação da água do Tanque Classe A e temperatura do solo.

Esses componentes são medidos e registrados tanto pelas estações meteorológicas padrões (EMPs) como pelas estações meteorológicas automáticas (EMAs). As EMPs, que hoje estão sendo desativadas e substituídas pelas automáticas, usam instrumentos com registros analógicos ou de leitura direta em escalas, enquanto as EMAs usam plataformas automáticas de aquisição de dados, geralmente de forma digital, fazendo uso de sensores e técnicas de microprocessamento. É sempre bom lembrar que dados climáticos de boa qualidade são indispensáveis para o uso nas áreas de produção agrícola de uma região, especialmente no que se refere à sua origem, adequação de acordo com as normas de aquisição e veracidade das informações utilizadas para sua elaboração.

As grandes extensões do território agrícola brasileiro demandam formações de redes de estações meteorológicas, com o propósito de gerar dados climáticos voltados para a agropecuária. Em vista disso, é primordial não somente a instalação, mas principalmente a operação e manutenção dessas redes, para que se tenha a espacialização de dados de clima com a utilização de geotécnicas, envolvendo o sensoriamento remoto, o geoprocessamento e a modelagem. Para isso, é essencial a participação e parcerias de órgãos governamentais (municipal, estadual e federal), principalmente com a colaboração de instituições de pesquisa e ensino e também da iniciativa privada. Hoje, as redes de estações meteorológicas no Brasil são gerenciadas e controladas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) por meio de seus distritos de meteorologia (Dismes), do Instituto de Pesquisas Espaciais (Inpe) e do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), ligados, respectivamente, aos ministérios da Agricultura e da Ciência e Tecnologia.

Neste capítulo, é discutido como se processa a interferência do clima no ciclo da água e no balanço da água no solo para uma condição de sistemas agrícolas irrigados, envolvendo toda a dinâmica da água no contínuo solo-planta-atmosfera. Para tanto, aquisição, registro, transferência, armazenamento e uso de dados e informações de elementos climáticos de superfície são apresentados e discutidos. Esses dados climáticos, uma vez registrados automaticamente, possibilitam a obtenção do requerimento de água de culturas e, consequentemente, permitem estabelecer estratégias de uso e manejo de água de irrigação, além de determinar o volume de água necessário aos sistemas agrícolas irrigados, e com isso dimensionar sistemas de bombeamento, distribuição e armazenamento de água.

Variáveis climáticas de superfície e sua importância para a agricultura irrigada

As condições climáticas de superfície são responsáveis pelo transporte, pela movimentação e circulação da água no ciclo hidrológico e influenciam diretamente o metabolismo, o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas. Além disso, afetam o seu requerimento de água, a extração de nutrientes pelo sistema radicular das plantas e a relação das plantas com microrganismos, insetos, fungos e bactérias, o que pode ou não favorecer a ocorrência de estresse hídrico de culturas e

de pragas e doenças. Elas são indicadoras das demandas de medidas de manejo, intervenção e controle mais adequadas às práticas agrícolas de campo, como preparo do solo, semeadura, adubação, irrigação, pulverizações, colheita, dentre outras. Para que possam ser eficientemente programadas e executadas, essas práticas dependem de condições específicas de clima. Nesse contexto, dada a grande importância do clima nas áreas de produção agrícola, pecuária e florestal, o registro e uso de dados e informações de elementos climáticos de superfície são fundamentais para entender melhor os processos envolvidos no ciclo da água e também no uso desse recurso natural nos sistemas agrícolas irrigados, de forma mais eficiente e racional e de modo a evitar impacto negativo ao ambiente e assegurar sustentabilidade às referidas áreas de produção (Figura 2).

A seguir, são apresentados os principais elementos climáticos de superfície com importância para o manejo da irrigação assim como as formas de medição deles por meio de EMAs configuradas para esse propósito (Figuras 3 e 4).

Temperatura e umidade relativa do ar

A temperatura do ar pode ser considerada o elemento climático que mais exerce influência sobre o vigor de culturas de grãos, e, de maneira geral, faz-se referência ao efeito prejudicial das altas temperaturas sobre o florescimento e a frutificação de várias espécies de cereais e leguminosas. Com relação à germinação dessas espécies, os valores de temperatura em torno de 28 °C são tidos como ótimos para muitas delas. Já o rendimento de grãos é bastante afetado quando a temperatura do ar, na floração, apresenta valores acima de 35 °C. Da mesma forma, temperaturas do ar abaixo de 12 °C podem provocar, dependendo da intensidade, abortamento de flores, concorrendo para um decréscimo no rendimento.

Foto: Reinaldo Lúcio Gomide



Figura 2. Registro e uso de dados e informações de elementos climáticos de superfície com as estações meteorológicas automáticas para a agricultura irrigada.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Fotos: Reinaldo Lúcio Gomide



Figura 3. Configuração típica de uma estação meteorológica automática (EMA) com os sensores mais utilizados para fins de uso e manejo da água na irrigação (A); e Tanque Classe A de medição automática de evaporação da água (B).

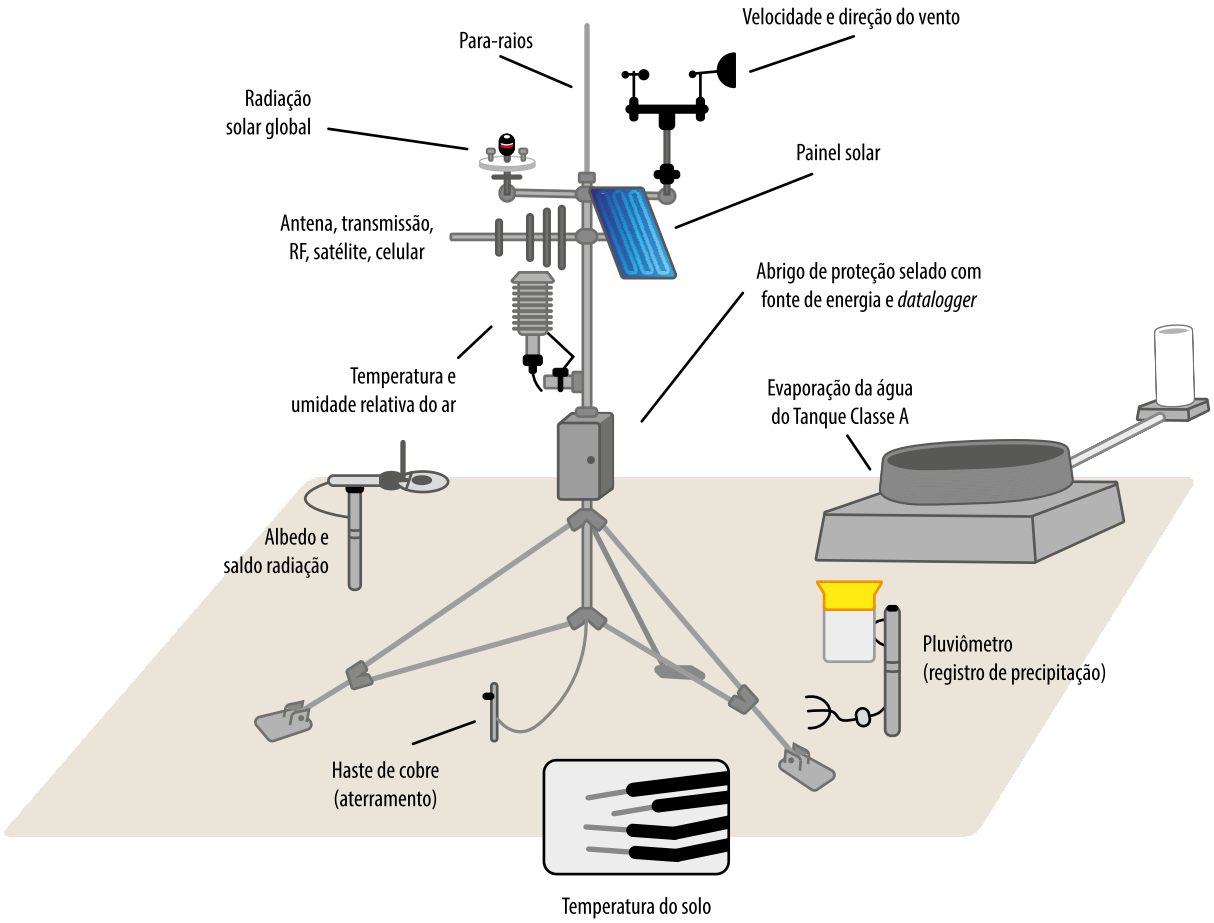


Figura 4. Esquema de uma estação meteorológica automática com sensores, sistemas de aquisição e transmissão (frequência de radio-RF, satélite, celular) de dados, fonte de energia (painel solar, baterias seladas recarregáveis), abrigo de proteção, sistemas de aterramento e para-raios totalmente integrados.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

A fotossíntese das plantas responde muito bem à temperatura do ar, que afeta a taxa das reações metabólicas das plantas, regulando o crescimento e o desenvolvimento vegetal. Regra geral, sob temperaturas crescentes induz-se o aumento da taxa de fotossíntese, invertendo-se, porém, essa relação, nas condições ambientais de temperaturas muito elevadas. A temperatura também afeta a respiração de manutenção, a transpiração, o repouso vegetativo, a duração das fases fenológicas das culturas, a indução ao florescimento, o conteúdo de óleo em grãos, a taxa de germinação de sementes, etc. (Pereira et al., 2002; Mavi; Tupper, 2004).

Lavouras instaladas em áreas que apresentam umidade relativa e temperatura do ar acima de 70% e 35 °C, respectivamente, chegam a ser dizimadas pela ocorrência de várias doenças. Tantas interferências tornam a temperatura um dos principais elementos de clima a ser considerado nos zoneamentos agroclimáticos, juntamente com a chuva (Camargo et al., 1974, 1977).

A umidade relativa do ar atua de diversas formas indiretas sobre as culturas, afetando, inclusive, o poder evaporante do ar e condicionando a transpiração. Ambientes muito secos levam ao aumento excessivo da transpiração, na maioria das plantas. Em outros casos, podem provocar danos indiretos resultantes de desordens fisiológicas. Além desses aspectos, a umidade do ar é muito importante na interação entre as plantas e os microrganismos, especialmente fungos e bactérias, causadores de doenças. Em condições de alta umidade, em que a duração do período de molhamento foliar é mais prolongada, há o favorecimento da ocorrência de doenças que afetam o desempenho das culturas, reduzindo a quantidade e a qualidade dos produtos agrícolas (Sentelhas, 2004).

Tanto a temperatura do ar (T) (°C) quanto a umidade relativa (UR) do ar (%) devem ser registradas a uma altura de 1,5 m a 2,0 m, por meio de sensores instalados dentro de abrigo meteorológico para evitar a incidência direta de Rs durante o dia e proteger do resfriamento por causa de ondas longas durante a noite (Figuras 3, 4 e 5). No entanto, destaca-se que a umidade relativa do ar é uma das variáveis mais difíceis de ser medida com precisão (Gomide, 1998). A UR expressa o grau de saturação de vapor d´água do ar como uma relação entre a pressão de vapor atual (e_a) e a pressão de vapor na saturação [$e_{s(T)}$] na mesma T, sendo adimensional e geralmente expressa em porcentagem (%).



Foto: Sara de Almeida Rios

Figura 5. Sensores de temperatura e umidade relativa do ar.

Um elemento sensor muito utilizado para medir a temperatura do ar é o termômetro de resistência de platina (TRP, 1.000 Ω), encapsulado em cerâmica, com características de estabilidade, confiabilidade e resposta extremamente rápida, assegurando uma transdução precisa da magnitude da temperatura do ar. Para a umidade relativa do ar, é comum a utilização de um sensor capacitivo. Ambos condicionam sinais de saída de 0 a 1.000 mV e são montados em uma única sonda de cerâmica (Figuras 3, 4 e 5). Além desses, também são utilizados para medir a temperatura do ar os termistores e termopares (TP), que mudam as suas resistências com a temperatura e já vêm calibrados de fábrica.

Radiação solar global

A radiação solar atinge a superfície terrestre de duas formas, direta e difusamente, e provê a energia necessária aos processos associados à fotossíntese das plantas, afetando assim a produção de carboidratos e, consequentemente, o crescimento da biomassa das plantas. O acúmulo desses dois componentes de energia denomina-se Rs global. A quantidade e a intensidade da radiação difusa dependem, basicamente, da latitude, altitude, declinação solar e da quantidade de nuvens. A Rs é registrada, geralmente, em W m^{-2}, a uma altura de 1,5 m a 2 m do solo, com um sensor que mede a radiação global incidente por meio de um detector fotovoltaico de silício, acondicionado em uma peça maciça (Figuras 3, 4 e 6). O sinal de saída desse sensor é geralmente da ordem de 0,2 kW m^{-2} mV^{-1} (Gomide, 1998). O aproveitamento da Rs pela planta depende da sua capacidade de interceptar e utilizar a luz, ou seja, a capacidade fotossintética. Por sua vez, a taxa fotossintética de uma cultura depende da distribuição da Rs nas diferentes camadas de folhas e do total absorvido em cada camada. O total de Rs interceptado e, eventualmente, absorvido por uma camada de folhas está diretamente relacionado ao ângulo foliar, à declinação solar, à distribuição espectral da radiação e à estruturação das folhas no dossel. Dessa forma, estudos agrometeorológicos sobre Rs em uma comunidade vegetal devem considerar não apenas o processo fotossintético como também a estrutura do dossel.

Radiação solar (Rs) é a principal fonte de energia disponível para transformar a água do estado líquido para vapor, sendo fundamental no processo de evapotranspiração de culturas. A quantidade potencial de radiação que pode chegar a uma superfície evaporante é determinada, além de sua localização também pela época do ano. Em razão das diferenças na posição do sol, a radiação potencial é diferente nas várias latitudes e nas diferentes estações. A Rs real que chega à superfície evaporante depende do estado da atmosfera e da presença de nuvens que refletem e absorvem partes principais da radiação. Quando se avalia o efeito da Rs na evapotranspiração, deve-se ter em mente que toda a energia disponível não é usada para vaporizar a água; parte dessa energia é usada para aquecer a atmosfera e o perfil do solo.

Velocidade e direção do vento

Os ventos são caracterizados pela sua direção e velocidade e afetam o crescimento das plantas por meio de seu efeito direto nas taxas de transpiração, na absorção de gás carbônico (CO_2) e no efeito mecânico sobre as folhas e os ramos. A direção do vento se refere à direção da qual

Fotos: Sara de Almeida Rios



Figura 6. Sensor de radiação global incidente e sua instalação em base niveladora.

o vento está vindo. Os sensores de medição de velocidade e direção do vento são construídos em alumínio para ter baixo peso e alta resistência à corrosão. Ambos devem ser instalados a 2,0 m de altura do solo. A velocidade do vento, em m s^{-1}, é medida com um anemômetro de três conchas, que produz um sinal cuja frequência é detectada por meio de um interruptor de luz, *light chopper*. A direção do vento é medida em graus, tendo como referência o norte verdadeiro e contado no sentido horário, com um leme e contrapeso conectado a um potenciômetro de precisão (Figuras 3, 4 e 7) (Gomide, 1998).

A transpiração tem relação direta com a velocidade dos ventos, sendo maior quando os ventos forem mais fortes (menor resistência aerodinâmica). Também o efeito dos ventos na transpiração tem que ser analisado de acordo com a temperatura e a umidade do ar do microclima local. Por exemplo, nos climas áridos, os ventos secos e quentes causam o rápido murchamento das plantas, em razão da baixa umidade e alta temperatura do ar no local. Em relação à absorção de CO_2, o efeito dos ventos geralmente tem características benéficas para as plantas, visto que a fotossíntese aumenta com um maior suprimento de CO_2, que por sua vez é favorecido pela turbulência. Já o efeito mecânico sobre as folhas e os ramos tende a ser prejudicial, visto que folhas danificadas têm sua capacidade de translocação e fotossíntese reduzidas. De acordo com Pereira et al. (2002), em velocidades baixas a moderadas, o vento contribui para a renovação do suprimento de CO_2 e para a manutenção da transpiração das plantas. No entanto, em velocidades excessivas, o vento é responsável pelo aumento demasiado da transpiração das plantas, levando ao fechamento dos estômatos, à redução do número de folhas e da área foliar, o que resulta em queda brusca da fotossíntese. Além disso, ventos intensos provocam danos mecânicos nas plantas, como acamamento, queda de folhas e quebra de galhos e troncos.

Precipitação e precipitação efetiva

A distribuição da precipitação pluvial na superfície terrestre resulta no abastecimento de água no perfil do solo, principalmente na zona efetiva das raízes, desempenhando um papel de grande importância na agricultura, uma vez que atua em quase todos os processos fisiológicos e bioquímicos. A precipitação pluvial funciona como veículo, através dos quais gases, minerais e outros solutos entram nas células e movem-se através da planta. Tem, ainda, papel importante na regulação térmica da planta, agindo tanto no resfriamento como na manutenção e na distribuição do calor. Apresenta elevada variação espacial e temporal de distribuição local e, principalmente, regional.



Fotos: Reinaldo Lúcio Gomide

Figura 7. Sensores de velocidade e direção do vento e sua instalação.

Situações de ocorrências extremas, como chuvas frequentes ou muito intensas, podem provocar erosão do solo, inviabilizar safras, atrasar colheitas e até mesmo ocasionar danos de ordem fitossanitária nas culturas, acarretando redução da produtividade agrícola e aumento do custo de produção. Da mesma forma, situações opostas, como veranicos ou mesmo períodos secos prolongados, podem inviabilizar a produção.

A precipitação é monitorada geralmente com um pluviômetro de caçamba oscilante, em mm h^{-1}, que deve ser instalado a uma altura de 1,5 m (Figuras 3, 4 e 8). A unidade é construída em alumínio anodizado e é composta de um funil, base e caçamba. A seção de captação do pluviômetro apresenta um diâmetro de 158,8 mm. O sensor é calibrado para registrar a precipitação com uma resolução de 0,25 mm pela geração de um pulso magnético (Gomide, 1998).

A chuva não afeta diretamente nenhum dos processos metabólicos das plantas. Contudo, ela age indiretamente, afetando tanto o crescimento quanto o desenvolvimento das culturas (Hoogenboom, 2000), além da disponibilidade hídrica dos solos que, por sua vez, influencia a absorção de água pelas raízes e o status hídrico das culturas. Em períodos de poucas chuvas, a seca induz as plantas ao fechamento de seus estômatos, fixando menos CO_2, afetando negativamente a fotossíntese. Em períodos com chuvas excessivas, levam à redução da oxigenação dos solos, diminuindo a atividade radicular e a absorção de água e nutrientes pelas plantas. Tanto as secas quanto o encharcamento dos solos levam à redução da produtividade das culturas.



Fotos: Reinaldo Lúcio Gomide

Figura 8. Pluviômetros de caçamba oscilante para registrar a precipitação e sua instalação.

No estudo da precipitação com fins de aplicação de água na agricultura irrigada, é de grande importância a determinação da precipitação efetiva (P_{ef}), visto que é realmente essa a parcela da precipitação que vai contribuir com a água disponível do solo às plantas. Uma definição mais moderna de P_{ef} envolve as necessidades de água dos sistemas agrícolas irrigados para os preparos dos solos, o desenvolvimento e a produção das culturas e até mesmo a lixiviação de sais. Deste modo, a P_{ef} é igual a precipitação total (P_{Total}) menos as perdas de água por escoamento superficial, percolação profunda e a variação de umidade no solo (Dastane, 1974). Por causa disso, a quantificação da P_{ef} é de grande utilidade nas irrigações, levando o irrigante a alcançar economia e uma maior eficiência no uso da água.

Os seguintes métodos podem ser utilizados na determinação da P_{ef} (Sampaio et al., 2000; Silva et al., 2010): a) porcentagem fixa (PF) (20%, 50% e 80%); b) fórmulas empíricas (Agriculture Low Water – AGLW/Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura – FAO); e c) programa aplicativo Cropwat, do Soil Conservation Service Method do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (Usda), desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) (Smith, 1992). O método da PF é definido como a P_{ef} com uma probabilidade de excedência respectiva à porcentagem aplicada; assim, 20% de probabilidade de excedência representam um ano considerado úmido; 50% se referem a um ano normal, aproximando-se de uma média; já 80% representam um ano seco, o que equivale a dizer, então, que quanto mais úmido o ano, menor a porcentagem da chuva que fica retida no solo disponível às plantas. As fórmulas empíricas (AGLW/FAO) foram desenvolvidas para climas áridos e subúmidos.

$$P_{ef} = 0{,}6\ P_{Total} - 10/3 \text{ para } P_{Total} \leq 70/3 \text{ mm} \quad (1)$$

$$P_{ef} = 0{,}8\ P_{Total} - 24/3 \text{ para } P_{Total} > 70/3 \text{ mm} \quad (2)$$

O método do Usda foi desenvolvido por meio de balanços hídricos relacionando-se a entrada da precipitação com as saídas, por escoamento superficial e percolação, bem como a água retida na zona radicular, para várias culturas. A precipitação efetiva é obtida pelas equações:

$$P_{ef} = P_{Total}\ [(125 - 0{,}2 \times 3 \times P_{Total})/125] \text{ para } P_{Total} \leq 250/3 \text{ mm} \quad (3)$$

$$P_{ef} = 125/3 + 0{,}1\ P_{Total} \text{ para } P_{Total} > 250/3 \text{ mm} \quad (4)$$

Os valores 3 nos denominadores de todas as equações representam o ajuste delas para períodos decendiais.

Evaporação da água do Tanque Classe A

A evaporação é a passagem da água para a atmosfera sob a forma de vapor, verificada em oceanos, lagos, rios, solos úmidos sem vegetação e outras superfícies de água. Essa evaporação como resultado da demanda atmosférica pode ser medida por meio da determinação da quantidade de água perdida por evaporação de um tanque aberto.

O modelo de tanque evaporimétrico mais utilizado em todo o mundo e adotado pela FAO é o Classe A.

O Tanque Classe A é um reservatório cilíndrico (Figura 3B e Figura 9) de 0,254 m de profundidade e 1.206 m de diâmetro, construído com uma chapa de metal não corrosiva e instalado sobre um estrado de madeira de 0,15 m de altura. Deve ficar nivelado com a lâmina de água a no máximo 5 cm da borda, e não deve deixar que essa lâmina atinja mais de 7,5 cm da borda, ocasião em que o tanque deverá ser reabastecido. A água deverá ser regularmente renovada para evitar turbidez. Se for tanque galvanizado, esse deverá ser pintado anualmente com tinta alumínio. O nível da água no interior do tanque

deve ser mantido dentro da faixa de 0,174 m a 0,204 m de profundidade.

A variação de nível da água do Tanque Classe A pode ser medida com um elemento sensor que fornece um sinal elétrico proporcional ao nível da água do tanque. A unidade é constituída de um flutuador, um contrapeso, uma corrente e uma roda dentada presa a um potenciômetro de precisão de 1 K Ω (Novalynx Systems, 1997). O conjunto fica instalado no interior de uma coluna de 20,3 cm de diâmetro e 66,0 cm de altura, com base nivelável, que funciona como poço tranquilizador para o flutuador, visando evitar rápidas flutuações de nível da água durante as medições (Gomide, 1998) (Figura 9). Essa coluna é conectada, lateralmente, ao tanque através de um tubo de PVC de 12,7 mm de diâmetro e 2 m de comprimento, formando um sistema de vasos comunicante (Figura 9). Dessa forma, uma mudança no nível da água no interior do tanque corresponderá a uma mesma mudança de nível no interior da coluna. Como a corrente está presa nas extremidades pelo flutuador e contrapeso e encaixada na roda dentada, a oscilação de nível é detectada pelo flutuador e transmitida ao potenciômetro que registra a variação de resistência. O sistema é calibrado para fornecer a leitura do nível da água do tanque em mm. O registro pode ser obtido a intervalos de 30 min a 60 min.

Foto: Reinaldo Lúcio Gomide



Figura 9. Registro automático de variação de nível da água de um tanque evaporimétrico Classe A e sua instalação sobre estrado de madeira, com um elemento sensor (potenciômetro) colocado no interior de uma coluna de base nivelável, conectada, lateralmente, ao tanque através de um tubo de PVC.

O Tanque Classe A fornece uma medida do efeito integrado da radiação, do vento, da temperatura e da umidade relativa do ar sobre a evaporação de uma superfície livre de água. De um modo similar, as plantas têm a mesma resposta a essas variáveis climáticas, mas muitos fatores podem produzir efeitos diferentes na perda de água pela cultura. A refletividade da Rs de uma superfície de água é de apenas 5% e 8%, enquanto superfícies vegetadas têm esse valor entre 20% e 25%. O armazenamento de calor no tanque pode ser apreciável e causar evaporação tanto de dia quanto de noite, ao passo que a maioria das culturas só transpira durante o dia. Também a diferença das perdas de água do tanque e das culturas pode ser causada pelas diferenças na turbulência, temperatura e umidade do ar imediatamente acima das superfícies. Além disso, a variação na cor do tanque e o uso de tela podem refletir na perda de água, assim como a sua localização no campo, em função de solo vegetado ou solo nu.

Apesar de todas essas deficiências, o uso racional do tanque para prever requerimento de água das culturas ainda é garantido, principalmente para períodos de 10 dias ou mais. Outros detalhamentos serão vistos em capítulo posterior.

Albedo e saldo de radiação

Uma quantidade considerável da Rs global que chega à superfície da terra é refletida. À fração da Rs que é refletida é denominada de albedo (α), que é bastante variável para os diferentes tipos de superfícies e ângulos de incidência e declividades dessas superfícies. Os valores de α variam desde elevados da ordem de 0,95 para superfícies com neve recém-precipitada a valores baixos de cerca de 0,05 para uma superfície de um solo nu e bastante úmido. Uma cobertura com vegetação verde tem um α em torno de 0,20 a 0,25. Para a cultura de referência

hipotética ou grama verde, o α assumido tem um valor de 0,23.

O α geralmente é medido com um elemento sensor de 12 setores que pode apresentar a forma triangular, aos quais estão conectados 72 termopares de cobre e constantan. Esses setores são feitos de cobre e as superfícies com os sensores são pintadas alternadamente com tintas nas cores preta (absorvente) e branca (refletiva). Os termopares estão todos conectados em série para fornecer o sinal de saída desejado. Quando o sensor, instalado a 1,5 m de altura, é exposto à radiação solar, um diferencial de temperatura existirá entre os setores pretos e brancos. Isso gera uma força eletromotriz, que é o sinal analógico enviado ao datalogger. Esse tipo de sensor pode apresentar dois lados, um voltado para cima onde é realizada a medição da radiação solar global (direta mais a difusa) e outro para baixo onde é feito o registro da radiação refletida ou α (Qualimetrics, modelo 3023). Desse modo, a saída dos sensores possibilita a investigação de α (reflexão), radiação global, refletida e Rn de ondas curtas. O sensor possui um espectro de resposta na faixa de 0,3 μ a 3,0 μ e um coeficiente de temperatura de 0,25% $^{o}C^{-1}$ (Gomide, 1998). Os elementos dos sensores são protegidos por uma doma de cristal de vidro e tubos com dessecantes em seu interior, que estão ligados aos sensores para evitar a umidade interna. Os sensores apresentam uma sensitividade da ordem de 0,014868 mV/W m^{-2} (Gomide, 1998).

O Rn é a diferença entre a soma algébrica do balanço de todas as ondas de radiação chegando (incidentes) e saindo (refletidas) de uma superfície, isto é, os componentes de radiação referentes às ondas curtas e longas, respectivamente (Gomide, 1998). Os valores de Rn normalmente são positivos durante o dia e negativos durante a noite.

A Figura 10 ilustra os sensores de α e Rn instalados a 1,5 m do solo, e o sinal enviado para o datalogger já é o Rn disponível, geralmente expresso em W m^{-2}. Esse sensor é robusto e compatível com a maioria dos dataloggers, com nível de bolha integrado para assegurar o seu nivelamento e garantir uma instalação apropriada. Também inclui hastes que impedem que pássaros se empoleirem nos radiômetros e está equipado com superfícies absorventes revestidas de um teflon, que proporciona uma manutenção muito fácil, resistentes ao clima sem a necessidade do uso de redomas plásticas frágeis. Esse sensor apresenta um espectro de resposta de 0 a 100 µm, um tempo de resposta de 20 s (nominal), uma sensibilidade de 10 µV W^{-1} m^2 (nominal), um sinal de saída na faixa de ± 25 mV, uma faixa de medição de ± 2.000 W m^{-2} e uma faixa de temperatura operacional de -30 °C a +70 °C.



Fotos: Sara de Almeida Rios

Figura 10. Sensores de albedo (α) e saldo de radiação (Rn), com haste para impedir o pouso de pássaros nos radiômetros e nível de bolha integrado para assegurar o seu nivelamento e sua instalação apropriada.

Temperatura do solo

A temperatura do solo pode ser registrada por meio de termistores e termopares, que geralmente são instalados a profundidades variando de 0,02 m a 0,15 m (Figura 11). É muito comum a utilização da sonda robusta (termistor modelo 107, Figura 11) precisa, que mede a temperatura do ar, solo, ou da água de -35 °C a +50 °C, por ter fácil interface com a maioria dos dataloggers e uma variedade de aplicações (Gomide, 1998).

Fotos: Reinaldo Lúcio Gomide



Figura 11. Sensores de temperatura do solo e sua instalação.

Manuais de instruções acompanham todos os sensores descritos, nos quais é possível acessar as orientações detalhadas de instalação, operação, manutenção, conexão de fios aos coletores de dados e configuração da aquisição dos dados (Tanner, 1990; Gomide, 1998). A maioria das plataformas já vem acompanhada com softwares, alguns para ambiente Windows, o qual permite ao técnico especialista editar o programa de coleta de dados, monitorar os dados das estações remotas em tempo real, descarregar os bancos de dados armazenados e executar o pré-processamento dos dados para posterior exportação aos diversos softwares de análise de dados (Microsoft Excel, IrrigaFácil, dentre outros) (Tanner, 1990; Gomide, 1998).

Medições climáticas pelas estações meteorológicas automáticas

As EMAs são plataformas baseadas em dispositivos eletrônicos e geralmente compostas de sensores para prover sinais eletrônicos dos elementos climáticos de superfície, amplificadores e conversores de sinais para ampliar e converter os sinais analógicos para valores digitais e áreas de memória, em que os dados coletados são armazenados (Figuras 3 e 4). Essas plataformas apresentam sistemas de aquisição de dados totalmente integrados, envolvendo coletores de dados (dataloggers), sensores e computadores (mesa – PCs, ou portáteis – notebooks), e são utilizadas para medir e registrar os elementos climáticos de superfície, de forma precisa e acurada, em intervalo de tempo programável (Gomide et al., 2001). A fonte de energia para alimentar a plataforma é proveniente de painéis solares e baterias seladas, que são recarregáveis durante o dia (Figura 3).

Na instalação de uma estação meteorológica é muito importante a escolha de um local que seja adequado e representativo das condições ambientais locais, e é necessário obedecer a alguns requisitos a fim de evitar interferências nas medições e registros de dados precisos dos elementos climáticos. Para isso, algumas exigências devem ser atendidas, a saber:

- O local deve ser plano para evitar o acúmulo de água e de preferência longe de instalações elétricas.
- A região desse local deve apresentar horizontes amplos, sem barreiras que impeçam a incidência da radiação solar ou influenciem ou

mudem as características do vento de velocidade e direção; para isso, uma regra que deve ser seguida é que a distância recomendada entre a estação e o obstáculo seja de pelo menos 10 vezes a altura desse obstáculo.

- A estação deve estar em locais distantes de cursos d'água, lagos e banhados, evitando distúrbios na medição da umidade relativa do ar.

Quando em funcionamento, as EMAs são programadas para fazer leituras ou varreduras nos sensores a intervalos de tempo de um segundo (1 s) a um minuto (1 min) e calcular as médias dos elementos climáticos registrados, para posterior armazenamento nas áreas de memória dos coletores de dados a cada intervalo, que pode variar de 0,5 hora a 1,0 hora. Apenas as médias dos dados são armazenadas no datalogger, para futura transferência, na forma de arquivo de dados por meio de interface direta via cabos com notebooks, dispositivo de armazenamento de dados externo (*flash memory*) e/ou transmissão à distância com sistemas de telemetria ou satélites, fazendo uso de ondas de frequência de rádio e de receptores/antenas de sinais de satélites, respectivamente. Os intervalos de varredura dos sensores e os cálculos de médias dos elementos climáticos podem ser alterados nos dataloggers, por meio de programação adequada, de acordo com a necessidade dos usuários.

Sistemas de memória portáteis são usados como dispositivos de armazenamento de dados externos para baixar (download) os dados de EMA. Além de serem leves, eles suportam comunicação direta entre um datalogger e um PC/notebook, podem servir como um dispositivo de armazenamento de até 8 GB, apresentam conectores compatíveis com USB 2.0 para conectá-los às portas USB do PC/notebook e, também, adaptadores USB/conector de nove pinos com cabos de extensão a serem conectados diretamente à porta de entrada/saída de um datalogger de uma EMA.

Medidas diretas de alguns elementos climáticos de superfície e de plantas são de suma importância na determinação do requerimento de água de culturas, ou seja, evapotranspiração das culturas (ETc), um processo combinado de transferência de água, na forma de vapor, de uma superfície coberta com vegetação para a atmosfera, incluindo a evaporação direta de água das superfícies dos solos e das plantas e a transpiração das plantas. Nessa transferência de vapor d'água, os elementos do clima controlam a força de demanda hídrica da atmosfera, atuando, no contínuo água-solo-planta-atmosfera (Aspa), como dreno. A taxa de evaporação direta da água do solo depende de sua estrutura e textura (tipo de solo), conteúdo de umidade, condutividade hidráulica e demanda evaporativa da atmosfera. Já a taxa de transpiração é uma função do gradiente de pressão de vapor do ar, da resistência ao fluxo de vapor d'água e da habilidade das plantas e do solo de transportar água. A transpiração é o mecanismo que fornece a principal energia (*driving force*) para a absorção de água das plantas contra as forças de gravidade e as resistências à fricção no trajeto da água do solo para a atmosfera. A automação das medições desses elementos climáticos, em tempo real, facilita a obtenção da ETc e, consequentemente, permite estabelecer estratégias de manejo de irrigação.



Medições climáticas pelas EMAs

Para fins de uso e manejo da água na irrigação, a configuração típica das EMAs envolve medições dos seguintes elementos climáticos de superfície (Gomide, 1998): temperatura e umidade relativa do ar, irradiância solar ou radiação solar global (mais comum) e Rn, velocidade e direção do vento, precipitação, evaporação da água do Tanque Classe A, albedo e temperatura do solo (Figuras 3 e 4).

Instruções e detalhes de características de operação, funcionamento, resolução, precisão, sensitividade, estabilidade, tipo de sinal gerado e endereços de distribuidores e fabricantes de vários sensores usados nas plataformas ou EMA podem ser encontrados em Tanner (1990).

Resultados de dados adquiridos de uma estação meteorológica automática

Resultados de dados típicos registrados de elementos climáticos de superfície de uma configuração típica de EMA, localizada na Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG, no período de dezembro de 2005 a maio de 2006, encontram-se nas Figuras 12 e 13 (Gomide et al., 2006). A variação diária da temperatura do ar mínima, média e máxima (*Tmín*, *Tméd* e *Tmáx*, respectivamente), em °C, é mostrada na Figura 12. Verifica-se que a amplitude térmica no período (diferença entre a *Tmáx* e *Tmín*) variou de 5 °C a 14 °C. Os valores registrados de temperatura do ar mínima, média e máxima variaram de aproximadamente 11 °C a 21 °C, 19 °C a 26 °C e 22 °C a 34 °C, respectivamente. Os dias 22 de abril e 5 de maio de 2006 apresentaram as mais baixas temperaturas do ar, 11,5 °C e 13 °C, respectivamente. As maiores temperaturas (*Tmáx*) estão na faixa de 30 °C a 34 °C e ocorreram nos meses de janeiro e fevereiro (verão). A mesma figura também mostra a variação diária da *Rs*, em MJ m^{-2} dia^{-1}, e temperatura do ar média (*Tméd*), em °C. Pode-se constatar a existência de uma relação praticamente direta de variação desses dois parâmetros microclimáticos. A *Rs* diária varia de um mínimo de 8,5 MJ m^{-2} dia^{-1} até um máximo de 30,5 MJ m^{-2} dia^{-1}. As oscilações abruptas dos valores diários de *Rs* podem ser explicadas principalmente pela ocorrência de nuvens (tempo nublado), que afetam diretamente a incidência direta e difusa dos raios solares.

Por último, a variação diária da umidade relativa do ar mínima, média e máxima (*URmín*, *URméd* e *URmáx*, respectivamente), em %, é apresentada também na Figura 12 (Gomide et al., 2006). Observa-se a ocorrência de dias mais secos com valores de *URmín* do ar abaixo de 35%. Isso associado às elevadas temperaturas do ar propicia condições de alta demanda evaporativa da atmosfera. Os valores de *URméd* do ar variaram de 68% a 100%, sendo o último valor por causa da situação de um dia com chuva.

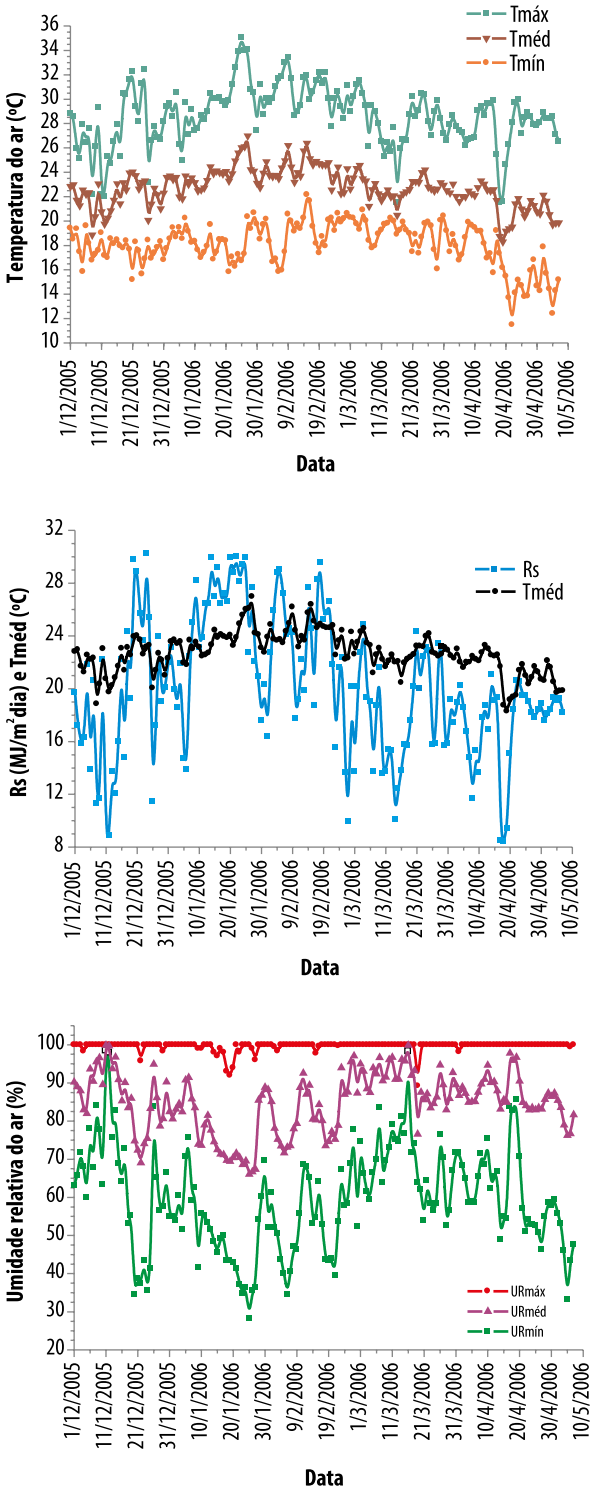


Figura 12. Variação diária da temperatura do ar mínima, média e máxima (Tmín, Tméd e Tmáx, respectivamente), em °C, da radiação solar (Rs), em MJ m^{-2} dia^{-1}, da umidade relativa do ar mínima, média e máxima (URmín, URméd e URmáx, respectivamente), em %, de dezembro de 2005 a maio de 2006, registrados na estação meteorológica automática (EMA) da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG.

Fonte: Gomide et al. (2006).

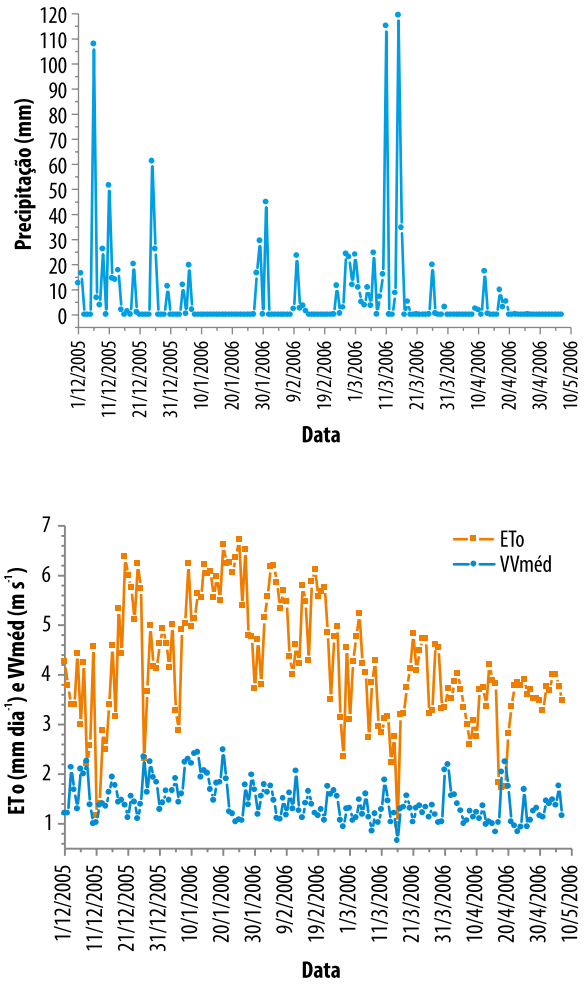


Figura 13. Variação diária da precipitação (Prec), em mm, da evapotranspiração de referência (ETo), em mm dia^{-1}, e velocidade média do vento (VVméd), em m s^{-1}, de dezembro de 2005 a maio de 2006, registrados na EMA da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG.

Fonte: Gomide et al. (2006).

A Figura 13 mostra a variação diária da precipitação (*Prec*), em mm. A estação chuvosa (dezembro de 2005 e janeiro a março de 2006) compreende período dos dados em que foram registrados os maiores valores diários de *Prec* (de 50 mm a 118 mm). A precipitação acumulada mensal foi de 396 mm, 126 mm, 108 mm, e 414 mm para os meses de dezembro de 2005 e janeiro a março de 2006, respectivamente.

As variações diárias da evapotranspiração de referência (*ETo*), em mm dia^{-1}, determinada pelo método de Penman-Monteith, e velocidade média do vento (*VVméd*), em m s^{-1}, encontram-se também na Figura 13 (Gomide et al., 2006). Os maiores valores diários de *ETo* (demanda hídrica da cultura) foram na faixa de 4,8 mm dia^{-1} a 6,6 mm dia^{-1}, e os menores valores diários foram da ordem de 1,2 mm dia^{-1} a 2,8 mm dia^{-1}. A variação diária da *VVméd* ficou na faixa de 0,6 m s^{-1} a 2,4 m s^{-1}.

Rede de Estações Meteorológicas Automáticas

Para atender as necessidades de dados de elementos climáticos de superfície nas diferentes regiões do País, o Brasil ainda não apresenta uma formação de redes de estações meteorológicas que seja suficiente e representativa. Hoje a concentração maior de distribuição dessas estações (pontos de observações meteorológicas) encontra-se nas áreas mais desenvolvidas do Sul e Sudeste, e a menor concentração é verificada nas áreas remotas, como no Norte (estado do Amazonas), Meio-Norte e Nordeste. Mas, em razão da crescente importância dos impactos de conhecimento e informações climáticas aos ambientes, esse número de estações meteorológicas vem aumentando. Atualmente, o Brasil conta com diversas redes de estações meteorológicas, e a mais importante é a coordenada pelo Inmet, que possui hoje pouco mais de 500 estações automáticas e 258 estações convencionais espalhadas pelo País. Outra rede de estações, não menos importante, é a coordenada pelo Inpe via seu Sistema Integrado de Dados Ambientais (Sinda), que possui várias estações meteorológicas pelo País. Os dados meteorológicos históricos de ambas as redes podem ser acessados via website nas respectivas plataformas desses órgãos.

Outras redes de estações meteorológicas são coordenadas por instituições estaduais como o Instituto Agronômico de Campinas (IAC) e o Instituto Agronômico do Paraná (Iapar), juntamente com o Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar), ambos com mais de 30 estações espalhadas nos estados de São Paulo e Paraná;

Fotos: Reinaldo Lúcio Gomide

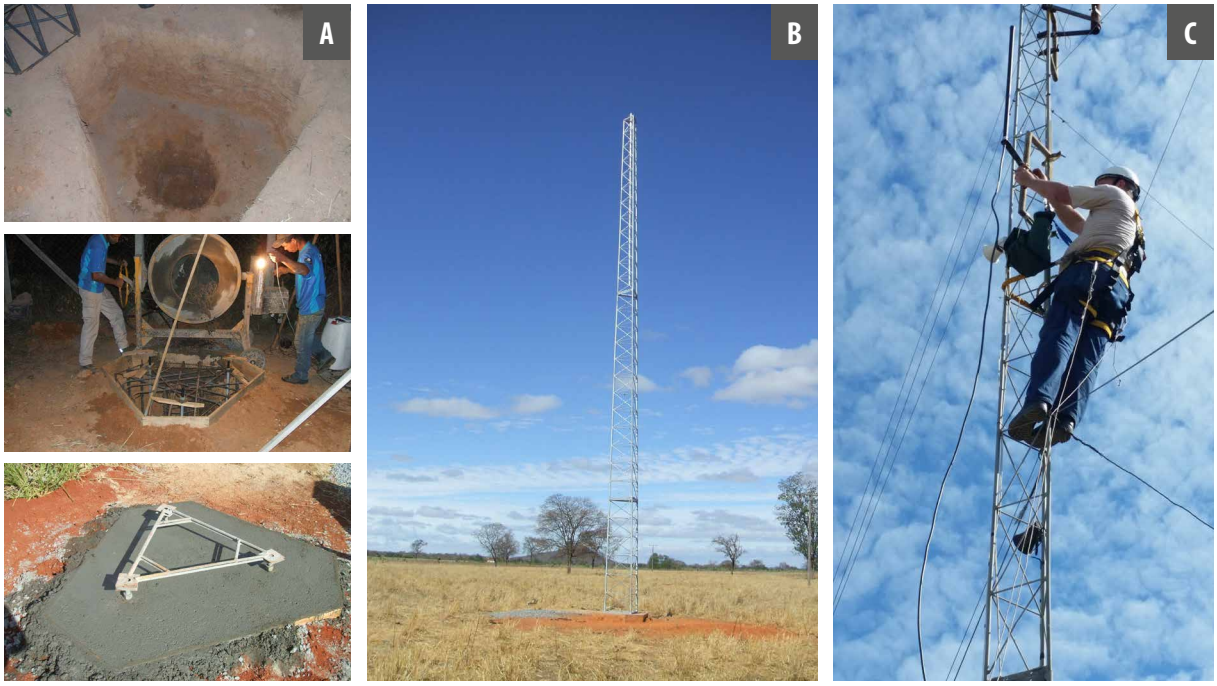


Figura 14. Construção de estação meteorológica automática. Abertura da fundação, com ferragens de concreto armado e gabarito (A), para chumbar a base triangular de concreto; instalação da torre metálica de 15 m de altura na Fazenda Angico, em Pai Pedro, MG (B); e montagem da torre/antena repetidora em Verdelândia, MG (C).

o Centro Integrado de Meteorologia e Recursos Hídricos de Santa Catarina (Climerh), entre outras. Algumas instituições de ensino, empresas de pesquisa e iniciativa privada também coordenam redes de estações meteorológicas, como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa).

Para ilustrar, vamos descrever nesse tópico como se encontra em operação a rede, coordenada pela Embrapa Milho e Sorgo, com 11 EMAs instaladas no norte de Minas Gerais, e distribuídas nos municípios de Mocambinho, Matias Cardoso, Gameleiras, Jaíba, Varzelândia, Verdelândia, Pai Pedro, Nova Porteirinha, São João da Ponte, Caçarema e Capitão Enéas. Observa-se, na Figura 14A, como foi feita a abertura de fundações de 1 m de profundidade, com o gabarito usado para chumbar a base triangular de concreto que recebeu a torre. Na Figura 14C, pode ser vista a instalação de uma antena repetidora na torre montada no alto de um morro em Verdelândia, MG.

Essas estações automáticas são compostas de sensores e acessórios para medição da Rs global, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, precipitação e temperatura de ponto de orvalho. Junto a cada uma das EMAs, foi instalada uma torre metálica de 15 m de altura, autoportante, seção transversal triangular, iniciando na fundação com base triangular equilátera de 0,90 m de lado e terminando no topo com uma seção triangular de 0,40 m de lado, com uma adaptação ajustável, para receber um tubo de 50 mm de diâmetro e 6 m de comprimento (Figura 14B). As torres da base (fundação) até o topo foram feitas com cantoneira de ferro galvanizado de 1 1/2" x 3/16" e vergalhões de barra de ferro redonda de 5/8" de diâmetro.

Observam-se, na Figura 15, as fotos da rede de EMAs instaladas em algumas fazendas de diferentes municípios, já descritos, situados na porção média da Bacia do Rio São Francisco no norte de Minas Gerais, coordenada pela Embrapa Milho e Sorgo.

Imagens de satélites com diferentes resoluções espaciais vêm sendo usadas nos trabalhos de pesquisa da rede de estações meteorológicas coordenadas pela Embrapa, conduzidos nos

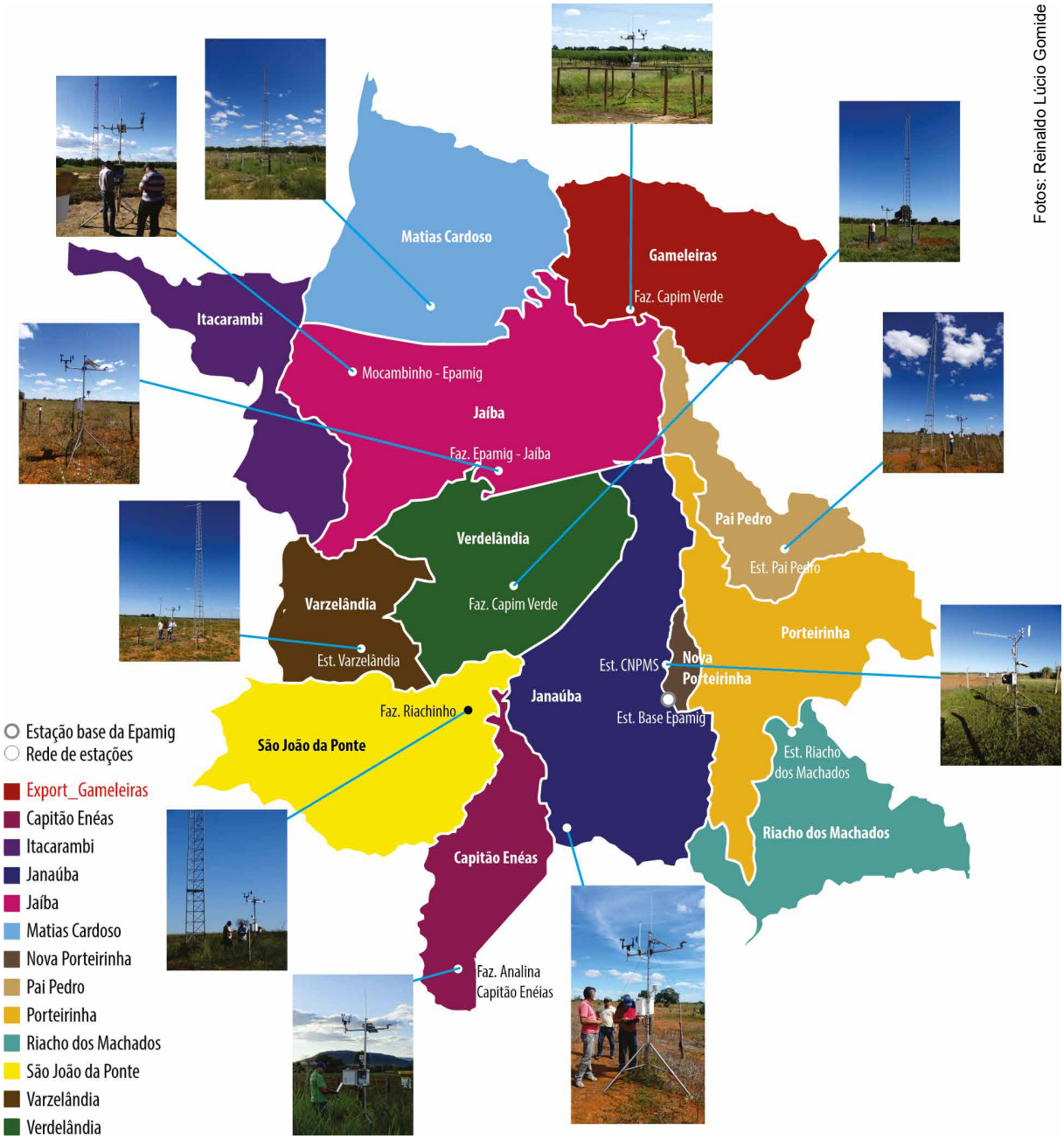


Figura 15. Rede de estações meteorológicas automáticas (pontos e linhas em azul), instaladas em algumas fazendas nos municípios de Nova Porteirinha, Pai Pedro, Verdelândia, Varzelândia, Capitão Enéas, São João da Ponte, Matias Cardoso, Mocambinho, Jaíba e Gameleiras, e situadas na porção média da Bacia do Rio São Francisco no norte de Minas.

centros de desenvolvimento das bacias hidrográficas Petrolina/Juazeiro e norte de Minas, do Rio São Francisco; do baixo Tietê, São José dos Dourados e Turvo Grande, do noroeste de São Paulo; e do Rio São Marcos, na parte central de Goiás, para estimativa de índices de vegetação, da evapotranspiração, de produção de biomassa, de produtividade da água e de estabelecimento das demandas hídricas das respectivas regiões.

Problemas de comunicação via sistema de transmissão por frequência de rádio (RF), verificados entre algumas EMAs, da rede do norte

de Minas Gerais, em razão da interferência de sinal do rádio pelo relevo (pequenas montanhas), demandaram a aquisição de unidades de módulos transmissores de sinal dos sensores por meio de comunicação via canal de satélite (Figura 16). Isso possibilitou cadastrar a rede de EMA no Sinda do Inpe, que pode ser acessado para efetuar o download dos dados climáticos no site. Uma vez acessado o site do Sinda, deve-se clicar no estado de Minas Gerais e, em seguida, selecionar as plataformas de coleta de dados (PCDs) ou EMA identificadas com as iniciais CNPMS (por exemplo: Fazenda Analina, Fazenda Angico, Fazenda Gado Bravo, Fazenda Itapoã, Fazenda Riachinho, Fazenda São Geraldo e Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais – Epamig Jaíba).

O aumento de redes de EMA, principalmente nas regiões do País com baixa densidade de distribuição, vai possibilitar a espacialização de dados de elementos climáticos de superfície e, consequentemente, uma melhor interpolação de variáveis climáticas com a utilização de geotécnicas (sensoriamento remoto, com imagens adquiridas de drones e satélites, geoprocessamento e a modelagem) em estudos de calibração de modelos biofísicos, em que os fatores relacionados a clima, evapotranspiração, biomassa, produtividade de água poderão ser passíveis de mapeamento, visando a um melhor entendimento de sua variabilidade espacial.

Referências

CAMARGO, A. P.; ALFONSI, R. R.; PINTO, H. S.; CHIARINI, J. V. Zoneamento da aptidão climática para culturas comerciais em zonas de cerrado. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 4., 1976, Brasília, DF. **Bases para utilização agropecuária**. São Paulo: Ed. da Edusp; Belo Horizonte: Itatiaia, 1977. p. 89-105.

CAMARGO, A. P.; PINTO, H. S.; PEDRO JÚNIOR, M. J. Aptidão climática de culturas agrícolas: In: ZONEAMENTO agrícola do Estado de São Paulo. São Paulo, 1974. v. 1, p. 109-149.

DASTANE, N. G. **Effective rainfall and irrigated water requirements**. Rome: FAO, 1974. 68 p. (Irrigation and Drainage Paper, 25).

GOMIDE, R. L. Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais**... Lavras: Ed. da Ufla: SBEA, 1998. p. 133-238.

GOMIDE, R. L.; ALBUQUERQUE, P. E. P. de; ANDRADE, C. de L. T. de; DURÃES, F. O. M.; VIANA, J. H. M. Utilização de estações climáticas automáticas nos estudos de clima e estresses hídricos de culturas para a fenotipagem de genótipos de cereais tolerantes à seca. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 26.; SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A LAGARTA-DO-

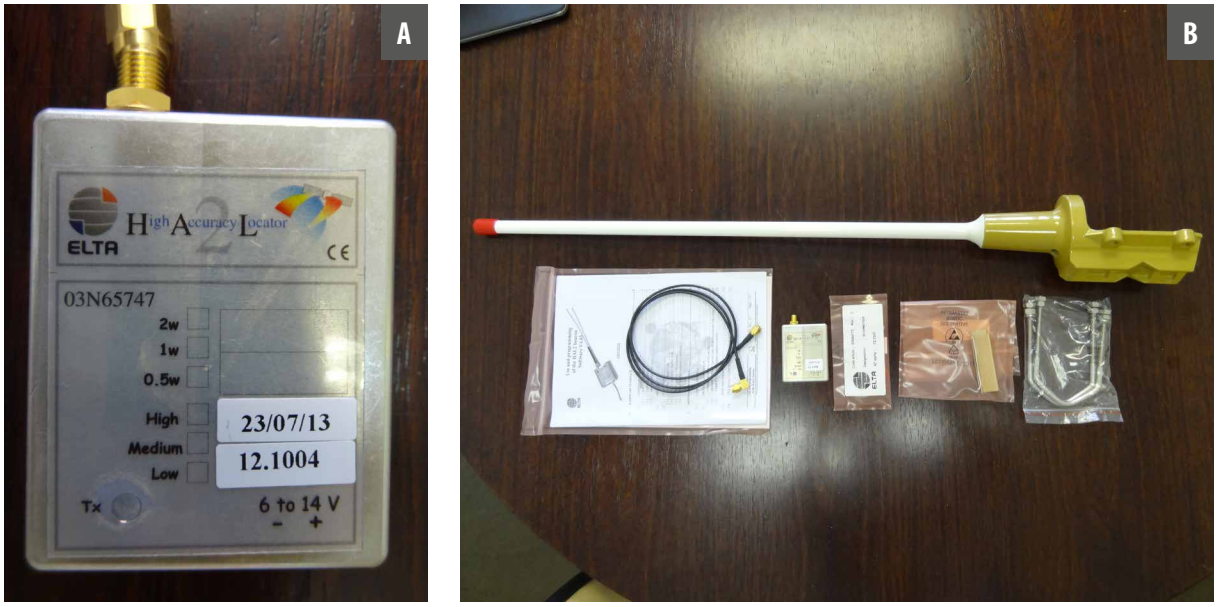


Figura 16. Comunicação via canal de satélite por meio de módulos transmissores (A), antenas, cabos e conexões (B), instalados em cada EMA, para acesso e download dos dados climáticos no sistema integrado de dados ambientais do Inpe.

CARTUCHO, SPODOPTERA FRUGIPERDA, 2.; SIMPÓSIO SOBRE COLLETOTRICHUM GRAMINICOLA, 1., 2006, Belo Horizonte. **Inovação para sistemas integrados de produção**: trabalhos apresentados. [Sete Lagoas]: ABMS, 2006. 1 CD-ROM.

GOMIDE, R. L.; ALBUQUERQUE, P. E. P. de; KOBAYASHI, M. K.; INAMASU, R. Y. **Microprocessor and automation techniques for registration of water requirements, stress indexes, and irrigation timing criteria of corn and beans crops in the Brazilian south-east irrigated fields**. St. Joseph: Asae, 2001. 11 p. (ASAE. Paper, 1-2049).

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p. 137-157, 2000. DOI: 10.1016/S0168-1923(00)00108-8.

MAVI, H. S.; TUPPER, G. J. **Agrometeorology**: principles and application of climate. New York: Food Products Press, 2004. 364 p.

NOVALYNX SYSTEMS INC. **Model 255-100 analog output evaporation gauge**. Rancho Cordova, 1997. 12 p. (Instruction Manual). Disponível em: https://novalynx.com/manuals/255-100-manual.pdf. Acesso em: 11 de julho de 2019.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia**: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Ed. Agropecuária, 2002. 478 p.

SAMPAIO, S. C.; CORREA, M. M.; BOAS, M. A. V.; OLIVEIRA, L. F. C. Estudo da precipitação efetiva para o Município de Lavras-MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 210-213, 2000.

SENTELHAS, P. C. **Duração do período de molhamento foliar**: aspectos operacionais da sua medida, variabilidade espacial em diferentes culturas e sua estimativa a partir do modelo de Penman-Monteith. 2004. 182 f. Tese (Livre Docência em Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

SILVA, A. P. N.; LIMA, F. J. L.; SILVA, A. O.; MOURA, G. B. de A. Valores efetivos de precipitação pluvial para manejo da irrigação na cana-de-açúcar em Goiana, Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 4, p. 585-591, out./dez. 2010. DOI: 10.5239/agraria.v5i4.980.

SMITH, M. **CROPWAT A computer program for irrigation planning and management**. Rome: FAO, 1992. 126 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 46).

TANNER, B. D. Automated weather stations. **Remote Sensing Reviews**, v. 5, n. 1, p. 73-98, 1990. DOI: 10.1080/02757259009532123.

Literatura recomendada

CAMPBELL SCIENTIFIC INC. **CS500 Temperature and Relative Humidity Probe**. Logan, 1996. 5 p. Disponível em: https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cs500.pdf. Acesso em: 11 jul. 2019.

CAMPBELL SCIENTIFIC INC. **NR-LITE Net Radiometer**. Logan, 2010. 22 p. Disponível em: https://s.campbellsci.com/documents/au/manuals/nr-lite2.pdf. Acesso em: 11 jul. 2019.

CAMPBELL SCIENTIFIC INC. **SC115 CS I/O 2G flash memory drive with USB interface**. Logan, 2016. 30 p. Disponível em: https://s.campbellsci.com/documents/us/miscellaneous/old-manuals/SC115%20CS%20IO%202G%20Flash%20Memory%20Drive%20with%20USB%20Interface.pdf. Acesso em: 11 jul. 2019.

CAMPBELL SCIENTIFICINC INC. **Tripod weather station installation manual**. Logan, 1995. 46 p. Disponível em: https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/tripod.pdf. Acesso em: 11 jul. 2019.

VAISALA. **User´s Guide**. Vaisala Humicap® Humidity and Temperature Probe HMP 155. Finland, 2012. 84 p. Disponível em: https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/HMP155_User_Guide_in_English.pdf. Acesso em: 1 fev. 2019.



PARTE 2

REQUISITOS DA IRRIGAÇÃO

Foto: Cássio Sampaio Pupo Nogueira (empresa Terra Molhada Irrigação)

Capítulo 6

Requerimento de água de culturas

Reinaldo Lúcio Gomide

Introdução

A medição do requerimento de água de culturas (anual, perene, pastagem, vegetação natural) envolve parâmetros ligados à passagem da água no contínuo solo-planta-atmosfera e é muito importante tanto na agricultura de sequeiro como na irrigada. A programação das irrigações depende fundamentalmente dessa medição, em que se busca fornecer uma quantidade adequada de água às culturas para prevenir o estresse hídrico que pode afetar, tanto em quantidade como em qualidade, a produção (grãos, frutas, hortaliças, pastagem, leite, carne, etc.). A quantidade de água requerida em cada irrigação e o momento de aplicação dessa água são parâmetros governados pelas condições climáticas locais, tipo de cultura e seu estádio de crescimento, profundidade efetiva do sistema radicular e umidade do solo. Sempre que a água proveniente da precipitação efetiva não for suficiente para atender à demanda hídrica das plantas, e a disponibilidade de água do solo for esgotada em níveis que vão provocar redução significativa de produtividade, haverá necessidade de suprir a carência hídrica das culturas com a aplicação de água de irrigação.

Medidas diretas de alguns elementos climáticos de superfície e de plantas são de suma importância na determinação do requerimento de água de culturas, ou seja, da evapotranspiração das culturas (ETc). A automação dessas medições com estações meteorológicas automáticas, em tempo real, facilita a obtenção da ETc e, consequentemente, permite estabelecer estratégias de manejo de irrigação, determinar o volume de água necessário aos sistemas agrícolas, principalmente os irrigados, e dimensionar sistemas de bombeamento, distribuição e armazenamento de água (Figura 1).

O manejo racional da água principalmente na agricultura irrigada envolve tanto a sua reposição no perfil do solo quanto a remoção de seu excesso. A sua reposição pode ocorrer artificialmente por meio de um sistema de irrigação, ou naturalmente pela distribuição de precipitações pluviométricas. Na programação da irrigação, tanto na fase de elaboração do projeto como na operação e no manejo do sistema, a água disponível no solo para as plantas é usualmente calculada com base no balanço hídrico da região, que tem na evapotranspiração de referência (ETo), ETc e precipitação efetiva seus principais componentes (Heermann, 1985; Ritchie, 1985; Mizyed et al., 1991).

A evapotranspiração das culturas pode ser medida por meio de lisímetros ou estimada por equações que envolvem dados climáticos de superfície. De acordo com Jensen (1974) e Tanner (1967), as equações podem ser classificadas com base em seus termos em equações de: radiação, evaporação, temperatura, umidade e múltipla correlação ou combinadas, podendo ter base física, empírica ou então envolver base física aliada a fatores ou componentes empíricos. Hoje, a aplicação de geotécnicas (sensoriamento remoto com aquisição de imagens por drones e satélites e geoprocessamento), associada a modelos/equações de determinação da ETc, permite uma análise espacial de como está distribuída a ETc (Engman, 1993; Medina et al., 1998; Allen et al., 2002), com a possibilidade de geração de mapas temáticos de ETc para áreas extensas, em tempos relativamente curtos, envolvendo a quantificação de parâmetros

Fotos: Reinaldo Lúcio Gomide



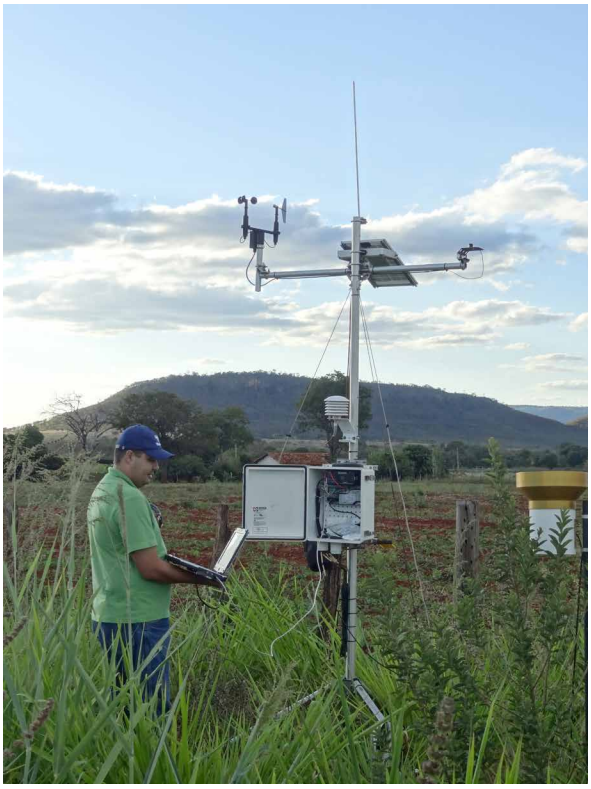


Figura 1. Estabelecimento de estratégias de manejo de irrigação a partir de determinação do requerimento de água de culturas (evapotranspiração) com registros de elementos climáticos de superfície de estações meteorológicas automáticas.

biofísicos da superfície terrestre, com alta resolução temporal e espacial.

Neste capítulo, o requerimento de água de culturas é apresentado e discutido, enfatizando-se os fatores ambientais e fisiológicos que afetam a estimativa da ETc em escalas local e regional. São descritas equações de estimativa de evapotranspiração de referência (ETo), junto com os elementos climáticos de superfície necessários e o novo conceito de manejo da água com base em algumas técnicas de sensoriamento remoto (SR), usadas na espacialização da ETc.

Fatores ambientais e fisiológicos que afetam a evapotranspiração

A evapotranspiração é um processo físico difusivo, e envolve uma parte turbulenta e outra molecular. Exceto na fina camada próxima à superfície evaporante, a parte turbulenta é o mecanismo dominante, que depende da taxa de variação da velocidade do vento com a altura. De acordo com a teoria da turbulência, o fluxo de vapor d'água para cima é igual ao produto do gradiente vertical de pressão de vapor e a taxa de mistura.

É impossível uma interpretação estritamente física do processo de evapotranspiração, sem o necessário envolvimento e padronização do tipo de vegetação, tendo em vista a estrutura complexa dos processos turbulentos no interior e na parte acima do dossel vegetativo, as-



É importante salientar que a evaporação é proporcional ao deficit de saturação da pressão de vapor quando a temperatura da superfície evaporante é igual à temperatura do ar. Caso contrário (mais comum na prática, uma vez que é predominantemente a falta dessa igualdade), a evaporação é proporcional ao gradiente de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar (Figura 2).

sociados ao fenômeno da partição do saldo de energia radiante e à própria fisiologia das plantas. Portanto, o processo deve ser considerado biofísico para um melhor entendimento da evapotranspiração (Figura 2).

Para fins de manejo de irrigação e da maioria das aplicações, o conceito do processo de evapotranspiração é considerado unidimensional, particularmente em relação aos aspectos da evaporação e aos processos de trocas de energia, o que significa que todos os fluxos de vapor d'água são uniformes e verticais ao longo da superfície horizontal coberta com a vegetação que deve ser representativa de plantio de grande escala para evitar o efeito de bordadura de energia advectiva de áreas adjacentes ou efeito oásis.

Fatores ambientais que influenciam a demanda atmosférica

O efeito de fatores ambientais sobre a evapotranspiração é chamado de demanda atmosférica ou demanda evaporativa. Quanto maior a demanda atmosférica, mais rápido a água pode ser evaporada de uma superfície de água livre. Os seguintes fatores influenciam a demanda atmosférica:

- Radiação solar (R_s) – Da radiação solar absorvida pelas folhas das plantas, 1% a 5% é usada no processo de fotossíntese, e 75% a 85% é utilizada no processo de aquecimento das folhas e do ar atmosférico logo acima do dossel da cultura (fluxo de calor sensível) e, também, no processo de evapotranspiração (fluxo de calor latente). Um aumento na R_s aumenta a demanda atmosférica e a temperatura do ar (Figura 3).
- Temperatura do ar (T_a) – A elevação da temperatura do ar aumenta a capacidade de retenção de umidade do ar, o que resulta uma maior demanda atmosférica (Figura 3).
- Umidade relativa do ar (UR) – Quanto maior o conteúdo de umidade (vapor d'água) do ar, maior será o potencial hídrico da atmosfera.

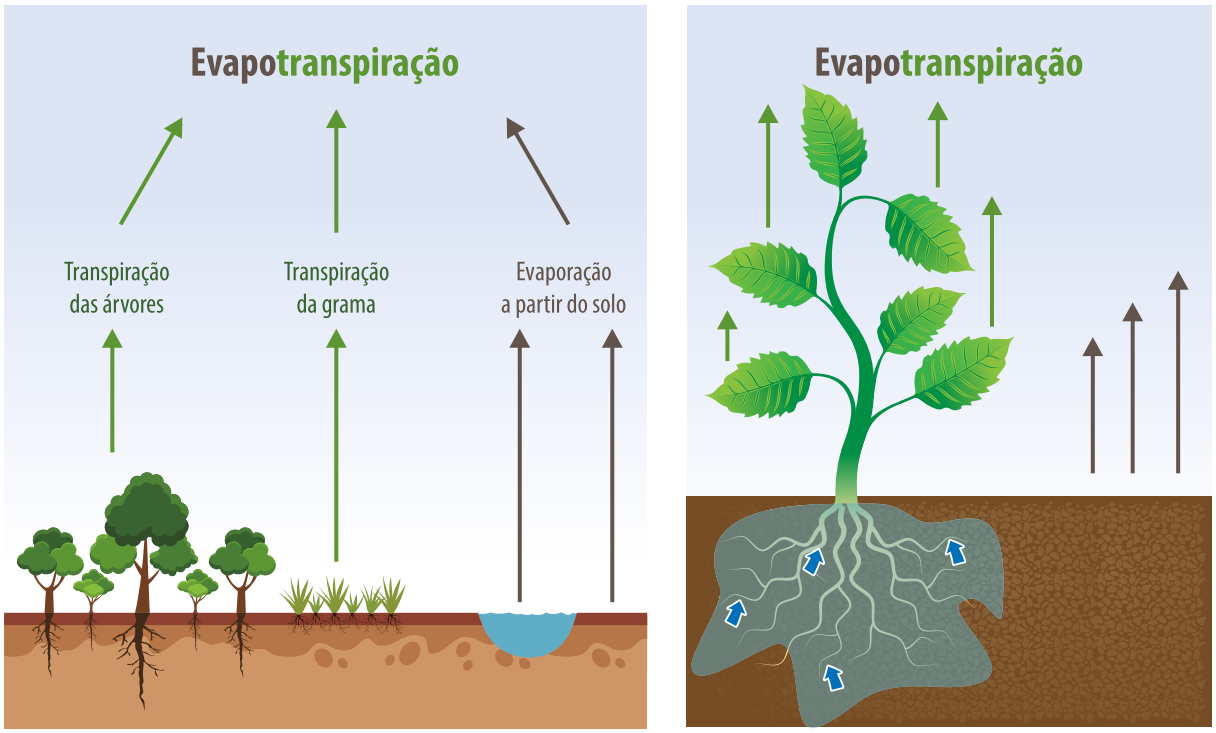


Figura 2. Evapotranspiração como processo biofísico difusivo, com tipo de dossel vegetativo e parte turbulenta e molecular de fluxo de vapor d'água, associada à taxa de variação da velocidade do vento com a altura das plantas em relação ao solo.

Ilustração: Paula Cristina Rodrigues Franco.

Isso significa que a demanda atmosférica diminui com o aumento da UR do ar (Figura 3).

- Vento – O processo de transpiração ocorre quando há difusão do vapor d'água através dos estômatos. A Figura 4A ilustra a difusão de vapor d'água através de uma abertura estomatal, para uma condição de ar parado, sem vento ou velocidade do vento muito baixa (sem turbulência), no exterior da folha (Gardner et al., 1985). Observa-se que um gradiente de difusão de vapor d'água é formado ao redor dessa abertura que reduz a taxa de transpiração. Nessa situação, a difusão do vapor d'água do interior da cavidade subestomatal é quase equilibrada pelo gradiente de pressão de vapor formado do lado de fora da folha. Isso reduz a taxa de transpiração e aumenta bastante a resistência aerodinâmica (r_a).

A Figura 4B ilustra o processo de formação de turbulência, que é iniciado para condições em que a velocidade do vento começa a aumentar, provocando uma remoção de vapor de água (umidade) próxima às folhas das plantas, um aumento da diferença em potencial hídrico internamente e imediatamente do lado de fora das aberturas estomatais e um aumento da difusão líquida de vapor d'água das folhas, mostrando os parâmetros relevantes envolvidos no processo (pressão de vapor d'água saturada ($e_{s,\,sat} \cong e_{z,sat}$) e atual ($e_z$), temperatura no interior da cavidade subestomática (T_s), temperatura do lado de fora da abertura estomatal (T_z) e resistências aerodinâmica (r_a) e estomática (r_c) (Bos et al., 1996).

O efeito do vento sobre a transpiração estomática e abertura estomatal encontra-se também ilustrado na Figura 5. Observa-se que, para pequenas aberturas estomatais, não há grandes diferenças na difusão de vapor d'água ou taxa de transpiração, quando se comparam as diferentes condições de vento. Essa diferença aumenta abruptamente com o aumento da abertura dos estômatos para a condição de velocidade de vento.

Fatores fisiológicos

Os fatores relacionados às plantas interferem, definem e modificam a taxa de evapotranspiração, afetando diretamente as resistências ao movimento da água do solo para a atmosfera. Dentre eles, destacam-se:

- **Fechamento estomatal** – Praticamente a totalidade da transpiração ocorre através dos estômatos por causa da relativa impermeabilidade da cutícula. Quase nenhuma transpiração ocorre quando os estômatos estão fechados. À medida que a abertura dos estômatos aumenta, uma maior quantidade de vapor d'água pode ser transportada para a atmosfera. Dentre os fatores que influenciam



Figura 3. Efeitos da radiação solar (R_s), temperatura do ar (T_a) e umidade relativa do ar (UR) na demanda evaporativa da atmosfera e nos processos de aquecimento das folhas, do ar atmosférico logo acima do dossel da cultura (fluxo de calor sensível) e de evapotranspiração (fluxo de calor latente).

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

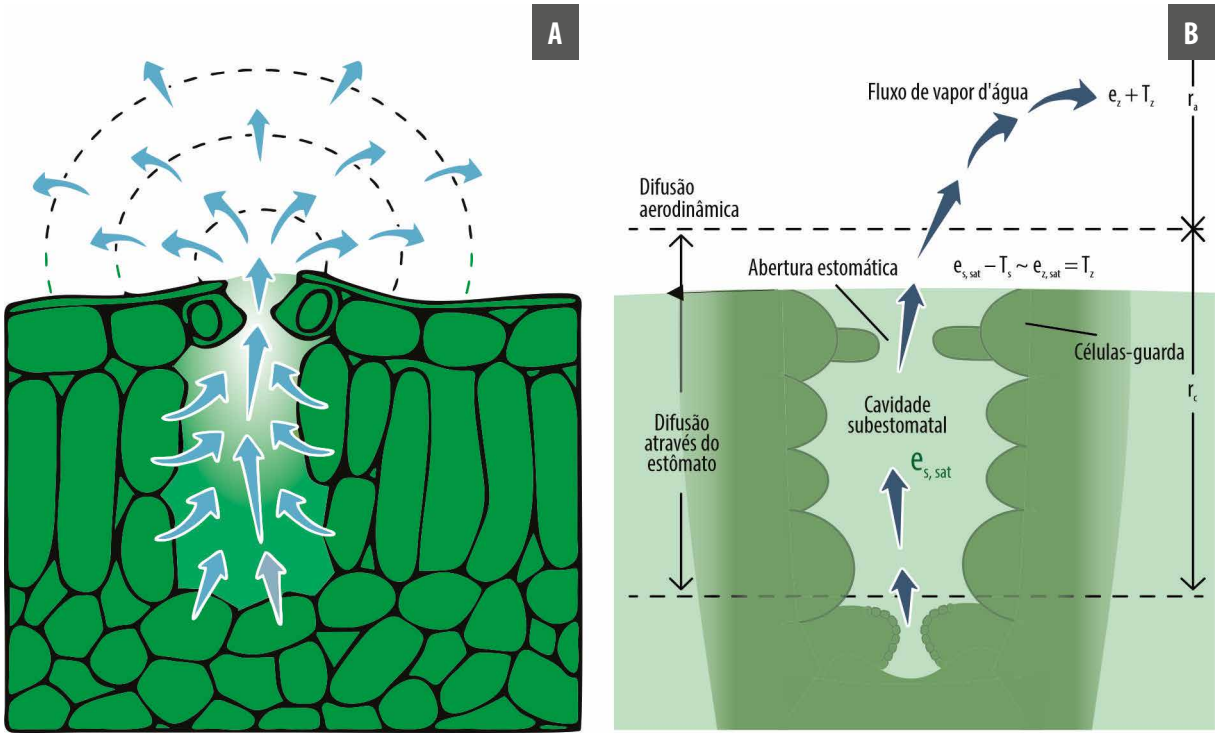


Figura 4. Difusão de vapor d'água através de uma abertura estomatal no exterior de uma folha, para duas condições: sem vento (sem turbulência), um gradiente de difusão de vapor d'água é gerado, reduzindo a taxa de transpiração (A); e com vento (com turbulência), parâmetros envolvidos no processo: pressão de vapor d'água saturada – $e_{s,sat} \cong e_{z,sat}$ e atual – e_z, temperatura no interior da cavidade subestomática – T_s, temperatura do lado de fora da abertura estomatal – T_z e resistências aerodinâmica – r_a e estomática – r_c (B).

Fonte: Adaptados de (A) Gardner et al. (1985) e (B) Bos et al. (1996).

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

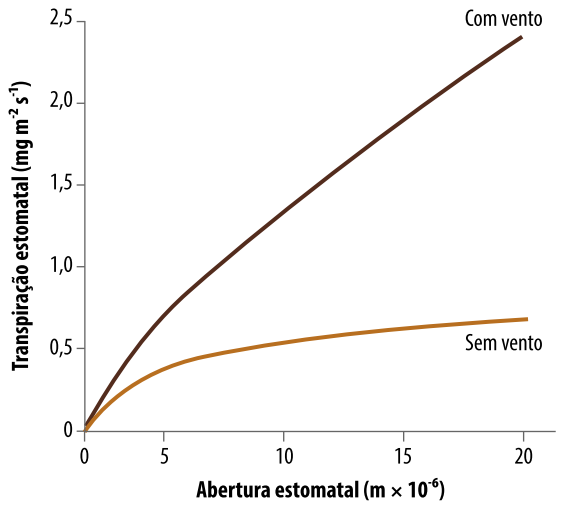


Figura 5. Efeito do vento sobre a transpiração estomática e abertura estomatal.

Fonte: Adaptado de Gardner et al. (1985).

a abertura e o fechamento dos estômatos, os principais são: a luz e o nível de umidade nas folhas. Na maioria das plantas, o aumento da luminosidade causa a abertura dos estômatos, e a redução do nível de umidade nas folhas (baixo potencial hídrico) provoca o fechamento dos estômatos, em virtude da redução do turgor das células-guarda (Figura 6).

- **Tamanho e número dos estômatos** – A maioria das folhas de várias espécies de plantas, produtivas comercialmente, apresenta estômatos em ambas as faces, isto é, face superior ou adaxial e face inferior ou abaxial. O tamanho e o número dos estômatos, que são afetados pelos genótipos e meio ambiente, apresentam menor efeito sobre a transpiração total das plantas quando comparados com a abertura e o fechamento estomatal (Figura 6).

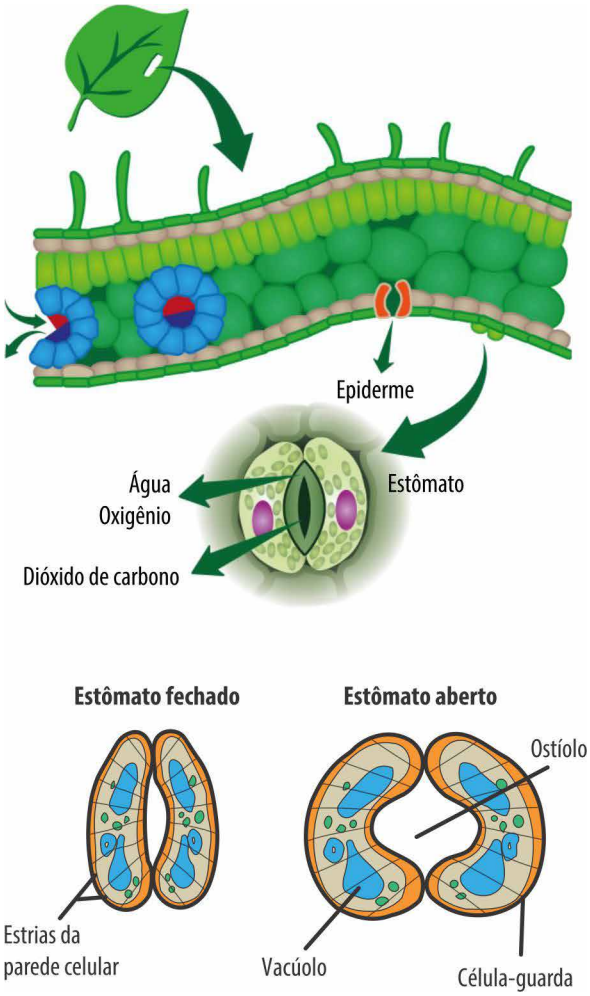


Figura 6. Tamanho, número, abertura e fechamento de estômatos nas folhas, por onde ocorrem os fluxos de vapor d´água ou as taxas de transpiração, afetados pelos genótipos, dinâmica da água nas plantas e ambiente.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

- **Quantidade de folhas** – Quanto maior a área foliar de uma determinada espécie, maior será a evapotranspiração. Para expressar a quantidade de folhas em termos de área foliar por unidade de área plantada (portanto adimensional), é muito utilizado o índice de área foliar (*IAF*), que é definido como a razão da área foliar de um determinado número de plantas para a área de superfície de solo, ocupada por essas plantas. A Figura 7 ilustra o efeito da variação do *IAF* na relação entre requerimento de água de uma cultura de soja (*ET*) e evaporação da água de um tanque aberto (como o Classe A – ECA) ao longo do ciclo da cultura. A *ET* dividida pela ECA elimina os efeitos da demanda da atmosfera de tal modo a salientar apenas o efeito da área foliar da cultura. Verifica-se que o aumento do índice de área foliar aumenta a quantidade de água requerida pela cultura.

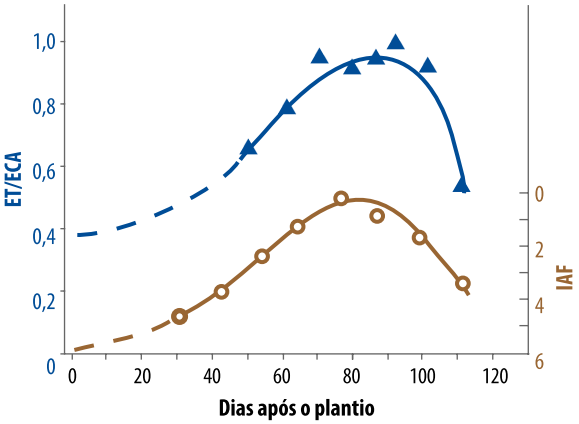


Figura 7. Efeito da variação do índice de área foliar (IAF) verde sobre a relação entre a evapotranspiração (ET) e a evaporação da água de um Tanque Classe A aberto (ECA), ao longo do ciclo de uma cultura de soja.

Fonte: Adaptado de Gardner et al. (1985).

- **Enrolamento e dobramento das folhas** – Muitas plantas têm mecanismos nas suas folhas que favorecem a redução da taxa de transpiração quando a disponibilidade de água no solo se torna limitante. Algumas gramíneas, tal como o milho, reduzem suas áreas foliares expostas à radiação solar por meio de enrolamento e dobramento de suas folhas (Figura 8).



Foto: Reinaldo Lúcio Gomide

Figura 8. Enrolamento e dobramento das folhas de milho aos 50 dias após o plantio, em razão da limitação da disponibilidade de água no solo, favorecendo a redução de áreas foliares expostas à radiação solar e, consequentemente, da taxa de transpiração.

- **Profundidade e proliferação de raízes** – Este fator afeta diretamente a exploração de determinado volume de solo e, consequentemente, a extração do conteúdo de umidade no perfil do solo. Geralmente, sistemas radiculares mais profundos aumentam a extração de água de uma determinada unidade de volume de solo antes mesmo de a cultura atingir o ponto de murcha permanente (Figura 9).

Interferência da quantidade e distribuição de chuvas no requerimento de água

A necessidade de irrigação diminui na medida em que se move das regiões áridas e semiáridas para as regiões mais úmidas. Geralmente, nas regiões úmidas, a quantidade de chuvas ao longo do ano é suficiente para a maioria das culturas. Entretanto, por causa da má distribuição, muitas culturas sofrem com a falta de água em certos períodos (Figura 10). É comum, na região do Cerrado, a ocorrência de veranicos (períodos secos no meio do período chuvoso) que causam quebra na produtividade e na qualidade dos produtos de muitas culturas. Se esse tipo de risco não é tolerável, como no caso da produção de sementes, deve-se dispor de irrigação, mesmo que essa aparentemente fique subutilizada durante parte do período chuvoso, lembrando ainda que, nessa região, as culturas de inverno necessitam ser irrigadas. Além do mais, algumas espécies, como as hortaliças, são sensíveis mesmo a pequenos deficits hídricos e requerem irrigações frequentes ao longo de todo o ciclo.

A análise de dados históricos de chuvas ao longo do ano é, portanto, fundamental na tomada de decisão de irrigar. Na Figura 11, são mostradas a variação de precipitação mensal média e a precipitação mensal provável para o período de 1998 a 2012, em Sete Lagoas, MG. A precipitação provável ou dependente representa um certo valor de precipitação que pode ser igualado ou superado com um determinado nível de probabilidade, definido com base no histórico da precipitação. Nota-se que a precipitação média (cuja probabilidade de ocorrência é aproximadamente 50%) é significativamente maior que a esperada, com 75% e 90% de probabilidade. Para a produção de culturas de menor valor comercial, como grãos e pastagem, pode-se adotar um nível de probabilidade de 75%, enquanto, para culturas de maior retorno econômico, deve-se trabalhar com probabilidades maiores, como a de 90%.

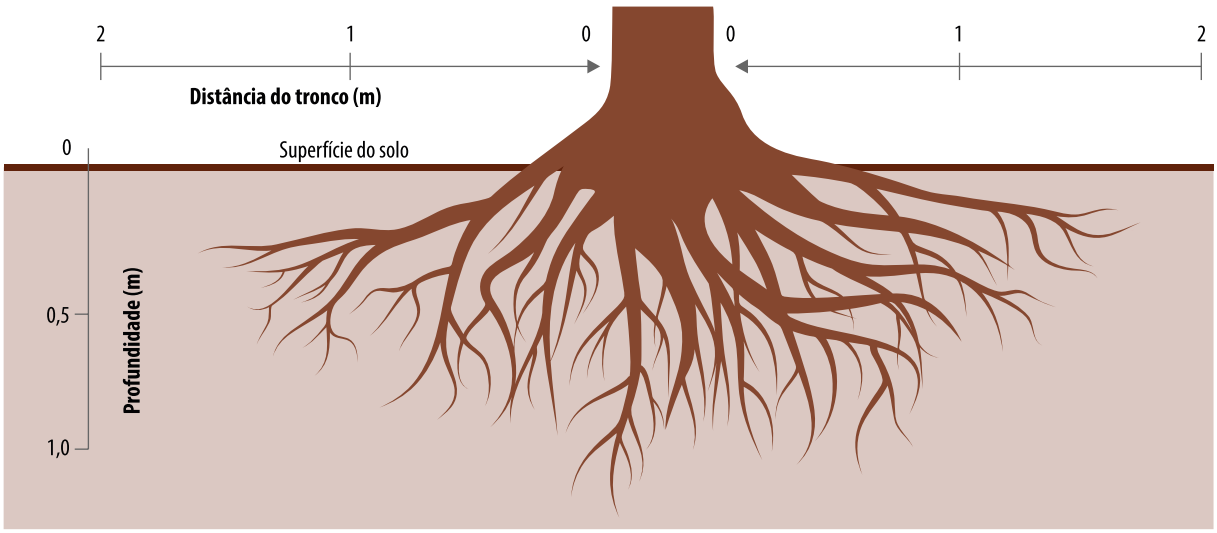


Figura 9. Profundidade e proliferação de raízes afetando diretamente a exploração e extração de água das plantas de uma determinada unidade de volume de solo, antes mesmo de atingimento do ponto de murcha permanente.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

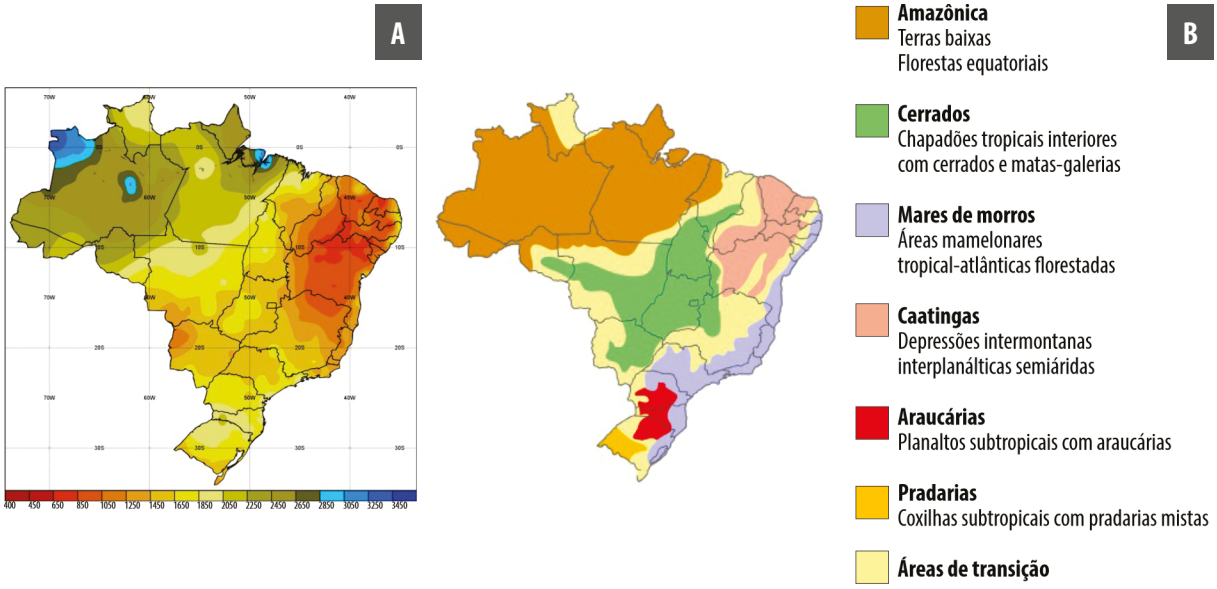


Figura 10. Normal climatológica do Brasil de 1981 a 2010 – precipitação acumulada anual (A); regiões do Brasil – interferência da quantidade e distribuição de chuvas nas irrigações e no requerimento de água de culturas (B).

Fonte: Inmet (2021).

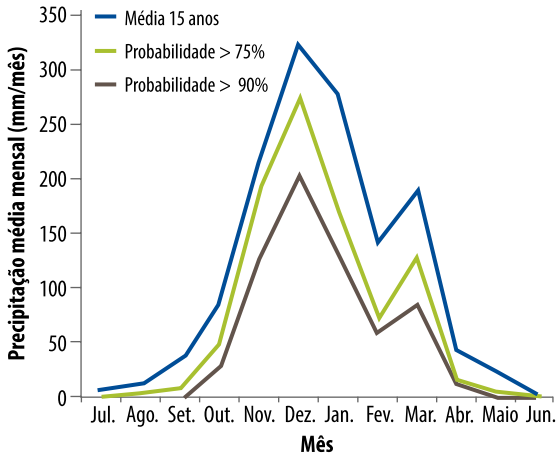


Figura 11. Variação de precipitação mensal média e provável ou dependente (probabilidade de ocorrência) para o período de 1998 a 2012, Sete Lagoas, MG.

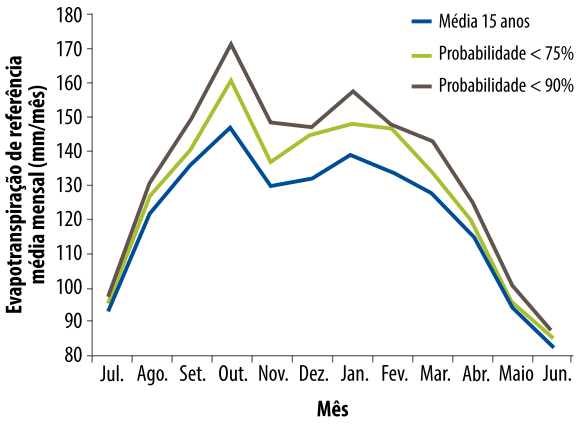


Figura 12. Variação de evapotranspiração de referência mensal média e provável ou dependente (probabilidade de ocorrência), para o período de 1998 a 2012, Sete Lagoas, MG.

Na Figura 12, são apresentadas a variação das curvas de evapotranspiração de referência (ETo) mensal média e provável ou dependente para o período de 1998 a 2012, em Sete Lagoas, MG. Diferentemente da precipitação (Figura 11), o gráfico mostra a probabilidade de ocorrência de um valor igual ou menor que o indicado. Por essa razão, os valores médios de ETo são menores que os valores associados a uma certa probabilidade de ocorrência. Quanto maior o valor econômico da cultura, maior deve ser a probabilidade e maiores serão os valores da ETo e, consequentemente, maior deverá ser a capacidade do sistema de irrigação. Vale lembrar que a evapotranspiração de muitas culturas é maior que a ETo nos períodos de pico de consumo. Os valores do coeficiente de cultura (K_c) devem ser multiplicados pelos valores de ETo para obter a curva de ETc. Dois picos de consumo mensal são observados para

o exemplo em questão, um com ocorrência em outubro e outro em janeiro. O sistema de irrigação deve ser capaz de fornecer a quantidade sazonal de água às culturas, bem como suprir a demanda de pico. Além disso, a quantidade sazonal de água requerida pela cultura bem como a demanda de pico devem ser comparadas com a quantidade de água disponível na fonte durante o ciclo e durante o período de pico, considerando-se também a eficiência do sistema de irrigação.

Demanda versus oferta de água – balanço

Quando se colocam juntas a variação das curvas de precipitação mensal média com as de evapotranspiração de referência mensal média com suas respectivas curvas provável ou dependente (75%), para o período de 1998 a 2012 (Figura 13), é que se tem uma visão melhor da necessidade ou não de irrigar. Vale lembrar que essa é uma análise aproximada, já que a evapotranspiração das culturas anuais é inferior à evapotranspiração de referência no início e no final do ciclo ($ETc < ETo$, ou seja, $K_c < 1$), mas pode superá-la na fase intermediária produtiva do ciclo ($K_c > 1$).

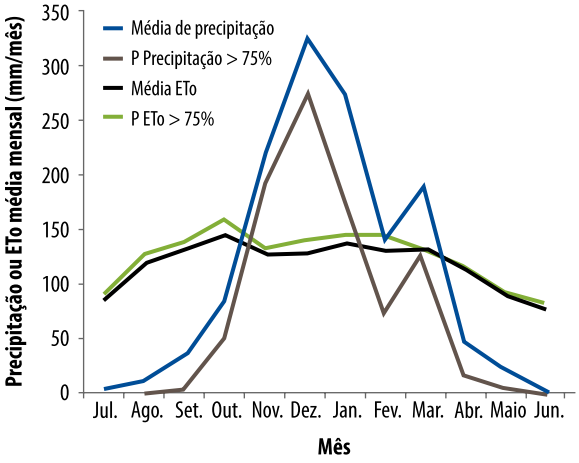


Figura 13. Variação das curvas de precipitação (oferta) e evapotranspiração de referência (demanda) mensal médias e prováveis ou dependentes (75% de probabilidade de ocorrência), para o período de 1998 a 2012, Sete Lagoas, MG.

Um primeiro ponto que chama a atenção no exemplo da Figura 13 é que, dada a grande variabilidade interanual da precipitação, dados médios devem ser evitados em favor de dados probabilísticos. O mesmo não ocorre com a evapotranspiração, que é mais uniforme. Considerando uma probabilidade de 75%, nota-se que, exceto para o período de novembro a janeiro, nos demais meses, há necessidade de irrigação, mesmo que complementar às chuvas, inclusive no mês de março, em que ocorreu um pouco de chuva e que foi o suficiente apenas para igualar a ETo. Em um estudo realizado para o estado de Minas Gerais, utilizaram-se dados históricos de clima para análise de frequência de precipitação e de evapotranspiração e estabeleceu-se o balanço de água para três tipos de solo. Simulou-se a irrigação da cultura do milho de forma total e complementar às chuvas, e os dados foram espacializados para gerar mapas. Verificou-se que, em apenas 3,3% da área do estado, não há possibilidade de se contar com alguma chuva para suprir parte da demanda da cultura. O estudo indicou ainda a possibilidade de economia de energia e água na irrigação na região centro-sul do estado, mediante a escolha criteriosa da época de plantio para aproveitar melhor as chuvas. Para o exemplo em questão (Figura 13), a época de plantio da cultura do milho deve ser tal que o período de maior consumo ocorra no mês de dezembro.

Algo que pode passar despercebido, quando se analisam dados médios mensais de precipitação, é a ocorrência de veranicos. Para a região de Brasília, DF, a análise dos dados de chuva indicou que apenas em um ano em cada 13 anos ocorreriam veranicos menores que oito dias. Há 50% de chance de que o veranico seja de 14 ou mais dias nessa região. Em um ano a cada sete anos, os veranicos poderão exceder três semanas. Verificou-se também que se podem esperar três veranicos de oito dias ou mais por período chuvoso e que esses ocorrem mais nos meses de dezembro e janeiro. O número de dias de veranico é diferente para cada região, e, quanto maior a evapotranspiração de refe-

rência e mais susceptível ao deficit hídrico for a cultura, maior será a redução na produtividade. Estudos mais recentes foram realizados para as regiões de Londrina e Ponta Grossa, no Paraná, e bacia do Rio Verde Grande, em Minas Gerais, indicando sempre a necessidade de se incentivar o uso da irrigação para evitar quebras na produção das culturas. Nesse caso, optando-se pelo uso da irrigação, podem-se definir basicamente três ciclos de cultivo com três critérios de manejo das irrigações:

- Início em novembro e estendendo-se até meados de fevereiro, no qual a irrigação seria mínima ou de segurança para o caso de veranicos.
- Início em março e indo até abril ou maio, com irrigação suplementar às chuvas.
- Início em junho ou julho e indo até outubro, com irrigação total. As culturas teriam que ser escolhidas em função de outras exigências climáticas, como temperatura e fotoperíodo. Para regiões com melhor distribuição das chuvas ao longo do ano e com temperaturas mais baixas no inverno, poder-se-iam utilizar culturas para a produção de palhada.

Ocorrência de veranicos

Mesmo na época da estação chuvosa, podem existir sequências de dias sem ocorrência de precipitação, que são períodos secos conhecidos como veranicos, os quais acarretam uma redução da água disponível no solo para as plantas, o que é suficiente para prejudicar a produção agrícola, já que o grau de redução dessa produção depende da duração do fenômeno de veranicos e do estádio de desenvolvimento em que a cultura se encontra. Em geral, as culturas são mais susceptíveis a deficits hídricos (veranicos) nos estádios iniciais de desenvolvimento vegetativo e também reprodutivo. Haverá sempre necessidade de realizar irrigações nessas épocas mais propícias de ocorrência de veranicos para evitar os riscos de redução de produção.

Geralmente, nos estudos de ocorrência de veranicos, trabalha-se com séries históricas dos dados de precipitação de pelo menos 20 anos em média, mas é mais recomendado utilizar séries de dados superiores a 30 anos, com os cálculos das frequências dos veranicos de 7, 10 e 15 dias de duração e obtenção das probabilidades de ocorrência em cada mês da estação chuvosa (que geralmente se estende de outubro a março). A quantificação dessa frequência baseia-se no número de sequências de dias secos com duração de n dias, cuja variação possa ser contabilizada de um até o número de dias do mês. Uma sequência de dias secos é definida como um período contínuo de dias, durante o qual não ocorra precipitação igual ou superior a 1,0 mm. Para o cálculo dos valores probabilísticos de ocorrência de veranico com duração de n dias, geralmente utiliza-se a Equação 1:

$$Pn = (Fn - n + 1)/(N - n + 1) \quad (1)$$

em que Pn é a probabilidade de ocorrência de veranicos com duração de n dias; Fn é a frequência dos veranicos com duração de n dias; n é o período de ocorrência de veranico; N é o número de dias do mês em estudo relativo à duração do veranico.

Hoje é muito usado espacializar as probabilidades de ocorrências de veranicos, utilizando um interpolador linear na determinação das regiões homogêneas quanto às probabilidades em questão, por meio de um programa computacional que trata de sistema de informações geográficas, como o Arcview GIS, que gera os mapas temáticos, com classes de probabilidades de ocorrência de veranicos de 7, 10 e 15 dias de duração, para cada mês da estação chuvosa do ano.

A Figura 14 apresenta resultados de um estudo conduzido por Minuzzi et al. (2005) para o estado de Minas Gerais, analisando dados de precipitação de 123 localidades, obtidos entre os anos de 1936 e 2000. Os dados foram oriundos de anos com ocorrência do fenômeno cli-

mático El Niño, na distribuição espacial no número de ocorrências de veranico, com duração de 3 a 6 dias nas séries de anos neutros (A) e de El Niño (B). Relacionou-se espacialmente o número médio de ocorrência de veranicos de classe A (Figura 14A e 14B), verificando que as situações mais notáveis são os aumentos nos números de 11 a 12 e de 13 a 14 veranicos no sul-sudoeste de Minas Gerais, em anos El Niño, bem como no oeste do Triângulo Mineiro, Alto Paranaíba e Zona da Mata mineira. Considerou-se como veranico o período de pelo menos 3 dias secos consecutivos; dessa forma, foram determinadas as frequências médias da ocorrência de veranicos para as classes, com os seguintes intervalos de duração, em cada uma das séries: 3 a 6 dias; 7 a 10 dias; 11 a 14 dias; e acima de 15 dias. Os resultados indicaram uma característica marcante do El Niño em ocasionar chuvas abaixo da média no nordeste do estado e chuvas acima da média climática no sudoeste de Minas Gerais. As estiagens ao norte e nordeste do estado corresponderam a períodos superiores a 15 dias, e as chuvas acima da média, no sudoeste, foram melhor correlacionadas com os veranicos de duração de 3 a 6 dias.

Variação do requerimento de água de culturas com o clima e a água no solo

O conhecimento de como os fatores ambientais e fisiológicos influenciam a evapotranspitração (ET) ajuda a explicar o requerimento diário de água de uma cultura em condições de campo. Os estômatos abrem em resposta à luz solar, e, com isso, a ET ocorre, aumentando com a elevação da radiação solar, da temperatura do ar e do deficit de pressão de vapor do ar. Se a demanda atmosférica não exceder a habilidade das plantas de suprir água para as folhas, os maiores valores de ET são geralmente registrados durante o período da tarde, ocasião em que são verificadas maiores demandas evaporativas da atmosfera (baixa umidade relativa do ar e elevadas radiação solar e temperatura do ar).

Variação diária da evapotranspiração da cultura com os componentes térmicos climáticos

A Figura 15 ilustra a variação diária entre os componentes térmicos climáticos – radiação solar e temperatura do ar – e a taxa de transpi-

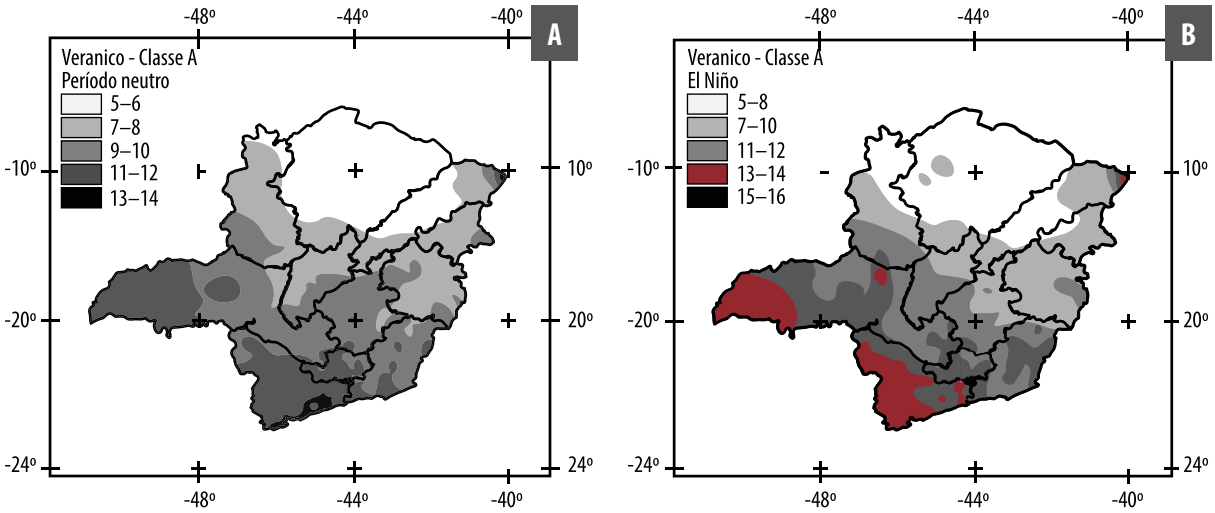


Figura 14. Distribuição espacial no número de ocorrências de veranico com duração de 3 a 6 dias nas séries de anos neutros (A) e de El Niño (B) para o estado de Minas Gerais, com dados de precipitação de 123 localidades, obtidos entre os anos de 1936 e 2000.

Fonte: Minuzzi et al. (2005).

ração (T) das plantas. Verifica-se que os valores diários de T começam a diminuir no final da tarde, principalmente porque inicia o processo de redução de energia proveniente da radiação solar e, consequentemente, queda de temperatura do ar.

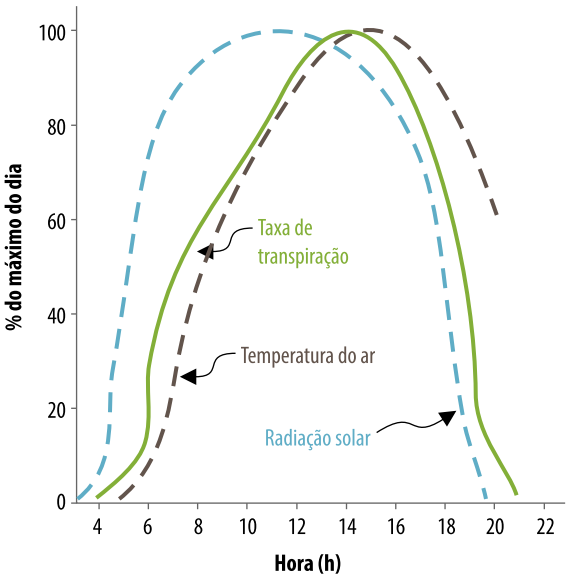


Figura 15. Variação diária entre os componentes térmicos climáticos – radiação solar e temperatura do ar – e a taxa de transpiração das plantas.

Fonte: Adaptado de Gardner et al. (1985).

Variação diária da evapotranspiração da cultura com a disponibilidade de água no solo e clima

O requerimento de água das culturas, ou ETc, geralmente aumenta à proporção que aumenta a demanda evaporativa da atmosfera, desde que ocorram condições de elevada umidade do solo. A Figura 16 ilustra a variação da ET de uma cultura em função da disponibilidade de água no solo e da demanda da atmosfera para diferentes condições de clima (Gardner et al., 1985). A disponibilidade de água no solo para as culturas é estabelecida pelo conteúdo de umidade retido pelo solo entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) de cada cultura. O solo apresenta 100% de água disponível para as culturas quando o seu teor de umidade encontra-se na CC. À medida que a disponibilidade de água do solo vai se reduzindo e tornando-se um fator limitante, ocorrem mudanças no comportamento entre demanda atmosférica, umidade do solo, fechamento estomatal e taxa de evapotranspiração (Figura 16). Uma condição de clima claro e seco (sem nuvens, altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar ou maior deficit de pressão de vapor do ar) é favorável para uma maior demanda evaporativa da atmosfera e, consequentemente, uma maior necessidade hídrica das culturas. Essa situação é a que apresenta a maior variação positiva no incremento da ETc com o aumento de umidade do solo. As condições de clima parcialmente nublado e úmido e fechado (nublado) são de demanda evaporativa da atmosfera intermediária e baixa, respectivamente.

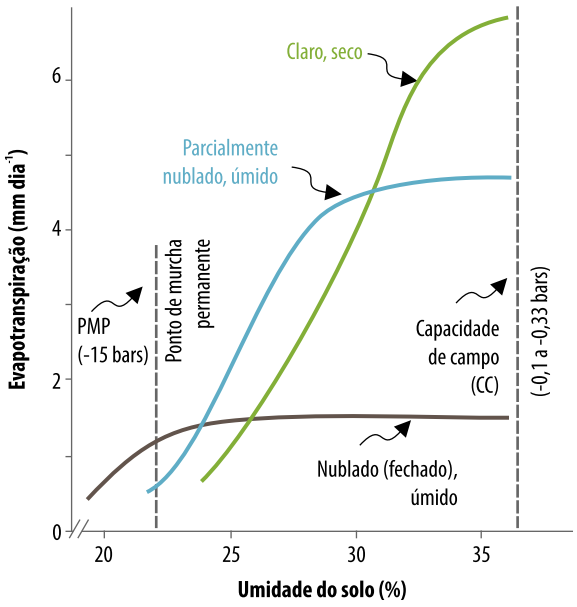


Figura 16. Variação da evapotranspiração de uma cultura, de acordo com a demanda evaporativa da atmosfera e a disponibilidade de água no solo para diferentes condições de clima.

Fonte: Adaptado de Gardner et al. (1985).

Variação da evapotranspiração da cultura com o balanço de energia da superfície

O requerimento de água das culturas (ETc) é um processo que envolve energia proveniente da radiação solar global (R_s). Fracionando todos

os fluxos de energia de ondas longas e curtas, que chegam e deixam a superfície coberta pela cultura, ou seja, efetuando o balanço de energia dessa superfície, tem-se a seguinte equação do balanço de energia:

$$R_n = G + H + \lambda E \quad (2)$$

em que R_n é a densidade de fluxo do saldo radiação; G é a densidade de fluxo de calor para o solo; H é a densidade de fluxo de calor sensível para o ar; e λE é a densidade de fluxo de calor latente para o ar atmosférico, próximo ao dossel da cultura.

Todas as frações são expressas em unidades de energia por unidade de área, ou seja, W m^{-2} ou MJ m^{-2}. O termo λE é a fração de energia utilizada no processo de requerimento de água da cultura ou evapotranspiração. Essa fração está relacionada com o processo de transporte de vapor d'água da cultura para a atmosfera.

Para converter os valores da fração de energia λE para valores equivalentes de evapotranspiração da cultura em unidades de mm dia^{-1}, unidade mais utilizada na agricultura irrigada, é necessário usar os seguintes fatores de conversão:

1 W = 1 J s^{-1}

1 MJ m^{-2} dia^{-1} = 0,408 mm dia^{-1}

1 W m^{-2} = 0,0864 MJ m^{-2} dia^{-1} = 0,03525 mm dia^{-1}

As frações H e G estão relacionadas aos processos de transporte de calor no ar, logo acima do dossel da cultura (1,5 m) e na camada de solo próxima à superfície (0,20 m), respectivamente. Para medir os processos de transporte de vapor d'água e calor em condições de campo, há necessidade de medir a pressão de vapor do ar e as temperaturas do ar e do solo em duas alturas ou profundidades, respectivamente. A Figura 17A ilustra o balanço de energia de uma superfície coberta por vegetação, salientando as principais formas de fracionamento ou dissipação do saldo de radiação. A Figura 17B ilustra a variação típica de energia ao longo de um dia de saldo de radiação e das frações de fluxo de calor latente (λE), fluxo de calor sensível (H) e

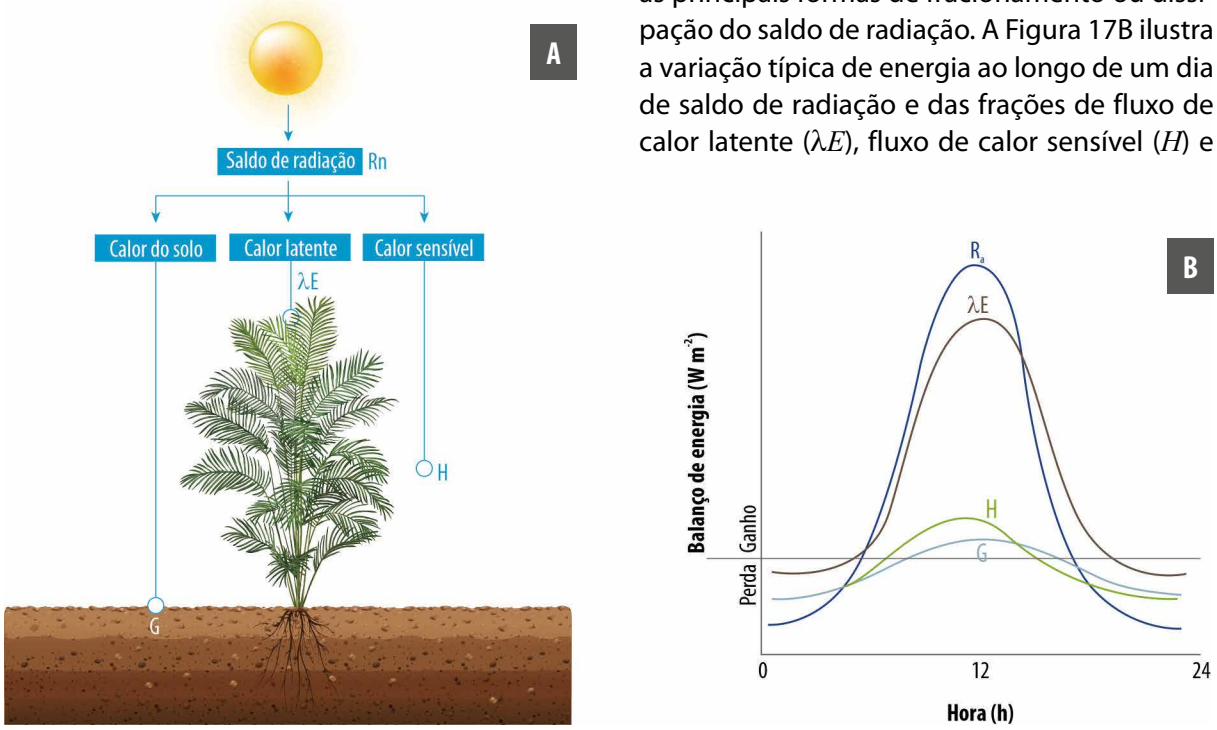


Figura 17. Balanço de energia de uma superfície coberta por vegetação com as principais formas de fracionamento ou dissipação do saldo radiação (A) e variação típica de energia ao longo de um dia de saldo radiação (R_n) e das frações fluxo de calor latente (λE), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor do solo (G) de uma superfície com cultura e sem restrição de umidade no solo (B).

Fonte: Adaptado de Merva (1995).

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

fluxo de calor do solo (G) de uma superfície, com cultura e sem restrição de umidade no solo (próximo à CC).

Durante o período da noite, o efeito do saldo do balanço de energia é de perda de energia por causa, principalmente, da radiação de ondas longas. Entretanto, durante o dia, o efeito do saldo do balanço de energia é de ganho de energia, uma vez que aumenta a contribuição de radiação de ondas curtas. Para a condição de regime hídrico adequado no solo (sem estresse hídrico), verifica-se que, durante o dia, uma maior fração de energia do saldo de radiação é dissipada na forma de fluxo de calor latente (λE) ou ET; consequentemente, os fluxos de energia H e G são menores.

Evapotranspiração de referência

Uma revisão sobre a tendência de superestimativa da ETo, pelo método Penman-FAO, tendo a grama como referência, é apresentada por Sediyama (1995). Resultados de trabalhos indicam superestimativas da ordem de 8% a 35%, dependendo do clima da região. O mesmo autor realça a complexidade do uso do fator c e salienta a importância desse método, utilizado por muitos como padrão internacional, especialmente no Brasil. Sediyama (1995) também fornece uma criteriosa análise dos conceitos e procedimentos metodológicos de cálculos da ETo, ressaltando as dificuldades de utilização dos lisímetros, dos métodos de balanço de energia e aerodinâmicos ou combinados e da equação de Penman-FAO. Um enfoque é dado no estabelecimento de critério e metodologia para atender a uma nova definição de cultura de referência e a estimativa de ETo, com base nos procedimentos para revisão do antigo boletim FAO-24, de acordo com Smith (1991).

A nova evapotranspiração de referência (ETo) é conceituada como sendo a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética, com uma altura uniforme de 0,12 m, resistência do dossel da cultura de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23 (Allen et al., 1998). Esse conceito de ETo assemelha-se, bem de perto, à evapotranspiração de uma superfície extensa coberta com grama de altura uniforme, em crescimento ativo e cobrindo completamente a superfície do solo e sem restrição de umidade. O método combinado de Penman-Monteith tem fornecido melhores resultados de estimativa da ETo para o caso dessa cultura hipotética de referência, atendendo tanto a definição original de evapotranspiração potencial de Penman quanto o atual conceito de ETo da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO). Esse método combinado de Penman-Monteith é a metodologia padrão utilizada hoje para a estimativa da ETo, envolvendo a interação entre o processo físico de perda de água, parâmetros fisiológicos e resistências do dossel da cultura e aerodinâmica.

A estimativa da ETc é feita a partir da determinação da ETo em um processo envolvendo duas etapas. A primeira etapa corresponde à própria determinação de ETo, apresentada e discutida neste capítulo, envolvendo uma cultura de referência adequadamente irrigada, com dossel vegetativo bem caracterizado e padronizado; hoje a FAO recomenda o uso da cultura hipotética de referência. A segunda etapa requer a multiplicação da ETo por um coeficiente de cultura (K_c), que varia com o estádio de crescimento de cada cultura e representa o efeito integrado de mudança na área foliar da cultura, da altura das plantas, do grau de cobertura, da resistência do dossel da cultura e do albedo.

Métodos de determinação da evapotranspiração de referência

Os métodos de determinação da ETo baseiam-se em dados climáticos, que utilizam desde equações mais simples, baseadas somente em dados de temperatura do ar à sombra, até equações mais complexas, baseadas em modelos físicos, que levam em consideração vários parâmetros climáticos, incluindo a radiação solar e o componente aerodinâmico. A ausên-

cia ou mesmo a dificuldade de acesso a certos elementos climáticos registrados em estações climatológicas pode fazer com que o técnico selecione equações mais simples para determinar a ETo, quando comparadas com aquelas que podem fornecer resultados mais representativos de uma região, que envolvem dados adicionais de clima, em que, geralmente, além do componente térmico, utilizam-se também os parâmetros aerodinâmicos.

Não há, em geral, uma recomendação de equação, com base em dados climáticos, que possa ser universalmente utilizada de forma adequada em todos os tipos de climas, principalmente em regiões de clima tropical e de maiores elevações. Sempre é recomendada uma criteriosa avaliação, e, quando necessário, uma calibração local ou regional.

A seguir, são apresentados os principais métodos de determinação da ETo baseados em elementos climáticos de superfície, relacionados à temperatura do ar, radiação solar, velocidade de vento e pressão de vapor d'água do ar.

Método de Penman modificado

O método de Penman, recomendado pela FAO, foi derivado do original (Penman, 1948) e é classificado como um método combinado de determinação da ETo, uma vez que se associam os efeitos do balanço de energia relacionados com o termo de radiação com os termos aerodinâmicos e de pressão de vapor d'água do ar. O método é conhecido como Penman modificado e, em princípio, não é empírico, uma vez que utiliza coeficientes de correção desenvolvidos e ajustados por Doorenbos e Pruitt (1977), com base em dados provenientes de dez localidades, cultivados na sua maioria com grama. Apenas alguns de seus parâmetros são estimados por fórmulas empíricas, tal como a função do vento. O formato da equação de Penman modificada, que usa dados climáticos relacionados à radiação, ao vento e à umidade relativa do ar, é o seguinte:

$$ETo = c[W R_n + (1 - W)0{,}27(1 + 0{,}01 U_2)(e_a - e_d)] \quad (3)$$

em que ETo é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); c é o fator de ajuste proposto pela FAO, adimensional; W é o fator de ponderação que depende da temperatura e da altitude; R_n é o saldo de radiação (mm dia^{-1}); U_2 é a velocidade média do vento, medida a 2 m da superfície do solo (ou convertida para essa altura) (km dia^{-1}); e_a é a pressão de saturação de vapor à temperatura média do dia (mbar); e e_d é a pressão de saturação de vapor de água à temperatura de ponto de orvalho (mbar).

O termo $0{,}27(1 + 0{,}01 U_2)$ é denominado de função do vento [$f(u)$]. O fator de ajuste da FAO c foi definido por Allen e Pruitt (1991) como:

$$\begin{aligned} c = {} & 0{,}892 - 0{,}0781\ Ud + 0{,}00219\ Ud\ R_s + \\ & + 0{,}000402\ URmáx\ R_s + \\ & + 0{,}000196\ Ud/Un\ Ud\ URmáx + \\ & + 0{,}0000198\ Ud/Un\ Ud\ URmáx\ R_s + \\ & + 0{,}00000236\ Ud^2\ URmáx\ R_s - \\ & - 0{,}0000086\ (Ud/Un)^2\ Ud\ URmáx - \\ & - 0{,}0000000292\ Ud/Un\ Ud^2\ URmáx^2\ R_s - \\ & - 0{,}0000161\ URmáx\ R_s^2 \end{aligned} \quad (4)$$

em que Ud é a velocidade média do vento durante o dia (m s^{-1}); Un é a velocidade média do vento durante a noite (m s^{-1}); R_s é a radiação solar global à superfície (mm dia^{-1}); $URmáx$ é a umidade relativa máxima (%); Ud/Un é igual a 2, valor recomendado por Doorenbos e Pruitt (1977), para o caso da indisponibilidade ou da não confiabilidade dos dados de vento diurno e noturno.

O fator de ponderação W é definido pela Equação 5:

$$W = (1 + \gamma/\Delta)^{-1} \quad (5)$$

em que γ é a constante psicrométrica (mbar °C^{-1}); Δ é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água com a temperatura (mbar °C^{-1}).

Método de Blaney e Criddle

O método de Blaney e Criddle é mais simples, pois correlaciona ETo apenas com dados de clima relacionados à temperatura do ar e à duração de brilho solar. A sua utilização é recomendada para determinação de ETo para períodos superiores a 15 dias ou mensais. A equação possui o seguinte formato:

$$ETo = a + b\,[p(0{,}46\,T + 8{,}13)] \quad (6)$$

em que ETo é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); a e b são fatores de ajuste da FAO, adimensionais; p é a porcentagem de horas de brilho solar diária em relação ao total anual, para um dado mês e latitude; T é a temperatura média do dia (°C).

Os fatores de ajuste da FAO, a e b, foram definidos por Allen e Pruitt (1991):

$$a = 0{,}0043\,URmín - n/N - 1{,}41 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} b = {} & 0{,}908 - 0{,}00483\,URmín + 0{,}7949\,n/N + \\ & + 0{,}0768\,[ln(Ud + 1)]2 - 0{,}0038\,URmín\,n/N - \\ & - 0{,}000433\,URmín\,Ud + \\ & + 0{,}281\,ln(Ud + 1)\,ln(n/N + 1) - \\ & - 0{,}00975\,ln(Ud + 1)\,[ln(URmín + 1)]2\,ln(n/N + 1) \end{aligned} \quad (8)$$

em que n/N é a razão entre o número de horas de brilho solar atual e o máximo possível, adimensional; e $URmín$ é a umidade relativa mínima do ar (%).

Método da radiação

O método da radiação tem sua origem na equação de Makkink (Allen; Pruitt, 1991) e é recomendado para regiões que dispõem de dados climáticos relacionados ao componente térmico, ou seja, à temperatura do ar e à radiação solar. A sua equação é expressa por:

$$ETo = r\,(W\,R_s) \quad (9)$$

em que ETo é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); W é o fator de ponderação que depende da temperatura e da altitude (já definidos anteriormente); R_s é a radiação solar global à superfície (mm dia^{-1}); e r é o fator de ajuste proposto pela FAO, que foi definido por Frevert et al. (1983) como sendo:

$$\begin{aligned} r = {} & 1{,}066 - 0{,}00128\,URméd + 0{,}045\,Ud - \\ & - 0{,}0002\,URméd\,Ud - 0{,}0000315\,(URméd)^2 - \\ & - 0{,}001103\,(Ud)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

em que $URméd$ é a umidade relativa média do ar (%); e Ud é a velocidade média do vento durante o dia (m s^{-1}).

Hargreaves e Samani

O método de estimativa da ETo proposto por Hargreaves e Samani (1985) é considerado empírico e requer uma menor quantidade de informações climatológicas, sendo indicado para estimativas de ETo em períodos superiores a 7–10 dias, apresentando tendências de superestimativa dos valores de ETo em relação ao método padrão combinado de Penman-Monteith e subestimativa em relação aos lisímetros, requerendo, por isso, uma calibração dos coeficientes da equação, regionalmente. A sua equação é a seguinte:

$$ETo = 0{,}0023\,Qo(Tmáx - Tmín)^{0{,}5}(Tméd + 17{,}8) \quad (11)$$

em que ETo é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Qo é a radiação extraterrestre (mm dia^{-1}); $Tmáx$ é a temperatura do ar máxima, (°C); $Tmín$ é a temperatura do ar mínima (°C); $Tméd$ é a temperatura do ar média diária (°C).

Método do Tanque Classe A

O método do tanque classe A se baseia na medição da evaporação da água no interior do tanque por meio da seguinte equação:

$$ETo = Kp \times EV \quad (12)$$

em que ETo é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Kp é o coeficiente de ajuste de tanque proposto pela FAO; EV é a evaporação da água medida no Tanque Classe A (mm dia^{-1}).

Snyder (1992) desenvolveu uma equação, que foi adaptada por Albuquerque e Guimarães (2004), para permitir a interpolação dos valores tabelados de Kp (Doorenbos; Pruitt, 1977), na condição de tanque exposto com bordadura vegetada:

$$Kp = 0{,}482 + 0{,}024ln(R) - \\ - 0{,}02356u_{10} + 0{,}0045URmín \quad (13)$$

em que Kp é o coeficiente do Tanque Classe A; R é o raio de bordadura vegetada ao redor do tanque, no lado dominante do vento (m); u_{10} é a velocidade do vento média diária a 10 m de altura (m s^{-1}); $URmín$ é a umidade relativa mínima diária (%).

Se o tanque estiver circundado por culturas mais altas, como o milho com 2,5 m de altura, o Kp deverá ser aumentado em 30%, para condição de clima mais seco e muito vento, enquanto esse acréscimo deverá ser de 5% a 10% se a condição for de vento leve e clima úmido.

Além disso, os valores obtidos da Equação 13 se aplicam para tanques galvanizados pintados anualmente de alumínio. Uma pequena diferença nos valores pode ocorrer caso seja pintado externa e internamente de branco, e um acréscimo de até 10% pode haver caso seja pintado de preto.

O nível da água mantido no tanque é um aspecto de fundamental importância, podendo ocorrer erros de até 15% quando o nível ultrapassa 10 cm além do padrão de 5 cm a 7,5 cm abaixo da borda. Há telas montadas sobre o tanque que podem reduzir a evaporação em até 10%. Um modo de evitar que pássaros utilizem a água do tanque para beber é usar um outro tanque próximo com água até a borda; assim, os pássaros deverão preferir o tanque mais cheio. Quando for necessário, esse segundo tanque pode ser usado também para reabastecer o tanque principal, haja vista que a temperatura da água de ambos deve ser a mesma.

A turbidez da água não afeta mais que 5% na evaporação. A variação global da evaporação não é constante ao longo do tempo em decorrência da idade, deterioração e repintura do tanque.

Método combinado de Penman-Monteith

O método combinado de Penman-Monteith para determinação da ETo é mais preciso, recomendado como padrão pela FAO e pode fornecer cálculos mais confiáveis de ETo, principalmente quando usado em base horária e diária. Contudo, esse método requer mais dados climáticos do local ou da região, quando comparado com os demais.

Para fins de padronização dos procedimentos de cálculos da nova proposta da ETo, baseada na cultura hipotética, para estimativas de 24 horas ou diárias, a seguinte equação combinada de Penman-Monteith foi proposta (Smith, 1991):

$$ETo = [\Delta/(\Delta + \gamma^*)](R_n - G)(1/\lambda) + \\ + [\gamma/(\Delta + \gamma^*)]\,[900/(T + 273)]U_2(e_s - e_a) \quad (14)$$

em que ETo é a evapotranspiração de referência da cultura hipotética (mm dia^{-1}); R_n é o saldo radiação à superfície da cultura (MJ m^{-2} dia^{-1}); G é o fluxo de calor no solo (MJ m^{-2} dia^{-1}); T é a temperatura média diária do ar a 2 m de altura (°C); U_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); $(e_s - e_a)$ é o deficit de pressão de vapor do ar (KPa), em que es é a pressão de saturação de vapor do ar (KPa), e e_a é a pressão atual de vapor do ar (KPa); Δ é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor do ar (KPa °C^{-1}); λ é o calor latente de evaporação da água (MJ kg^{-1}) (λ = 2,45 MJ kg^{-1} para água a 20 °C); γ^* é a constante psicrométrica modificada,

(KPa °C^{-1}); e 900 é o fator de conversão para as unidades (KJ^{-1} kg °K dia^{-1}).

A constante psicrométrica modificada (γ^*) é determinada pela equação:

$$\gamma^* = \gamma\ (1 + 0{,}34\ U_2) \text{ e } \gamma = 0{,}000665\ P \qquad (15)$$

em que γ é a constante psicrométrica (KPa °C^{-1}); P é a pressão atmosférica (KPa); $P = 101{,}3[(293 - 0{,}0065Z)/293]^{5{,}26}$, em que Z é a altitude local, elevação acima do nível do mar (m).

Novo conceito de manejo da água com base na espacialização

Um dos problemas que técnicos e agricultores enfrentam para traçar estratégias de manejo de sistemas de produção agrícola, tanto os de sequeiro como os irrigados, é a variabilidade espacial e temporal de parâmetros das áreas de produção, principalmente aqueles relacionados às condições hídricas de culturas e solos. Geralmente, é adotado um tratamento uniforme de práticas agrícolas (distribuição de chuvas e aplicação de água de irrigação, aplicação de fertilizantes, etc.) em toda a extensão das áreas de produção, com base em valores médios dos parâmetros envolvidos no manejo das culturas. Isso pode resultar em maior consumo de água e insumos agrícolas e acarretar perdas econômicas para os agricultores, além de provocar danos ao ambiente, como o comprometimento e a contaminação de recursos hídricos. Essa variabilidade pode ser identificada e mapeada com o sensoriamento remoto (SR) visando à divisão dessas áreas em subáreas menores ou zonas de manejo com características mais homogêneas.

Com a aquisição de imagens por meio de satélites e drones, tornaram-se possíveis as análises de relacionamento entre localização espacial de alvos do meio ambiente, variação espectral da imagem e variação da cobertura vegetal dos solos. A atualização dos dados também ficou extremamente facilitada, uma vez que, montada a base de dados, ficou muito fácil produzir uma cobertura vegetal atualizada do solo, obtendo assim um resultado dinâmico e, portanto, mais próximo do real.

A aparência da cobertura vegetal, resultado de aquisição de imagens por meio de SR, com sensores (câmeras) colocados em plataformas orbitais (satélites) e suborbitais (drones), cobrindo diferentes bandas do espectro eletromagnético, é fruto de um processo complexo que envolve muitos parâmetros e fatores ambientais da superfície e atmosfera (Engman, 1993). O que é efetivamente medido por um sensor remotamente situado, oriundo de determinada vegetação (alvo), não pode ser explicado somente pelas características intrínsecas dessa vegetação, inclui também a interferência de vários outros parâmetros e fatores, tais como: a fonte de radiação, o espalhamento atmosférico, as características tanto das folhas quanto do dossel, os teores de umidade do solo, a interferência da reflectância do solo, sombra, entre outros.

As dificuldades de medição dos componentes do balanço hídrico em larga escala (regional) incentivou o uso das técnicas de SR (satélites/drones), geoprocessamento e modelagem para avaliação desses componentes em escala regional (ecossistemas). O sensoriamento remoto exclui a necessidade de quantificação de processos hidrológicos complexos, destacando-se como uma excelente ferramenta para determinação e mapeamento das estruturas espaciais e temporais, das variáveis hídricas numa bacia ou microbacia hidrográfica. Todavia, um dos grandes desafios para o uso dessa ferramenta está no requerimento de algoritmos/modelos que sejam biofisicamente realísticos, mas simples o bastante para serem operacionalizados e inseridos nos softwares de processamento de imagens e geoprocessamento. Nesse sentido, imagens de satélites vêm sendo muito utilizadas, junto com alguns dados climáticos de superfície (precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica, radiação solar e número de horas

de insolação), para a determinação da ETc, sem a necessidade de envolvimento do cálculo do balanço hídrico. E são bastante utilizadas tanto na estimação de parâmetros relacionados à temperatura e radiação da superfície coberta pela vegetação como em modelos biofísicos, como é o caso do uso do método do balanço de energia, junto com o estudo de dissipação de seus componentes a partir do saldo de radiação, ou seja, os fluxos de calor sensível, calor no solo e calor latente (Figura 18).

Uma das técnicas de SR utilizadas requer a aquisição de imagens (assinaturas espectrais) aéreas de solos e dossel de culturas e a obtenção de dados e informações de outros atributos da superfície coberta pela vegetação, que, geralmente, estão relacionados às condições de ambiente (recursos naturais) e clima, que deverão ser georreferenciados. Com isso, é possível realçar e caracterizar os diferentes tipos de solos (textura, estrutura, cor, tipo, fertilidade) e de culturas (anual, perene, pastagem, vegetação natural, estádio fenológico, área foliar, índice de vegetação). A análise e o processamento dessas imagens têm sido utilizados para identificar e classificar o uso dos solos e das culturas no campo e, também, acessar a variabilidade espacial e temporal de suas biomassas, índices de vegetação, ETc e estresses hídricos de plantas e produtividade de grãos (Figura 18). No caso da agricultura de sequeiro, a avaliação do estresse hídrico da cultura por meio de técnicas de SR pode ser um bom indicador indireto da distribuição de água de chuva nas áreas de produção.

Em trabalhos de caracterização espectral de culturas de milho, soja, feijão, trigo e algodão, com imagens de satélite, já se têm bem definido os melhores estádios de desenvolvimento dessas culturas para a aquisição de imagens, visando a estudos agrícolas e previsão de safras. As assinaturas espectrais dessas culturas apresentam complexidade de acordo com o manejo e tratos culturais, o estágio fenológico das plantas, o espaçamento de plantio, o tipo de solo e o teor de umidade de solo utilizado nos sistemas de produção. Essa complexidade é maior, principalmente, nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura, quando se tem uma maior influência do solo exposto, havendo necessidade de obtenção de imagens com uma melhor resolução espacial.

No Brasil, ainda é incipiente o uso de SR, a partir de plataformas fixas e móveis, tais como aeromodelos, aeronaves, drones (suborbitais) e

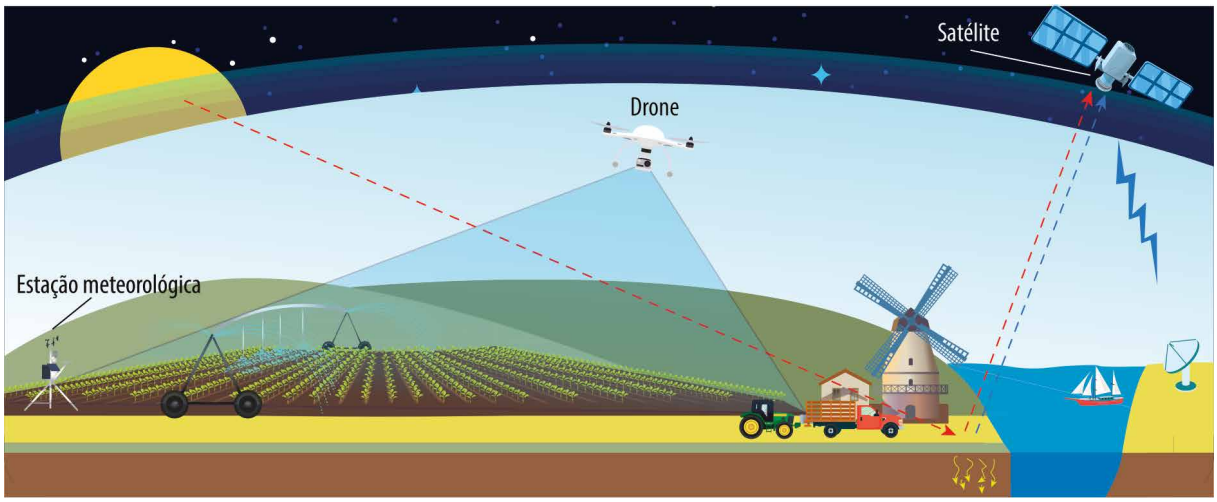


Figura 18. Utilização de técnicas de sensoriamento remoto (satélites/drones), geoprocessamento e modelagem, junto com dados climáticos de superfície, para a espacialização de estudos de recursos hídricos e evapotranspiração de culturas em sistemas agrícolas irrigados e de sequeiro.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

satélites (orbitais), para estabelecer estratégias de intervenção e manejo de áreas de produção agrícola. Assim, o manejo tradicional, com ineficiente tratamento de variabilidade de fatores que afetam a produção (fertilidade, conteúdo de umidade do solo, distribuição de água de chuva, aplicação de água de irrigação, etc.), pelas médias de toda extensão das áreas de produção, pode dar lugar a estratégias econômicas e ecologicamente mais eficientes, ou seja, o tratamento de zonas diferenciadas de manejo. Com isso, busca-se uma racionalização e otimização de uso de água e de insumos agrícolas, almejando-se melhorias da quantidade e da qualidade dos produtos agrícolas, assegurando a sustentabilidade do empreendimento. Outro aspecto importante é a possibilidade de previsão de safras das áreas de produção agrícola e rastreabilidade dos produtos agrícolas, que pode assegurar uma maior competitividade de comercialização deles nos mercados externos e internos.

Indicações de possíveis economias e otimização de uso de água serão possíveis, baseadas nas tecnologias disponíveis de determinação de requerimento de água de culturas local e regional, com medidas climáticas de superfície e espacialização, com o uso de sensoriamento remoto, geoprocessamento, modelagem (geotécnicas) (Figura 19). As depleções líquidas de água dos rios (vazões) serão também quantificadas em nível regional, baseadas nas taxas de evapotranspiração da vegetação natural e das culturas agrícolas, com análises estatísticas envolvendo diferentes condições climáticas e hidrológicas. Após validação desses modelos (Sebal, Safer), eles serão úteis para o gerenciamento hídrico em condições de rápidas mudanças de uso da terra e climáticas (Figura 19). No entanto, há ainda alguns desafios relacionados à aquisição de imagens e temperaturas aéreas em ambientes agrícolas a serem estudados, quais sejam: a) desuniformidade de cenas no campo, b) variação de iluminação,

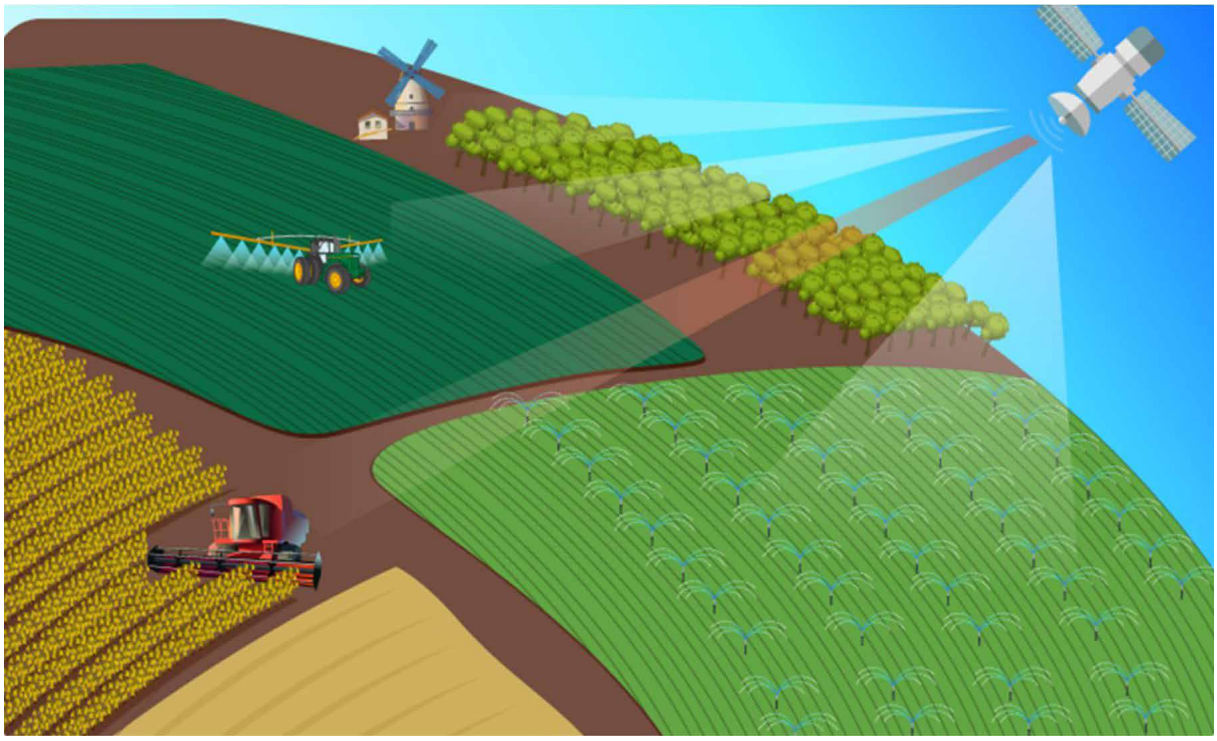


Figura 19. Otimização e gerenciamento de uso de recursos hídricos baseados nas geotécnicas (sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelagem) e medidas climáticas de superfície disponíveis para espacialização de requerimento de água de culturas e de mudanças de uso da terra.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

c) intempéries (temperaturas elevadas, chuvas, ventos, nebulosidades, poeiras) dificultando o funcionamento e a operação de equipamentos e sensores.

Espacialização de índices de vegetação e evapotranspiração da cultura na região norte de Minas Gerais

A seguir, são apresentados alguns resultados de espacialização de ETc e dos componentes do balanço de energia na região norte de Minas Gerais, abrangendo o perímetro irrigado de Gorutuba, que se localiza no município de Nova Porteirinha e parte dos municípios de Janaúba, Porteirinha, Verdelândia e Pai Pedro (Figura 20), utilizando o modelo Surface Energy Balance Algorithm for Land (Sebal), que estima a evapotranspiração a partir do balanço de energia da superfície coberta pela vegetação, calculando o fluxo de calor latente, fração de energia que é dissipada na ETc, para cada pixel da imagem de um satélite, como um resíduo da equação clássica do balanço de energia (Bastiaanssen et al., 1998). A região apresenta coordenadas geográficas de 15°47′ de latitude sul e 43°18′ de longitude oeste e altitude média de 516 m e tem como característica um clima semiárido, de inverno seco e quase sem chuva, com duração de 5 a 8 meses. Já o clima do verão é de temperaturas do ar mais elevadas e chuvoso, com duração de 4 a 7 meses, período em que as precipitações pluviais são de distribuição irregular no tempo e no espaço, e a diversidade biológica mostra-se extremamente rica. Fisionomicamente, a região está incluída na transição dos domínios do Cerrado e da Caatinga.

Utilizaram-se duas imagens de satélite do Mapeador Temático Landsat-5 (Landsat 5 TM), que caracterizaram dois períodos distintos, um úmido (24/1/2011) e outro seco (17/8/2010), da região estudada, obtidas com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Os dados climáticos usados na pesquisa foram obtidos da rede de estações meteorológicas automáticas, distribuídas em diferentes municípios na região (Figura 20). Os dados climáticos utilizados pelo modelo Sebal foram médias diárias de precipitação, temperatura do ar (máxima e mínima), umidade relativa do ar (máxima e mínima), velocidade do vento (a 2 m de altura), pressão atmosférica, radiação solar e número de horas de insolação.

A evapotranspiração e os componentes do balanço de energia da área estudada foram estimados a partir do uso das imagens do satélite Landsat 5 TM, por meio do modelo/algoritmo Sebal (Bastiaanssen et al., 1998), versão descrita por Allen et al. (2002). Esse modelo é baseado na equação simplificada do balanço de energia de uma superfície coberta por vegetação, que utiliza um reduzido número de dados climatológicos de superfície, necessários ao equacionamento do balanço de energia e à caracterização da espacialização dos parâmetros estudados pelo referido modelo, ou seja, os resultados obtidos não são referentes somente a um ponto, mas sim a uma região.

O modelo/algoritmo Sebal é composto por 25 passos computacionais que foram divididos em duas etapas e inseridos e testados no módulo Model Maker do software Erdas 2011, e utilizados nos diferentes cálculos de cada passo para todos os pixels das imagens envolvidas no estudo. Posteriormente, os mapas temáticos foram processados no software ArcGis 9.3. Foram realizadas as estimativas do balanço de radiação e energia da superfície estudada juntamente com as respectivas resistências para o transporte de momentum, para calor e vapor d'água relacionados ao saldo de radiação (R_n) e à dissipação desse R_n nos fluxos de calor do solo, de calor sensível e de calor latente, sendo este a fração de energia usada na evapotranspiração.

O trabalho também contemplou a espacialização da caracterização da vegetação da região estudada com a geração de mapas temáticos das

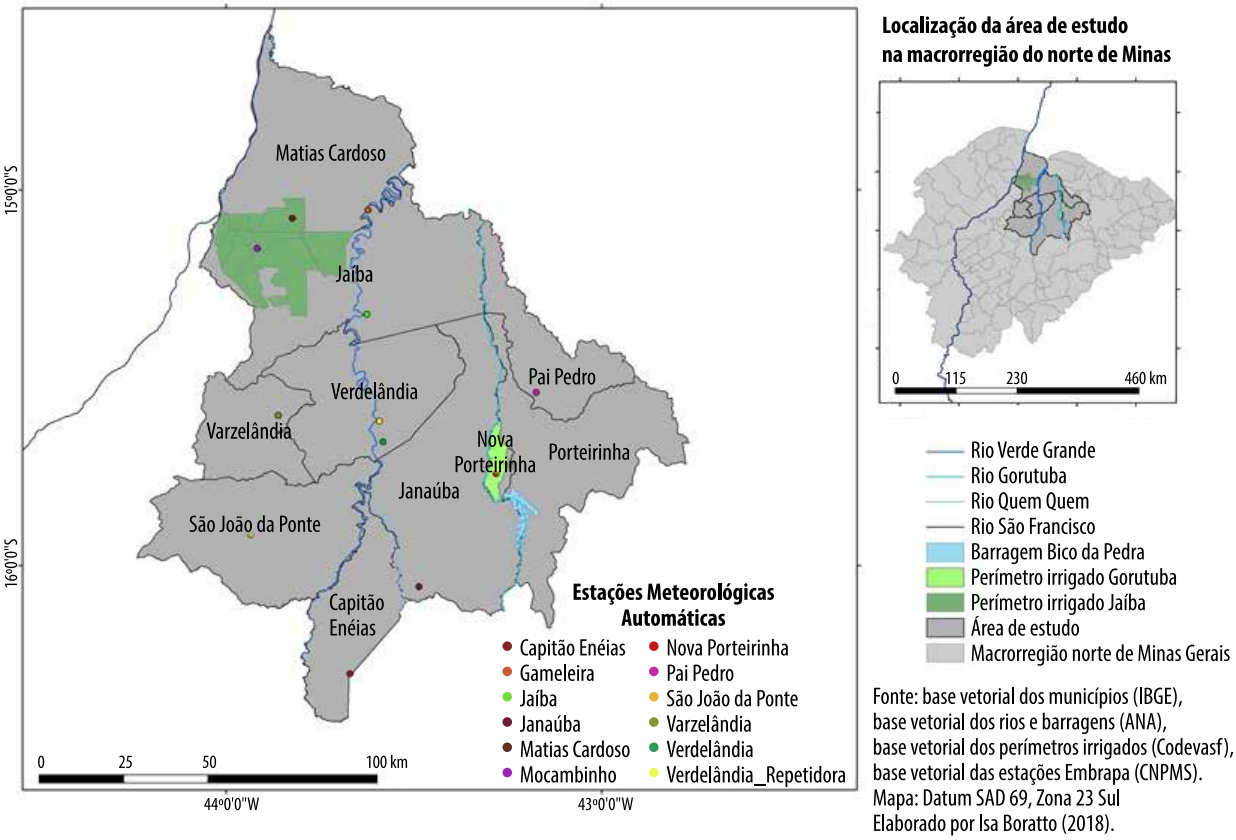


Figura 20. Mapa de localização da área de estudo na região norte de Minas Gerais e da rede de estações meteorológicas automáticas distribuídas nos municípios.

Ilustração: Isa Boratto.

condições de cobertura vegetativa dos solos, a partir de análises espectrais de imagens do satélite Landsat 5 TM, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento (SIG), associadas aos cálculos de índices de vegetação, como o índice de vegetação da diferença normalizada (*NDVI*), índice de vegetação ajustado ao solo (*SAVI*) e índice de área foliar (*IAF*).

As imagens de satélites foram calibradas e processadas no software Erdas 2011, e os mapas temáticos foram gerados no ArcGIS 9.3.

Usando os correspondentes coeficientes de calibração de cada banda ($L_{mín}$ e $L_{máx}$) do satélite Landsat 5 TM, converteram-se os números digitais (*DN*) de cada pixel em radiância espectral (L_λ, Equação 16). Isso porque os satélites medem as radiâncias espectrais emitidas e refletidas pelos alvos e armazenam os dados em formato digital. As radiâncias espectrais representam a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, do ângulo sólido e do comprimento de onda, medida nos sensores a bordo do satélite, que, no caso do Landsat 5 TM, correspondem às medidas realizadas nos canais ou bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 (Tabela 1).

$$L_\lambda = [(L_{máx} - L_{mín})/255]DN + L_{mín} \quad (16)$$

em que L_λ é a radiância espectral para banda λ (W m^{-2} sr^{-1} mm^{-1}); $L_{máx}$ e $L_{mín}$ são os coeficientes de calibração das respectivas radiâncias espectrais de cada banda λ (W m^{-2} sr^{-1} mm^{-1}); e *DN* é o número digital da imagem (0 a 255).

Tabela 1. Descrição dos canais para o Satélite Landsat 5 TM com os respectivos coeficientes de calibração $L_{máx}$, $L_{mín}$ e K.

Descrição dos canais	Comprimento de onda	$L_{mín}$	$L_{máx}$	K
Banda 1 (azul)	0,45–0,52	-1,765	178,941	1.957
Banda 2 (verde)	0,53–0,61	-3,576	379,055	1.829
Banda 3 (vermelho)	0,62–0,69	-1,502	255,695	1.557
Banda 4 (infravermelho próximo)	0,78–0,90	-1,763	245,303	1.047
Banda 5 (infravermelho médio)	1,57–1,78	-0,411	30,178	219,3
Banda 6 (infravermelho termal)	10,4–12,5	1,238	15,600	-
Banda 7 (infravermelho médio)	2,10–2,35	-0,137	13,156	74,52

Fonte: Bastiaanssen (2002).

Uma vez que a superfície apresenta uma refletância isotrópica, a radiação espectral deve ser integrada hemisfericamente, o que corresponde multiplicar a radiância espectral (L_λ) por π esterorradianos (Equação 17). A refletância espectral planetária no topo da atmosfera é a razão entre o fluxo da radiação refletido e o fluxo de radiação incidente (Allen et al., 2002).

$$\rho_\lambda = (\pi \times L_\lambda)/(K \times cos\theta \times d_r) \quad (17)$$

em que $\rho\lambda$ é a refletância espectral da banda λ; $L\lambda$ é a radiância espectral para banda λ, (Wm^{-2} sr^{-1} mm^{-1}); K é a irradiância espectral (Tabela 1); e $cos\theta$ é o cosseno do ângulo zenital solar obtido através do cabeçalho das imagens Landsat 5 TM; e d_r é o inverso do quadrado relativo da distância terra sol (Equação 18).

$$d_r = 1 + 0{,}033 \times cos\theta[DOY(2\pi/365)] \quad (18)$$

em que DOY é o dia Juliano do ano e o ângulo é dado em radianos.

Espacialização de índices de vegetação

O índice de vegetação da diferença normalizada ($NDVI$) é a razão entre a diferença das refletividades das bandas no infravermelho próximo e no vermelho e pela soma dessas mesmas refletividades (Equação 19) (Rouse et al., 1973). O $NDVI$ é um indicador sensível da quantidade e condição da vegetação, cujos valores variam no intervalo de -1 a 1.

$$NDVI = (\rho_4 - \rho_3)/(\rho_4 + \rho_3) \quad (19)$$

em que ρ_3 e ρ_4 são os valores da refletância das bandas 3 e 4 do Landsat 5 TM.

O índice de vegetação ajustado ao solo ($SAVI$) é um índice definido pela Equação 20, que leva em consideração efeitos do solo exposto nas imagens analisadas, para ajuste do $NDVI$ quando a superfície não está completamente coberta pela vegetação.

$$SAVI = [(1+ L_s)(\rho_4 - \rho_3)]/(L_s + \rho_4 + \rho_3)] \quad (20)$$

em que L_s é uma constante denominada de fator de ajuste do índice $SAVI$ e pode assumir valores de 0,25 a 1, dependendo da cobertura do solo.

Conforme Huete (1988), um valor para L_s de 0,25 é indicado para vegetação densa, de 0,5 para vegetação com densidade intermediária, e de 1 para vegetação com baixa densidade. Se o valor do $SAVI$ for igual a 0, seus valores tornam-se iguais aos valores do $NDVI$. Portanto, o valor de L_s mais utilizado é 0,5.

O índice de área foliar (IAF) é um índice biofísico definido pela razão entre a área foliar de uma vegetação por unidade de área utilizada por esta vegetação, sendo um indicador da biomas-

sa de cada pixel da imagem, computado pela seguinte equação empírica (Allen et al., 2002):

$$IAF = [ln(0{,}69 - SAVI)/0{,}59]/0{,}91 \quad (21)$$

Quanto mais próximos de 1 são os valores de $NDVI$, mais densa e vigorosa é a vegetação; o valor 0 (zero) indica superfície não vegetada; enquanto os menores valores representam as áreas de vegetação estressada hidricamente, que são bem menos densas. Os valores negativos de $NDVI$ (cor azul na Figura 21) representam a água (barragem Bico da Pedra) (Gomide; Boratto, 2014). O $SAVI$ foi usado para minimizar os efeitos da reflectância do solo ao considerar a incorporação de um fator de ajuste dependente da densidade de vegetação. O IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem, constituindo-se, portanto, em um índice biofísico, que é definido pela razão entre a área foliar de toda vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. As Figuras 21, 22 e 23 mostram os mapas das imagens processadas referentes aos cálculos de $NDVI$, $SAVI$ e IAF, para dois períodos, um úmido (24/1/2011) e outro seco (17/8/2010), cobrindo o perímetro irrigado do Rio Gorutuba, no norte de Minas Gerais (Gomide; Boratto, 2014).

Os três índices de vegetação estudados permitiram detectar e separar em diferentes classes a cobertura vegetal da região, uma vez que estão diretamente ligados à disponibilidade hídrica do perfil do solo. Por isso, a imagem do período úmido é mais homogênea e não apresenta visualmente áreas com valores muito baixos desses três índices, que caracterizariam áreas degradadas, as quais são possíveis de serem visualizadas com mais nitidez, na porção norte das imagens do período seco. Os resultados mostram que esses índices são ferramentas importantes para o manejo, a caracterização e o uso e ocupação do solo.

Espacialização de evapotranspiração das culturas

Os primeiros resultados de determinação da ETc (ou λET, em termos de energia) e dos componentes do balanço de energia, envolvendo a

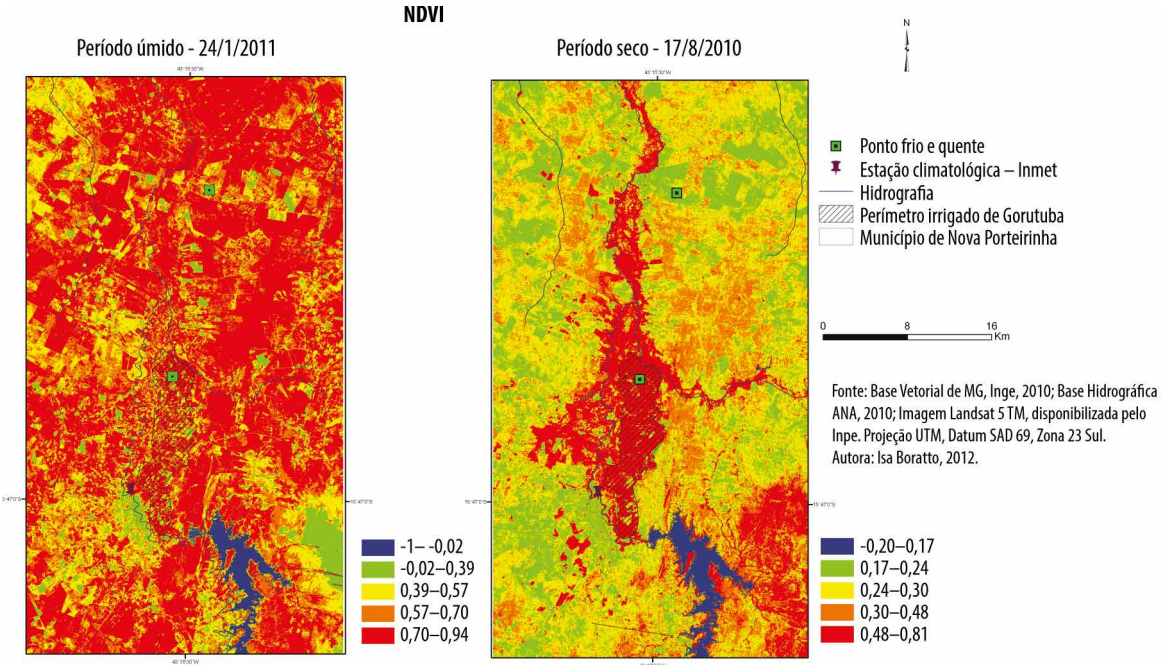


Figura 21. Mapas das imagens processadas referentes aos cálculos de NDVI, para dois períodos (úmido e seco), cobrindo o perímetro irrigado do Rio Gorutuba, no norte de Minas Gerais.

Fonte: Gomide e Boratto (2014).

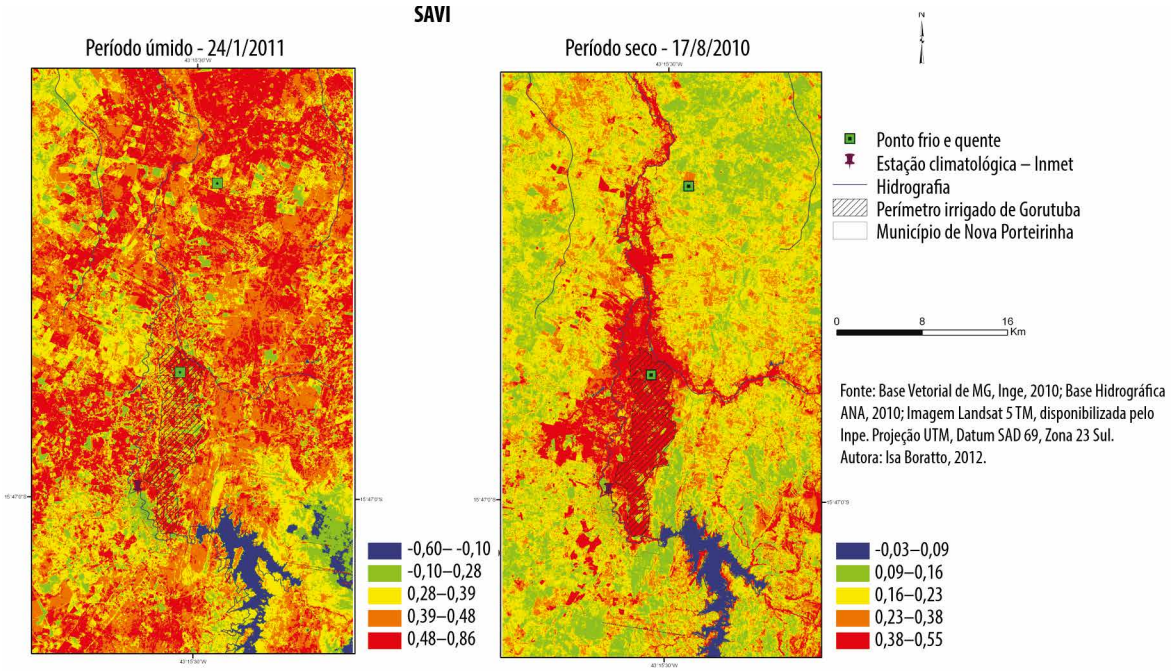


Figura 22. Mapas das imagens processadas referentes aos cálculos de SAVI, para dois períodos (úmido e seco), cobrindo o perímetro irrigado do Rio Gorutuba, no norte de Minas Gerais.

Fonte: Gomide e Boratto (2014).

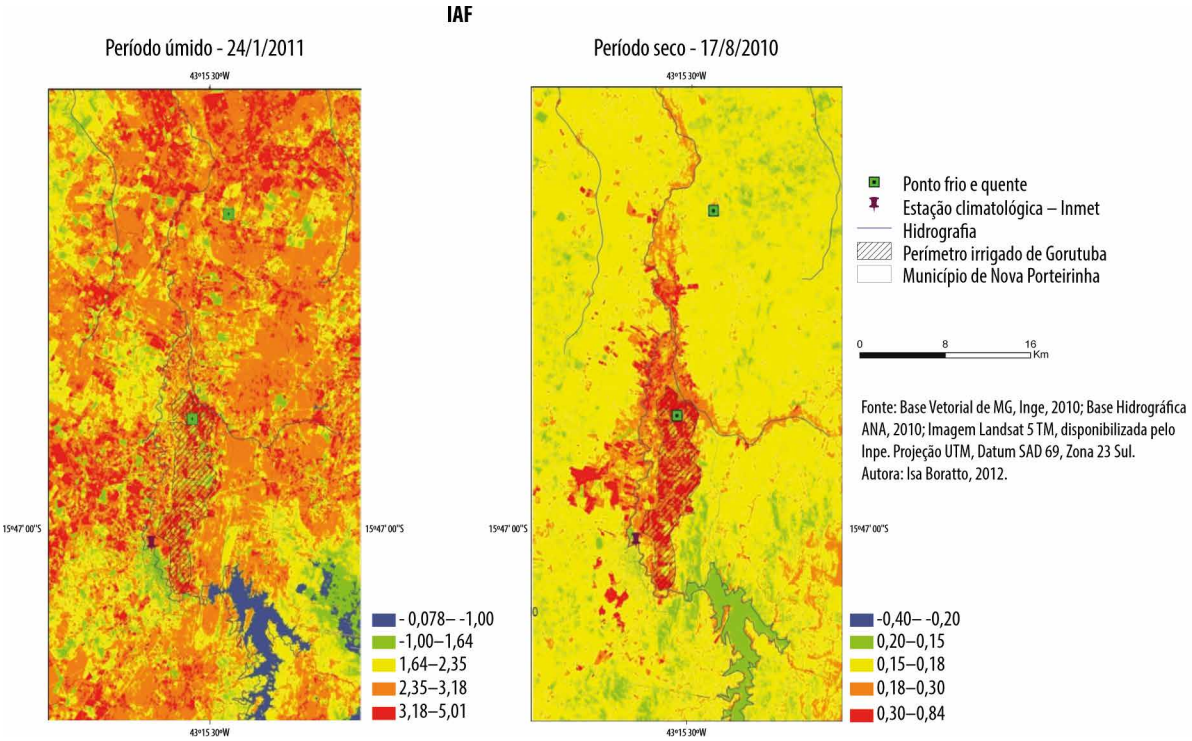


Figura 23. Mapas das imagens processadas referentes aos cálculos de IAF, para dois períodos (úmido e seco), cobrindo o perímetro irrigado do Rio Gorutuba, no norte de Minas Gerais.

Fonte: Gomide e Boratto (2014).

região do perímetro irrigado do Rio Gorutuba, no norte de Minas Gerais, foram obtidos com imagens do satélite Landsat 5 TM e o modelo/algoritmo Sebal, que estima a evapotranspiração a partir do balanço de energia da superfície coberta pela vegetação, calculando o fluxo de calor latente, fração de energia dissipada na ET, para cada pixel da imagem, como um resíduo da equação clássica do balanço de energia (Gomide; Boratto, 2014). Esse modelo requer um reduzido número de dados climatológicos de superfície, necessários ao equacionamento do balanço de energia e à caracterização da espacialização dos parâmetros estudados, ou seja, os resultados obtidos não são referentes somente a um ponto, mas sim a uma região.

Os mapas das imagens processadas da distribuição espacial do cálculo do fluxo de calor latente (λET) ou ETc, com o modelo Sebal, para dois períodos, um seco (17/8/2010) e outro úmido (24/1/2011), na região norte de Minas Gerais, são mostrados na Figura 24 (Gomide; Boratto, 2014). Os resultados obtidos indicam que o período úmido apresentou maiores valores de λET em relação ao período seco e também uma maior uniformidade das classes, por se tratar de período chuvoso na região. A classe que apresenta os intervalos de λET de 295,47 W m^{-2} a 306,22 W m^{-2} (cor laranja) é predominante na imagem do período úmido, e a classe que apresenta os maiores valores de λET, 316,26 W m^{-2} a 320,47 W m^{-2} (cor vermelha), está representada pela barragem Bico da Pedra, leitos de rios e alguns canais dentro do perímetro irrigado do Rio Gorutuba. Já os menores valores de λET situaram na faixa de 230,90 W m^{-2} a 241,73 W m^{-2} (cor amarela) e representam a vegetação com certo grau de estresse hídrico ou mesmo solos expostos (Gomide; Boratto, 2014).

Em razão da importância das práticas racionais para o manejo da água de maneira operacional, o algoritmo *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* (Safer) foi também desenvolvido (Teixeira et al., 2014) com

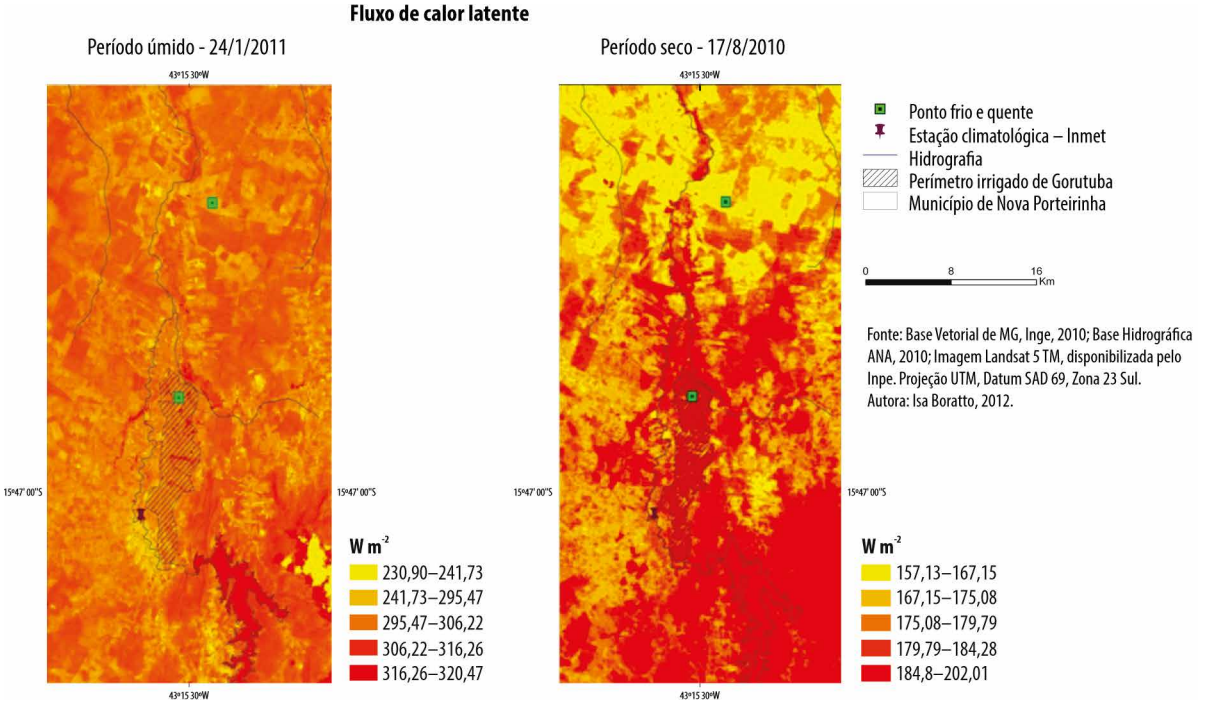


Figura 24. Mapas das imagens processadas da distribuição espacial do cálculo do fluxo de calor latente (λET) ou fração de energia usada na evapotranspiração, com o modelo Sebal, para dois períodos (seco e úmido), cobrindo o perímetro irrigado do Rio Gorutuba, na região norte de Minas Gerais.

Fonte: Gomide e Boratto (2014).

base em medições avançadas do balanço de radiação e energia, conduzidas em culturas irrigadas e vegetação natural, nas condições semiáridas da Bacia do Rio São Francisco. A elaboração desse algoritmo se deu para extrapolação de medições pontuais, pois estas fornecem valores para locais específicos, falhando nas estimativas na escala de bacia hidrográfica. A variabilidade espacial das variáveis hídricas nesta última escala é significante, e essas variações são causadas por diferentes quantidades de precipitação, drenagem, irrigação, características hidráulicas dos solos, tipos de vegetação e densidades das plantas; enquanto as tendências temporais são atribuídas às condições climáticas e ao desenvolvimento da vegetação. Os parâmetros de entrada do Safer são o albedo de superfície (α), a temperatura da superfície (T_S) e o índice da diferença de vegetação normalizado ($NDVI$) (Teixeira et al., 2014).

Considerando a simplicidade de aplicação, o Safer está sendo usado para obtenção de todos os componentes do balanço de energia, incluindo a evapotranspiração. Apesar de o algoritmo já ter sido validado nas condições semiáridas da Bacia do Rio São Francisco, provavelmente o uso das equações originais em outras condições necessitará de calibrações. Para essa calibração, além de fornecimento de informações locais, novos experimentos com balanço de energia em campo deverão ser instalados na Bacia de São Marcos (Goiás), junto com a Agência Nacional de Águas (ANA), e no noroeste de São Paulo, junto com a Universidade Estadual Paulista (Unesp), em Ilha Solteira (Teixeira et al., 2014). O Safer calibrado e validado será utilizado em conjunto com estações meteorológicas automáticas, para a estimativa das variáveis hídricas, enquanto o modelo de Monteith será aplicado para estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida para obtenção da produção de biomassa.

Os modelos Sebal e Safer estão sendo aplicados em imagens Landsat e Modis, e os indicadores obtidos possibilitarão a composição de cenários das variações espaciais e temporais da evapotranspiração, produção de biomassa e produtividade da água nos ecossistemas, envolvendo culturas agrícolas e vegetação natural nas bacias hidrográficas selecionadas para estudo, permitindo a identificação de microclimas e análises históricas.

Referências

ALBUQUERQUE, P. E. P. de; GUIMARÃES, D. P. Gestão da água na agricultura: coeficientes de cultivo (kc) e de tanque classe A (kp): um exemplo metodológico de estimativa do kc da cultura do milho e do kp para o Estado de Minas Gerais. **Item**, n. 63, p. 12-19, 2004.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 308 p. (FAO. Irrigation and Drainage, 56).

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O. FAO-24 reference evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 117, n. 5, p. 758-772, 1991.

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land**: advanced training and user manual: version 1.0. Kimberly: University of Idaho, 2002.

BASTIAANSSEN, W. G. M. **SEBAL - Surface Energy Balance Algorithms for Land**. Aug. 2002. Disponível em: http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf. Acesso em: 11 jul. 2019.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212/213, p. 213-229, Dec. 1998. DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00254-6.

BOS, M. G.; VOS, J.; FEDDES, R. A. **CRIWAR 2.0**: a simulation model on crop irrigation water requirements. Wageningen: Institute for Land Reclamation and Improvement, 1996. 117 p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting water requirements**. Roma: FAO, 1977. 144 p.

ENGMAN, T. Remote sensing: a developing technology for hydrology. **Hydrological Processes**, v. 7, n. 2, p. 119, 1993.

FREVERT, D. K.; HILL, R. W.; BRAATEN, B. C. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 109, n. 2, p. 265-270, 1983.

GARDNER, F. P.; PEARCE, R. B.; MITCHELL, R. L. **Physiology of crop plants**. Ames: The Iowa State University, 1985. 327 p.

GOMIDE, R. L.; BORATTO, I. M. de P. Evapotranspiration and energy balance components spatial distribution in the north region of Minas Gerais, Brazil, using the SEBAL model and Landsat 5 TM images. In: REMOTE SENSING FOR AGRICULTURE, ECOSYSTEMS, AND HYDROLOGY, 16., 2014, Amsterdam. **Proceedings** [...] Bellingham: SPIE, 2014. p. 1-14. (Proceedings of SPIE , v. 9239).

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. **Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature**. Chicago: American Society of Agricultural and Biological Engineers Meeting, 1985. (Paper 85-2517).

HEERMANN, D. F. Evapotranspiration in irrigation management. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Advances in evapotranspiration**. St. Joseph, 1985. p. 323-333.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, Aug. 1988.

INMET. **Normais climatológicas de 1981 a 2010**: mapas de precipitação acumulada anual. Disponível em: https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao_acumulada_mensal_anual. Acesso em: 31 maio de 2021.

JENSEN, M. E. **Consumptive use of water and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1974. 215 p.

MEDINA, J. L.; CAMACHO, E.; RECA, J.; LÓPEZ, R.; ROLDÁN, J. Determination and analysis of regional evapotranspiration in Southern Spain based on Remote Sensing and GIS. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 23, n. 4, p. 427-432, 1998.

MERVA, G. E. **Physical principles of the plant biosystem**. Michigan: Asae, 1995. 272 p. (ASAE. Textbook number, 9).

MINUZZI, R. B.; SEDIYAMA, G. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, J. M. N. El Niño: ocorrência e duração dos veranicos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 364-371, 2005. DOI: 10.1590/S1415-43662005000300011.

MIZYED, N.; LOFTIS, J.; OAD, R.; EARLY, A. Importance of demand estimation in irrigation-system management. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 117, v. 3, p. 336-349, 1991.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. **Proceedings of Royal Society. Series A**, v. 193, p. 120-145, 1948. DOI: 10.1098/rspa.1948.0037.

RITCHIE, J. T. Evapotranspiration empiricisms for minimizing risk in rainfed agriculture. In: CONFERENCE ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION. Chicago, 1985. **Proceedings** [...] St. Joseph: ASAE, 1985. p. 139-150.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, DC. **Proceedings** [...] Washington, DC: NASA: Goddart Space Flight Center, 1973. v. 1, p. 309-317. (NASA SP-351).

SEDIYAMA, G. C. A versão/proposta para o conceito de evapotranspiração de referência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9., 1995. Campina Grande. **Anais** [...] Campina Grande: SBA, 1995. 15 p.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Roma: FAO, 1991. 45 p.

SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 118, n. 6, p. 977-980, Nov. 1992.

TANNER, C. B. Measurement of evapotranspiration. In: HAGAN, R. M.; HAISE, H. R.; EDMINSTER, T. W. (ed.). **Irrigation of agricultural lands**. Madison: American Society of Agronomy, 1967. p. 320-329.

TEIXEIRA, A. H. de C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. A Comparative study of techniques for modeling the spatiotemporal distribution of heat and moisture fluxes in different agro-ecosystems in Brazil. In: PETROPOULOS, G. G. (org.). **Remote sensing of energy fluxes and soil moisture content**. Boca Raton: Taylor and Francis, 2014. p. 169-191.



Capítulo 7

Seleção do método de irrigação

Camilo de Lelis Teixeira de Andrade
João Carlos Ferreira Borges Júnior

Introdução

O método de irrigação ideal é aquele que possibilita o aumento da produtividade das culturas, a melhoria da qualidade dos produtos, a redução do risco e que garanta a rentabilidade da atividade agrícola, com o menor dano ao ambiente e atendendo, ainda, às peculiaridades sociais e políticas locais. Dessa forma, a seleção do método de irrigação mais adequado é o resultado do ajuste entre as condições existentes e os diversos tipos de irrigação disponíveis. Em muitos casos, não será possível a escolha do método ideal. Deve-se, todavia, procurar aproximar ao máximo desse objetivo, mesmo que isso implique num processo evolutivo ou realizado por etapas. Portanto, o conhecimento das características dos diversos tipos de irrigação disponíveis é essencial, mas não suficiente para que se possa proceder a uma escolha inteligente. É preciso conhecer o local onde o sistema de irrigação será implantado, as características institucionais e de viabilidade econômica do empreendimento, além de questões sociais e ambientais. Os fatores físicos do projeto são facilmente levantados, mas aqueles relacionados à interação homem-sistema de irrigação costumam ser relegados.

Um tipo de limitação econômica que pode afetar a decisão, por exemplo, é a pequena capacidade de investimento do cliente, o que recomendaria que o investimento inicial do projeto fosse reduzido, a despeito de o gasto posterior com a operação ser maior. Os objetivos sociais do empreendimento podem ser a geração de empregos, o estímulo à permanência do agricultor na terra e o aumento da oferta de produtos agrícolas. Na questão ambiental, além de respeitar as leis vigentes de proteção ambiental e de uso da água, deve-se atentar para o impacto da irrigação ao ambiente. Questões como a necessidade de manter certa qualidade da água a jusante do projeto e de preservar as matas ciliares ajudam a definir o método e as culturas a serem plantadas.

Alguns métodos de irrigação requerem a manutenção de equipamentos mais sofisticados ou especiais, como válvulas automáticas e controles eletrônicos. A disponibilidade de assistência para os componentes do sistema deve ser considerada, bem como a disponibilidade de mão de obra treinada para operá-los. O usuário do sistema deve ter discernimento suficiente para, pelo menos, identificar problemas e buscar assistência em tempo hábil, de forma a não afetar as lavouras.

A disposição dos usuários dos sistemas para trabalhar em cooperação deve ser considerada quando se tenciona projetar sistemas com estruturas comuns, como estações de bombeamento e canais. Deverá haver também disponibilidade para se compartilhar trabalho, custos e políticas de desenvolvimento e de controle ambiental.

O nível de conhecimento da mão de obra que vai lidar com os componentes do sistema deve ser considerado. Se há escassez de mão de obra qualificada, devem-se considerar métodos mais simples de operar e de manter ou mesmo o treinamento das pessoas envolvidas.

Vários aspectos dos métodos de irrigação, com implicações institucionais, devem ser considerados, ressaltando-se:

- **Divisibilidade:** capacidade de ser compartilhado para atender a vários usuários e áreas de diferentes formas e tamanhos.
- **Complexidade de manutenção:** que nível de manutenção o método requer, se o próprio usuário pode executar, se requer um profissional local mais qualificado, se requer uma oficina ou mesmo uma empresa especializada para dar manutenção.
- **Risco às culturas:** refere-se ao risco de ter a cultura afetada pela quebra de um componente; em geral, sistemas mecanizados têm maior risco de quebra que os de superfície.
- **Facilidade de operação:** alguns sistemas como os de aspersão convencional são muito simples de operar, quando comparados com um sistema de gotejamento subsuperficial.
- **Necessidade de mão de obra:** alguns sistemas, como o de sulcos, requerem muita mão de obra, quando comparados com um pivô central, que é semiautomático.
- **Robustez:** refere-se à durabilidade do sistema; alguns métodos, como os de superfície, são menos vulneráveis, enquanto outros podem parar totalmente e são frágeis, como os de irrigação localizada.

Fatores influenciadores na seleção do método de irrigação

Os fatores que podem afetar a seleção do método de irrigação são, sobretudo, aqueles relacionados ao dimensionamento do sistema, tais como: culturas, fonte de água, qualidade da água, condições da área a ser irrigada, clima, suprimento de energia e fatores econômicos.

Culturas

Na seleção do método de irrigação, é importante saber quais culturas serão cultivadas na área, bem como as práticas culturais que serão empregadas. Deve-se observar também o tipo de cultura, a facilidade de germinação, as doenças foliares, o efeito do microclima na cultura e as práticas culturais comuns, como cultivos, fertilizações e aplicações de herbicidas. Saber se haverá rotação de cultura e quais culturas farão parte dessa rotação é uma informação extremamente importante na escolha do método. Isso porque, alguns métodos podem ser bons para uma cultura, mas não para a seguinte. Algumas culturas, por exemplo, são muito susceptíveis a doenças causadas pelo molhamento das folhas, o que limita a prática de alguns métodos.

Fonte de água

As principais fontes de água para irrigação são rios, lagos, barragens, açudes, canais ou redes de tubulações comunitárias e poços profundos (Figura 1). Vários fatores devem ser considerados na análise da adaptabilidade da fonte para irrigação, entre os quais a distância da fonte ao campo, a necessidade (ou não) de bombeamento, a altura em que a água deve ser bombeada, se for o caso, o volume de água disponível (no caso de lago ou reservatório), a vazão da fonte no período de demanda de pico da cultura, a confiabilidade do suprimento de água e a frequência e duração do suprimento, além da qualidade da água. O volume de água disponível deve atender à necessidade sazonal de água da cultura (no caso de lago ou reservatório), e a vazão da fonte deve suprir a demanda durante todo o ciclo, principalmente durante o período de pico de consumo.

Fontes com vazões pequenas, mas contínuas e confiáveis, são adequadas para sistemas de irrigação por aspersão ou localizada, ao passo que suprimentos de água em grande quantidade, mas com pouca frequência, servem para o uso de métodos de superfície.

Em geral, fontes de água com frequência e vazões de distribuição rígidas limitam o uso de métodos de irrigação mais eficientes. Da mesma forma, perímetros com a distribuição de água pouco confiável limitam a seleção das culturas e afetam a rentabilidade da atividade agrícola.

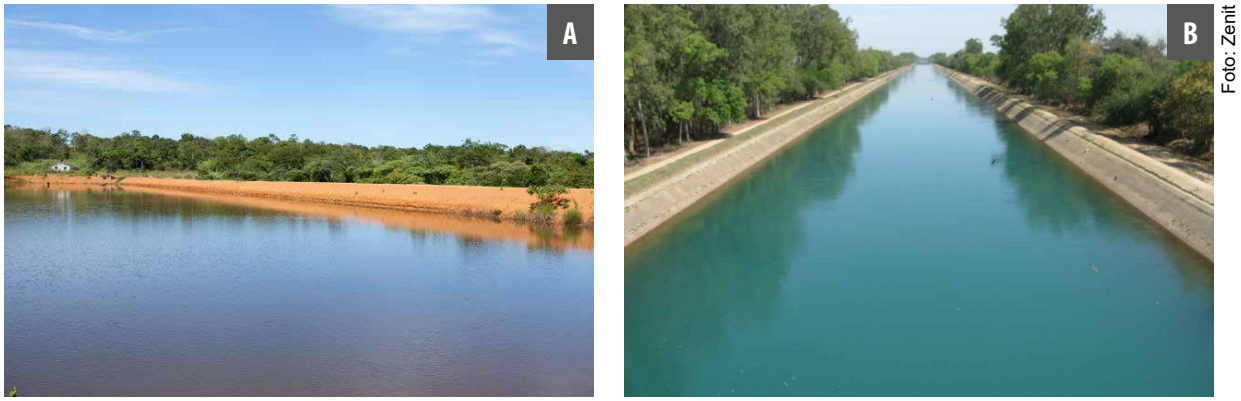


Foto: Jefferson Cristiano Christofoletti

Foto: Zenit

Figura 1. Fontes de água para irrigação indicando uma barragem de terra (A) e um canal de irrigação (B).

Qualidade da água

A qualidade da água, com relação à presença de sais, poluentes e materiais sólidos, deve ser analisada. Essas informações são essenciais para a escolha do método e para o dimensionamento dos sistemas.

Para casos em que a fonte de água é salina em regiões semiáridas, alguns métodos são mais apropriados por facilitar a lixiviação dos sais, se corretamente dimensionados e manejados. Água com alta relação entre sódio mais magnésio e cálcio pode afetar a estrutura do solo e, consequentemente, a taxa de infiltração. Em outro extremo, a água muito pura pode também reduzir a capacidade de infiltração de muitos solos, o que afeta a irrigação com alguns métodos.

Algumas culturas são sensíveis a certos íons, como sódio, boro e cloreto. A variação da concentração desses íons ao longo do ano deve ser avaliada para que se possa realizar a escolha correta das culturas e dos métodos a serem empregados.

Águas com concentrações de agroquímicos acima do limite permitido podem contaminar os produtos, o solo e mesmo a água percolada ou drenada da área. Cuidados especiais devem ser tomados nesse caso, para que se possam diluir os efeitos. O mesmo cuidado vale para águas com contaminantes biológicos. O nível de contaminação pode estar abaixo dos limites, mas a informação vai ajudar na escolha do método. Pode-se evitar, por exemplo, a utilização da irrigação por aspersão em hortaliças quando a água tem algum resíduo biológico. É possível, em alguns casos, realizar o tratamento da água antes da utilização para evitar tais problemas.

Os contaminantes físicos podem causar problemas em bombas, filtros, válvulas, tubulações e emissores. Uma análise do tipo e teor de contaminação é requerida para a escolha e o dimensionamento do sistema de irrigação.

Condições da área a ser irrigada

Dados da forma da área, obstruções, topografia, risco de enchente, profundidade do lençol freático e parâmetros do solo são essenciais para a escolha do método e dimensionamento do sistema.

A forma da área e as obstruções devem ser consideradas e anotadas nos mapas. A presença de construções, de redes hidráulicas e elétricas no interior ou nas bordas da área pode afetar a escolha do método. Redes enterradas, por exemplo, limitam a altura de corte do solo para sistemas de superfície que requerem nivelamento do terreno. Redes elétricas aéreas podem afetar os sistemas mecanizados como pivôs, ramal rolante e sistemas lineares. Se as bordas da área ou os prédios internos não podem receber

água, sistemas especiais, com aspersores setoriais, por exemplo, devem ser dimensionados.

A topografia do terreno pode influenciar decisivamente a escolha de um método. Áreas planas, com poucas irregularidades e uniformes, após pequenas regularizações da topografia, permitem a escolha de métodos de superfície. Áreas muito desuniformes em termos topográficos podem limitar o tamanho dos campos em alguns sistemas de superfície. Dados topográficos são fundamentais na escolha dos métodos de irrigação.

Outro dado importante é a profundidade do lençol freático. Locais planos com lençol raso e onde não há problemas de sais podem ser subirrigados. Em outras situações, a profundidade do lençol vai ditar a cultura a ser plantada. Se existe o risco de o lençol subir com o tempo, métodos com menor percolação de água devem ser considerados. Um possível sistema de drenagem artificial poderá ser considerado se a drenagem natural não for suficiente.

Finalmente, há que se levantar se existe risco de enchentes na área. Algumas culturas não toleram encharcamento, mesmo que seja temporário. Da mesma forma, alguns métodos de irrigação não suportariam enchentes, sobretudo aqueles que contenham componentes elétricos ou eletrônicos. Alguns métodos de superfície podem tolerar enchentes, desde que com pequena velocidade da água, que não causariam problemas sérios na superfície do solo que foi sistematizado.

Clima

Além dos aspectos de precipitação e requerimento de água, discutidos em outros capítulos, que definem a necessidade ou não de irrigar, outros parâmetros climáticos são necessários para a seleção do método. Entre esses outros dados devem-se considerar a temperatura do ar, o risco de geada, a umidade relativa e a velocidade do vento. Se a irrigação, além de propiciar água para as plantas, for empregada para a proteção contra geada, para reduzir o efeito do calor nas plantas ou para manter certo nível de umidade relativa no ar, essas informações devem ser anotadas para ajudar na escolha futura. Alguns tipos de cultivo, especialmente aqueles relacionados com ambientes protegidos, requerem informações extras das condições climáticas internamente.

Suprimento de energia

A maioria dos métodos de irrigação requer alguma fonte de energia para bombear a água e controlar os equipamentos. A disponibilidade, qualidade e confiabilidade da fonte de energia devem ser levantadas. A potência disponível, as variações de tensão e o número e a duração dos períodos de interrupção, no caso de energia elétrica, são informações valiosas na seleção do método e da cultura a ser cultivada. Em locais onde há frequentes interrupções de energia, métodos de irrigação que tenham frequência de irrigação alta e muitos equipamentos eletroeletrônicos devem ser evitados.

Outras fontes de energia, como diesel, gás natural, solar e eólica, devem ser consideradas e terem seus custos computados. Há uma tendência de se estimular o uso de energias renováveis, como solar (Figura 2) e eólica, sobretudo para pequenas irrigações. Usinas termoelétricas, que utilizam biomassa como fonte de energia, também têm potencial para serem empregadas na irrigação.

Fatores econômicos

Enquanto vários fatores têm uma grande importância na escolha do método mais adequado para uma dada situação, a maioria deles, senão todos, têm implicações econômicas.

Os dados econômicos a serem levantados são aqueles necessários para se proceder uma análise econômica detalhada após a pré-seleção dos métodos. Eles podem estar relacionados ao local ou à área onde o sistema será implantado ou ao método de irrigação com potencial para ser selecionado.

Foto: Primate's World Relief and Development Fund



Figura 2. Bombeamento de água em Fazenda de Tamil Nadu, na Índia.

Os parâmetros econômicos relacionados ao local são aqueles que não dependem, exclusivamente, do sistema de irrigação, mas são necessários para se determinar a eficiência econômica do empreendimento. Incluem-se aí taxa de juros, custo da mão de obra e da energia, taxa de inflação, custo da água, da terra e retorno econômico de cada cultura.

Os dados econômicos dependentes do sistema de irrigação são aqueles afetos aos componentes de cada método e, portanto, são específicos para cada um. Incluem-se custo dos componentes, vida útil, necessidade de mão de obra e de energia e custo de manutenção.

Considerando todos os sete fatores apresentados anteriormente (culturas, fonte de água, qualidade da água, condições da área a ser irrigada, clima, suprimento de energia e fatores econômicos), na Tabela 1 são listados aqueles mais importantes e suas relações com os métodos de irrigação, e é indicado que tipo de influência cada um tem na escolha de certo método. Essa tabela pode auxiliar um estudo de pré-seleção, somando-se os pontos obtidos para os diferentes métodos. Os métodos mais viáveis seriam aqueles para os quais forem obtidas as maiores pontuações, devendo-se, também, observar a não ocorrência de restrições severas em relação a um determinado fator. A tabela não é definitiva e deve ser empregada apenas como um guia, já que as informações nela contidas são generalizadas.

Pré-seleção dos métodos

Uma vez que os objetivos do empreendimento forem claramente estabelecidos e que os dados do local forem levantados, o processo de seleção pode prosseguir. O conhecimento da região é fundamental nessa fase. Cuidados devem ser tomados para evitar que métodos, com alguma chance de serem adequados, sejam eliminados em função da experiência em outras regiões e situações diferentes. Na dúvida, o método deve ser incluído na lista dos promissores.

A pré-seleção é feita comparando as características e potencialidades de cada método com os objetivos do empreendimento e com as condições do local onde será instalado. Aqueles métodos que não atenderem aos objetivos esperados e não se enquadrarem nas exigências físicas do local devem ser eliminados.

A Tabela 1 pode servir de guia para eliminar aqueles métodos cuja inadequação, para atender aos objetivos do empreendimento e do local onde será implantado, seja óbvia.

Dimensionamento dos sistemas e análise econômica

Se a lista dos métodos pré-selecionados é grande, uma primeira análise não muito detalhada

Tabela 1. Fatores que afetam a seleção do método de irrigação: (0) indica nenhuma influência na seleção, (1) indica possíveis razões para a preferência e (-1) indica possíveis razões para a escolha de algum outro método[1].

Fator	Método de irrigação													
	Superfície					Localizado			Aspersão					
	Sulcos	Sulcos mecanizados[2]	Faixas	Tabuleiros	Tabuleiro com inundação contínua	Microaspersão	Gotejamento[3]	Fita gotejadora[4]	Sistema linear	Pivô central	Autopropelido	Ramal rolante	Convencional	Convencional fixo
Tipo de cultura														
Culturas anuais, porte alto e médio[5]	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	1	1	0	-1	-1	0
Culturas anuais, porte baixo, espaçamento largo[6]	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	-1	-1	-1	0
Culturas anuais, porte baixo, espaçamento pequeno[7]	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	0	0
Forrageiras de porte alto	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	0	-1	-1	-1
Pastagens e forrageiras de porte baixo	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	0	-1	0	0
Arroz	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0	0	-1	0	0	-1
Batata	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	-1	0	0	1
Olerícolas sensíveis ao molhamento do dossel	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Demais olerícolas	0	0	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	-1	1	1	1
Frutíferas de porte baixo[8]	0	0	0	0	-1	1	1	-1	0	0	0	-1	0	1
Frutíferas de porte alto[9]	0	0	0	0	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1
Café	0	0	0	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	0	0
Cana-de-açúcar	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	1	-1	0	0
Rotação, clima e mecanização e tratos culturais														
Rotação de culturas	0	0	0	1	-1	-1	-1	0	1	1	-1	-1	0	0
Modificação do microclima	-1	-1	-1	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1
Mecanização e tratos culturais	0	0	0	-1	-1	0	0	1	0	0	0	-1	-1	0
Condições da área														
Áreas irregulares	0	0	0	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	0	0
Obstruções na área	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	1	-1	0	0
Lençol freático alto	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Topografia ondulada, solos rasos	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
Declividades elevadas	0	0	0	-1	-1	1	1	1	0	0	0	0	1	1
Solos pedregosos, declividade elevada	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0	1
Solos arenosos, alta taxa de infiltração	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Fator	Método de irrigação													
	Superfície					Localizado			Aspersão					
	Sulcos	Sulcos mecanizados[2]	Faixas	Tabuleiros	Tabuleiro com inundação contínua	Microaspersão	Gotejamento[3]	Fita gotejadora[4]	Sistema linear	Pivô central	Autopropelido	Ramal rolante	Convencional	Convencional fixo
Solos de textura média, taxa de infiltração moderada	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solos pesados, baixa taxa de infiltração	0	0	0	0	1	0	0	1	-1	-1	-1	0	0	0
Solos altamente não uniformes	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Solos com baixa capacidade de retenção de água	-1	-1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Solos salinos	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	0	0	-1	-1	-1	0
Solos com problemas de drenagem	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Solos muito erosíveis	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	0	0	-1	0	0	0
Solos com baixa capacidade de sustentação	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0
Suprimento de água														
Água subterrânea	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Água superficial, suprimento flexível	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	1	0	1	0
Água superficial, suprimento rígido	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Água superficial, suprimento contínuo	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Suprimento com vazão e turno não confiáveis	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	-1
Alta carga de sedimento	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0
Alta carga de matéria orgânica	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0
Alta salinidade	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Águas servidas (esgoto semifiltrado)	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	-1	-1	0
Vazão elevada	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Vazão pequena	0	0	-1	-1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Clima														
Altas precipitações	0	0	0	-1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
Precipitações limitadas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Altas temperaturas, úmido	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
Altas temperaturas, seco	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Muito vento	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Geada	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	1

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Fator	Método de irrigação													
	Superfície					Localizado			Aspersão					
	Sulcos	Sulcos mecanizados[2]	Faixas	Tabuleiros	Tabuleiro com inundação contínua	Microaspersão	Gotejamento[3]	Fita gotejadora[4]	Sistema linear	Pivô central	Autopropelido	Ramal rolante	Convencional	Convencional fixo
Energia														
Escassa e pouco confiável	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	-1
Tarifa diferenciada no período noturno	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1
Fatores sociais e institucionais														
Mão de obra pouco qualificada	0	-1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0
Dificuldade de obtenção de peças de reposição	0	-1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1
Dificuldade de assistência técnica	0	-1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0
Pouca disponibilidade de mão de obra	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	-1	-1	1
Potencial para automação	-1	0	-1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1
Potencial para vandalismo	1	0	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0
Pequena habilidade com manejo de irrigação	0	-1	0	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0
Geração de emprego	0	-1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	1	-1
Fatores econômicos														
Baixa capacidade de investimento	0	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	1	-1
Elevada capacidade de investimento	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1
Acesso a crédito	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1
Preocupações com o meio ambiente e saúde														
Adequação da área e mobilização do solo	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Uso de agroquímicos	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Propensão à proliferação de mosquitos	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Propensão à ocorrência de esquistossomose	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

[1] Com modificações para a realidade brasileira. [2] Entende-se por sulcos mecanizados aqueles que empregam redução de vazão, vazão intermitente (*surge flow*) e tubo janelado com cabo (*cablegation*). [3] Refere-se a sistemas de gotejamento providos de laterais com paredes espessas. [4] Refere-se a sistemas de gotejamento providos de laterais com fitas ou tripas com paredes de pequena espessura. [5] Exemplo: milho, sorgo, algodão, girassol. [6] Exemplo: feijão, soja. [7] Exemplo: trigo, cevada, aveia. [8] Exemplo: parreira, goiabeira, maracujazeiro, entre outras. [9] Exemplo: mangueira, citros, bananeira, entre outras.

Fonte: Adaptado de Burt et al. (1999).

deve ser realizada visando reduzir a lista. Se a lista é pequena, procede-se com o dimensionamento dos sistemas e uma posterior análise completa.

Uma vez dimensionados e listados todos os componentes dos sistemas mais promissores, uma análise econômica completa deve ser realizada, levando-se em consideração as restrições impostas pelos objetivos do empreendimento.

Seleção final

A seleção final deve ser realizada levando-se em consideração todos os fatores nas etapas descritas anteriormente. Devem ser identificados aqueles sistemas que melhor atendem aos objetivos de desenvolvimento do projeto, sejam eles institucionais, sociais, econômicos ou de adaptação às condições do local. Como na pré-seleção já se eliminou aqueles métodos que não atendem às condições não econômicas, a decisão final vai depender da análise dos sistemas que proporcionem melhor benefício líquido ou que proporcionem melhor retorno ao investimento.

Em alguns casos, haverá uma escolha simples e direta. Todavia, em outros casos, mais de um sistema atenderá aos objetivos do projeto de forma razoável. Nesse caso, deve-se reavaliar o dimensionamento do sistema de irrigação e considerar os riscos envolvidos em sua operação. Modificações no sistema de bombeamento, adutoras, tipo de tubulação e de emissores podem reduzir custos operacionais, embora aumentem custos de investimentos. Também, deve-se selecionar aquele método que seja mais confiável ou que seja mais simples de operar, se os usuários assim o desejarem.

Em todos os casos, a decisão final deve ser tomada em conjunto com o cliente, a quem devem ser apresentadas as vantagens e limitações, custos e benefícios dos diferentes métodos em apreço.

Descrição dos principais métodos de irrigação

Há um grande número de métodos de irrigação disponíveis hoje, capazes de atender às mais diversas condições de solo, clima, cultura, disponibilidade de água e energia e requisitos sociais, econômicos e institucionais. Os métodos de irrigação foram agrupados em quatro categorias: superfície, localizada, aspersão e subirrigação, as quais podem ser subdivididas conforme as características peculiares dos diferentes métodos.

Irrigação por superfície

A característica principal dessa categoria de métodos de irrigação por superfície é que ela emprega o solo como meio de transporte para a água. As características do solo controlam a lâmina infiltrada; logo, como essas características mudam com o tempo, fica impossível prever, com precisão, a lâmina de irrigação aplicada. O manejo da irrigação é feito em campo e requer muita experiência do operador para que as eficiências de irrigação e de aplicação de água[1] e a uniformidade de distribuição[2] sejam adequadas.

Há basicamente dois grupos de métodos de irrigação por superfície: com água parada e com água em movimento. Nos métodos com água parada, a lâmina de irrigação cobre toda a superfície do solo. Nos métodos com água em movimento, é requerido, geralmente, escoamento superficial, para fora da área, ou empoçamento no final da área para garantir a infiltração da lâmina pretendida no trecho final da área irrigada.

[1] Eficiência de aplicação de água é a relação entre a lâmina de irrigação desejada, que pode ser para repor o deficit de água no solo, e a lâmina de água efetivamente aplicada.

[2] Uniformidade de distribuição que pode ser a do menor quarto (DU), que é a relação entre a lâmina média infiltrada no menor quarto do campo e a lâmina média infiltrada em todo o campo, ou a uniformidade de distribuição absoluta (DUa), que é a menor lâmina infiltrada dividida pela lâmina média infiltrada em todo o campo (Walker, 1989).

Bacia ou tabuleiro em nível

É o método empregado para aplicar água em uma área plana cercada por diques. O volume de água necessário para repor certa lâmina de irrigação é rapidamente aplicado de uma única vez em uma área fechada, onde não ocorre escoamento superficial na parte mais baixa. A água fica empoçada na superfície só pelo tempo necessário para infiltrar no solo. Pode ser empregado com culturas anuais de espaçamento médio (milho, sorgo, algodão) ou pequeno (arroz, trigo, aveia, alfafa) e mesmo com culturas perenes, como fruteiras (Figura 3).

Variações nesse método incluem bacias planas e bacias com pequenos sulcos ou canteiros. Bacias planas são plantadas com culturas que podem tolerar um encharcamento temporário, como alfafa, trigo, sorgo, algodão, cevada, arroz e variedades apropriadas de milho. Esse método facilita a aplicação de grande quantidade de água de uma única vez, o que é desejável quando há problemas de salinidade no solo. Culturas perenes também podem ser cultivadas tanto nas bacias planas, quanto naquelas com canteiros.

Bacias com sulcos ou canteiros são utilizadas com culturas que não toleram inundação, mesmo que temporária. São adequadas também quando se deseja aplicar pequena lâmina de irrigação para germinar sementes nos canteiros. Culturas como hortaliças, melão, algodão, milho, batata e beterraba podem ser cultivadas nas bacias com canteiros, principalmente se estas são pequenas.

Esses métodos são mais eficientes em áreas com solos uniformes, bacias niveladas de forma precisa e com a fonte de água com altas vazões relativas ao tamanho da bacia. O nivelamento preciso da área da bacia é crucial para o manejo adequado da irrigação nesse método, pois reduz os problemas de inundação em pontos isolados e propicia melhor uniformidade de distribuição da irrigação. Operações de nivelamento podem ser realizadas com equipamentos dotados de laser ou GPS para orientação de cortes e aterros (Figura 4).

Foto: Jeff Vanuga (United States Department of Agriculture - Usda, Natural Resources Conservation Service - NRCS)



Figura 3. Tabuleiro irrigando a cultura de citros.

Foto: Jeff Vanuga (United States Department of Agriculture - Usda, Natural Resources Conservation Service - NRCS)



Figura 4. Sistematização de área empregando equipamento de nivelamento a laser.

Em regiões com alta precipitação e solos pouco permeáveis, as bacias devem ser dotadas de um sistema de drenagem superficial para evitar danos às culturas que não toleram encharcamento.

O tamanho das bacias pode variar de alguns metros quadrados até 10 ha a 15 ha, dependendo da topografia, textura do solo, taxa de infiltração, profundidade do horizonte A do solo, vazão da fonte de água, tipo de cultura e outras práticas culturais. Para solos com altas taxas de infiltração, o comprimento da bacia pode ser de cerca de 100 m. Para solos com taxa de infiltração intermediária, o comprimento da bacia pode chegar a 400 m. Para solos pesados, com baixas taxas de infiltração, um sistema de drenagem é necessário. Bacias de comprimento menor possibilitam melhor uniformidade de distribuição de água. A largura da bacia pode ser ajustada à vazão disponível para permitir o avanço rápido da água e, assim, proporcionar melhor uniformidade.

Tabuleiro com inundação contínua

Neste método, que pode ser considerado uma variação do método Tabuleiros em nível, uma lâmina d'água é mantida cobrindo a superfície do solo durante todo o tempo. O suprimento pode ser contínuo ou intermitente. É o método típico empregado para a cultura do arroz inundado (Figura 5); melhor adaptado para condições de solo com baixa taxa de infiltração e lençol freático alto. A vazão da fonte de água deve ser elevada no momento de enchimento dos tabuleiros, embora possa ser reduzida, subsequentemente, para uma vazão suficiente para manter uma lâmina cobrindo a superfície do solo no tabuleiro.

O tamanho e a forma dos tabuleiros são ditados pelas condições de topografia da área e variabilidade da textura do solo. Todavia, os diques devem ser de preferência paralelos para facilitar a mecanização e o nivelamento. Os tabuleiros podem ser totalmente em nível, o que permite que uma lâmina de água de igual altura seja mantida em toda a área. Isso é uma vantagem para a cultura do arroz inundado. Eles podem também ser construídos com pequena declividade para permitir que o arroz seja cultivado na época das chuvas e outra cultura possa ser plantada no período seco. Nesse caso, os diques podem ser removidos ou realocados e sulcos ou canteiros podem ser construídos para propiciar a irrigação de culturas que não toleram encharcamento constante. O nivelamento é crucial para que se possa obter boa uniformidade de distribuição da irrigação, e um sistema de drenagem deve ser construído para que se possa remover excesso de água na época das chuvas e enxugar a área para a colheita.

Tabuleiro com inundação intermitente

É uma variação do método Tabuleiro com inundação contínua, no qual um sistema de drenagem remove a água da bacia após o tempo necessário para infiltrar a lâmina requerida pela cultura. Isso permite que culturas que toleram um encharcamento temporário sejam cultivadas nas áreas de arroz inundado, possibilitando, assim, a sucessão de culturas (Figura 6). Aplica-se a locais com solos de baixa capacidade de infiltração e não muito bem nivelados. Requer uma fonte de água de alta vazão e permite a lixiviação de sais, quando isso é necessário.

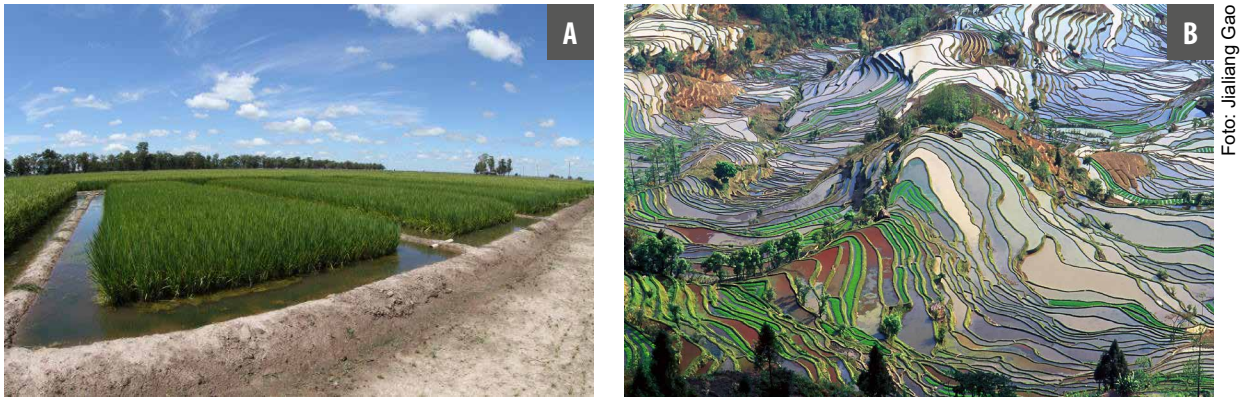
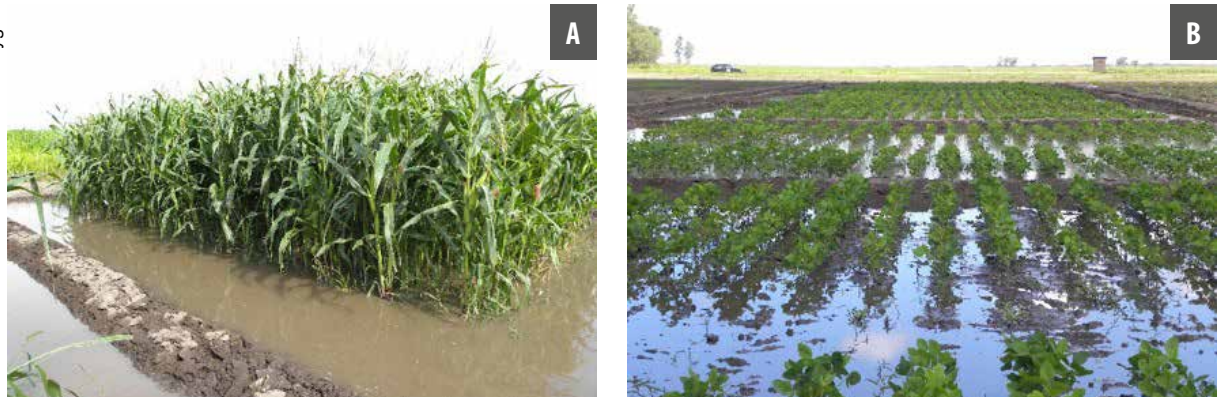


Foto: Paulo Lanzetta

Foto: Jialiang Gao

Figura 5. Arroz irrigado por tabuleiro em nível em área plana do Brasil (A) e em área montanhosa da China (B).



Fotos: Beatriz Marti Emygdio

Figura 6. Experimento de milho (A) e soja (B) plantados em sucessão ao arroz inundado na região Sul do Brasil.

Faixas

Consiste em uma faixa de terra com declividade muito pequena na direção transversal e maior no sentido longitudinal, delimitada por camalhões para evitar o espalhamento da água. Os camalhões laterais podem ser paralelos ou não, a depender da topografia da área. A largura da faixa depende da declividade transversal do terreno e o comprimento depende da capacidade de infiltração de água do solo e da vazão da fonte de água.

A superfície do solo é inundada temporariamente. O método é mais adequado para culturas perenes, como pastagem, parreira e outras fruteiras (Figura 7), ou semiperenes, como alfafa, as quais têm o limite de esgotamento de água no solo aproximadamente constante ao longo do ciclo.

Há basicamente três variações desse método: faixas em contorno; faixas sistematizadas; e faixas guiadas morro abaixo. Faixas em contorno acompanham as curvas de nível do terreno e são, geralmente, estreitas e quase nunca retas. Em geral, pouca sistematização do terreno é requerida. Faixas sistematizadas são preparadas com uma declividade constante ao longo do seu comprimento e, por isso, requerem mais movimento de terra. É o método mais moderno de irrigação por faixas no qual equipamentos a laser ou com GPS podem ser empregados para sistematizar o terreno. As faixas guiadas morro abaixo são empregadas quando o solo é raso e a topografia não é uniforme. A irrigação é feita no sentido do maior declive, o que requer que culturas que cobrem bem o solo, como pastagens, sejam empregadas.

O dimensionamento e, sobretudo, o manejo da irrigação no método de faixas é o mais complicado entre todos os métodos de irrigação.



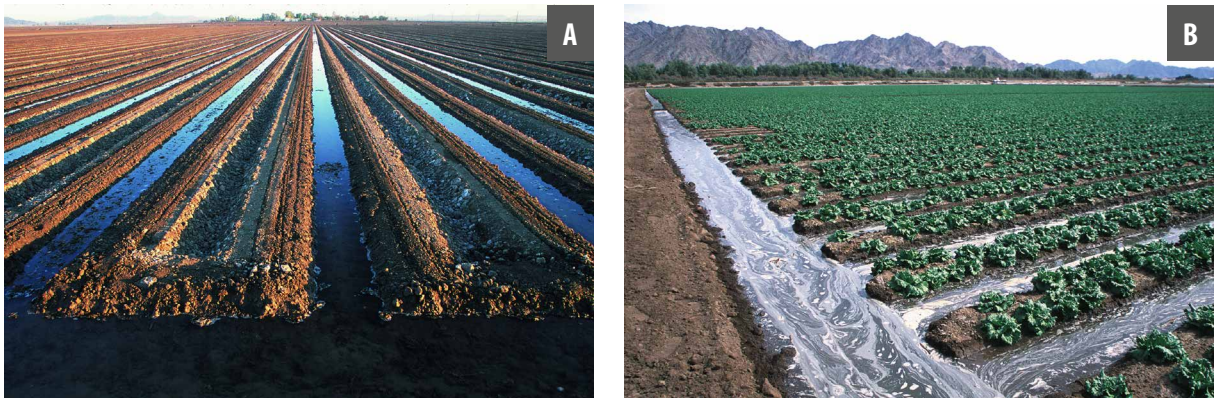
Foto: Dick Lyon

Figura 7. Irrigação por faixa em pomar nogueira pecã.

Sulcos

Este método consiste em utilizar sulcos abertos na superfície do solo para conduzir a água e permitir o umedecimento do solo até a profundidade desejada (Figura 8). A água é deixada fluir pelos sulcos até que a lâmina adequada de irrigação seja aplicada no final da área. Isso implica que ocorre um excesso de irrigação no início dos sulcos e, possivelmente, um deficit no final, além de perdas por escoamento se não houver um mecanismo de reaproveitamento da água.

É mais adaptado a culturas anuais em linha e pomares, embora possa ser utilizado com outras culturas, como hortaliças. A forma e o espaçamento entre sulcos podem variar muito para atender às exigências das culturas e aos tratos culturais. Sulcos podem ser planejados e exe-



Fotos: Jeff Vanuga (United States Department of Agriculture - Usda, Natural Resources Conservation Service - NRCS)

Figura 8. Sulcos após primeira irrigação (A) e em lavoura de alface sendo irrigada (B).

cutados de forma a evitar o molhamento das plantas ou o umedecimento total da superfície do solo, quando isso for desejável para certas culturas.

O comprimento dos sulcos pode variar, geralmente, de 60 m a 600 m, dependendo da velocidade de infiltração da água e erosividade do solo e da vazão aplicada na cabeceira do sulco, embora sulcos curtos possam ser empregados em algumas situações. A vazão de cada sulco, com declividade de 0 a 2%, pode variar de 0,2 L s^{-1} a 2 L s^{-1}. A declividade na direção perpendicular aos sulcos pode chegar a 5%, desde que se empreguem dispositivos especiais para evitar erosão no canal de cabeceira, como tubos janelados e revestimento associado ao uso de sifões (Figura 9).

O método se aplica a solos com as mais variadas velocidades de infiltração, menos os extremos, como os muito porosos ou muito pouco permeáveis. A uniformidade é melhor quando a capacidade de infiltração é similar ao longo da direção dos sulcos. Melhores uniformidade de distribuição e eficiência de aplicação são obtidas quando se tem flexibilidade de vazão e tempo de fornecimento da fonte de água e se faz uso de mecanismos de reúso da água, redução de vazão nos sulcos, vazão intermitente (*surge flow*) e dispositivos de automação, como tubos janelados comuns e tubos janelados com cabo (*cablegation*).

O método requer sistematização do terreno tanto quanto os métodos de tabuleiros ou faixas descritos anteriormente. Áreas sistematizadas com auxílio de equipamentos a laser ou GPS geralmente permitem a obtenção de boa uniformidade de distribuição da irrigação.

A disposição dos sulcos no campo, em relação à declividade do terreno, permite a acomodação do método a diversas situações. Os sulcos podem ser retos em nível, o que favorece a uniformidade de distribuição de água. Podem ser retos em declive, com comprometimento da uniformidade, risco de erosão e piora da eficiência de aplicação de água. Sulcos em contorno se ajustam melhor a áreas com declividade mais acentuada em uma direção, mas requerem algum tipo de controle da água no canal de cabeceira para evitar erosão. Podem também ser em ziguezague ou contornar covas, em terrenos com baixa velocidade de infiltração, cultivados com culturas perenes (Figura 10).

Pode-se empregar pouca ou muita mão de obra na operação e ser bom ou ruim em termos de uniformidade de distribuição e eficiência de aplicação de água. Algum tipo de automação no fornecimento da água aos sulcos pode ser utilizado, o que reduz o uso de mão de obra, mas torna mais cara a implantação. Sistemas sistematizados a laser ou com GPS e com mão de obra treinada e experiente em operação podem ser tão eficientes quanto os pressurizados. Como nos sistemas de sulcos, os fatores que

Foto: Horace G.





Foto: Dan Ogle (United States Department of Agriculture - Usda, Natural Resources Conservation Service - NRCS)

Figura 9. Tubo janelado em lavoura de cana-de-açúcar na Austrália (A) e sifões irrigando gramínea nos EUA (B).

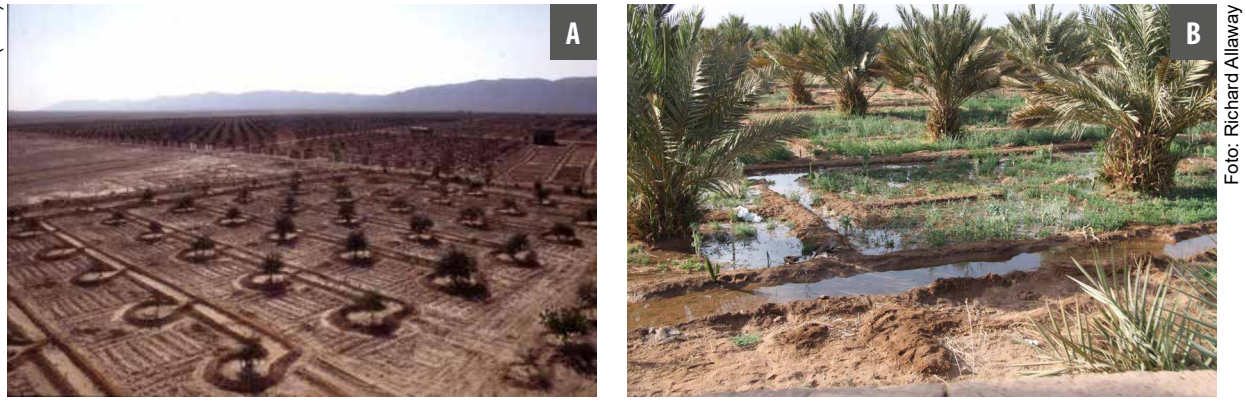


Foto: Roberto Faidutti (FAO)
Foto: Richard Allaway

Figura 10. Sulcos contornando covas de oliveira na Síria (A) e irrigando tamareiras no Marrocos (B).

afetam a uniformidade e eficiência da irrigação variam com o tempo. A experiência do operador é crucial para se obterem bons resultados.

Corrugação

Este método é uma variação do método de sulcos, e, por isso, a ele se aplicam os mesmos princípios de operação e automação. Os sulcos são mais rasos, mais próximos e locados na direção de maior declividade da área. Podem ser empregados em áreas com declividade longitudinal maior que no método de sulcos se o comprimento for curto, uma vez que empregam pequenas vazões não erosivas. Pode ser empregado em áreas de topografia irregular e com maior declividade onde a sistematização do terreno não seria prática.

Adaptável a culturas de espaçamento pequeno, sendo que os pequenos sulcos podem ser construídos antes ou depois do estabelecimento das plantas. Como nesse método as glebas são geralmente pequenas, ele requer pequenas vazões da fonte de água. Práticas modernas de automação e manejo da irrigação são mais difíceis de ser implementadas com esse método, em razão da dificuldade de sistematização do terreno.

Drenos em contorno

Este é um método de irrigação bastante rústico. Drenos são construídos aproximadamente em contorno. Para irrigar a área abaixo dos drenos, uma pequena barragem ou contenção é colocada para bloquear o fluxo de água no dreno fazendo-o transbordar (Figura 11). Não se faz qualquer sistematização da área, o que implica em pouco gasto na implantação desse método. É empregado em locais onde o custo da água é baixo, como nos vales em que a água é proveniente do degelo da neve. A superfície do solo deve estar coberta por vegetação, geralmente pastagem ou forragem para feno. Quando não há água suficiente, a cultura é deixada em dormência.

Requer pouca mão de obra para ser operado e a eficiência e uniformidade da irrigação são, geralmente, muito baixas.



Foto: Giuseppe Bizzarri (FAO)

Figura 11. Dreno em contorno para irrigação de milho no México.

Vantagens da irrigação por superfície

- Muito pouco equipamento é, geralmente, empregado nos métodos de superfície.

- Menor investimento inicial para a maioria dos solos e topografia.
- Água com impurezas físicas pode ser empregada normalmente, pois não há necessidade de filtragem.
- Uniformidade e eficiência de irrigação podem ser altas se a correta combinação de condições for empregada, como em solos uniformes de textura média a pesada, excelente sistematização do terreno, fonte de água de alta vazão e com possibilidade de variação da vazão, reúso da água de escoamento superficial e excelente manejo do sistema.
- Na maioria dos casos, não requer bombeamento da água de suprimento, mas requer o bombeamento da água de escoamento superficial para reúso.
- Pode requerer pouca mão de obra para operação, caso se reúnam as condições adequadas, como fonte de água de grande vazão e possibilidade de variação da vazão, reúso da água de escoamento.
- Maior flexibilidade para superar eventuais problemas de interrupção das operações.

Limitações da irrigação por superfície

- Alguns métodos de irrigação por superfície, para permitirem a aplicação de água de forma eficiente e uniforme, requerem excelente sistematização do terreno, e isso é difícil de obter em pequenas glebas, comuns na maior parte do mundo, em razão da dificuldade de operação das máquinas.
- A uniformidade da irrigação depende em grande parte da uniformidade do solo na gleba.
- Nos métodos de superfície, é difícil aplicar uma pequena lâmina de irrigação uniformemente.
- O manejo da irrigação nos métodos de superfície é difícil, pois as propriedades de infiltração de água do solo variam com o tempo; ademais, requer experiência do operador e boa base de dados históricos de cada gleba.
- A irrigação por superfície é uma arte que requer do projetista e do operador conhecimento, prática e muita habilidade.

Fatores influenciadores na escolha dos métodos de superfície

Nos tópicos seguintes, serão analisados os fatores que afetam a escolha dos métodos de superfície.

Culturas

Teoricamente, qualquer cultura pode ser irrigada por métodos de superfície. Todavia, para se obter boa uniformidade de distribuição de água, as lâminas mínimas de irrigação devem ser superiores a 50 mm, o que pode não ser adequado para culturas como hortaliças e algumas fruteiras, que requerem irrigações leves e frequentes. Culturas com sistema radicular profundo são mais facilmente irrigadas por métodos de superfície que permitem a aplicação rápida de grandes lâminas de água.

Algumas culturas como batata, citros e fumo não toleram o solo saturado por muito tempo e, portanto, não devem ser irrigadas por alguns dos métodos de superfície. Entretanto, sistemas de irrigação por sulcos podem ser projetados para umedecer, sem saturar a zona das raízes de culturas, como a batata (Figura 12). A cultura



Foto: Mario Marzot (FAO)

Figura 12. Sulcos curtos em plantação de batata.

do arroz, todavia, responde muito bem ao encharcamento e, quando o solo o permitir, deve ser preferencialmente irrigada por inundação.

Culturas plantadas em linha com espaçamento adensado ou semeadas a lanço, como espécies forrageiras, podem ser irrigadas por faixas, corrugação ou drenos em contorno. Culturas que ocupam parcialmente a superfície do solo são mais eficientemente irrigadas com o método de sulco.

Um aspecto importante a observar é a rotação de culturas. O método selecionado deve atender a todas as culturas envolvidas no sistema de produção.

Solos

Métodos de superfície são mais adequados a solos com velocidade de infiltração de água entre 12 mm h^{-1} e 70 mm h^{-1}. Não se recomenda irrigar, com métodos de superfície, solos com velocidade de infiltração nos extremos dessa faixa. De uma forma geral, os solos de textura arenosa apresentam alta velocidade de infiltração e baixa capacidade de retenção de água e devem ser irrigados preferencialmente por métodos pressurizados. Um grande equívoco é generalizar que os solos de textura argilosa têm baixa velocidade de infiltração e alta capacidade de retenção de água. Os solos sob Cerrado se comportam de forma diferente do que, no passado, se difundia nos livros, sobretudo os internacionais.

Em solos com horizontes A e B pouco espessos, devem-se evitar métodos que requerem sistematização rigorosa do terreno para evitar a exposição de horizontes de baixa fertilidade. Alguns métodos de superfície devem ser evitados em solos com problemas de salinidade e nos pedregosos.

Topografia e condições da área

A declividade ideal para métodos de superfície é de 1%, em que se pode sistematizar o terreno sem gasto excessivo e sem expor horizontes do solo pobres em fertilidade. Todavia, alguns métodos de superfície, como sulcos em contorno e com tubos janelados, podem ser acomodados em terrenos com declividade de até 5%. Há uma tendência nos países desenvolvidos em substituir os sistemas de irrigação por superfície, implantados em áreas com declividade acima de 1%, por métodos de aspersão e localizada.

A presença de obstrução na área (voçorocas, rochas, construções, etc.) dificulta a implantação de métodos de superfície, assim como áreas de formato e declividades irregulares.

Suprimento e qualidade da água

Os métodos de superfície, em geral, requerem grandes vazões com baixa frequência, embora reservatórios possam ser construídos na área para propiciar maior flexibilidade e confiabilidade quanto ao suprimento de água.

A altura de bombeamento de água deve ser considerada na seleção do método de irrigação. Sistemas de superfície não são recomendados para situações em que se devem bombear grandes volumes de água por desníveis elevados. Da mesma forma, em situações em que o custo da água é elevado, deve-se dar preferência para métodos em que a eficiência de aplicação é menos dependente do manejo.

Métodos de superfície podem operar razoavelmente bem com água ou solo salino, principalmente aqueles que proporcionam altas taxas de percolação, como nos tabuleiros e nas faixas. Problemas com salinidade podem ocorrer; todavia, com o método de sulcos quando canteiros são construídos na área ou no método de faixas dotados de camalhões longitudinais. Esses problemas podem ser minimizados com técnicas especiais de plantio. Uma vantagem dos métodos de superfície é que neles a água salina não entra em contato direto com a folhagem das plantas, o que minimiza os problemas de queima pelo sal. Da mesma forma, a presença de patógenos, nocivos à saúde humana, pode ser tolerada mediante a escolha

adequada de alguns métodos de superfície, como sulcos e faixas, para irrigar culturas frutíferas, para produção de fibras e algumas anuais, mas nunca hortaliças para consumo in natura (Figura 13).

Foto: I. de Borhegyi (FAO)



Figura 13. Irrigação por faixa num plantio de álamo (*Poplar*), empregando águas residuárias.

Águas com elevada concentração de sólidos em suspensão, que poderiam ser problemáticas para sistemas de irrigação localizada, podem perfeitamente ser utilizadas nos métodos de superfície. Não se pode descuidar da questão da outorga de água, que deve ser obtida antes do projeto ser implantado.

Clima

Exceto em grandes áreas irrigadas por tabuleiros ou faixas, o efeito do vento é desprezível nos métodos de superfície. Em regiões áridas e semiáridas, a evaporação direta da água acumulada em tabuleiros pode ser significativa e deve ser considerada no dimensionamento. Métodos que umedecem toda a superfície do solo (tabuleiros, faixas) também favorecem a evaporação da água do solo em comparação com aqueles que umedecem parcialmente (sulcos, corrugação, tabuleiros com canteiros).

A estratégia de manejar a irrigação de forma a deixar o solo com uma reserva para absorver a água de chuva é muito difícil de ser aplicada em sistemas de superfície, que normalmente permitem a aplicação de grandes lâminas de irrigação por vez.

Em alguns países, os métodos de superfície são empregados para umedecer o solo antes de geadas, tornando-os mais escuros e, assim, favorecer o armazenamento de calor absorvido durante o dia. Entretanto, em regiões muito quentes, os métodos que mantêm a água acumulada na superfície, como nos de tabuleiros, permitem o abaixamento da temperatura do ar e do solo, reduzindo danos à cultura do arroz.

Eficiência

A eficiência de aplicação de água nos métodos de superfície varia muito com as condições locais de solo, topografia, flexibilidade no suprimento de água, forma da área que, de alguma forma, restringem o dimensionamento do sistema e, posteriormente, do manejo da irrigação. Sob condições ideais, quando bem projetados e operados, a maioria dos métodos apresenta eficiência potencial de aplicação de água elevada. Todavia, tais condições ocorrem com menos frequência. Na prática, a eficiência de aplicação de água varia de 40%, no método de drenos em contorno, a 80%, nos métodos de faixas sistematizadas e tabuleiros com inundação contínua. O método de sulco, quando totalmente automatizado em locais de suprimento flexível de água, pode atingir uma eficiência de aplicação de cerca de 75%.

Quanto maior e mais flexível for a vazão de suprimento de água e mais automatizado for o sistema, inclusive com reúso da água de escorrimento superficial, maior será a chance de alcance das melhores eficiências.

Manejo da irrigação

O manejo científico da irrigação é muito mais complicado e difícil de ser implementado nos métodos de superfície que nos de aspersão e localizada. O solo, e não os aspersores ou emissores, é que controla a lâmina de água aplicada. Como a velocidade de infiltração de água do solo nos métodos de superfície varia com o tempo e com as condições da superfície do solo, fica difícil prever o tempo necessário para

infiltrar a lâmina de água requerida pela cultura em toda área. Para complicar, em razão de a taxa de infiltração ser elevada num solo recém-preparado, é praticamente impossível aplicar uma lâmina pequena de irrigação para suprir um menor requerimento de água pelas culturas anuais no início do ciclo.

O manejo da irrigação nos métodos de superfície é uma arte. Só a experiência e a observação de campo poderão dar confiança ao operador para irrigar de forma eficiente.

Necessidade e qualidade da mão de obra

Os métodos de superfície mais grosseiros, como os drenos em contorno, não necessitam de mão de obra muito treinada, ao passo que os sistemas mais mecanizados e automatizados requerem pessoal treinado para operar. O requerimento de mão de obra será tanto menor quanto maior for a vazão de projeto e mais flexível for o suprimento de água, melhor sistematizado for o terreno e melhores forem as estruturas para distribuição de água (por exemplo, comportas automáticas e tubos janelados com válvulas solenoides), dentre outros fatores.

Os métodos de irrigação por superfície têm sido utilizados com sucesso por agricultores mais primitivos do mundo, enquanto os sistemas pressurizados requerem algum treinamento.

Disponibilidade de assistência técnica

A disponibilidade de equipamento a laser ou GPS para orientar a sistematização do terreno e de válvulas, comportas e tubos, empregados na mecanização dos sistemas, pode ditar a escolha de um método. Terrenos sistematizados a laser ou com GPS e sistemas automatizados potencialmente podem proporcionar melhor eficiência de aplicação de água e requererem menos mão de obra. Em países subdesenvolvidos, há certa dificuldade de se contar com esse tipo de assistência, o que torna esses métodos menos eficientes na aplicação da irrigação.

Fatores econômicos

O custo de projetos de irrigação por superfície varia muito com as condições do local onde serão implantados. Se o terreno é plano, requer pouca sistematização de terra; e, se a fonte de água estiver localizada em ponto mais elevado e for de fácil captação, os custos de implantação dos métodos de superfície costumam ser menores que os de aspersão e localizada.

À medida que aumenta a complexidade do projeto, contemplando barragem para captação da água, canais de distribuição, estruturas de controle, de derivação e de reúso da água, o custo dele aumenta, embora, potencialmente, se possam conseguir melhores eficiências de aplicação de água.

Os custos de energia também são dependentes das condições do projeto. Se houver necessidade de bombeamento da água da fonte e desta para as áreas a serem irrigadas, os custos de operação serão maiores quando comparados com os dos sistemas de distribuição totalmente por gravidade. Para situações em que se faz o reúso da água, há necessariamente um custo de bombeamento envolvido, a não ser que a água seja prontamente aproveitada a jusante de uma área inicialmente irrigada.

Os custos da mão de obra dependem do grau de automação do sistema e das características do projeto. Projetos com suprimento flexível de água (água disponível quando necessário) e de grande vazão, canais revestidos, comportas e válvulas automáticas e estrutura para reúso da água, geralmente, requerem menos mão de obra. Nesse caso, um homem pode cuidar de cerca de 200 ha a 400 ha. Os métodos de tabuleiros com inundação contínua ou não, sulcos e corrugação mecanizados são os que requerem menos mão de obra (0,1 a 0,25 homens-hora por hectare, por irrigação), enquanto os métodos mais grosseiros, como drenos em contorno e sulcos tradicionais, necessitam de mais pessoas para serem operados (até 6,2 homens-hora por hectare, por irrigação).

Os custos de manutenção se limitam ao renivelamento de terreno e reparo em canais, comportas, válvulas, tubulações e drenos. Alguns métodos requerem que as estruturas internas da área, como canteiros, sulcos e camalhões, sejam refeitos várias vezes ao ano, entre irrigações e entre cultivos diferentes. A manutenção de drenos de terra é muito mais cara do que de canais revestidos e tubulações. Um projeto de irrigação por superfície pode, aparentemente, ser mais barato para ser implantado, mas poderá demandar custos elevados de manutenção e operação (Figura 14). Como regra geral, pode-se considerar que métodos de irrigação de custo inicial elevado são mais recomendados para culturas de maior valor econômico.

Fatores humanos e sociais

A escolha do método de irrigação deve levar em consideração fatores como a geração de emprego, a produção local de alimentos e a utilização de equipamentos produzidos localmente. Se há incentivo ou restrição para algum desses fatores, isso deve ser levado em consideração na escolha do método. Em regiões de agricultura familiar, com pouco acesso a crédito, os métodos de irrigação por superfície costumam ser bem aceitos.

Diversos fatores humanos de difícil justificativa técnica podem influenciar a escolha do método. Em regiões com tradição no uso da irrigação por superfície, verifica-se uma grande resistência dos irrigantes para trocarem para métodos mecanizados, pressurizados ou semiautomáticos. Há uma tendência de se aceitarem as inconveniências dos métodos de superfície como inevitáveis, o que dificulta a introdução de novas técnicas.

Fatores ambientais

Os impactos ambientais dos métodos de irrigação devem ser considerados na seleção do método. No passado, era muito comum a implantação de projetos de irrigação por superfície em várzeas, sem levar em consideração os aspectos ambientais, sobretudo o habitat natural da fauna. Hoje, as leis ambientais devem ser respeitadas, incluindo os limites das áreas de proteção dos cursos d'água e das nascentes.

Outro ponto importante é a erosão e a contaminação das águas superficiais e subterrâneas. Em alguns países, há leis que regulam a questão do escoamento superficial e da erosão nos métodos de irrigação por superfície. De uma forma geral, os métodos de superfície são potencialmente mais propensos a causar problemas ambientais ligados à erosão e à contaminação das águas superficiais e subterrâneas, uma vez que a eficiência de aplicação da água é, comumente, baixa.

Irrigação localizada

Os sistemas de irrigação localizada permitem irrigações frequentes, mantendo o solo com

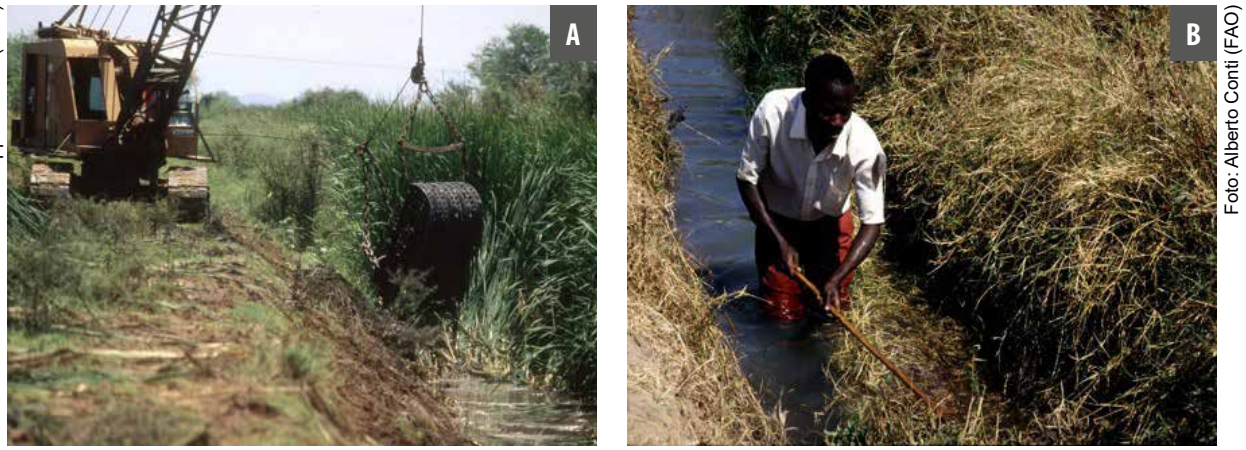


Foto: Giuseppe Bizzarri (FAO)

Foto: Alberto Conti (FAO)

Figura 14. Limpeza de drenos e canais com máquina (A) e manual (B).

teor de água próximo à capacidade de campo, beneficiando, assim, culturas que respondem a essa condição. A água é aplicada apenas na área adjacente às plantas. Empregam-se emissores instalados na linha de irrigação ou em um prolongamento da linha, cuja vazão pode variar de 0,5 L a 120 L por hora. Os emissores podem ser do tipo gotejadores individuais ou lineares, como os tubos porosos e as tripas ou do tipo microaspersores (Figura 15), que podem ser fixos, como os sprays, ou móveis com bailarinas. A fração da área molhada pode variar de 20% a 80%, podendo chegar a 100% em alguns casos.

Os sistemas de irrigação localizada são, quase sempre, fixos, o que permite total automação das operações, incluindo a fertirrigação, reduzindo-se, dessa forma, os custos com mão de obra na operação. Alguns sistemas permanecem fixos na mesma gleba durante uma safra, mas podem ser removidos para outra área na safra seguinte.

Esses métodos requerem que a água seja filtrada (Figura 16) para evitar o entupimento dos emissores, o que onera o custo de implantação dos sistemas. Dependendo da qualidade da água, há ainda a necessidade de aplicação de produtos químicos via água para minimizar o problema de entupimento dos emissores, sobretudo dos gotejadores. Fertilizantes e alguns defensivos podem ser aplicados via água de irrigação (Figura 16), com potencial para aumento da produtividade das culturas, mas com perigo de contaminação do solo e da água subterrânea.

Por ter custo elevado, os métodos de irrigação localizada são recomendados para culturas de alto valor econômico e maior espaçamento entre plantas. O tipo de solo e a cultura a ser irrigada é que, geralmente, ditam o tipo de irrigação localizada que dever ser empregada. Se há necessidade de controle de geadas, o método da microaspersão com cobertura total pode ser recomendado. Culturas de espaçamento pequeno entre plantas na linha, como café e algumas hortaliças, se adaptam melhor ao gotejamento do tipo fita ou tripa. Sistemas de microaspersão não funcionam bem em culturas que apresentam uma saia fechada junto ao solo; no entanto, são adequados a solos muito arenosos e para culturas de espaçamentos largos, como da manga e da banana.

Gotejamento

No sistema de gotejamento, a água é aplicada com baixas vazões (0,5 L h^{-1} a 10 L h^{-1}) de forma

Foto: Marcelino Ribeiro



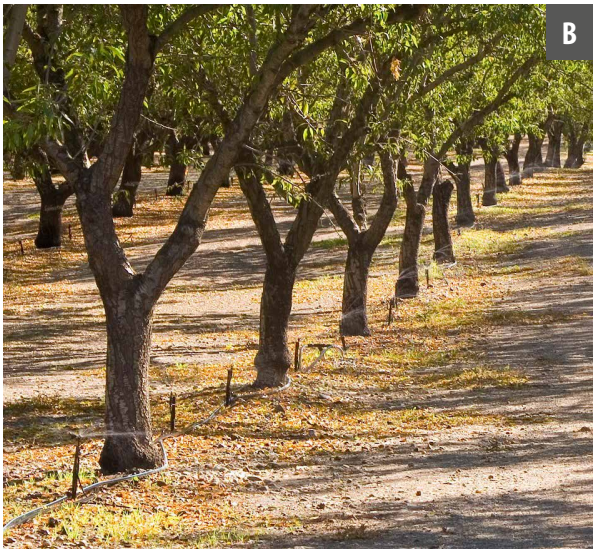


Foto: Jeff Vanuga (United States Department of Agriculture - Usda, Natural Resources Conservation Service - NRCS)

Figura 15. Gotejador na cultura do melão (A) e microaspersor em pomar de amêndoas (B).

Foto: J. M. Villarreal (United States Department of Agriculture - Usda, Natural Resources Conservation Service - NRCS)





Foto: Cássio Sampaio Pupo Nogueira (empresa Terra Molhada Irrigação)

Figura 16. Bateria de filtros de areia de um sistema de irrigação localizada (A) e injetor de agroquímicos do tipo venturi (B).

pontual na superfície do solo. Para tal, empregam-se laterais de polietileno (mangueiras) com diâmetro de 16 mm a 30 mm e comprimento, normalmente, de 100 m a 200 m, que são dispostas ao longo das linhas de plantio da cultura. A espessura da parede dos tubos usados como laterais varia muito, dependendo da durabilidade esperada e se o sistema será enterrado ou não. Para culturas permanentes, como pomares e café, geralmente são utilizadas laterais de parede mais grossa, de maior durabilidade. Já para culturas anuais e hortaliças, é comum o emprego de laterais de parede fina, chamadas de fitas ou tripas, cuja durabilidade é de uma a duas safras apenas.

Os gotejadores são instalados sobre a linha, no prolongamento da linha ou podem ser manufaturados na parede do tubo como nas fitas (Figura 17). Há, basicamente, dois tipos de gotejadores, os de labirinto e os de compensação de pressão. Por não terem partes móveis, os de labirinto são mais baratos, duráveis e costumam entupir menos, pois as passagens da água são maiores. Os autocompensantes são dotados de um mecanismo que mantém a mesma vazão no gotejador para diferentes pressões na linha lateral, o que permite o uso de laterais mais longas e de menor diâmetro. Esse tipo de gotejador costuma apresentar maior coeficiente de variação da vazão e ter a durabilidade reduzida; é, portanto, necessário estabelecer claros critérios de garantia quando da aquisição do sistema.

Um ou mais gotejadores por planta podem ser instalados nas laterais para permitir que se aplique a lâmina de irrigação necessária à cultura e também proporcionar o umedecimento mínimo do volume de solo na zona das raízes, requerido pela cultura em certo ambiente e tipo de solo. Em regiões semiáridas, esse volume mínimo é de 60%, enquanto em regiões úmidas, onde o gotejamento é suplementar às chuvas, volumes de solo úmido menores podem ser empregados (Figura 18).

Para culturas de espaçamento até 4 m, geralmente utiliza-se uma lateral por linha de cultura. Para culturas de espaçamento maior, é necessário utilizar duas laterais por fileira de plantas para que se obtenha o volume adequado de solo úmido. Em cultivos de uva, as laterais podem ser suspensas aproveitando o espalderamento, o que facilita os tratos culturais e reduz os danos a elas (Figura 19). Estudos demonstram vantagens para o uso de duas laterais por linha de videira, para que se possam alternar as irrigações e, assim, evitar o estresse do sistema radicular da cultura, favorecendo a qualidade dos frutos e também reduzindo a evapotranspiração.

O uso do método de gotejamento tem-se expandido consideravelmente nos cultivos de hortaliças, principalmente naquelas espécies que não toleram o molhamento das folhagens ou dos frutos. Em cultivos realizados em am-



Figura 17. Gotejador sobre a linha de irrigação (A), no prolongamento da linha (B) e construído na parede da linha (C).



Figura 18. Sistema de gotejamento subsuperficial umedecendo parte da superfície do solo em lavoura de tomate (A) e de alface (B).

Foto: Tim McCabe (United States Department of Agriculture - Usda, Natural Resources Conservation Service - NRCS)



Figura 19. Sistema de gotejamento com linha lateral suspensa amarrada no espalderamento de parreira.

biente protegido e em vaso, utiliza-se gotejamento; em campo, é comum o uso de fitas ou tripas, que são laterais de parede muito fina com os gotejadores tipo labirinto construídos na própria parede da lateral (Figuras 17 e 20). O custo de instalação do sistema é menor em razão do menor custo das laterais e do sistema de filtragem menos exigente, uma vez que as laterais têm vida útil curta. As laterais costumam ser recolhidas ao final do ciclo das culturas de forma manual ou empregando-se equipamento acoplado ao trator. A durabilidade das laterais depende da espessura da parede do tubo, dos cuidados no manuseio e nos tratos culturais e da presença ou não de ventos fortes que podem danificar os tubos.

Nos últimos anos, expandiu-se consideravelmente o uso de fitas com furos construídos a laser em toda a sua extensão (Figura 21). São furos muito pequenos que requerem filtragem da água.



Foto: Anjarl

Figura 21. Sistema de irrigação localizada com fita perfurada.

Gotejamento subsuperficial

Trata-se de uma variação do sistema de gotejamento convencional, usada desde a década de 1970 nos Estados Unidos, no qual toda a rede é enterrada, inclusive as laterais de irrigação (Figura 22). As principais razões para se optar por um sistema totalmente enterrado são a menor evaporação da água pela superfície do solo, menos plantas daninhas nas regiões semiáridas, menos umidade e, portanto, menos problemas de doenças para aquelas culturas mais susceptíveis e a possibilidade de trafegar e cultivar o solo em qualquer época e em qualquer direção. Na prática, nem todas essas vantagens são obtidas por causa de vários fatores. A água pode

Foto: Goldlocki





Foto: United States Department of Agriculture (Usda)

Figura 20. Sistema de gotejamento para produção de tomate em estufa (A) e no campo (B).

Foto: Mark Meyer (United States Department of Agriculture - Usda, Natural Resources Conservation Service - NRCS, Texas)

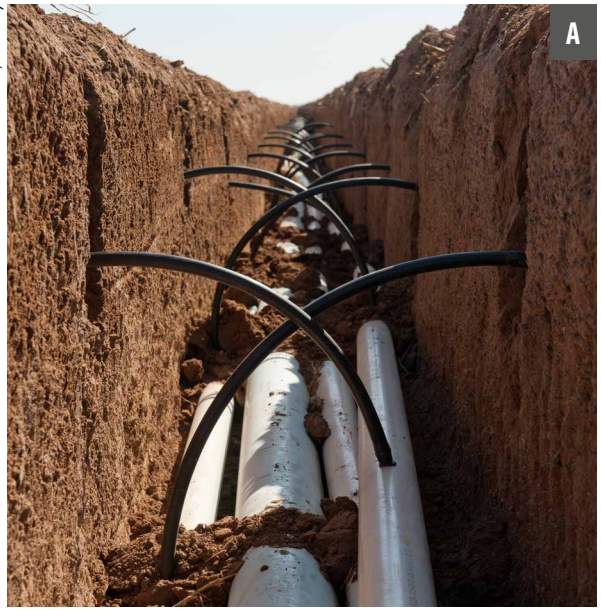




Foto: Lance Cheung (United States Department of Agriculture - Usda)

Figura 22. Laterais de irrigação por gotejamento subsuperficial (A) e detalhe do umedecimento em uma lavoura de tomate (B).

subir por capilaridade e umedecer a superfície quando a vazão dos gotejadores é elevada ou quando as laterais são enterradas muito rasas (Figura 18). A qualidade da água pode também afetar a condutividade hidráulica do solo e favorecer a ascensão da água para a superfície. Soluções para esses problemas têm sido praticadas, como o tratamento da água, o uso de emissores de baixa vazão, uso de irrigação pulsante a cada 30 minutos ou 1 hora. Outro problema é o rompimento das mangueiras das laterais pelas raízes das plantas perenes e a intrusão de raízes nos gotejadores, que pode ser minimizada com o uso de gotejadores impregnados com trifluralina (herbicida) ou a injeção de trifluralina na água de irrigação, de tempos em tempos.

Um complicador do sistema de gotejamento subsuperficial é a profundidade de instalação das laterais, que pode variar de 0,10 m a 0,75 m. Essa profundidade deve ser tal que as laterais não sejam danificadas pelo tráfego de máquinas, que não permitam o umedecimento da superfície, mas que proporcionem umidade suficiente para a germinação de culturas anuais ou hortaliças.

Esse método pode ser empregado em culturas perenes, anuais e hortaliças. Deve-se ter mais cuidado para instalar o gotejamento subsuperficial em culturas já implantadas por causa do dano causado às raízes.

Os sistemas de gotejamento enterrado podem ser do tipo de uma safra ou permanentes. Nos sistemas de uma safra, as linhas principais e secundárias são permanentemente enterradas, o sistema de filtragem não é tão rigoroso, e as laterais são do tipo fitas ou tripas, enterradas entre 10 cm e 25 cm. As laterais são removidas ou descartadas ao final do ciclo das culturas ou são deixadas enterradas no solo, como em lavouras de cana. Na próxima safra, outras laterais são instaladas.

Os sistemas permanentes são cuidadosamente projetados para atender a várias culturas, geralmente hortaliças, com demandas de água, germinação, transplantio e espaçamentos diferentes. As laterais de maior durabilidade (6 a 10 anos) são enterradas entre 20 cm e 40 cm.

Equipamentos especiais são empregados para cultivar o solo e incorporar restos culturais sem danificar ou mover as laterais enterradas. As principais culturas irrigáveis com esse método são hortaliças, mas está sendo utilizado para irrigar culturas anuais e gramados. No Brasil, há relatos de experiências bem-sucedidas com a irrigação subsuperficial nas culturas de tomate, milho, soja e cana-de-açúcar. Nas lavouras de cana, tem-se observado aumento considerável da produtividade e da longevidade do canavial.

Para a germinação de sementes e pegamento de mudas, costuma-se operar o sistema com pressões mais altas de forma a se ter maior vazão nos gotejadores e, assim, forçar o umedecimento da superfície do solo. Em algumas situações, todavia, há necessidade de um sistema auxiliar, geralmente, de aspersão móvel, para facilitar a implantação das culturas de hortaliças.

Um grande problema desse tipo de sistema é a detecção de entupimento que fica dificultada, sobretudo nos sistemas projetados para não umedecer a superfície do solo.

Microaspersão

Como o nome indica, nesse sistema, a água é aplicada por emissores rotativos ou fixos, com vazão entre 12 L e 120 L por hora e molhando um diâmetro de 2 m a 6 m (Figura 23). As laterais são geralmente de diâmetro maior e de comprimento mais curto que no método de gotejamento, quando os microaspersores não dispõem de regulador de pressão. Para culturas de espaçamento pequeno, o custo dos sistemas de microaspersão é maior que o dos sistemas de gotejamento, sendo equivalente ou mais barato, todavia, para culturas de espaçamento mais largo, como manga, banana, mamão e citros (Figura 24). Em solos arenosos, quando se deseja um volume maior de solo úmido, os sistemas de microaspersão são mais vantajosos, bem como para culturas cujo sistema radicular é raso e se espalha lateralmente. Se projetado adequadamente, os sistemas de microaspersão podem ser empregados para controle de geada nas plantações (Figura 25). Os sistemas de microaspersão costumam ser mais simples de manter que os de gotejamento e, principalmente, que os de gotejamento subsuperficial.

Aparentemente, os sistemas de microaspersão requerem filtragem menos rigorosa da água, uma vez que os orifícios de passagem são maiores. Entretanto, em razão da alta velocidade de saída da água combinada com a presença de silte, vem sendo observado elevado desgaste dos bocais. Em culturas de porte baixo, como hortaliças, ou em pomares jovens, os microaspersores podem sofrer a influência do vento afetando a uniformidade de distribuição da água. A evaporação direta da água do jato e da superfície do solo também é maior nos sistemas de microaspersão, principalmente nos locais de clima seco. Além disso, por proporcionar um ambiente mais úmido, os sistemas de microas-



Foto: Anton Croos (Art of Photography)

Foto: Lynn Ketchum

Figura 23. Microaspersor com bailarina (A) e do tipo spray setorial (B).



Foto: Cássio Sampaio Pupo Nogueira (empresa Terra Molhada Irrigação)

Figura 24. Microaspersão em pomar.



Foto: Joaquin Perales Martinez (Refor S.L.)

Figura 25. Microaspersão para proteção contra geada em pomar.

persão podem favorecer o desenvolvimento de doenças em culturas mais sensíveis.

Vantagens da irrigação localizada

- Pode ser implantada em áreas de declividade elevada (Figura 26).
- Não requer qualquer tipo de sistematização do terreno, exceto quando drenagem superficial é necessária.
- É geralmente alta (acima de 93%) a uniformidade de distribuição de água, principalmente nos sistemas novos, bem projetados e com gotejadores autocompensantes.
- Permite a irrigação com alta frequência sem reduzir a uniformidade (ao contrário do que ocorre nos sistemas de superfície) e com menor perda por evaporação direta (comparado com aspersão).
- Pouco afetada pelo vento.
- Pode ser implantada em glebas de qualquer formato e não tem problemas de escoamento superficial.
- Fertilizantes podem ser aplicados de forma uniforme em qualquer estádio da cultura e com qualquer dose, o que, combinado com o maior umedecimento do solo, favorece o aproveitamento dos nutrientes.

Limitações da irrigação localizada

- A uniformidade de distribuição de água pode se reduzir rapidamente com o tempo por causa da filtragem e da operação inadequadas que causam o entupimento de emissores.
- Tanto no sistema superficial, quanto no subsuperficial, podem ocorrer danos nas laterais por roedores e pelas operações de cultivo e colheita (Figura 27).

Vantagens e limitações da irrigação localizada

- Em algumas situações, as gavinhas das próprias culturas irrigadas ou de plantas invasoras podem paralisar a bailarina de microaspersores (Figura 27).
- O potencial para uso mais eficiente de água e fertilizantes e otimização da produtividade existe, mas só poderá ser obtido se houver uma mudança de cultura dos irrigantes acostumados com outros sistemas, sobretudo no que diz respeito ao manejo da irrigação.
- As perdas de água por evaporação podem ser grandes nos sistemas de microaspersão que umedecem áreas maiores de solo nu.
- A fonte de água deve ser confiável e do tipo por demanda, com alta frequência de fornecimento; perímetros projetados para operar no sistema de rotação (muito comum no mundo e empregado para irrigação por superfície)

Fotos: Christian Fischer Johansson (empresa Agronovedades, Chile)

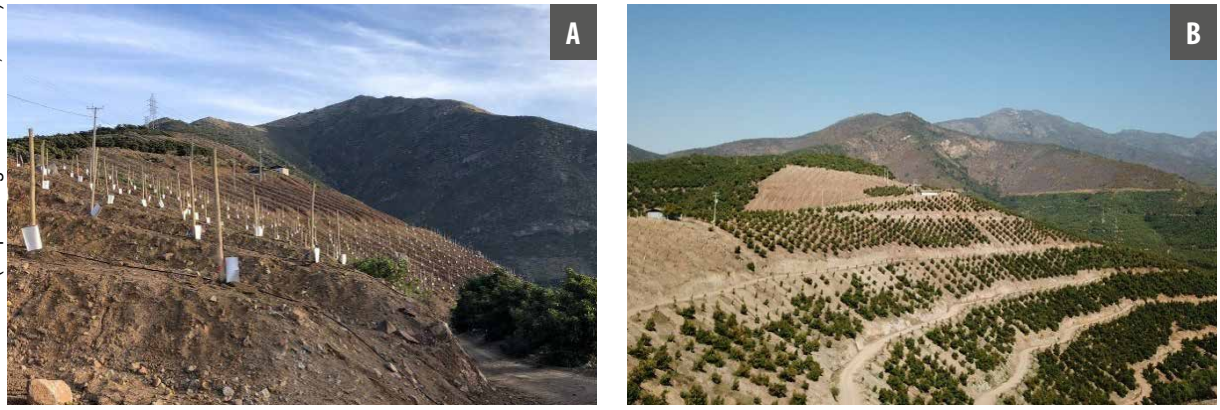


Figura 26. Irrigação de pomar por gotejamento em área montanhosa, indicando detalhes de um plantio recente (A) e pomar estabelecido (B).



Fotos: Bruno Leite Teixeira Perroni

Figura 27. Lateral danificada por capina (A) e bailarina de microaspersor paralisada por planta invasora (B).

não atendem aos sistemas de irrigação localizada, a menos que reservatórios de água sejam construídos nas glebas ou que se faça uso de água subterrânea.

- Em razão da complexidade dos componentes, sobretudo dos sistemas automatizados, há necessidade de assistência técnica responsável, bem treinada e bem suprida de peças de reposição, o que, muitas vezes, é um problema nos países do terceiro mundo, principalmente quando os equipamentos são importados.
- Em regiões semiáridas, é possível que se necessite de um sistema auxiliar de aspersão para, de tempos em tempos, lixiviar sais; na época das chuvas, os sais acumulados na periferia dos bulbos molhados podem ser deslocados para a zona das raízes e afetarem as culturas.
- O custo inicial de implantação é, quase sempre, elevado.

Fatores influenciadores na escolha dos métodos de irrigação localizada

Nos tópicos seguintes, serão analisados os fatores que afetam a escolha dos métodos de irrigação localizada.

Culturas

Alguns aspectos relacionados às culturas, tais como tolerância ao molhamento do tronco e das folhas, e propensão ao desenvolvimento de doenças em ambiente úmido, tanto no ar quanto no solo, devem ser considerados na seleção do método de irrigação localizada.

Algumas culturas como citros não toleram o molhamento do tronco. Nesse caso, para irrigá-las, deve-se empregar gotejamento, ou microaspersão com emissores setoriais. Algumas hortaliças, como tomate e pimentão, respondem melhor ao gotejamento que à microaspersão, uma vez que este último método pode criar ambiente úmido e propiciar o aparecimento de doenças.

Culturas de espaçamento mais largo, que requerem maior volume de solo úmido, são mais facilmente irrigadas com microaspersão. No Brasil, as culturas de mangueira e bananeira têm sido irrigadas de forma bem-sucedida com microaspersão. No entanto, a cultura do meloeiro tem sido adequadamente irrigada com gotejamento.

De uma forma geral, os métodos de irrigação localizada se adequam melhor às culturas de maior valor comercial, como fruteiras e hortaliças, e àquelas que ocupam parcialmente a superfície do solo e têm espaçamento mais largo.

Algumas pesquisas indicam que a videira, cultivada em regiões com estações úmida e seca bem definidas, reduz a produtividade e a qualidade dos frutos no período seco quando ocorre a morte das raízes que cresceram no

período chuvoso. Obviamente, os métodos que umedecem um volume maior de solo na zona das raízes seriam mais adequados para tal situação.

Solos

Os métodos de irrigação localizada têm sido empregados nos mais variados tipos de solo. Em solos muito arenosos, cultivados com plantas de espaçamento largo, deve-se dar preferência para a microaspersão, uma vez que seriam necessários muitos gotejadores para umedecer o volume requerido de solo. Em solos mais pesados, onde o movimento lateral da água é grande, pode-se utilizar gotejamento, sobretudo naqueles solos com baixa velocidade de infiltração de água. É possível irrigar com gotejamento solos com velocidade de infiltração tão baixa quanto 12 mm h^{-1}.

De uma forma geral, em solos com baixa capacidade de retenção de água, os métodos de irrigação localizada são mais eficientes que os de superfície e até aspersão.

Métodos de irrigação localizada também costumam apresentar bons resultados em solos salinos.

Topografia e condições da área

Os métodos de irrigação localizada são os mais adaptáveis às condições topográficas, podendo ser instalados em áreas com declividades de até 60% (Figura 26). Da mesma forma, esses métodos são facilmente ajustados a áreas irregulares e com obstruções, como prédios, voçorocas, rochas, etc.

Suprimento e qualidade da água

Os métodos de irrigação localizada requerem o suprimento praticamente contínuo de água, principalmente quando os sistemas são automatizados. Os perímetros de irrigação mais antigos foram projetados para fornecer água em um sistema de rotação, cuja frequência é, quase sempre, inadequada para os métodos de irrigação localizada. Isso limita sua modernização por meio da implementação da irrigação localizada. Uma forma de resolver esse problema é com a construção de reservatórios pulmão nos lotes ou a utilização de água subterrânea.

Quanto maior for a altura de recalque ou maior for o custo da água, mais eficiente deve ser o método de irrigação empregado. Nesse caso, os métodos de irrigação localizada levam vantagem.

Os métodos de irrigação localizada podem ser utilizados com água salina, uma vez que o solo é mantido mais úmido, o que reduz o estresse osmótico.

O gotejamento é extremamente sensível à presença de sólidos na água e, por isso, requer um sistema contínuo e rigoroso de filtragem. Em casos extremos, as impurezas da água são tais que inviabilizam os métodos de irrigação localizada por causa do custo das estruturas de filtragem. Nessas situações, é necessária a construção de reservatórios para sedimentar areia, silte, ou para oxidar óxidos de ferro e manganês, antes da filtragem convencional. Concentrações de ferro e manganês acima de 0,2 ppm podem causar entupimento de gotejadores, fazendo-se necessário o tratamento da água. Águas com elevada concentração de carbonatos de cálcio são problemáticas para os métodos de irrigação localizada, pois pode ocorrer a precipitação nas tubulações e, sobretudo, nos emissores expostos à evaporação da água.

Água com contaminantes nocivos à saúde humana pode ser empregada em sistemas de gotejamento, principalmente se as laterais forem enterradas, o que é mais difícil de ser operacionalizado com métodos de aspersão. Há uma tendência mundial de reutilização de água oriunda de estações de tratamento de esgoto doméstico e industrial. Esforços têm sido feitos para pesquisar a utilização desse tipo de água na agricultura ou para irrigação de parques e jardins, empregando-se, principalmente, o gotejamento.

Clima

Não se verifica efeito do vento no método de gotejamento e é mínimo na microaspersão, uma vez que os emissores são baixos e estão protegidos pelas plantas. A evaporação da água do solo depende do tipo de solo, da área molhada, da frequência da irrigação e da posição da área molhada em relação à incidência de luz. A evaporação costuma ser menor que nos métodos de aspersão e maior que em alguns métodos de superfície, como sulcos.

Eficiência

A indústria apregoa que os métodos de irrigação localizada são definitivamente os melhores em termos de uniformidade e eficiência de aplicação de água. Todavia, avaliações intensivas realizadas nos Estados Unidos têm demonstrado que altas uniformidades só são obtidas em sistemas cuidadosamente projetados, instalados e mantidos. Sistemas recém-instalados apresentam, geralmente, altos valores de uniformidade de distribuição (88% a 94%), enquanto sistemas mais antigos têm valores similares aos dos outros métodos (70% a 85%). As causas dessa baixa uniformidade são em razão da variação na vazão dos emissores decorrente de entupimento, variação de pressão dentro da área e escolha inadequada de emissores.

Quanto à eficiência de aplicação de água, em geral, os métodos de irrigação localizada apresentam valores maiores que os outros métodos, principalmente por permitirem o manejo mais acurado das irrigações, as quais podem ser realizadas a qualquer hora e por qualquer duração, além da limitação de vazão inerente ao sistema pressurizado.

Manejo da irrigação

O manejo da irrigação nos métodos de irrigação localizada é o mais simples e preciso de todos. Qualquer quantidade de água, requerida pela cultura, pode ser aplicada com boa uniformidade. Em geral, há uma relação direta entre a lâmina a ser aplicada e o número de horas de funcionamento do sistema. As perdas por percolação são, quase sempre, pequenas.

Alguns irrigantes esperam grandes economias de água com os métodos de irrigação localizada, o que não vem ocorrendo na prática. A eficiência de aplicação de água anual observada tem sido em torno de 80% a 85% e nunca os 90% esperados. Isso tem levado muitos agricultores a aplicarem menos água que o requerido pelas culturas.

Ao contrário do que se prega, a evaporação da água da superfície do solo em pomares pode variar de 4% a 20% com alguns métodos de irrigação localizada. Já com culturas em linha, irrigadas por fitas, essas perdas são muito pequenas após o estabelecimento das culturas. Menores ainda são essas perdas nos métodos de gotejamento subsuperficial.

Necessidade e qualidade da mão de obra

Enquanto, nos métodos de aspersão e superfície, os problemas surgidos não requerem muita habilidade para se resolverem, nos sistemas de irrigação localizada há necessidade de mão de obra mais especializada.

Teoricamente, os métodos de irrigação localizada deveriam necessitar da menor quantidade de mão de obra, principalmente quando totalmente automatizados. Todavia, na prática, isso não acontece. Como os sistemas são dimensionados para operar com elevada uniformidade de distribuição e eficiência de aplicação de água, qualquer erro na operação ou falha no sistema pode causar danos às culturas. Isso implica que deverá haver uma constante inspeção dos equipamentos para detectar falhas, especialmente nos sistemas mais antigos.

O conhecimento técnico sobre os sistemas de irrigação localizada deve ser elevado, tanto pelos agricultores como pelos operadores. Há necessidade, portanto, de constante treinamento e atualização das pessoas envolvidas, sobretu-

do quando se inicia a utilização desses métodos na fazenda.

Os sistemas de gotejamento enterrado são os que requerem mão de obra mais treinada, capaz de observar detalhes e detectar falhas que, muitas vezes, não estão visíveis. Mesmo os trabalhadores que não estão envolvidos diretamente com a irrigação devem ser treinados para evitar danos aos equipamentos na superfície, como em válvulas e nas laterais enterradas. Cuidados especiais devem ser tomados durante a colheita de certas culturas e durante tratos culturais, para evitar o colapso das laterais, principalmente quando estas são enterradas muito rasas.

Disponibilidade de assistência técnica

Um dos grandes desafios envolvidos na utilização dos métodos de irrigação localizada diz respeito à assistência técnica, principalmente nos países subdesenvolvidos. É crucial que haja, nas proximidades da fazenda, empresas capacitadas para dimensionar, vender e instalar esses sistemas. Como os sistemas de irrigação localizada são compostos por um grande número de componentes, muitos deles extremamente sensíveis, é fundamental que o projetista e o instalador sejam realmente capacitados.

Peças de reposição e pessoal treinado para identificar problemas e reparar os defeitos devem estar disponíveis a uma curta distância, pois, como foi mencionado anteriormente, a margem de segurança desses sistemas, em termos de armazenamento de água no solo, é muito pequena.

Fatores econômicos

Os métodos de irrigação localizada podem apresentar uma excelente relação custo-benefício em razão da economia com mão de obra, fertilização, água e melhoria na produtividade e qualidade dos produtos. Todavia, todos esses benefícios só são obtidos quando os sistemas são cuidadosamente projetados, instalados e mantidos.

Duas situações devem ser analisadas. A primeira consiste na conversão de métodos para irrigação localizada. Em muitos casos, a conversão não é viável economicamente em razão da perda dos investimentos já realizados com os métodos antigos. A segunda situação é quando se pretende instalar um sistema novo. Nesse caso, todos os cuidados já mencionados, com projeto, instalação e manutenção, devem ser tomados para se beneficiar das vantagens comparativas dos métodos de irrigação localizada. Há softwares específicos para dimensionamento otimizado e análise econômica de sistemas de irrigação.

O custo do investimento em sistemas de irrigação localizada varia muito com a localização da fazenda em relação aos fornecedores, com o tipo de cultura e com o grau de sofisticação do projeto. É mais barato implantar microaspersão em culturas de espaçamento mais largo que gotejamento. O inverso vale para culturas em linha, de espaçamento pequeno. Sistemas mais simples, com pouca automação, são mais baratos, embora requeiram mais mão de obra para operar e manter. Sistemas dotados de válvulas, filtros automáticos e dispositivos automáticos de quimigação são mais caros, mas requerem menos mão de obra para operar e menos cuidado para com a manutenção.

Um componente caro dos sistemas de irrigação localizada é o sistema de filtragem. Economizar no sistema de filtragem pode causar um problema sério de entupimento dos emissores. O rigor da filtragem depende da qualidade da água e do tipo de gotejador. Isso vale também para os dispositivos de quimigação. Com certos tipos de água, a injeção periódica de produtos químicos é crucial para evitar a formação de lodo nas tubulações, com consequente entupimento dos emissores. Esses custos devem ser considerados no estudo de viabilidade econômica.

Por permitir total automação, os métodos de irrigação localizada propiciam condições para economia com a conta de energia ao serem

operados em períodos fora dos horários de pico de consumo, sobre os quais incidem tarifas reduzidas. Como a eficiência anual de aplicação de água é, em geral, mais alta nos métodos de irrigação localizada e os sistemas operam com pressões baixas, há também uma economia em termos de consumo de energia. Há, todavia, que se fazer um balanço entre os custos com investimentos e os custos com operação do sistema. Economizar no investimento, tal como em bitola de tubos, pode implicar em gastos operacionais maiores com consumo e conta de energia.

Os gastos com mão de obra estão relacionados com a sofisticação do sistema. Sistemas dotados de mecanismos automáticos de filtragem, quimigação, limpeza das laterais e de controle de lâmina de irrigação requerem muito pouca mão de obra para operação. Se manutenções preventivas são realizadas, os gastos com inspeção, em geral, são mais reduzidos.

Há uma série de outros fatores que podem contribuir para aumentar os custos dos sistemas. Em algumas regiões, há necessidade do controle de roedores, pássaros, marimbondos e outros animais que apreciam, por alguma razão, os equipamentos, seja pela cor, pelo gosto ou pela temperatura.

Fatores humanos

Tal como foi mencionado para os métodos de superfície e também anteriormente, existem certos fatores humanos e sociais que devem ser levados em consideração quando da escolha da irrigação localizada. Todas as questões relacionadas aos incentivos, à geração de empregos e à produção local de equipamentos e alimentos devem ser consideradas à luz, principalmente, da disponibilidade de assistência técnica e custos.

Por serem sistemas com um grande número de componentes, sendo alguns deles sensíveis e complexos, os usuários e operadores devem ter um nível melhor de entendimento de todo o processo. A irrigação localizada é cara e funciona diferente dos demais métodos. A sua adoção de forma intempestiva ou por modismo pode levar a grandes prejuízos e frustrações.

A conversão de um sistema simples de operar, como os de superfície, para a irrigação localizada deve ser feita gradativamente. Recomenda-se a instalação de pequenas áreas piloto, onde todas as pessoas envolvidas possam sentir as diferenças e aprenderem as peculiaridades desse tipo de irrigação. Deve-se evitar, a todo custo, as pressões comerciais e as promessas milagrosas.

Fatores ambientais

Os aspectos ambientais também devem ser levados em consideração na escolha dos métodos de irrigação localizada. Se utilizada de forma incorreta, a irrigação localizada pode afetar a qualidade nas águas subterrâneas. A implantação do método de gotejamento em solos muito arenosos pode aumentar o risco de contaminação e até de salinização das águas subterrâneas. Esse problema pode ser agravado quando se faz quimigação, especialmente em regiões semiáridas e com o lençol freático elevado. Nesse caso, o uso da microaspersão ou da aspersão pode ser mais adequado. Deverá haver, também, um maior rigor no dimensionamento e no manejo das irrigações para evitar a percolação excessiva de água, com consequente lixiviação de agroquímicos.

Se a irrigação tem outro papel além de fornecer água às plantas, como umedecer o ambiente ou abaixar a temperatura do ar ou do dossel, devem-se considerar os métodos de aspersão ou microaspersão, uma vez que o gotejamento não se prestaria para tal finalidade.

Irrigação por aspersão

Nos métodos de irrigação por aspersão, a água é aplicada no ar através de dispositivos chamados aspersores ou de furos na tubulação e cai sobre a cultura na forma de chuva. As tubulações que contêm os aspersores, chamadas

laterais, podem permanecer fixas quando irrigam ou se movimentarem continuamente no sentido longitudinal ou radial (Figura 28). Nos sistemas com laterais portáteis, após o término da irrigação numa certa posição, essas são mudadas para outra posição e permanecem nessa nova posição irrigando pelo tempo necessário.

Os aspersores podem ser basicamente do tipo tubo ou mangueira perfurada, impacto, rotor e spray, com variações para se adaptarem a diferentes condições e equipamentos (Figura 29). Os aspersores de impacto giram em torno da posição onde estão montados, aplicando água em uma área com formato circular ou parcialmente circular (aspersores setoriais). O jato de água, ao sair por um bocal, atinge um braço fazendo-o se deslocar contra a ação de uma mola, que, por sua vez, atua no braço na direção oposta e faz com que o braço retorne e se choque com um suporte. Isso faz com que o aspersor se desloque circularmente em pequenos ângulos. O diâmetro do círculo molhado depende do diâmetro do bocal, da pressão na base do aspersor, do desenho do aspersor e do ângulo do bocal. O jato pode sofrer influência do vento; e, quanto maior a pressão, menor o tamanho das gotas, menor o alcance e maior o efeito do vento.

Normalmente, o aspersor aplica mais água próximo ao ponto onde está localizado do que na periferia do círculo. Por isso, para que a uniformidade de aplicação de água seja adequada, há necessidade de superpor os círculos molhados. Isso é obtido instalando-se os aspersores na lateral com espaçamento menor que o diâmetro molhado deles, geralmente com uma superposição de 60% a 80% do diâmetro.

Os aspersores são classificados, de acordo com a pressão de operação, em:

- Baixa Pressão: 35 kPa a 100 kPa, diâmetro molhado de 6 m a 15 m, taxa de aplicação



Figura 28. Irrigação por aspersão convencional móvel (A), ramal rolante (B), carretel irrigador (C) e pivô central (D).



Figura 29. Aspersor de pequeno porte (A), tipo canhão (B), rotor pop-up (C) e spray com *accelerator* (D).

de água usual de 10 mm h^{-1}, empregados em pomares.

- Pressão moderada: 100 kPa a 200 kPa, diâmetro molhado de 20 m a 25 m, taxa de aplicação de água usual de 5 mm h^{-1}, adaptado a todas as culturas anuais e hortaliças.
- Pressão intermediária: 200 kPa a 410 kPa, diâmetro molhado de 25 m a 35 m, taxa de aplicação de água usual de 6 mm h^{-1}, adaptado a maioria das culturas anuais e irrigação sobre copa de pomares.
- Alta pressão: 410 kPa a 690 kPa, diâmetro molhado de 35 m a 70 m, taxa de aplicação de água média de 12 mm h^{-1}, adaptado a culturas anuais e irrigação sobre copa de pomares.
- Aspersores gigantes ou canhões: 550 kPa a 825 kPa, diâmetro molhado de 60 m a 120 m, taxa de aplicação de água usual de 16 mm h^{-1}, adaptado a culturas de espaçamento muito pequeno, que cobrem totalmente o solo.

Aspersores do tipo spray não dispõem do braço que impacta o suporte e o faz girar. Ao sair por um orifício vertical, a água atinge uma placa que pode ser fixa, girar, ser lisa ou ranhurada. A água é aplicada quase que num plano horizontal e pode cobrir um círculo total ou parcial. Esse tipo de aspersor opera com pressões entre 70 kPa e 200 kPa e apresenta um alcance menor que os de impacto e, por isso, pode irrigar com uma taxa de aplicação instantânea elevada. Placas ranhuradas, móveis tipo *accelerator* (Figura 29) ou *wobbler* (Figura 30) propiciam a emissão de gotas maiores e maior raio de alcance, o que reduz um pouco a taxa de aplicação e minimiza potenciais problemas de escoamento superficial no final de laterais de pivôs centrais, instalados em solos com baixa taxa de infiltração de água. São muito empregados em pivôs centrais e sistemas lineares, por permitirem menor consumo de energia. Por operarem com uma pressão mais baixa, os sprays sofrem mais o efeito das variações de pressão oriundas

Foto: United States Department of Agriculture (Usda), Natural Resource Conservation Service (NRCS), Montana



Figura 30. Pivô central equipado com emissor tipo *wobbler*.

das inclinações do terreno e perda de carga nas laterais e, por isso, quase sempre, requerem a utilização de reguladores de pressão.

Aspersores do tipo rotor (Figura 29) dispõem de um mecanismo de turbina e engrenagens que o faz girar lenta e continuamente, sem impacto. Pode operar com círculo total ou parcial. Uma variedade de tipos e ângulos de bocal favorecem um maior raio de alcance e uma melhor uniformidade na distribuição de água, quando comparado com os sprays e de impacto. Têm sido muito empregados em jardins e gramados. Requerem algum tipo de filtragem da água, pois impurezas, como folhas e lodo, podem afetar o funcionamento das engrenagens.

Tubos perfurados estão em desuso, se limitando a pequenos sistemas empregados em jardins. Mangueiras com perfurações a laser têm sido usadas pela facilidade de instalação e remoção da área e pelo custo inferior aos tubos.

A seguir, serão descritos os principais métodos de irrigação por aspersão.

Aspersão convencional

É um grupo de métodos de irrigação por aspersão, composto por uma estação de bombeamento, uma adutora, uma ou mais redes principais e uma ou mais laterais nas quais são instalados aspersores. As laterais permanecem paradas enquanto irrigam. Esse grupo pode ser ainda subdividido em sistemas de cobertura parcial e de cobertura total, os quais podem ser fixos, semifixo ou portáteis.

Nos sistemas de cobertura parcial, as redes principais e/ou laterais, dotadas de engate rápido, são transferidas de uma posição a outra até toda a área ser irrigada. Nos sistemas de cobertura total, toda a área é servida por redes, e não há necessidade de mudança de tubulações. Nos sistemas fixos, todas as redes, inclusive as laterais, são permanentemente instaladas na área. As tubulações podem ser de engate rápido e serem instaladas na superfície ou podem ser de PVC e serem enterradas, aparecendo na superfície do solo as válvulas ou os tubos de subida dos aspersores. Nos sistemas semifixos, as adutoras e linhas principais são fixas, podendo ser enterradas ou não. As laterais, com engate rápido, conectam-se a hidrantes e são mudadas de posição ao término do tempo de irrigação. Nos sistemas portáteis, toda a rede de tubulações é dotada de engate rápido para facilitar a montagem e desmontagem das redes para mudança de local. Até mesmo a estação de bombeamento pode ser móvel, montada em carretinha. Enquanto o custo do investimento aumenta dos sistemas de cobertura parcial portátil para os sistemas de cobertura total fixos, a necessidade de mão de obra caminha na direção oposta.

O método mais simples de aspersão convencional é o sistema de cobertura parcial, totalmente portátil (Figura 31). Requer mão de obra para mudar tanto as laterais quanto a rede principal e, por isso, é recomendado para áreas pequenas e com disponibilidade de mão de obra familiar. É um sistema empregado em culturas nômades, como a batata e o tomate. Quando se empregam aspersores de maior alcance, esse método pode ser empregado para irrigar áreas maiores, principalmente aquelas com cultura de menor valor comercial, que não exigem grande uniformidade de distribuição de água e que cobrem totalmente o solo, como pastagem.

Uma variação do método anterior é obtida, quando se mantêm tanto a estação de bom-



Foto: G. Bizzarri (FAO)

Foto: Jeff Vanuga (United States Department of Agriculture - Usda, Natural Resource Conservation Service - NRCS)

Figura 31. Aspersão convencional com laterais móveis, em cobertura parcial (A) e total (B).

beamento quanto as redes principais fixas. Para facilitar o tráfego de máquinas na área, as redes principais, geralmente de PVC, costumam ser enterradas, aparecendo na superfície do solo apenas os hidrantes, onde se conectam as laterais que permanecem paradas quando irrigam (Figura 32).

As laterais, dotadas de engate rápido, são desmontadas e transferidas para outra posição manualmente, o que demanda mão de obra. Todavia, esse método pode ser empregado com as mais diversas condições de topografia e tipos de culturas.

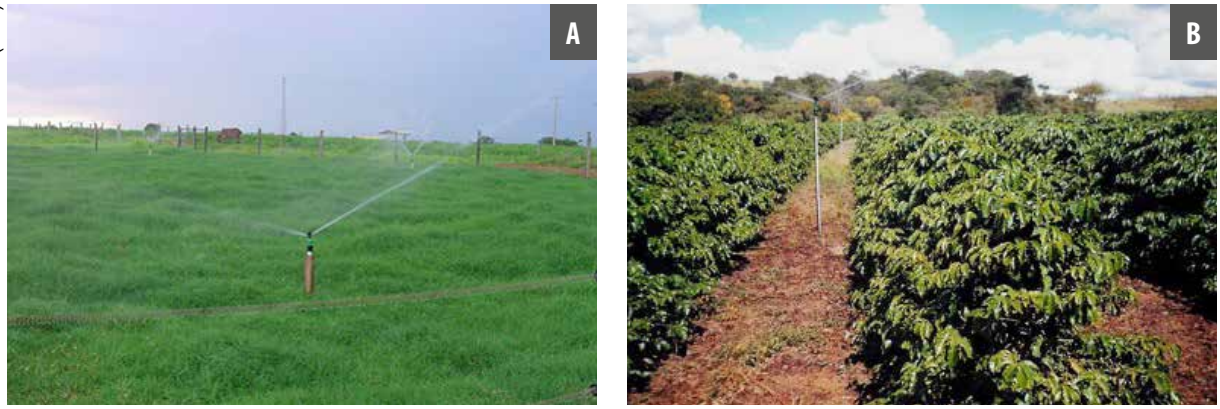


Foto: G. Bizzarri (FAO)

Figura 32. Hidrante onde se conectam as laterais móveis dos sistemas de aspersão convencional.

Um método que vem sendo empregado em pastagens e café no Brasil é do tipo aspersão convencional semifixa, com cobertura parcial, denominado de malha. Toda a rede de adutoras, linhas principais e laterais são de PVC enterradas, movendo-se apenas os aspersores. As laterais têm diâmetro menor que o usual, pois apenas um aspersor, de baixa vazão, opera em cada uma e, geralmente, são interconectadas, duas a duas, nas suas extremidades. Os tubos de subida dos aspersores permanecem no local, tutorados por um mourão, e recebem um tampão quando não há aspersor conectado. O sistema é, geralmente, dimensionado para operar com um aspersor em cada lateral, que permanece irrigando por 12 horas. É um sistema que requer pouca mão de obra para operação. Apenas uma pessoa muda os aspersores de posição duas vezes por dia, geralmente no intervalo de outras atividades (Figura 33).

Sistemas de cobertura total, fixos, semifixos ou portáteis são empregados em culturas de alto valor comercial e que respondem bem a irrigações leves e frequentes, como algumas fruteiras e hortaliças. Quando adequadamente dimensionados, esse método pode ser utilizado para proteger as culturas contra geada (Figura 25). Os sistemas de cobertura total



Fotos: Luiz César Drumond (UFV)

Figura 33. Sistema de aspersão em malha aplicado em pastagem (A) e em café (B).

portáteis são empregados em hortaliças e são instalados após o plantio e removidos no final do ciclo, para facilitar o preparo do solo para a próxima cultura ou para mudar para outra área. Os sistemas de cobertura total semifixos ou fixos são empregados para irrigar fruteiras, embora os fixos possam também ser utilizados em hortaliças e jardins, uma vez que as redes de tubulações são enterradas e não atrapalham o preparo do solo, plantio e tratos culturais. Sistemas de cobertura total fixos podem ser totalmente automatizados, o que reduz ainda mais a necessidade de mão de obra para operação. Em pomares, os aspersores são cuidadosamente selecionados para evitar o molhamento da folhagem e do tronco de culturas sensíveis ou para proteger contra geada. Um grande número de arranjos das laterais e dos aspersores pode ser empregado para baratear os custos de investimento, sem comprometer a eficiência da irrigação. Laterais podem ser instaladas entre fileiras alternadas de plantas e um único aspersor, geralmente do tipo subcopa, pode irrigar quatro plantas de espaçamento maior, como a cultura da mangueira (Figura 34).

Ramal rolante ou rolão

Este é uma variação do método de aspersão convencional. As laterais de irrigação são compostas por tubos dotados de uma roda de metal no centro e engates rápidos especiais que suportam a torção. A tubulação da lateral funciona como eixos e permite o deslocamento de toda a lateral para uma nova posição. Uma mangueira ou tubo é empregado para conectar a lateral aos hidrantes da linha principal que, geralmente, é enterrada no centro da área. Um pequeno motor à gasolina, montado sobre quatro rodas, é posicionado no centro da



Foto: Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

Foto: Luiz Antonio Lima (Ufla)

Figura 34. Sistema de aspersão convencional móvel em pomar de mangueira (A) e sistema de aspersão fixo em parreira (B).

lateral. Durante a irrigação, as laterais permanecem paradas. Para mudar a lateral de posição, a conexão com a linha principal é desligada, e o motor à gasolina é acionado fazendo a lateral rolar até a nova posição, onde é novamente conectada com a linha principal. Cada tubo da lateral é dotado de uma roda e de um aspersor escamoteável que permanece de cabeça para cima, independentemente da posição do tubo. O diâmetro das rodas é geralmente de 1 m, o que restringe a utilização desse método em culturas de porte baixo como pastagem, feijão, arroz, trigo, cevada, alfafa, etc. Tal como no método de aspersão convencional em malha, descrito anteriormente, os sistemas desse tipo são dimensionados para operar geralmente por 12 horas em uma posição, de forma a conciliar a troca de posições com as outras atividades da fazenda. É um sistema recomendado para áreas retangulares, relativamente planas e sem obstrução (Figura 35).

Autopropelido

É composto por um único canhão ou minicanhão montado em uma carretinha que se desloca longitudinalmente ao longo da área a ser irrigada. O suprimento de água ao canhão é feito através de uma mangueira flexível, conectada a um hidrante da linha principal que, geralmente, é enterrada. A carretinha se move tracionada por um cabo de aço ou pela própria mangueira de alimentação do canhão. Antes de chegar ao tubo de subida do canhão, a água passa por uma turbina e aciona o carretel que enrola a mangueira ou o cabo de aço. Ao se deslocar, a carretinha pode danificar uma faixa da cultura. Ao final do percurso, o sistema é desligado, a mangueira desconectada do hidrante, e a carretinha é rebocada, por um trator, para a próxima posição, que pode variar de 30 m a 72 m ao longo da linha principal. O carretel é desenrolado, e a carretinha posicionada no início da área (Figura 36).

O canhão, geralmente setorial, opera com pressão elevada e irriga com uma alta taxa de aplicação de água, o que pode propiciar escoamento superficial em áreas com solos de baixa capacidade de infiltração e declividade elevada. O jato do canhão, mesmo produzindo gotas grandes, sofre a ação do vento, o que prejudica a uniformidade da irrigação. Gotas grandes podem causar problemas a algumas culturas, como queda de flores em feijão.

Por operar com pressões elevadas e por apresentar altas perdas de carga na mangueira, esse método consome muita energia. Todavia, o uso de mão de obra é reduzido, quando comparado com outros sistemas de aspersão convencional.

É um método adequado para áreas retangulares de até 70 ha, com declividade de até 20%, com solos de alta velocidade de infiltração de



Foto: Camilo de Lelis Teixeira de Andrade



Foto: United States Department of Agriculture (Usda), Natural Resource Conservation Service (NRCS)

Figura 35. Ramal rolante (rolão) irrigando trigo (A) e detalhe do aspersor escamoteável (B).



Fotos: Carlos Timermann Júnior (Irrigabrasil)

Figura 36. Sistema de irrigação autopropelido indicando o carretel enrolador A), barra irrigadora (B) e faixa irrigada (C).

água, cultivado com culturas de boa cobertura, como cana-de-açúcar, milho e pastagem, principalmente para aplicar irrigação suplementar.

Pivô central

Uma única lateral gira em torno do centro de um círculo onde ela é ancorada. Segmentos da lateral de 30 m a 50 m, composta por tubos metálicos, são sustentados por torres em formato de A e conectados entre si por juntas flexíveis. Um pequeno motor elétrico, colocado em cada torre, permite o acionamento do pivô. A velocidade de deslocamento da lateral do pivô é ditada pela velocidade da última torre. Quanto mais afastado do ponto pivô, mais rápido a torre se desloca. Um sistema de microinterruptores, posicionado em cada torre, controla a operação do motor da torre que está imediatamente mais próxima em direção ao ponto pivô (Figura 37).

A água é suprida à lateral por meio do ponto pivô, sendo obtida de poço profundo perfurado próximo ao centro ou de uma adutora enterrada. A velocidade de deslocamento do pivô varia de 12 a 120 horas por volta para uma lateral típica de 400 m de comprimento. A lâmina de irrigação aplicada varia com a velocidade de rotação. Para uma mesma vazão da bomba, a taxa de aplicação de água aumenta do ponto pivô para a última torre. Se o sistema não for dimensionado e operado corretamente, poderão ocorrer problemas de escoamento superficial e erosão no final da lateral, que ainda pode ser agravado se a área for declivosa.

Pivôs centrais se adaptam aos mais diversos tipos de culturas anuais, olerícolas e algumas perenes de porte baixo, como café, videira e fruteiras mantidas baixas (Figura 38). De uma forma geral, os pivôs operam melhor em áreas planas sem obstrução, mas podem tolerar alguma declividade. Alguns autores afirmam que, para vãos entre torres de até 30 m, declividades de até 30% na direção radial podem ser toleradas, enquanto outros indicam que essa declividade máxima só pode ser admitida na direção tangencial (ao longo dos círculos).

Pivôs têm custo inicial médio, mas o requerimento de mão de obra para operação é mínimo. Quanto mais longa a lateral, menor é o custo do sistema por unidade de área. Isso tem levado ao dimensionamento de pivôs exageradamente longos, que apresentam problemas de alinhamento e, principalmente, de elevada taxa de aplicação

Aspersão por pivô central



Foto: Barbosa de Menezes

Foto: Tequask

Foto: United States Department of Agriculture (Usda), Natural Resource Conservation Service (NRCS)

Foto: United States Department of Agriculture (Usda), Natural Resource Conservation Service (NRCS)

Figura 37. Lateral de um pivô central indicando a estrutura de sustentação em formato de "A" (A), base do pivô (B), motor com motorredutor de acionamento das rodas (C) e caixa com micro interruptor (D).



Foto: Luis Cesar Drumond (UFV)

Figura 38. Pivô central dotado de *low elevation spray application* (Lesa) em café cultivado em topografia ondulada.

de água no final da lateral. É um equipamento que requer manutenção periódica, mas fácil de operar.

Um grande número de aparatos vem sendo desenvolvido para reduzir as limitações dos pivôs. Dispositivos especiais permitem aos pivôs cruzarem cercas em áreas de pastagens irrigadas e também escamotear as rodas para que possam ser rebocados para outras áreas (Figura 39).

Os pivôs centrais podem ser equipados com os mais variados tipos de aspersores para atender a diversas condições de solo, vento e culturas. Há uma tendência, todavia, de se empregarem aspersores do tipo spray, de baixa pressão, dotados de reguladores de pressão.

Foto: Bruno Leite Teixeira Perroni



Foto: Bruno Leite Teixeira Perroni

Figura 39. Pivôs centrais rebocáveis, indicando base dotada de quatro rodas (A) e de duas rodas (B) para mudança de área.

Sistema linear ou deslocamento linear

É uma variação do pivô central, no qual são empregadas as mesmas estruturas de sustentação com torres em A e os mesmos mecanismos de deslocamento. A lateral desloca-se no sentido longitudinal de uma área retangular. Todas as torres deslocam-se com a mesma velocidade. O suprimento de água é feito através de canal ou adutora com hidrantes posicionados no centro ou na extremidade da área. A água é succionada diretamente do canal por um sistema de bombeamento que se desloca com a lateral. Utiliza-se também mangueira flexível, que é conectada a hidrantes da adutora, para alimentar a lateral. Em alguns sistemas, dispositivos especiais desconectam e conectam a mangueira aos hidrantes sem necessidade de desligamento do sistema (Figura 40).

No sistema linear, não há perda de área nos cantos, e não há problema de altas taxas de aplicação de água no final da lateral, como nos pivôs centrais. A uniformidade de distribuição de água é também melhor. Como nos pivôs, um grande número de tipos de aspersores pode ser empregado para atender a necessidades especiais da área, do solo, do vento e das culturas.

Lepa e Lesa

Low energy precision application (Lepa) é um dispositivo no qual os aspersores, que operam com pressão muito baixa, e dotados de reguladores de pressão, são colocados na extremidade dos tubos de descida dos pivôs centrais e sistemas lineares e despejam a água diretamente na superfície do solo. Quando se utilizam emissores com taxas de aplicação de água elevadas em solos com baixa capacidade de infiltração, há necessidade da construção de sulcos com camalhões, regularmente espaçados, para reter a água. Sistemas Lepa mais recentes substituíram os emissores por linhas de gotejadores de baixa pressão. A vantagem desse dispositivo é que, em algumas situações, se molha pouco ou não se molha a folhagem das culturas plantadas em linha, e reduz-se a evaporação direta da água do jato dos aspersores convencionais, que pode ser significativa em locais de umidade relativa baixa e ventos intensos (Figura 41).

No dispositivo tipo *Low elevation spray application* (Lesa), os aspersores tipo spray são colocados nos tubos de descida para aplicar a água diretamente sobre o dossel das culturas. Para solos com baixa taxa de infiltração, há necessidade de sulcos fechados para melhorar a uni-



Foto: Tsogni

Figura 40. Sistema linear em lavoura de milho, indicando a mangueira de alimentação.



Foto: Kansas State University

Figura 41. Pivô central tipo Lepa sendo testado em lavoura com detalhe das mangueiras com gotejadores.

formidade de distribuição de água e reduzir os problemas com escoamento superficial. É um dispositivo muito empregado nos Estados Unidos para irrigar batata e cebola. Não funciona bem com culturas mais altas nas quais os sprays podem se enroscar ou afetar a uniformidade de distribuição de água (Figura 42).

O uso desses dois dispositivos é promissor, pois requer menor consumo de energia, reduz o efeito do vento nos jatos e a evaporação direta da água. Necessita, todavia, de muito mais planejamento para implantar o sistema de irrigação e a lavoura. Aplica-se melhor em áreas planas e solos com maior capacidade de infiltração de água. O dispositivo Lesa pode ser empregado em culturas perenes de porte menor, como café e citros, plantadas em círculo.

Vantagens da irrigação por aspersão

- O manejo da irrigação é simples, uma vez que a taxa de aplicação de água é fixa, definida no dimensionamento do sistema de irrigação, e não há efeito da variação temporal das propriedades do solo, tão expressivo como nos métodos de superfícies.
- Não há necessidade de sistematização do terreno.



Foto: Luiz Antônio Lima (Ufla)



Foto: Wenderson Santos (Fockink)

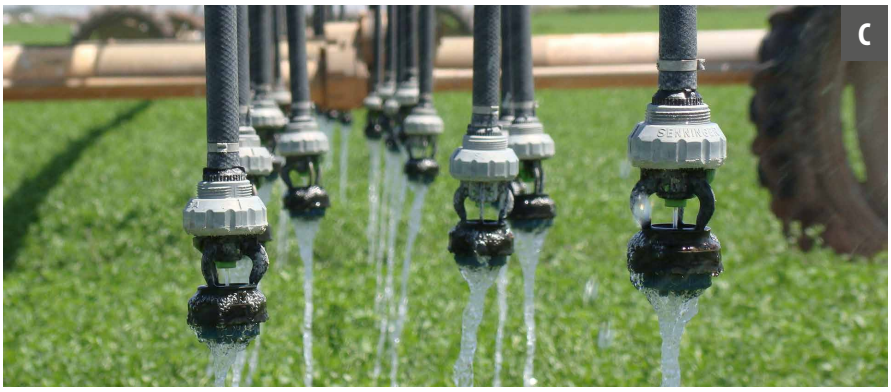


Foto: United States Department of Agriculture (Usda)

Figura 42. Pivôs centrais dotados de dispositivos tipo Lesa na cultura do café (A e B) e detalhe do emissor (C).

- Para alguns sistemas, como pivô central, a necessidade de mão de obra é mínima.
- Adapta-se às mais diversas condições de topografia, tipos de solo e de culturas.

Limitações da irrigação por aspersão

- Normalmente, métodos de aspersão necessitam de mais energia que os métodos de superfície e irrigação localizada.
- Pode requerer, dependendo da situação, algum tipo de filtragem mínima da água, o que não ocorre com os métodos de superfície.
- Alguns métodos de aspersão, como os convencionais portáteis, requerem mão de obra para mudança de laterais, que é um tipo de trabalho considerado pesado.
- Pode haver perda de área como nos pivôs centrais (cerca de 20% de área perdida nos cantos).
- Os métodos de aspersão, que aplicam água na folhagem, podem causar problemas de doenças e de toxicidade em algumas culturas, quando a água apresentar alto teor de sal ou de fertilizantes (fertirrigação).

Fatores influenciadores na escolha dos métodos de aspersão

Nos tópicos seguintes, serão analisados os fatores que afetam a escolha dos métodos de aspersão.

Culturas

Praticamente, qualquer cultura pode ser irrigada por algum método de aspersão. Algumas culturas de porte alto, como milho e cana-de-açúcar, não podem ser irrigadas com ramal rolante ou rolão. Da mesma forma, muitas culturas perenes não podem ser irrigadas com pivô central ou sistema linear em razão da limitação de altura dos equipamentos. Para outras

culturas, como tomate para mesa e pimentão, os métodos de aspersão não seriam muito recomendados, pois podem favorecer o desenvolvimento de doenças. Culturas com sistema radicular raso, plantadas em solos arenosos, demandam irrigações leves e frequentes e devem ser irrigadas por aspersão ou microaspersão. Cultivos que requerem proteção contra extremos de temperatura, como geadas e calor, devem ser irrigados por sistemas de aspersão com cobertura total fixos ou portáteis.

Uma regra geral é que os sistemas de aspersão devem ser empregados em culturas que cobrem a maior parte da superfície do solo, durante boa parte do ciclo fenológico.

Solos

A maior limitação dos solos para os métodos de irrigação por aspersão está relacionada com a velocidade básica de infiltração da água.

Solos com menos de 3 mm h^{-1} de velocidade de infiltração básica não são facilmente irrigáveis com aspersão, a menos que se usem dispositivos como o Lepa e que se construam sulcos de retenção na superfície do solo. Podem ser empregadas algumas técnicas como a cobertura do solo com palhada, cultivo em nível, construção de terraços e o plantio direto para melhorar a infiltração da água e permitir o uso da aspersão. Cuidados devem ser tomados quando há a combinação de baixa velocidade de infiltração da água no solo com alta declividade do terreno. Mesmo os solos rasos, tomando-se os devidos cuidados, podem ser irrigados por aspersão.

Em razão da não uniformidade, inerente aos métodos de aspersão, tem-se, como regra geral, verificar se o solo apresenta uma velocidade básica de infiltração de pelo menos 1,3 vezes a taxa média de aplicação de água prevista pelo sistema.

Topografia e condições da área

Os métodos de aspersão podem ser adaptados às mais diversas condições de topografia, formas de área e obstruções, embora uma regra geral indique como limite uma declividade de 30%. Mesmo em áreas com restrições à mecanização, é possível implantar sistemas de aspersão, tomando-se as precauções quanto à conservação do solo e a um maior rigor no dimensionamento. Existe no mercado uma variedade grande de válvulas reguladoras de vazão e de pressão que possibilitam esse tipo de projeto, às vezes comuns em parques e jardins.

Entre os sistemas móveis, somente o pivô central se adapta às condições de topografia ondulada e declividades acentuadas.

Suprimento e qualidade da água

Para que os sistemas de irrigação por aspersão sejam dimensionados com menor custo e uso eficiente de energia, eles necessitam de uma fonte de água com vazão constante e com o fornecimento por demanda. Os perímetros de irrigação mais antigos, projetados para o fornecimento de água num esquema de rotação e com o tempo para uso da água fixo, são difíceis de serem convertidos de métodos de superfície para aspersão de alta frequência, como os pivôs. Reservatórios podem ser construídos nos lotes, e o projeto do sistema pode ser ajustado para operar em menor tempo, mas isso aumenta os custos.

Aspersão é mais eficiente para lixiviar sais que os métodos de superfície, pois a uniformidade de distribuição de água é maior e ocorre fluxo de água no solo não saturado, o que é vantajoso para locais com lençol freático elevado e mais efetivo na lixiviação que o fluxo em meio saturado.

Algumas culturas são sensíveis à aplicação de água salina nas folhas. Em regiões semiáridas, esse problema pode ser minimizado se as irrigações forem realizadas à noite. Isso é facilitado com os métodos de irrigação por aspersão convencional de cobertura total ou os mecanizados, como pivô central e sistema linear. Ramais rolantes e outros métodos convencionais tam-

bém podem ser dimensionados para operarem somente à noite, deixando para o período diurno a mudança das laterais.

Alguns aspersores, com bocais de pequeno diâmetro e rotores, são sensíveis a impurezas, fazendo-se necessário a filtragem da água. Águas com alta concentração de sedimentos também são problemáticas, pois corroem lentamente os bocais. Nesse caso, devem ser previstos tanques de sedimentação.

A altura de bombeamento deve ser levada em consideração na escolha do método de irrigação. Quanto maior a altura, maior será o custo da água, mais eficiente deverá ser o sistema e maior retorno econômico deve ser esperado.

Finalmente, águas contaminadas com produtos nocivos à saúde humana não devem ser empregadas com métodos de aspersão, sobretudo se os produtos agrícolas forem consumidos in natura, mas poderiam ser utilizadas com outros métodos. Tem sido comum, todavia, o emprego da aspersão com canhão ou pivô central para aplicar dejetos de animais, devidamente estabilizados biologicamente, em culturas anuais e pastagens.

Clima

Os fatores relacionados ao clima mais importantes são o vento e a umidade relativa. Em regiões com velocidade do vento elevada, a uniformidade de distribuição da água fica muito prejudicada, sobretudo com aspersores de grande porte, que operam com pressões altas. A evaporação da água, diretamente do jato, pode chegar a 10% em regiões semiáridas, sem considerar a evaporação da água da superfície do solo e do dossel que pode contribuir com outros 10%. Dispositivos do tipo Lepa ou Lesa, empregados em pivôs e sistemas lineares, podem minimizar consideravelmente esse problema.

O controle de temperatura (geada ou calor) empregando a irrigação por aspersão só é possível quando o sistema é dimensionado para cobertura total, fixo ou portátil, de forma que toda a área possa ser irrigada simultaneamente. O custo desse tipo de sistema é, geralmente, muito elevado.

Eficiência

A eficiência de aplicação de água dos métodos de irrigação por aspersão depende da adequação do projeto, da uniformidade de distribuição, da programação da irrigação e do rigor na operação do sistema. A programação da irrigação e a operação dos métodos de aspersão são muito simples, quando comparadas com os métodos de superfície, sendo que os mais simples são o pivô central, o sistema linear e o convencional com cobertura total.

Os sistemas de irrigação por aspersão, se corretamente dimensionados e operados, não causam problemas de escoamento superficial ou erosão. Todavia, é comum, no Brasil, pivôs centrais com laterais excessivamente longas para certos tipos de solo e topografia, fazendo com que esse problema se pronuncie.

Os menores valores de uniformidade de distribuição, de 60%, são esperados com autopropelidos e sistemas convencionais, que dependem de superposição em duas dimensões, tais como os convencionais de cobertura total, fixa ou de cobertura parcial, porém que não alternam a posição das laterais. Nesse caso, a origem da não uniformidade está na variação de vazão dos aspersores, decorrente da variação da pressão na lateral, entupimento e desgaste dos bocais e da própria desuniformidade da superposição dos jatos.

O uso de posições alternadas das laterais, comum quando se emprega ramal rolante ou mesmo métodos convencionais de cobertura parcial, permite uma melhoria considerável da uniformidade de distribuição de água, pelo menos em uma das direções.

As melhores uniformidades de distribuição (até 93%) são obtidas com aspersão subcopa de cobertura total fixa em pomar, onde o dimensionamento foi rigoroso, o sistema tem filtros para

a água, e um aspersor é colocado para uma ou duas covas. Dessa forma, não há efeito de superposição de jatos, e a variação de vazão entre emissores é controlada no dimensionamento.

Valores intermediários de uniformidade de distribuição são obtidos com pivôs centrais e sistemas lineares. O problema da não uniformidade, oriunda da superposição dos jatos, só ocorre ao longo da lateral (entre aspersores) e não no sentido do movimento. Com o correto dimensionamento e o uso de reguladores de pressão, a uniformidade de distribuição desses métodos pode atingir 90%.

Manejo da irrigação

A programação da irrigação deve ser levada em consideração quando da escolha dos métodos de aspersão. Para os sistemas convencionais e lateral rolante, é desejável que a duração da irrigação seja de 12 ou 24 horas (descontado o tempo necessário para mudar as laterais de posição) para liberar a mão de obra para outros serviços na propriedade. No Brasil, como os solos têm características de retenção de água muito menores que os solos dos Estados Unidos e da Europa, os tempos de irrigação são muito menores, o que implica em maior uso de mão de obra. Exceção é o método de irrigação em malha, empregado em pastagem e café, que é projetado para operar com aspersores com taxa de aplicação muito pequena. Se isso não é desejável, deve-se optar por outros métodos.

Nos pivôs centrais e sistemas lineares, a vazão de aplicação de água é fixa, podendo-se variar a velocidade de deslocamento, o que implica na variação da taxa de precipitação (em mm h^{-1}) para diferentes velocidades de deslocamento. São sistemas muito mais flexíveis para serem manejados e requerem pouca mão de obra para operação.

Pastagens irrigadas necessitam de área livre e da superfície do solo seca, preferencialmente, durante o dia. Além do mais, o turno de irrigação deve ser ajustado de acordo com o tempo de permanência dos animais no piquete. Culturas que demandam trabalhos na área (como pulverizações, tratos culturais, desbaste, etc.) praticamente contínuos durante o dia, como algumas hortaliças e fruteiras, devem ter a irrigação muito bem planejada e manejada para evitar conflito entre operações.

Necessidade e qualidade da mão de obra

A necessidade de mão de obra dos métodos de irrigação por aspersão depende do grau de automação dos sistemas. Aspersão convencional de cobertura parcial portátil requer mais mão de obra que pivô central ou sistema linear, embora a qualificação técnica da mão de obra deste último deva ser mais elevada, sobretudo quando se utiliza Lepa. Os sistemas de cobertura total fixos são os que demandam menos mão de obra.

Disponibilidade de assistência técnica

Quanto mais automatizados forem os métodos de irrigação, maior será a necessidade de assistência técnica, sobretudo no que diz respeito às partes elétricas e mecânicas. Nesse aspecto, os pivôs, os sistemas lineares e os convencionais de cobertura total fixos, com controles automáticos, são os métodos que mais demandariam assistência de boa qualidade.

Os demais métodos requerem manutenção mais simples, que pode ser providenciada na própria fazenda, por meio do treinamento de pessoal.

Fatores econômicos

O custo do investimento, por unidade de área, varia muito entre os métodos de irrigação por aspersão, e o mais barato é o convencional com cobertura parcial móvel, e o mais caro, o convencional com cobertura total fixo.

Nos métodos convencionais e pivôs com Lepa (0,9 kWh ha^{-1} mm^{-1} a 2,1 kWh ha^{-1} mm^{-1}), o consumo de energia é menor, e muito elevado nos métodos autopropelidos (3,5 kWh ha^{-1} mm^{-1} a

4,9 kWh ha^{-1} mm^{-1}), por operarem com pressões muito altas.

Os custos com mão de obra estão estreitamente relacionados com a sua necessidade, sendo maiores nos convencionais de cobertura parcial, portáteis.

Os custos com manutenção são tão maiores quanto mais automatizados ou mecanizados forem os métodos, sendo os sistemas lineares, pivôs, autopropelidos e ramal rolante os mais caros.

Alguns métodos, como os pivôs ou sistemas lineares com Lepa, quando instalados em solos com baixa velocidade de infiltração, requerem operações especiais para construção de sulcos com bloqueios para evitar escorrimento superficial. Esses custos devem ser computados.

Todos esses fatores econômicos devem ser levados em consideração na seleção do método. Após a eliminação de alguns métodos por fatores técnicos, o retorno econômico passa a ser o principal determinante na escolha.

Fatores humanos

O método de aspersão convencional do tipo cobertura parcial portátil é considerado o mais simples de se manter. O tipo de manutenção requerida pode ser perfeitamente realizado na propriedade, por pessoal local ou por empresas especializadas. De Norte a Sul do Brasil, há pequenas empresas e profissionais especializados, capazes de dar manutenção em bombas, motores e painéis elétricos.

Esse método é, portanto, o ideal para se iniciar a atividade da irrigação ou como passo intermediário para a conversão de métodos de superfície para outros que propiciam o uso mais racional da água. A programação e o manejo da irrigação são muito mais simples, quando comparados com os métodos de superfície, favorecendo a introdução da irrigação em comunidades com pouco conhecimento da área. Vale lembrar ainda que, quando há interesse na geração de emprego, sobretudo no âmbito da agricultura familiar, o método de aspersão convencional do tipo cobertura parcial pode ser um dos mais adequados. Entretanto, se o custo da mão de obra é elevado ou se há escassez, deve-se optar por outros métodos mais automatizados ou mecanizados.

Alguns métodos, como pivô central e sistema linear, não são adequados para perímetros e assentamentos com lotes pequenos. Tentativas de se dividir o pivô em várias fatias para colonos não têm sido bem-sucedidas, pois essa divisão reduz a flexibilidade de escolha de culturas e manejo da irrigação. Em contrapartida, esses métodos são os preferidos para aqueles empresários agrícolas que cultivam grandes áreas, empregando alta tecnologia de produção.

Não se pode esquecer também do hábito das pessoas. Não é comum em muitas regiões no Brasil, na área de irrigação, o trabalho noturno e aos domingos, principalmente a mudança de laterais. Se esse tipo de trabalho tiver que ser executado, haverá um custo adicional com o pagamento de horas extras, quando a mão de obra familiar não for disponível ou suficiente.

Fatores ambientais

Assim como todos os outros métodos, se não for utilizado corretamente, poderão ocorrer problemas ambientais. Alguns desses problemas já foram discutidos anteriormente.

Pivôs centrais com laterais muito longas, instalados em solos com baixa velocidade de infiltração de água e topografia muito inclinada, podem causar problemas de excessivo escoamento superficial e até erosão (Figura 43). Escoamento superficial em áreas agrícolas pode conter agroquímicos dissolvidos na água ou adsorvidos nas partículas de solo, com elevado potencial poluidor.

O manejo inadequado das irrigações, como aplicação de água em excesso, quando associado com fertilizações nitrogenadas pesadas,

Foto: Pedro Ramirez Júnior (USFWS)



Figura 43. Escoamento superficial e erosão em área irrigada.

principalmente se realizadas via água (fertirrigação), pode levar à lixiviação de nitrato e contaminar as águas subterrâneas. O mesmo vale para outros agroquímicos empregados no controle de plantas daninhas, insetos e doenças.

No período das chuvas, as irrigações complementares devem ser planejadas de tal forma a deixar um espaço na capacidade de retenção de água do solo para, assim, tentar reter parte das chuvas e minimizar a lixiviação de agroquímicos.

Os cuidados devem ser maiores nos locais com solos arenosos, com lençol freático raso e com topografia declivosa.

Métodos como o pivô central, sistema linear e aspersão convencional com cobertura total, quando cuidadosamente projetados, são mais fáceis de se manejar corretamente para reduzir os problemas com escoamento superficial e lixiviação de agroquímicos.

Subirrigação – Irrigação subterrânea

É um método no qual se controla a profundidade do lençol freático de forma a fornecer água à cultura por capilaridade. Em algumas situações, a água de um lago próximo é aplicada em fossos que alimentam os drenos subterrâneos (Figura 44). Para que funcione a contento, a subirrigação requer condições de topografia, solo e clima muito especiais. Está, geralmente, associada a um sistema de drenagem subterrânea, necessário para remover o excesso de umidade do solo na zona das raízes em regiões úmidas. Havendo condições satisfatórias, pode-se constituir num método de custo de implantação e operação relativamente baixo. No Brasil, esse método tem sido empregado com sucesso no projeto do Rio Formoso, estado do Tocantins.

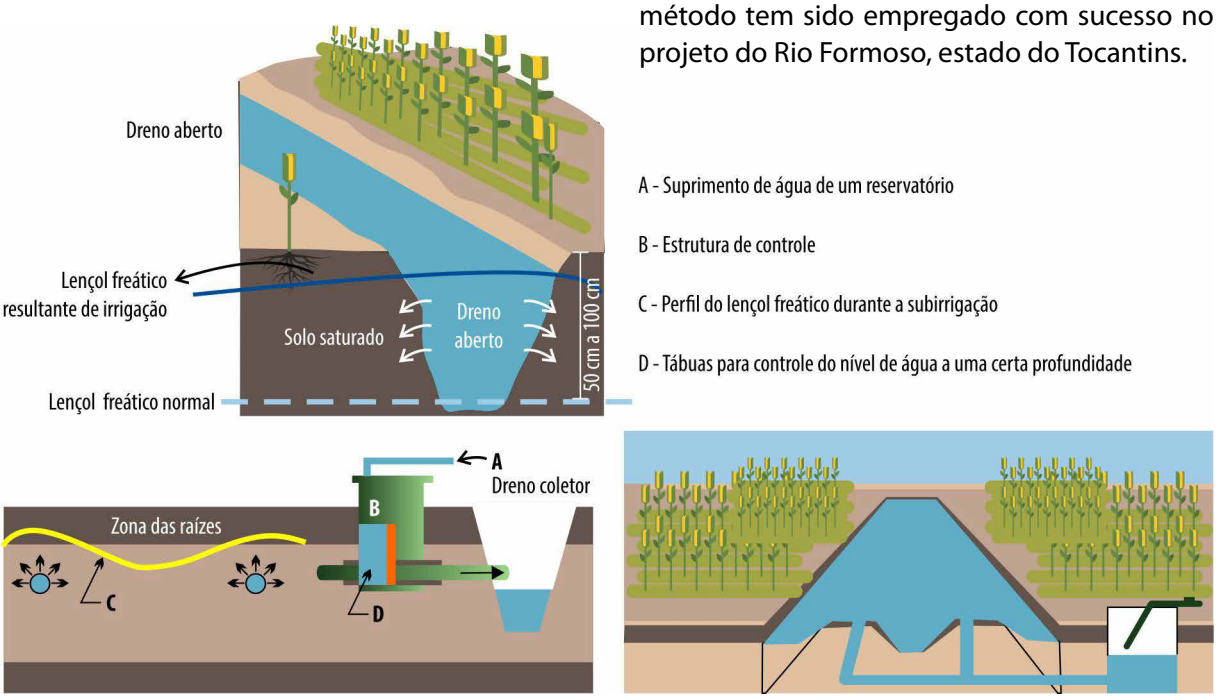


Figura 44. Esquema de subirrigação e detalhe de uma estação de controle de nível do lençol freático.

Ilustração: Paula Cristina Rodrigues Franco.

Vantagens da subirrigação

- Se o sistema de drenagem existe para remover o excesso de água, pode-se considerar que o custo de implantação do sistema é pequeno.
- Permite viabilizar o cultivo de outras culturas em tabuleiros empregados para o plantio de arroz inundado.
- A necessidade de bombeamento pode ser nula, se o sistema foi dimensionado para operar por gravidade.
- A necessidade de mão de obra para operação costuma ser pequena.

Limitações da subirrigação

- Requer condições especiais de solo, topografia e clima para funcionar adequadamente.
- A germinação das sementes de algumas culturas pode ficar prejudicada.
- Não funciona bem em solos muito pesados que demoram para ser drenados.
- Não é adequado para culturas que não toleram solo muito úmido, podendo favorecer o aparecimento de doenças.
- Pode favorecer o acúmulo de sais na superfície do solo em regiões semiáridas.
- Pode ser limitante para algumas culturas de sistema radicular muito raso.

Fatores influenciadores na escolha da subirrigação

Nos tópicos seguintes, serão analisados os fatores que afetam a escolha da subirrigação.

Culturas

A subirrigação não interfere com os tratos culturais, podendo ser irrigadas culturas que demandam constantes operações na área. Algumas culturas não toleram solo muito úmido, mesmo que temporariamente. O manejo da irrigação, que é feito controlando o nível do lençol por certo tempo, deve ser bem rigoroso, principalmente em solos muito pesados, que demoram muito para ser drenados. Plantas muito susceptíveis a doenças no sistema radicular devem ser evitadas.

A germinação de sementes plantadas muito rasas pode ser prejudicada, havendo necessidade de se empregarem métodos de aspersão para essa finalidade.

Solos

Os solos mais apropriados para esse tipo de irrigação são aqueles com condutividade hidráulica saturada elevada e com lençol freático relativamente alto. Solos muito pesados, de difícil drenagem, não são adequados para a subirrigação. No entanto, a ascensão capilar em solos arenosos é reduzida, o que pode inviabilizar o método. É possível manter o nível do lençol freático elevado durante a entressafra para o controle de nematoides.

Topografia e condições da área

As áreas para se instalar subirrigação devem ser preferencialmente planas ou com declividade pequena. O sistema de drenagem subterrânea deve estar implantado. As estruturas de controle de nível da água devem ser colocadas nos drenos coletores. Os drenos laterais devem ser preferencialmente enterrados para facilitar o cultivo e o tráfego na área.

Suprimento e qualidade da água

Em algumas situações, há necessidade de fornecimento de água para a área subirrigada, além daquela do lençol freático. Nesse caso, o suprimento de água deve ser capaz de atender à evapotranspiração da cultura e às perdas por percolação profunda e laterais. Em outras situações, a própria água do lençol é suficiente para

suprir a necessidade da cultura, e não há necessidade de suprimento externo de água.

O nível do lençol pode ser controlado de forma a reduzir ao mínimo a evaporação de água pela superfície do solo.

Esse método não é recomendado para regiões com problemas de salinidade no solo e na água. Deve-se dar preferência para regiões úmidas, com precipitação anual suficiente para lixiviar os sais, quando for o caso.

Clima

Esse método não sofre efeito de vento ou umidade relativa elevados. Não se presta para controle de geada ou para redução da temperatura.

O sistema deve ser dimensionado para operar de modo integrado com a drenagem, constituindo-se, portanto, um sistema de manejo da altura do lençol freático.

Eficiência

Nos Estados Unidos, a eficiência de aplicação de água em alguns sistemas de subirrigação, com lençol freático alto e pouco movimento lateral de água, chega a ultrapassar 80%. É possível que não chegue a essa cifra em outros locais.

Manejo da irrigação

O manejo da irrigação pode ser feito de duas formas. Em uma, a quantidade de água requerida pela cultura e necessária para suprir as perdas laterais e por percolação profunda é fornecida diariamente através dos drenos. O mesmo resultado também pode ser obtido mantendo-se o lençol a uma profundidade tal que o fluxo de ascensão capilar supra a evapotranspiração da cultura. Nesse caso, há que se fazer alguns ensaios de campo.

Outra forma consiste em monitorar a umidade na zona das raízes e fazer subir o nível do lençol quando os valores observados caírem de certo valor crítico já estabelecido para a área e cultura plantada.

A experiência de campo é fundamental para o manejo desse tipo de irrigação.

Necessidade e qualidade da mão de obra

A quantidade de mão de obra requerida para operar sistemas de subirrigação pode ser mínima se dispositivos automáticos são empregados para manter o nível da água nos drenos. Alguma mão de obra, não muito especializada, é necessária se o manejo é feito por elevação periódica do nível do lençol ou se o nível for variar ao longo do ciclo da cultura.

Disponibilidade de assistência técnica

Pode ser necessária assistência técnica para reparar bombas e estruturas de controle de nível, como vertedouros.

Quando os drenos são enterrados, poderá ser necessária a limpeza deles, o que é feito, geralmente, por empresas especializadas. Se os drenos forem abertos, deve-se dispor, na região, de profissionais capacitados a operar escavadeiras, retroescavadeiras e dragas, a serem utilizadas na limpeza dos drenos.

O conhecimento das relações solo-água-planta e o monitoramento do nível do lençol e teor de água do solo são cruciais nesse método. Serviço profissional especializado pode ser requerido para auxiliar na determinação do manejo.

Fatores econômicos

O custo de investimento em projetos de subirrigação varia muito com o local e com o tipo e espaçamento de drenos a serem implantados. Em média, o custo de implantação de um sistema de subirrigação com drenos fechados, envelopados e utilizando água subterrânea para irrigar, está em torno de U$ 2.200,00 por hectare. A maior parte do custo está nos drenos enterrados. Esses custos podem ser bastante reduzidos

quando as condições do local permitirem espaçamentos mais largos e drenos abertos.

Os custos com mão de obra são pequenos, uma vez que se requer pouco pessoal não muito qualificado. Gastos com energia existirão se a água for bombeada. A limpeza periódica dos drenos, principalmente se forem abertos, será significativa.

Fatores humanos e sociais

Esse tipo de sistema é mais fácil de ser adotado por aqueles agricultores que já têm alguma experiência com irrigação por superfície do tipo tabuleiros e em drenagem. Em alguns locais, o custo de implantação pode ser baixo, o que favorece a introdução da irrigação, principalmente visando à diversificação de culturas e ao abastecimento local ou regional com algum produto hortícola estratégico.

Fatores ambientais

Diferentemente dos métodos de tabuleiros ou faixas, em que a água pode permanecer estagnada na superfície, na subirrigação, a superfície do solo não tem água acumulada. Isso evita o desenvolvimento de insetos, como pernilongos ou mosquitos, além de patógenos, principalmente se os drenos forem fechados.

Cuidados devem ser tomados quanto ao uso de agroquímicos, uma vez que o lençol freático é raso, e, normalmente, os sistemas são instalados em regiões chuvosas. Os íons solúveis, especialmente nitrato, são facilmente lixiviados para o lençol.

Deve-se atentar também para as leis de proteção ambiental, no que diz respeito a faixas de mata ciliar, áreas de nascentes e outorga de água.

Referências

BURT, C. M.; CLEMMENS, A. J.; BLIESNER, R.; MERRIAM, J. L.; HARDY, L. **Selection of irrigation methods for agriculture**. Reston: ASCE, 1999. 129 p.

WALKER, W. R. **Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems**. Utah: Department of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University, 1989. 148 p.

Literatura recomendada

ALVES, E. J.; DANTAS, J. L. L.; SOARES FILHO, W. S.; SILVA, S. O.; OLIVEIRA, M. A.; SOUZA, L. S.; CINTRA, F. L. D.; BORGES, A. L.; OLIVEIRA, A. M. G.; OLIVEIRA, S. L.; FANCELLI, M.; CORDEIRO, Z. J. M.; SOUZA, J. S. **Banana para exportação**: aspectos técnicos da produção. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI/CNPMF, 1995. 106 p. (EMBRAPA-SPI. Série Publicações Técnicas FRUPEX, 18).

ANDRADE, C. L.T.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; TEIXEIRA, E. G. Irrigação do milho na região centro-sul do Brasil. **Revista Plantio Direto**, v. 80, p. 36-44, 2004.

ANDRADE, C. L. T.; BRITO, R. A. L. Viabilidade da irrigação. **Redecampo comunicação em agronegócios**, v. 1, n. 4, p. 33-34, 2004.

CUNHA, G. A. P.; MATOS, A. P. de; SOUZA, L. F.; SANCHES, N. F. REINHARDT, D. H. R. C.; CABRAL, J. R. S. **A cultura do abacaxi**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI/CNPMF, 1994. 80 p. (Coleção Plantar, 12).

FARIA, C. M. B.; PEREIRA, J. R.; POSSÍDEO, E. L. de Adubação orgânica e mineral na cultura do melão em um vertissolo do submédio São Francisco**. Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 2, n. 2, p. 191-197, 1994.

FRANÇA, G. E.; COELHO, A. M.; RESENDE, M.; BAHIA FILHO, A. F. C. Balanço de nitrogênio (^{15}N) em milho irrigado. In: EMBRAPA. Centro de Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. **Relatório técnico anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo**: período 1992-1993. Sete Lagoas, 1994. p. 30-32.

GOMIDE. R. L. Seleção do sistema de irrigação. In: CURSO DE USO E MANEJO DE IRRIGAÇÃO, 8., 1993, Sete Lagoas. **Apostila**... Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 1993. 13 p.

GONZAGA NETO, L.; SOARES, J. M.; CHOUDHURY, M. M.; LEAL, I. M. **A cultura da acerola**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, 1995. 101 p. (EMBRAPA-SPI. Coleção Plantar, 22).

GUROVICH, L. A. **Fundamentos y diseño de sistemas de riego.** San Jose, Costa Rica: IICA, 1985. 433 p. (IICA. Serie de Libros y Materiales Educativos, 59).

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

KLAR, A. E. Critérios para escolha do método de irrigação. **Irriga**, v. 5, n. 1, p. 52-82, 2000. DOI: 10.15809/irriga.2000v5n1p52.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A**. Trickle irrigation for crop production - Design, operation and management**. Amsterdan: Elsevier, 1986. 383 p. (ASAE. Developments in Agricultural Engineering, 9).

OLIVEIRA, A. M. G.; FARIAS, A. R. N; SANTOS FILHO, H. P.; OLIVEIRA, J. R. P.; DANTAS, J. L. L.; SANTOS, L. B.; OLIVEIRA, M. A.; SOUZA JR, M. T.; SILVA, M. J.; ALMEIDA, O. A.; NICKEL, O.; MEDINA, V. M.; CORDEIRO, Z. J. M. **Mamão para exportação**: aspectos técnicos da produção. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, 1994. 52 p. (Séries Publicações Técnicas. FRUPEX, 9).

PARSONS, L. R.; BOMAN, B. J. **Microsprinkler irrigation for cold protection of Florida citrus**. University of Florida, 2003. Disponível em: https://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/CH/CH18200.pdf. Acesso em: 21 fev. 2019.

SCALOPPI, E. J. Critérios básicos para seleção de sistemas de irrigação. **Informe Agropecuário**, v. 12, n. 139. p. 54-62, 1986.

TURNER, J. H. **Planning for an irrigation system**. Athens: American Association for Vocational Instructional Materials/Soil Conservation Service, 1971. 107 p.





PARTE 3

APLICAÇÕES E ASPECTOS ECONÔMICOS

Foto: Reinaldo Lúcio Gomide

Capítulo 8

Desempenho de sistemas e projetos de irrigação

Ricardo Augusto Lopes Brito
Reinaldo Lúcio Gomide

Introdução

A água é o recurso natural que mais participa na composição de animais e vegetais, e representa mais de 50% dos seres humanos adultos (Nelson, 1974) e acima de 80% das plantas (Reichardt, 1993). O fato de aproximadamente dois terços do nosso planeta serem constituídos de água, às vezes, causa a errônea impressão de que existe abundância do recurso. Entretanto, além do sentido quantitativo, que por si pode representar escassez, qualquer ideia de quantidade deve ser qualificada pelo aspecto de disponibilidade, que é o fator de correção mais importante nesse caso.

Quando se considera a disponibilidade, rapidamente se conclui que o recurso água, em muitos casos ou regiões, chega a ser escasso, ou está em vias de assim tornar-se, dependendo da localização, finalidade e recursos técnicos e econômicos associados ao seu uso. Em outras palavras, há muitas circunstâncias em que se constata considerável diferença entre a existência de recursos hídricos e sua disponibilidade de uso.

Além disso, um aspecto relevante é a qualidade. Muitas vezes, o recurso hídrico existe em quantidade suficiente, entretanto não atende aos requisitos de qualidade necessários para seu uso, seja para consumo humano, animal, agrícola ou industrial. Nesse caso, a água pode ser simplesmente considerada imprópria, ou necessitar de medidas de correção química, controle ou manejo, as quais exigem recursos de ordem técnica e econômica, que vão dificultar ou impedir seu uso.

De modo geral, a utilização agrícola é comparativamente a de maior demanda de uso, principalmente no caso da irrigação. E, geralmente, as regiões onde há necessidade de irrigar já são naturalmente aquelas onde o recurso é quantitativamente escasso (Figura 1).

No caso do Brasil, existem diversas zonas em que há escassez de água para irrigação, não só no Semiárido, mas em algumas áreas do Centro-Sul onde as fontes já estão sendo utilizadas na sua totalidade (Figura 1). Atualmente, já se tem notícia de inúmeros sistemas de irrigação que foram desativados, ou tiveram de ser modificados, por problemas de escassez de água.

Muitas vezes, a má utilização da técnica de irrigação, com baixa eficiência dos sistemas e/ou do uso de água, provoca a falsa impressão de escassez, em razão dos desperdícios frequentes. Esse problema é mais verificado na maioria dos perímetros irrigados públicos, e é visível pela observação de volumes excessivos de drenagem em consequência dos excessos na aplicação.

A disponibilidade da água em nível da parcela a ser irrigada, além dos aspectos quantitativos e qualitativos, ainda está condicionada a fatores externos, como custo de energia, implicações ambientais, legislação, que afetam diretamente a exequibilidade do projeto de irrigação.

Em decorrência dessas várias circunstâncias e sendo a irrigação a atividade que comparati-

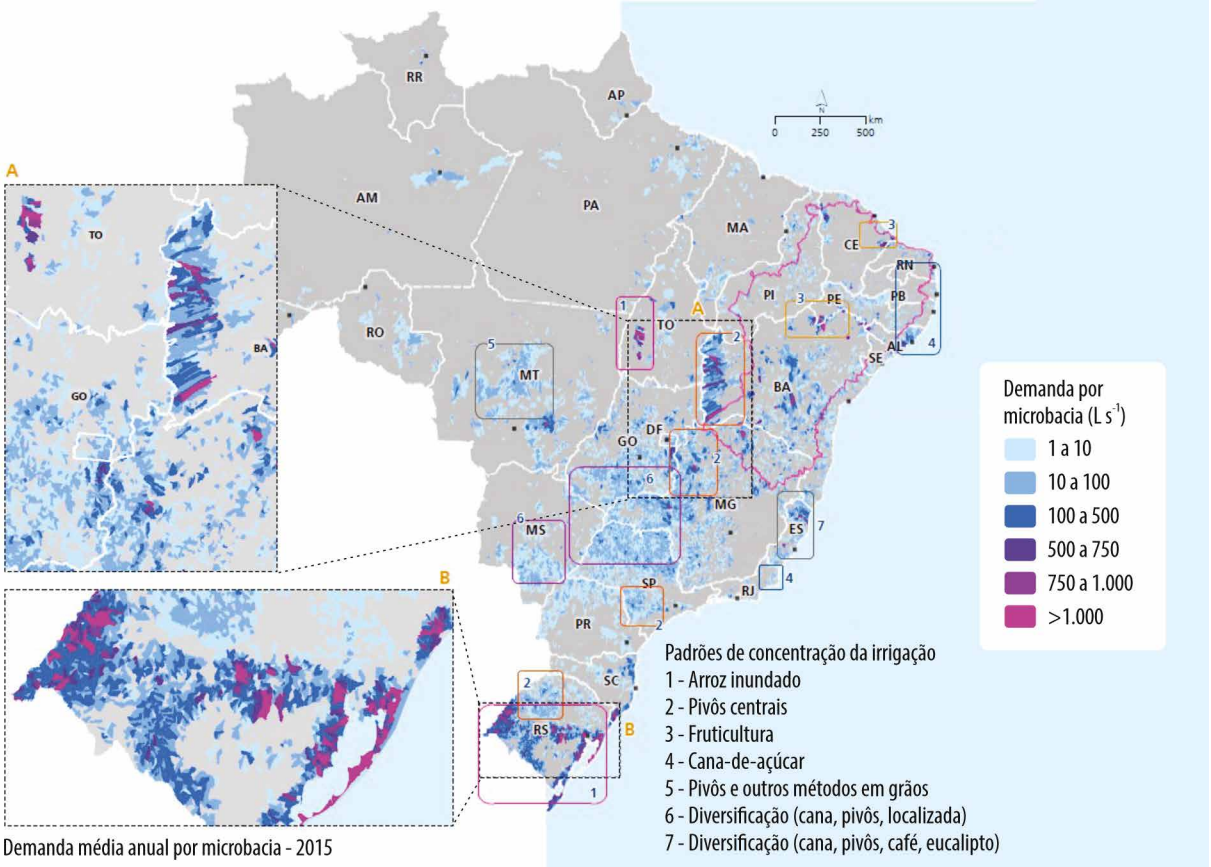


Figura 1. Demanda média anual de água por microbacia do Brasil, destacando os principais polos e padrões de concentração da irrigação.

Fonte: Agência Nacional de Águas (2017).

vamente representa a maior demanda desse recurso natural finito, a eficiência do uso da água nos sistemas irrigados deverá se intensificar até mesmo para viabilização do sistema de produção agrícola irrigado. Daí a razão para um cuidado crescente com a avaliação do desempenho de sistemas e projetos de irrigação, que, neste capítulo, envolve diversos fatores, de ordem técnica, econômica e social. Porém, não se dispõe ainda de uma metodologia que permita avaliar esse desempenho de forma global, embora alguns estudos já tenham sido iniciados com esse objetivo.

Entre os fatores de ordem técnica, os parâmetros de eficiência de aplicação e uniformidade de distribuição da água têm sido os mais utilizados para a avaliação do desempenho de sistemas no campo da engenharia de irrigação.

Aplicação e uniformidade de distribuição da água nos diferentes métodos de irrigação

Os métodos de irrigação devem ser cuidadosamente selecionados para se ter ou até mesmo garantir um controle ótimo ou adequado de aplicação de água de irrigação para as culturas em projetos de irrigação e perímetros irrigados. O processo de tomada de decisão para planejamento e implantação de áreas irrigadas e de quando e quanto irrigar é função de uma série de variáveis, como características climáticas, suprimento de água, culturas, métodos e sistemas de irrigação (como irrigar), solos, topografia, energia, salinidade, economia, infraes-

trutura local, trabalho gerencial e mão de obra (Stegman, 1983).

Na maioria das vezes, os técnicos e produtores nos sistemas agrícolas irrigados reconhecem a necessidade de controlar a quantidade de aplicação dos principais insumos, tais como sementes, adubação e defensivos agrícolas. No entanto, a necessidade de medir ou controlar o volume de água aplicada e a uniformidade de distribuição da água aplicada na irrigação é quase sempre ignorada, e esses passos não são realizados, por causa da visão errônea de não se caracterizar como uma medida para reduzir os custos de produção, ou porque a cobrança pelo uso dos recursos hídricos ainda não está implantada na maior parte do País, ou mesmo por tradição.

Nos métodos de irrigação gravitacionais ou superficiais (sulcos, faixas, inundação, etc.), a água é conduzida desde a fonte até a planta por meio da gravidade, ou escoamento superficial, o que implica um tempo de avanço e um tempo de recessão, os quais caracterizam, respectivamente, o lapso de tempo necessário para que a água, a partir do início da irrigação, atinja o final dos sulcos/faixas/tabuleiros, e o lapso de tempo requerido para que, uma vez cortado o fornecimento, a água se infiltre completamente no solo, ao longo dos respectivos sulcos/faixas/tabuleiros de inundação. A magnitude desses tempos – principalmente do tempo de avanço – tem influência na eficiência de aplicação dos sistemas. Geralmente, é desejável um tempo de avanço mais curto, quando a declividade do terreno e capacidade de infiltração do solo assim o permitirem.

Nos métodos pressurizados (aspersão, lateral móvel, pivô central e autopropelido), a água é conduzida em tubulação e submetida à pressão por meio de um conjunto moto-bomba. No método por aspersão convencional, comumente se trabalha com maiores vazões, maiores pressões, tubulações de maior diâmetro e intervalos de irrigação mais longos (4 a 10 dias) quando comparado com a irrigação localizada. Esses sistemas de aspersão são comumente usados para aplicação de água para as culturas anuais por meio de uma rede de linhas ou ramais principais, secundários e laterais com os aspersores espaçados ao longo de seus comprimentos. A seleção do tipo de aspersor depende da forma e do tamanho da área a ser irrigada e da vazão e pressão do fornecimento de água, além das características hídricas do solo.

Os tipos de aspersores mais utilizados são os rotativos de impacto, com um só bocal ou bocais múltiplos. O jato de água que sai do bocal de um aspersor pulveriza e se divide em pequenas gotas (assemelhando chuva), sendo que os tamanhos dessas gotas dependem da pressão de operação (serviço) do aspersor, do tamanho do(s) bocal(ais) (diâmetro) e da resistência do ar. Desse modo, a uniformidade da aplicação de água de um aspersor de rotação depende de sua geometria, ângulo de trajetória do jato de água, diâmetro do bocal e pressão de operação, assim como o espaçamento entre aspersores e a velocidade e direção do vento (Gomide et al., 1980a).

Para a obtenção de distribuição de água uniforme na irrigação por aspersão convencional, é muito importante que haja sobreposição dos jatos de água aplicados pelos aspersores adjacentes. Em razão disso, geralmente, os espaçamentos dos aspersores são dimensionados para permitir que haja sobreposições da ordem de 60% a 100% dos seus respectivos raios de alcance dos jatos de água, dependendo do perfil de aplicação de água de cada aspersor e da velocidade e direção do vento. Para atender a isso, são bastante utilizados espaçamentos entre aspersores ao longo de linhas laterais e entre linhas laterais da ordem de 12 m x 12 m e 12 m x 18 m, respectivamente (Gomide et al., 1980a). Os catálogos de fabricantes de aspersores com diâmetros de bocais de 3,5 mm a 4,5 mm, operando com pressões de serviço de 3,5 Kgf cm^{-2} a 4,0 Kgf cm^{-2} e vazão de água de 1,14 m^3 h^{-1} a 1,75 m^3 h^{-1}, fornecem taxas médias de aplicação de água de 8,0 mm h^{-1} a 12,2 mm h^{-1}. Esses valores mudam sempre com

a alteração de tamanho do bocal, pressão de serviço e espaçamento entre aspersores. Por isso, é sempre importante seguir as recomendações técnicas de instalação e operação dos aspersores do fabricante.

Uma instalação e utilização incorreta de um sistema de aspersão convencional resultarão numa baixa uniformidade de distribuição de água na área irrigada. Uma pressão de serviço do aspersor maior que o valor recomendado tende a produzir jato de água com pequeno diâmetro de gotas, que estão sujeitas a uma maior perda por evaporação no ar e também perdas em razão da deriva pelo vento. Todavia, uma baixa pressão de serviço diminui o raio de alcance do jato de água do aspersor e não provoca uma boa pulverização desse jato no ar, causando gotas de diâmetros muito maiores, erosão no solo e uma má uniformidade de distribuição de água (Gomide et al., 1980a).

As linhas laterais com os aspersores devem ser instaladas de preferência sempre em nível, e posicionadas numa direção perpendicular (90°) ou 45°com relação à linha principal. Essa última posição formando um ângulo de 45° é a melhor disposição em relação à direção predominante do vento.

No método em que toda a linha lateral, com os aspersores/difusores, encontra-se em movimento, denominado de lateral móvel, o sistema é construído de maneira semelhante a um pivô central, isto é, torres móveis com vãos de tubos que interligam as torres. A principal diferença é que todas as torres se movem com a mesma velocidade e na mesma direção (perpendicular ao sentido de deslocamento), percorrendo um caminho linear. O fornecimento de água geralmente é feito ao carrinho/torre de comando da unidade por meio de mangueira flexível de um polietileno especial, cujo diâmetro pode variar de 100 mm a 150 mm e o comprimento de 150 m a 400 m. Essa mangueira é geralmente conectada a uma série de hidrantes pressurizados, distribuídos via tubulações enterradas na área irrigada de acordo com os espaçamentos dimensionados pelo projeto de irrigação. A principal vantagem desse sistema é que pode irrigar campos retangulares. O componente principal é o carrinho/torre de comando, responsável pelo movimento de toda a unidade, que pode estar localizado no centro ou na parte lateral da linha lateral em movimento, o qual abriga o painel de controle, em que é regulada a velocidade de deslocamento da unidade e, consequentemente, a taxa de aplicação de água, que geralmente varia de 2,5 mm h^{-1} a 6,0 mm h^{-1}.

Uma das regras muito importante nos sistemas de irrigação pressurizados, com cobertura total da área irrigada (aspersão convencional, autopropelido, pivô central, lateral móvel e rolão), é que eles sejam projetados sempre para fornecer uma taxa de aplicação de água menor do que a taxa de infiltração de água do solo (velocidade de infiltração de água básica do solo, que se aproxima do valor de sua condutividade hidráulica saturada), de modo a evitar a formação de poças e também o escoamento de água na superfície do solo.

Nos métodos pressurizados com cobertura parcial da área irrigada, ou irrigação localizada, a pressão de operação é geralmente mais baixa, as vazões são menores, com tubulações – normalmente flexíveis – de menores diâmetros e menores intervalos de irrigação (1 a 3 dias).

Um sistema de irrigação localizada fornece água às culturas perenes (café, citrus, uva, manga, etc.) e também a culturas anuais de ciclo menor, por meio de uma rede de linhas principais, secundárias e laterais, sendo esta última dotada de pontos de emissão, com gotejadores espaçados ao longo do seu comprimento (Figura 2). O material mais comum utilizado na fabricação dessas linhas é o de polietileno. Cada orifício gotejador fornece uma aplicação uniforme e precisa de água, diretamente na zona efetiva do sistema radicular das plantas; e, às vezes, a água é aplicada com nutrientes ou outras substâncias químicas (agroquímicos), ambos necessários para assegurar um bom crescimento fitos-

sanitário e uma boa produtividade das plantas (Figura 2). A escolha de um emissor, gotejador ou microaspersor baseia-se principalmente na sua vazão, que deve ser uniforme e constante ao longo das linhas laterais, com menor risco de obstruções ou entupimento e também resistência ao ataque de insetos e roedores.

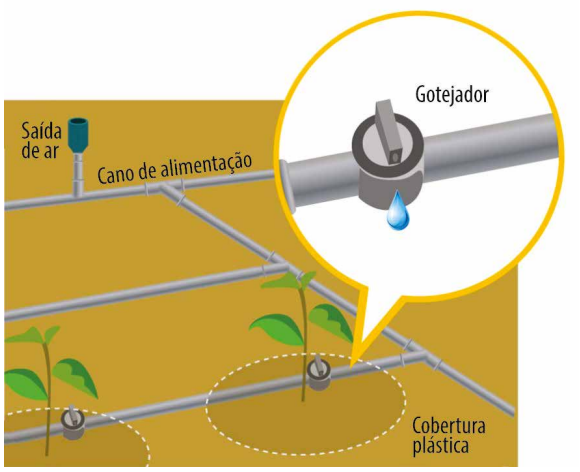


Figura 2. Sistema de irrigação localizada por gotejamento indicando a rede de linhas principais, secundárias e laterais, com os pontos de emissão ou gotejadores espaçados ao longo do seu comprimento, para fornecer água diretamente na zona efetiva do sistema radicular das plantas.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Os tubos de polietileno flexíveis estão disponíveis no mercado com diâmetros internos de 10,0 mm; 12,5 mm e 15,0 mm. A alta eficiência de um sistema de irrigação por gotejamento resulta a partir do fato de que a água aplicada infiltra no solo antes de poder evaporar para atmosfera ou escoar superficialmente (*runoff*), e é aplicada somente onde for necessário (por isso a cobertura parcial, apenas na zona efetiva do sistema radicular das plantas). A água infiltrada no solo forma, na região dos emissores ou gotejadores, bulbos úmidos ou bulbos molhados, cujas formas e tamanhos dependem do tipo de emissor/gotejador, da sua vazão, da duração da irrigação e do tipo de solo (argiloso ou arenoso). A infiltração da água aplicada pelos emissores, no solo, ocorre em todas as direções, mas, no caso de solos arenosos, é mais rápida na direção vertical. Um sistema de irrigação localizada é mais indicado geralmente para condições de solos muito leves (arenosos), com elevadas taxas de infiltração de água e baixa capacidade de retenção de água. Essas condições de solo não são adequadas para os métodos de irrigação superficial ou aspersão convencional.

Cada método e/ou sistema de irrigação depende de circunstâncias operacionais (topografia, solos, cultura, disponibilidade de mão de obra, tamanho da área irrigada, etc.) que podem torná-los recomendáveis ou não para cada conjunto de situações.

Eficiência de irrigação

O conceito de eficiência, num sentido mais amplo, diz respeito à maneira com que determinado insumo é utilizado para se obter um produto. Por exemplo, a quantidade (em quilos) de leite usada para produzir certa quantidade (em quilos ou outra unidade) de queijo de determinado tipo. Um processo mais eficiente seria aquele que usasse menor quantidade do leite para obter a mesma quantidade do queijo.

O conceito de eficiência de irrigação, entretanto, difere dessa interpretação mais ampla, sendo definido como a quantidade (volume ou lâmina) de água que é efetivamente usada para um fim específico, em relação ao total de água disponibilizado para aquele fim. Essa definição está associada com a ocorrência de perdas, ou desperdício de água, ao longo do processo de fazê-la chegar ao seu objetivo principal. Em outras palavras, pode-se generalizar o conceito de eficiência como a relação entre a quantidade (volume ou lâmina) útil e a quantidade bruta (Figura 3).

Uma vez que a trajetória da água, desde a fonte até a zona radicular da cultura, pode ser longa em muitos casos (grandes projetos, por exemplo), é comum dividir essa trajetória em três partes: condução, distribuição e aplicação. Daí a existência dos termos: eficiência de condução, eficiência de distribuição e eficiência de aplicação (Figura 4). Condução está associada com a

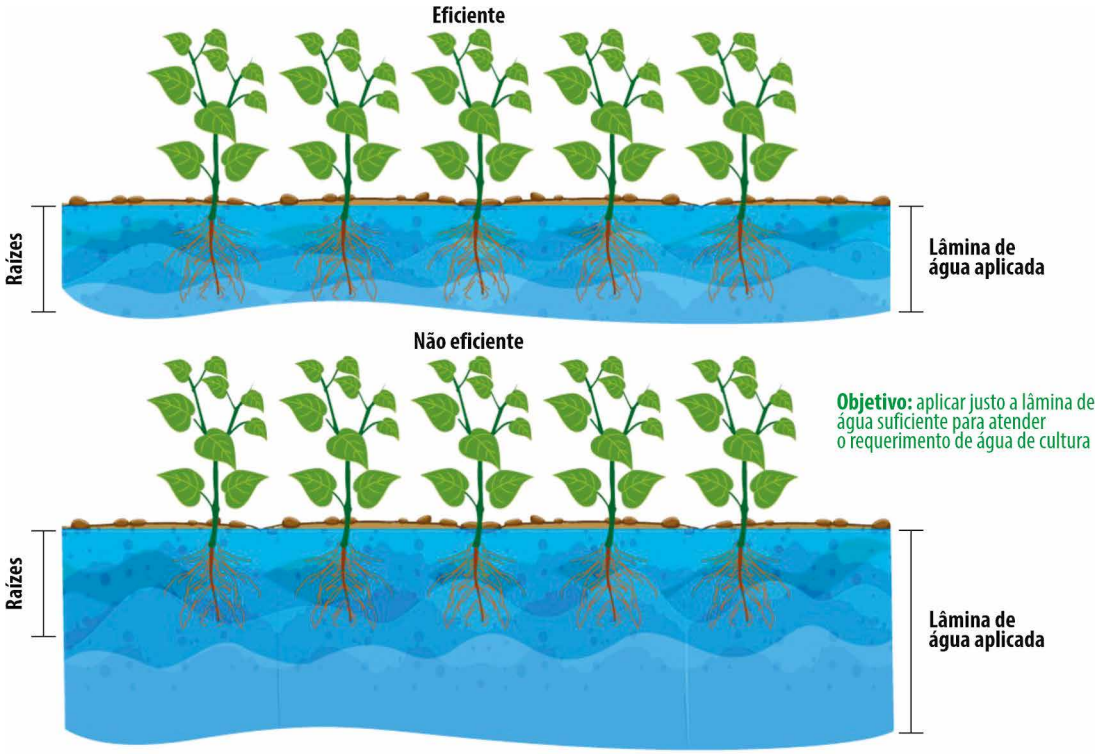


Figura 3. Conceito de eficiência de irrigação com base na relação entre a lâmina útil (Lu) e a lâmina bruta (Lb) de água aplicada para suprir a região das raízes das plantas no perfil do solo. Acima, uma irrigação eficiente em que foi aplicada a Lb adequada para suprir o solo com uma Lu, atendendo, de forma correta, ao requerimento de água da cultura (evapotranspiração); abaixo uma irrigação não eficiente com um total de água (Lb) disponibilizado em excesso, com a ocorrência de perdas por percolação profunda de água abaixo das raízes das plantas.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

trajetória da água desde a fonte até sua entrada na área a ser irrigada, isto é, o trecho representado pela linha adutora dos projetos, sejam tubulações ou canais, principais e secundários. A distribuição refere-se, como indica o termo, à distribuição da água dentro do projeto, ou seja, a entrega da água às unidades terciárias ou unidades de irrigação, aquelas que recebem água de uma mesma derivação. E, finalmente, a aplicação consiste no uso da água dentro das unidades, ou parcelas irrigadas, isto é, a aplicação da água no solo propriamente dita. No caso de áreas menores, a eficiência restringe-se praticamente à de aplicação.

Pela definição, a eficiência de irrigação (*Ef*) será representada em termos percentuais pelas seguintes relações:

$$Ef = Vu/Vb = Lu/Lb \quad (1)$$

em que Vu é o volume útil; Vb é o volume bruto; Lu é a lâmina útil; e Lb é a lâmina bruta.

A eficiência de condução está relacionada com as perdas na adutora, se for o caso, e é afetada por vazamentos no canal ou tubulação e ainda por evaporação de água em canais. A eficiência de distribuição também é afetada pelos mesmos problemas, porém no âmbito da distribuição interna no projeto. Quanto à eficiência de aplicação, essa diz respeito às características operacionais do sistema e ao seu manejo, ou seja, os critérios adotados no suprimento de água às culturas, ou no reabastecimento da zona efetiva de desenvolvimento do sistema radicular da cultura (Figura 4).

Usando-se os termos Ec, Ed e Ea para representar, respectivamente, as eficiências de condução, de distribuição e de aplicação, pode-se

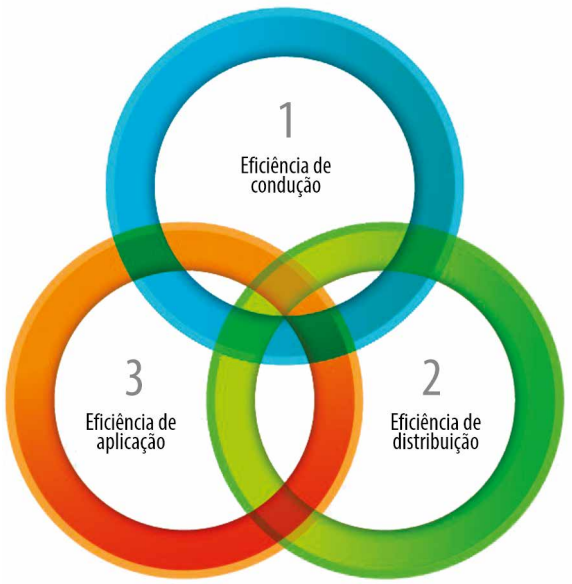


Figura 4. Divisão da trajetória da água, desde a fonte de sua captação até a sua aplicação na zona radicular da cultura, em três partes para efeito de estudo das eficiências de condução, distribuição e aplicação.

definir a eficiência global (Eg) de um projeto como o produto dessas três eficiências, ou seja,

$$Eg = Ec \times Ed \times Ea \quad (2)$$

Todas as componentes da eficiência são importantes e devem ser acompanhadas periodicamente. Entretanto, entre elas, a eficiência de aplicação é a que mais depende do uso e manejo da irrigação, e, portanto, será dada ênfase a essa eficiência.

Como ponto de referência, podem-se adotar como valores mínimos para a eficiência de aplicação (Ea) os seguintes números:

- Irrigação por sulcos com declividade: $Ea \geq 65\%$.
- Irrigação por faixas/bacias niveladas: $Ea \geq 75\%$.
- Irrigação por aspersão com laterais portáteis (convencional): $Ea \geq 80\%$.
- Irrigação por pivô central/lateral móvel: $Ea \geq 85\%$.
- Irrigação localizada (gotejamento, microaspersão) $Ea \geq 85\%$.

A seguir, apresenta-se um exemplo de cálculo de eficiência de aplicação de água em um sistema de irrigação por aspersão, utilizando os resultados de um teste com coletores em campo.

Exemplo: teste com coletores em campo

Um sistema de aspersão com laterais portáteis utiliza aspersores cuja vazão individual é de 3,42 $m^3\ h^{-1}$. Um teste com coletores, feito em condições de campo, com espaçamento de 18 m × 18 m entre aspersores, revelou que a lâmina acumulada que atingiu o solo, após 30 minutos de teste, foi de 4,3 mm. Qual é a eficiência de aplicação (Ea) resultante desse teste?

Solução:

Se o teste durou 30 minutos, o volume aplicado pelo aspersor no mesmo período foi de 1,71 m^3. A lâmina bruta aplicada foi:

$Lb = 1{,}71\ m^3/(18 \times 18)\ m^2 = 0{,}0052\ m = 5{,}2\ mm$

Calculando a eficiência de aplicação:

$Ea = Lu/Lb = 4{,}3/5{,}2 = 0{,}827 \approx 83\%$

Observa-se que esse valor de Ea está associado à lâmina que atingiu o solo (ou os coletores), já descontadas as perdas por evaporação de água e deriva pela ação do vento, porém não representando necessariamente a lâmina armazenada na zona radicular. Se houver algum escoamento superficial, ou percolação profunda abaixo da zona radicular, estes serão também perdas que causarão redução na eficiência de aplicação. Tais perdas, entretanto, são mais difíceis de quantificar, embora devam ser observadas, e, se for o caso, determinadas.

No caso da irrigação por gravidade, as perdas por escoamento superficial, infiltração em canais e percolação profunda são geralmente maiores, enquanto as perdas por evaporação de água tendem a ser menores, e a ação de deriva pelo vento praticamente inexiste.

Na irrigação localizada, as perdas por evaporação de água e deriva pelo vento são minimizadas, principalmente no caso de gotejamento. Perdas por escoamento superficial não devem ocorrer, porém pode haver perdas por percolação profunda, que devem ser mantidas num limite máximo de 10%, a menos que existam razões específicas para aumentar esse limite, como no caso de necessidade calculada de lixiviação para remoção de sais.



É importante ter em mente que perdas de água, seja qual for sua origem, são importantes não apenas pela perda da água em si. Além do volume desperdiçado, que em muitos casos tem um preço e cuja tendência é passar a ser cobrado em todo o território nacional (Lei nº 9.433/1997), a perda representa uma perda agregada, em termos de desperdício de energia, de agroquímicos (principalmente fertilizantes), de solo (no caso de escoamento superficial), os quais são insumos com preço real de mercado.

Além disso, o excesso de água na zona radicular pode causar saturação do perfil de solo, com consequente efeito negativo na produtividade e ainda o comprometimento ambiental, provocado pela acumulação de águas superficiais oriundas de drenagem excessiva, bem como a contaminação de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, fruto da deposição de resíduos químicos transportados pela água de irrigação desperdiçada.

Uniformidade de distribuição de água

Quando a água é aplicada no solo, isso ocorre de maneira pontual, seja pela derivação, a partir de canais alimentadores/sifões, na entrada de sulcos ou bordas, seja por meio de aspersores/emissores pressurizados, nos casos da aspersão e da irrigação localizada. Em se tratando dos sistemas de irrigação superficial e pressurizados, o objetivo é a aplicação de uma lâmina de água igualmente em toda a superfície do solo (cobertura total da área irrigada) e, na irrigação localizada, objetiva-se umedecer apenas parte da área. Em qualquer dos casos, entretanto, a intenção é aplicar a água uniformemente (Figura 5).

Na prática, porém, em condições de campo, nenhum sistema é capaz de aplicar água de maneira perfeitamente uniforme. Na irrigação por gravidade, há diferença entre a lâmina infiltrada no início do sulco ou borda e aquela armazenada no final (Figura 6). Na irrigação por aspersão, existe variação entre a vazão individual dos aspersores, além de imperfeições na sobreposição de lâminas de água oriundas dos aspersores (Figura 7). Na irrigação localizada, à semelhança da aspersão, também há diferenças entre as vazões individuais dos emissores, provocadas por variação na pressão ao longo das linhas principal e laterais (Figura 8).

A irrigação pressurizada caracteriza-se pelo princípio hidráulico de fluxo em orifício, o qual é representado pela fórmula:

$$q = C_d A \sqrt{2gh} \quad (3)$$

em que q é a vazão no orifício ($m^3\ s^{-1}$); C_d é o coeficiente de descarga do orifício; A é a seção transversal do orifício (m^2); g é a aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$) e h é a carga (pressão) exercida no orifício (m).

Universalmente, é adotado um critério em que se limita a variação da vazão em 10%, ou seja, a maior vazão individual, na linha lateral, não deve ser mais do que 10% superior à menor vazão na mesma linha. Chamando-se a menor vazão individual de q_1 e a maior de q_2, para atender ao mencionado critério, tem-se que:

$$q_2/q_1 \leq 1{,}1 \quad (4)$$

Substituindo q_1 e q_2 na Equação 4 chega-se a:

$$q_2/q_1 = \sqrt{h_2/h_1} \leq 1{,}1 \quad (5)$$

em que se conclui que $h_2/h_1 \leq 1{,}21$, o que equivale a dizer que a variação de pressão deve ser mantida num limite de 20% para que a variação

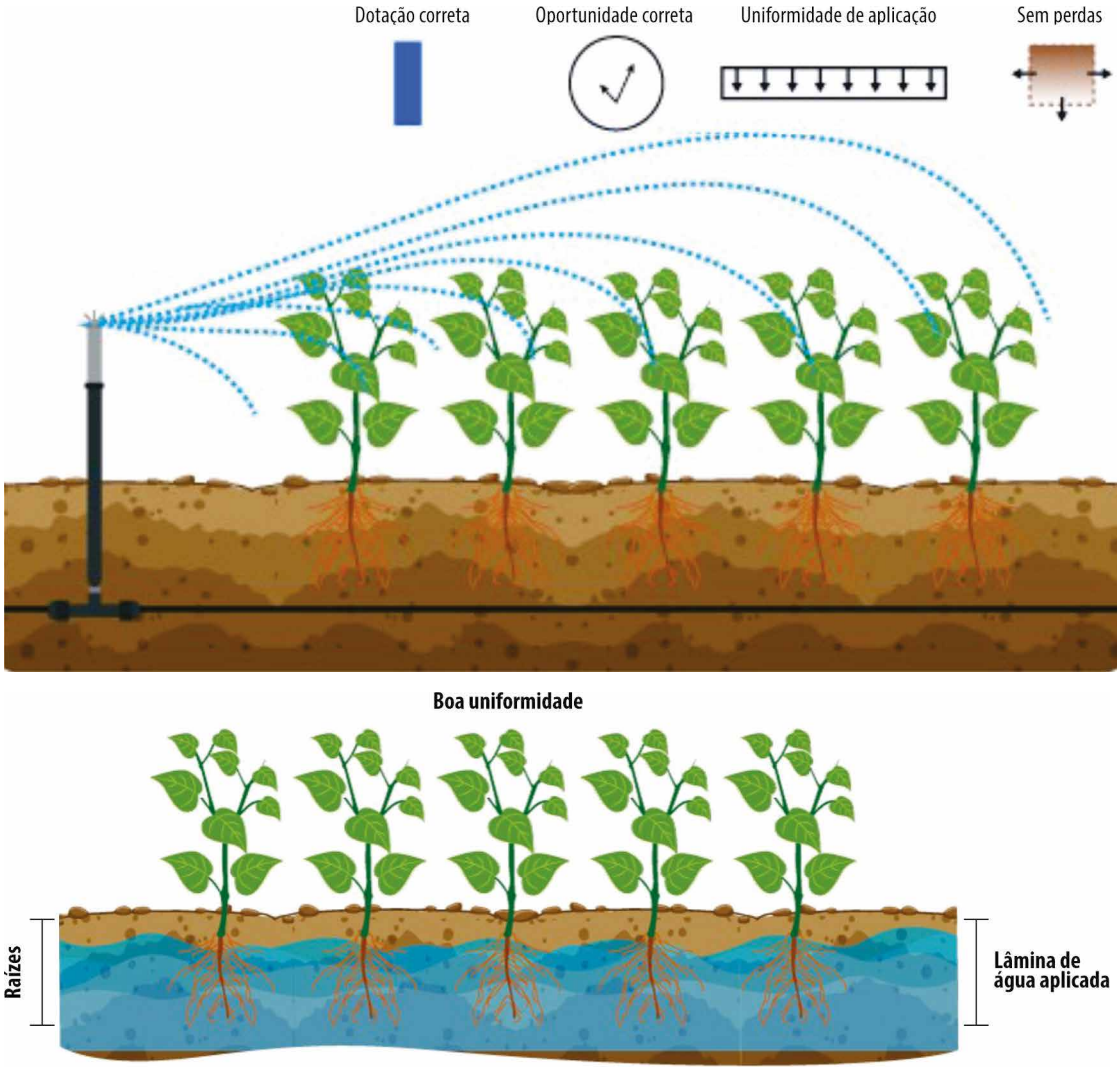


Figura 5. Aplicação de lâmina de água adequada, distribuída igualmente, na região das raízes das plantas/superfície do solo, em toda a área irrigada, com uma boa uniformidade de distribuição da água.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

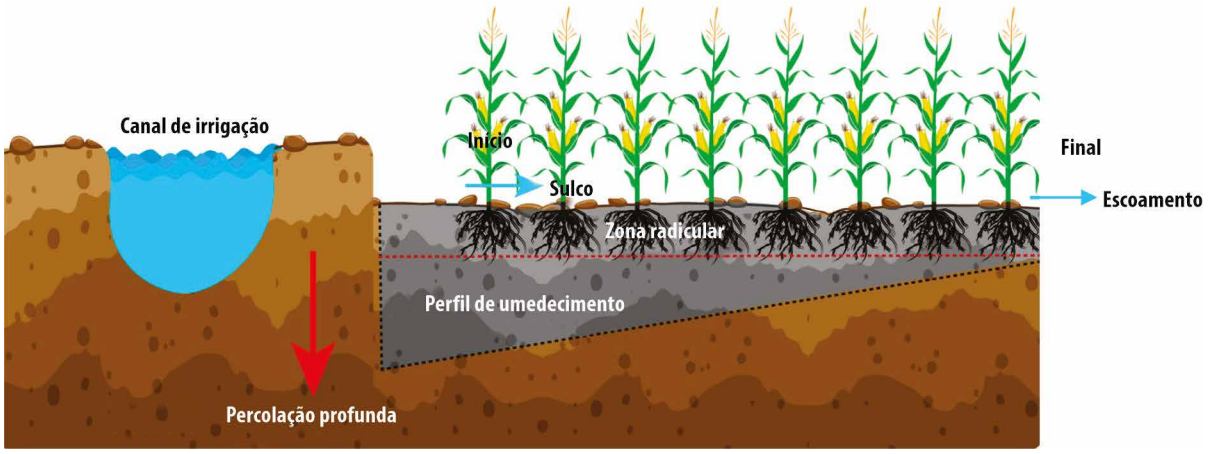


Figura 6. Desuniformidade na aplicação e distribuição de água mostrando o perfil de umedecimento ao longo de um sulco de irrigação por gravidade, evidenciando as perdas de água no seu início (percolação profunda) e final (escoamento superficial).

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

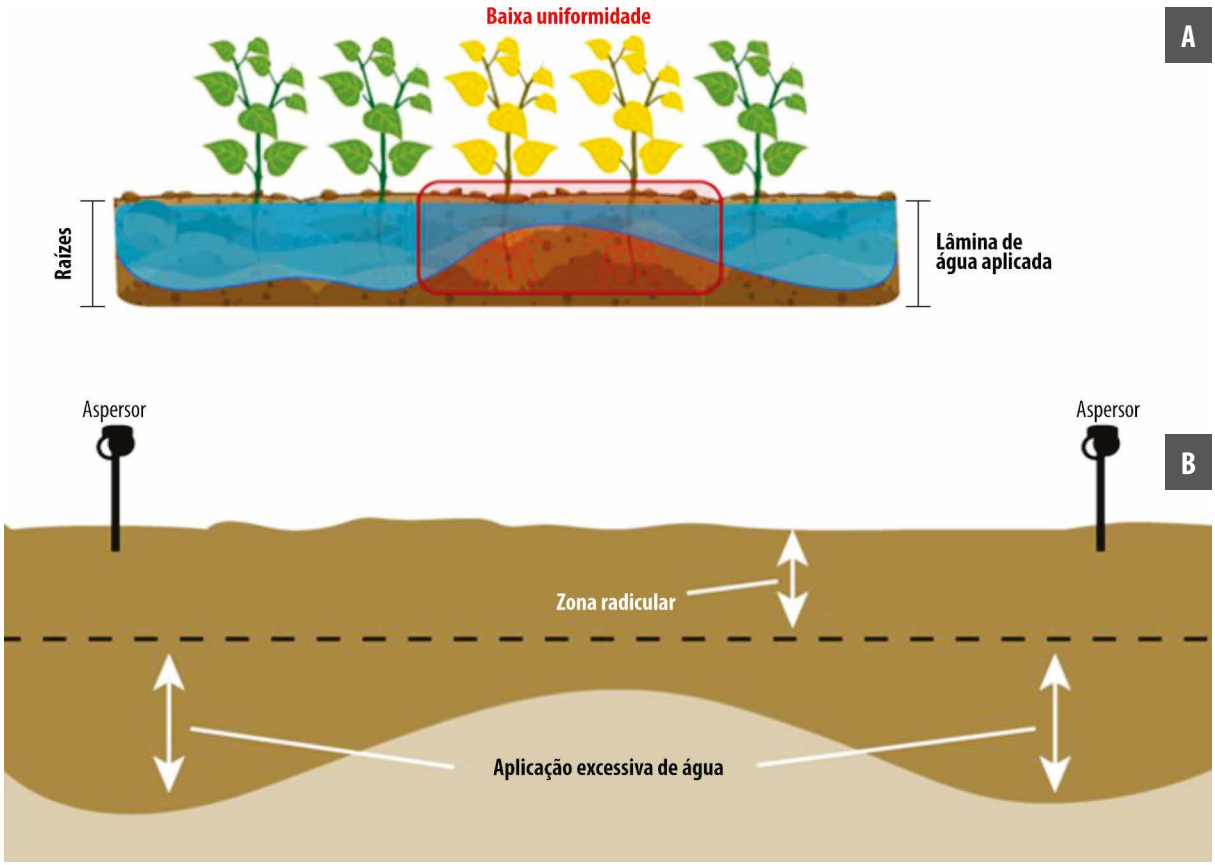


Figura 7. Desuniformidade na aplicação e distribuição da lâmina de água aplicada entre aspersores no campo, em razão da variação de vazão e pressão de serviço e imperfeições da sobreposição de lâminas de água, ocasionadas pelos espaçamentos entre os aspersores, com aplicação de água em falta (A) e em excesso (B).

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.



Figura 8. Desuniformidade na aplicação e distribuição da lâmina de água aplicada na irrigação localizada, ao longo da linha de gotejadores, em razão das diferenças entre as vazões e pressões individuais dos emissores.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

de vazão não ultrapasse 10%. Essa é conhecida como a regra dos 20%, quando se dimensionam sistemas pressurizados.

A eficiência de aplicação, por si, não dá uma ideia completa do desempenho do sistema, pois a lâmina útil, ou volume útil aplicado, usado no cálculo, representa a média da quantidade de água que efetivamente atingiu a superfície do solo, ou a zona radicular. Entretanto, como essa lâmina ou volume varia dentro da área irrigada, algumas partes recebem quantidades superiores à média, enquanto outras ficam com deficit (Figura 9).

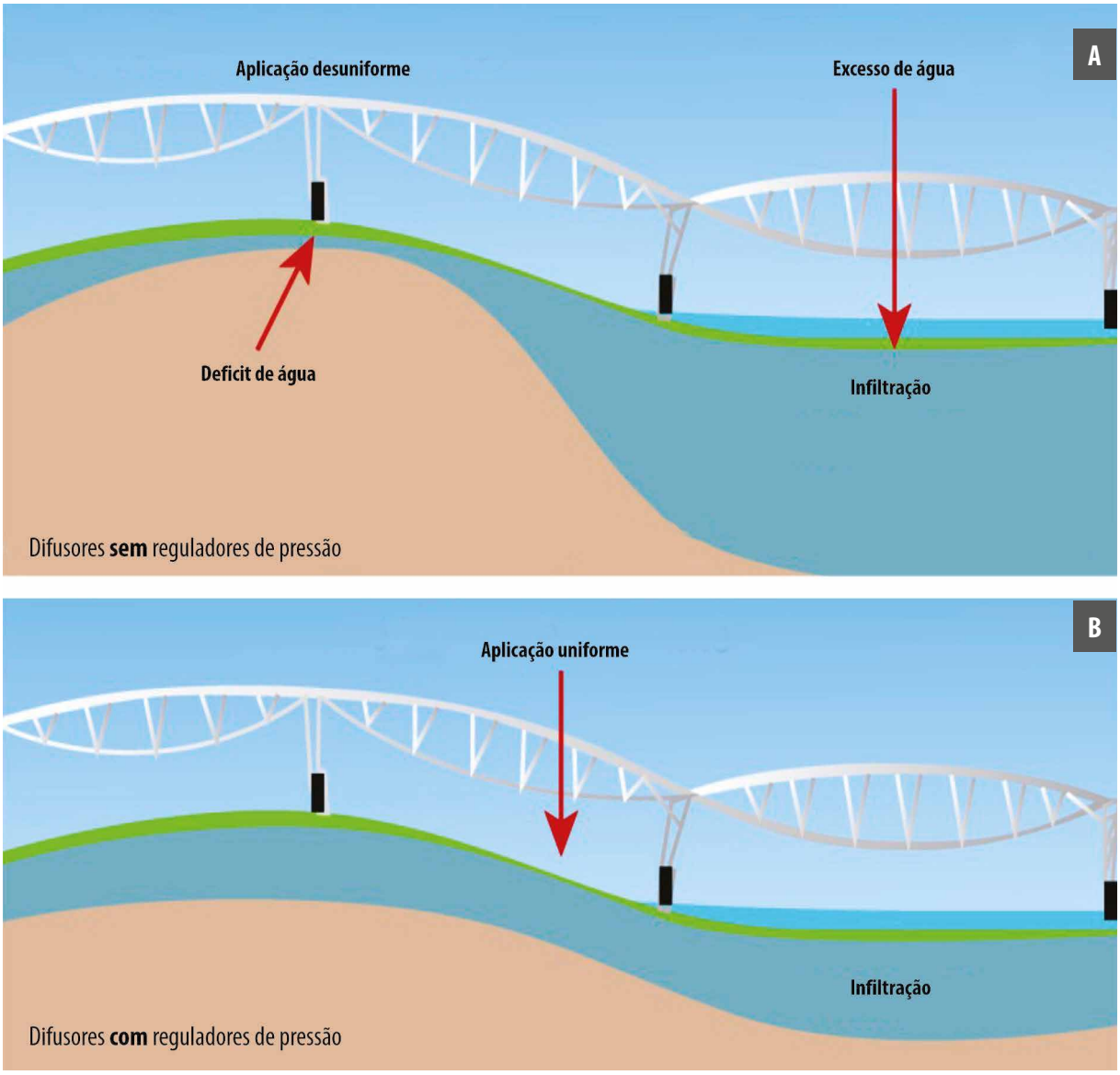


Figura 9. Variação da seção transversal de lâmina de água aplicada no solo ao longo da lateral de dois pivôs centrais; um mostrando (A) a aplicação desuniforme de água, com algumas partes da área irrigada recebendo tanto o excesso como também o deficit de água, por causa de os difusores terem sido instalados sem os reguladores de pressão; e outro (B) em que os difusores receberam reguladores de pressão que verificam a aplicação uniforme de água.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Procedimentos de campo para avaliação e determinação da aplicação e distribuição de água

Informações fornecidas em tabelas e gráficos dos fabricantes de equipamentos de irrigação são valores médios de vazão, pressão de serviço, intensidade de aplicação de água, para diferentes combinações de espaçamento. Essas informações são baseadas em testes de equipamentos novos (aspersores, difusores, gotejadores), operando em condições de campo, mas não levando em conta outros parâmetros ambientais que podem afetar e mudar os seus respectivos desempenhos. Em geral, esses equipamentos são operados em condições adversas e

submetidos a longo tempo de uso em campo (Merriam; Keller, 1978).

Os procedimentos de campo para avaliação e determinação da aplicação e distribuição de água, para os sistemas de irrigação por aspersão convencional, lateral móvel e pivô central, envolvem geralmente a colocação de recipientes coletores de água (vários tipos), desde pluviômetros até latas ou recipientes de plástico, enfim qualquer recipiente com abertura e seção de captação uniforme, e devem ser profundos o suficiente (pelo menos 10 cm de profundidade) para evitar que a água coletada respingue para fora de seu interior. Os recipientes de 0,5 L a 1,0 L são bastante adequados (Figura 10). Esses coletores são fixados sobre hastes verticais, as quais, uma vez instaladas no campo, devem deixar niveladas as suas respectivas seções de captação de água de 0,60 m a 0,80 m acima da superfície do solo, onde a água será aplicada. O volume de água obtido nos coletores será medido com provetas de 100 mL a 500 mL, e, posteriormente, será determinada a lâmina de água coletada. Atualmente, pode-se obter no mercado kits de coletores e hastes verticais fabricados comercialmente, já com provetas graduadas para leitura direta da lâmina de água coletada, o que facilita a padronização do processo (Figura 10).

Todos os coletores distribuídos na área devem apresentar o mesmo tamanho e forma e devem ser instalados no campo a uma mesma referência de nível em relação aos bocais dos aspersores/difusores, evitando-se sempre a interceptação de água aplicada da irrigação pela folhagem das culturas ou qualquer outro obstáculo (Figura 10). Uma vez que os coletores se encontram distribuídos na área de aplicação de água, o sistema de irrigação é colocado em operação, e devem ser medidas e registradas a pressão de serviço, a vazão do sistema e a quantidade de água coletada em cada coletor, para em seguida se proceder à computação do volume médio e da taxa de aplicação de água,

Fotos: Reinaldo Lúcio Gomide



Figura 10. Disposição de recipientes coletores de água no campo na avaliação e determinação da aplicação e distribuição de água de irrigação (pivô central e aspersão convencional), fixados sobre hastes verticais, com as suas seções de captação de água niveladas, sempre em posições acima do dossel da cultura, para evitar a interceptação dos volumes (medidos com provetas) de água aplicada da irrigação pela folhagem.

bem como a sua uniformidade de distribuição. Geralmente, um medidor de vazão é instalado na linha principal ou secundária (se for o caso), para obter uma boa medida do volume total de água bombeada a partir da fonte durante o ciclo de cada irrigação.

O sistema de irrigação localizado possui procedimentos de campo para a avaliação e determinação da uniformidade de aplicação e distribuição da água ao longo da linha lateral, que são intrínsecos e peculiares à variação de vazão dos emissores (microaspersor, gotejador) e ao fato de que a água é aplicada formando bulbos úmidos próximos ao sistema radicular.

Avaliação da aplicação e distribuição de água

Descrição dos coeficientes de uniformidade de distribuição de água

Os coeficientes de uniformidade de distribuição de água dos sistemas de irrigação exprimem a variabilidade da lâmina de irrigação na superfície do solo da área irrigada e são influenciados, principalmente, pelo espaçamento entre aspersores, emissores ou difusores, velocidade e direção do vento e pressão de serviço dos sistemas.

Entre os principais coeficientes usados para expressar e determinar a variabilidade de distribuição da água aplicada pelos sistemas de irrigação na superfície do solo, destacam-se os propostos por Christiansen (1942) conforme box abaixo.

O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) é o coeficiente mais conhecido e, pela sua simplicidade, o mais utilizado. Por convenção, é estabelecido, em geral, o valor mínimo aceitável de CUC de 80%. O CUC é função do módulo dos desvios em relação à média; desvios negativos e positivos têm o mesmo efeito. Gomide et al. (1980b), Rodrigues et al. (1997) e Rocha et al. (1999) avaliaram a sensibilidade de diferentes coeficientes de uniformidade a mudanças nos fatores operacionais dos sistemas de irrigação e concluíram que os espaçamentos entre linhas laterais e aspersores (difusores ou emissores), seguidos pela velocidade e direção do vento, pelo diâmetro dos bocais e pela pressão de serviço, foram os fatores operacionais que mais influenciaram nas variações dos coeficientes (Figura 11). Entretanto, o tempo de duração dos testes de distribuição de água e a altura de posicionamento dos aspersores, difusores ou emissores foram os que menos influenciaram. Teoricamente todos os coeficientes de uniformidade, CUC, coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), coeficiente de uniformidade estatístico (CUE) e eficiência padrão da uniformidade de distribuição (UDH), podem ser usados indistintamente na determinação do desempenho dos sistemas de irrigação.

Os sistemas de irrigação são geralmente avaliados apenas com base nas medições de distribui-

Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC)

Esse coeficiente é o mais conhecido e usado, adota o desvio médio absoluto como medida de dispersão (Christiansen, 1942).

Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE)

Esse coeficiente usa o desvio-padrão como medida de dispersão (Wilcox; Swailles, 1947).

Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)

Esse coeficiente considera a razão entre a média do menor quartil e a lâmina média coletada em 100% da área (Criddle et al., 1956).

Eficiência Padrão da Uniformidade de Distribuição (UDH)

Baseia-se no desvio-padrão como medida de dispersão.

Foto: Reinaldo Lúcio Gomide



Figura 11. Uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão convencional, em condições de campo.

ção de água na superfície do solo. No entanto, a extração de água no perfil do solo, na profundidade efetiva da raiz, depende da capacidade de armazenamento de água do solo, da profundidade da raiz e da espécie de cultura. Por causa disso, a distribuição da água no perfil do solo na área irrigada é tão importante quanto a distribuição que ocorre na sua superfície, devendo ser considerada na avaliação, visando propiciar um manejo de água eficiente e econômico (Figura 12). Daí a importância de se medir e avaliar a água no perfil do solo, em vários pontos da área irrigada, para o correto acompanhamento e avaliação da eficiência de funcionamento dos sistemas de irrigação.

Nos testes de avaliação e análise da distribuição superficial de água aplicada pelos sistemas de irrigação, os coeficientes de uniformidade CUC, CUE, CUD e UDH são calculados pelas seguintes equações:

$$CUC = 100[(1 - \sum_{i=1}^{n} |x_i - x_{méd}|)/n\, x_{méd}] \quad (6)$$

$$CUE = 100[1 - (Sd/x_{méd})] \quad (7)$$

$$\text{CUD} = 100(x_{25}/x_{méd}) \quad (8)$$

$$UDH = 100[1 - 1{,}27(Sd/x_{méd})] \quad (9)$$

em que CUC é o coeficiente de uniformidade de Christiansen (%); x_i são os valores de lâmina de água aplicada ou precipitação, acumulados em cada coletor de ordem i (mm); $x_{méd}$ é a média geral dos valores de lâmina de água aplicada ou precipitação (mm); n é o número total de coletores usados (pontos amostrados); CUE é o coeficiente de uniformidade estatístico (%); Sd é o desvio-padrão dos valores de precipitação (mm); CUD é o coeficiente de uniformidade de distribuição (%); x_{25} é a média do menor quartil ou dos 25% menores valores de precipitação medidos nos coletores (mm); e UDH é a eficiência padrão da uniformidade de distribuição (%).

O sistema de irrigação por pivô central tem a particularidade de ter mobilidade contínua e trajetória circular, o que lhe impõe peculiaridades com relação a características hidráulicas de

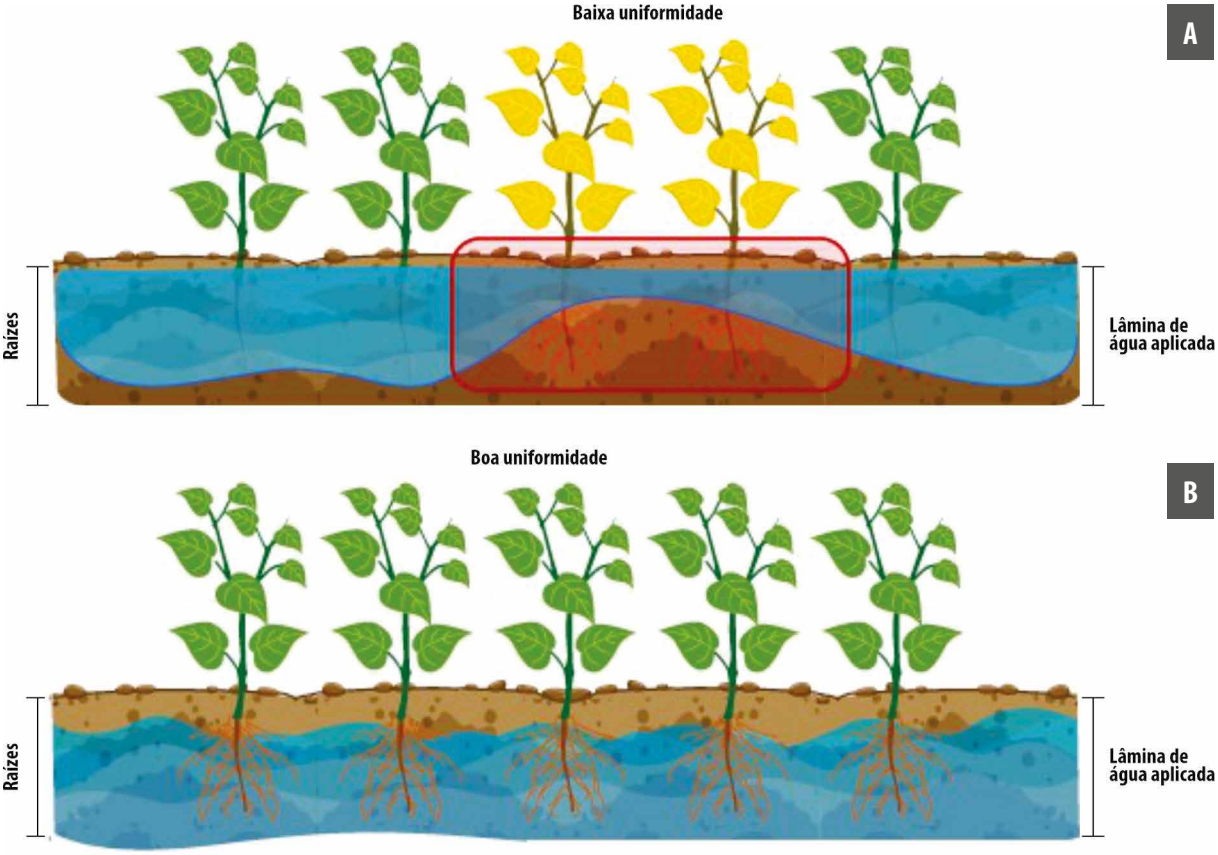


Figura 12. Baixa (A) e boa (B) uniformidade de distribuição da lâmina de água aplicada no perfil do solo, na região das raízes da cultura, resultado diretamente da uniformidade de aplicação e distribuição de água pelo sistema de irrigação na superfície do solo.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

seus difusores ou sprays na linha lateral do pivô. Cada grupo de difusores de todos os vãos entre duas torres tem vazões que crescem radialmente, para atender à demanda crescente de cobrir áreas gradualmente maiores; a primeira torre é responsável pela menor área, enquanto a última torre irriga a maior área. Por essa razão, ao se determinar o coeficiente de uniformidade para pivô central, não se podem considerar os aspersores como iguais, e, portanto, a eles são dados pesos diferentes, de modo a obter uma média ponderada ao final.

Heermann e Hein (1968) adaptaram o CUC ao sistema pivô central, cujos coletores de água são dispostos radialmente, e cada coletor representa uma faixa irrigada circular que é função de sua distância radial. Nessas condições, o CUC é denominado de coeficiente de uniformidade de Christiansen radial, $CUCr$ (Keller; Bliesner, 1990) e é calculado pela seguinte equação:

$$CUCr = 100\left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} Ni\left|Li - \frac{\sum_{i=1}^{n}(LiNi)}{\sum_{i=1}^{n} Ni}\right|}{\sum_{i=1}^{n}(LiNi)}\right] \quad (10)$$

em que Li é a lâmina coletada no coletor de ordem i (mm); Ni é o posicionamento do coletor de ordem i, que identifica o número de ordem do coletor e está relacionado à distância do centro de rotação do pivô à posição i (m); e n é o número total de coletores radialmente dispostos.

Avaliação da distribuição de água no sistema de irrigação por aspersão convencional

O método mais utilizado na avaliação e determinação da uniformidade da aplicação e distribuição de água no sistema de irrigação por aspersão convencional é o que emprega os testes de distribuição de água de um único aspersor. Ele opera em diversas condições de campo, com os coletores dispostos sobre o solo em forma de malha quadrada, com 2 m a 3 m de lado, avaliando-se alguns dos principais fatores que influenciam a uniformidade de aplicação e distribuição de água, tais como vento, espaçamento dos aspersores, pressão de serviço, altura do tubo de elevação, conforme ilustra a Figura 13 (Christiansen, 1942; Davis, 1966; Branscheid; Hart, 1968; Gomide et al., 1980a, 1980b). O tempo de duração de cada teste deve ser de preferência, pelo menos, 1 hora.

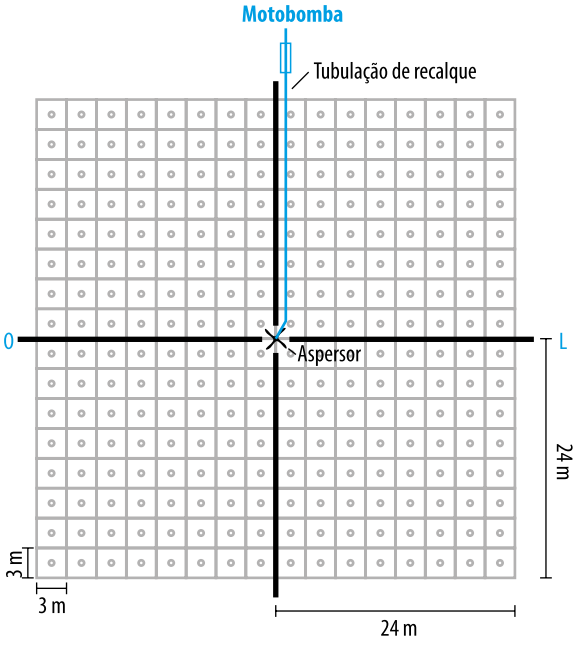


Figura 13. Distribuição dos coletores (pluviômetros--centro do quadrado), malha de 3 m x 3 m, em relação ao único aspersor (centro), na área de realização de testes da aplicação e distribuição de água.

Ilustração: Reinaldo Lúcio Gomide.

A direção e a velocidade média do vento devem ser medidas em intervalos de cerca de 15 minutos, para analisar a influência desses parâmetros meteorológicos sobre o perfil de aplicação de água, fazendo uso de um anemômetro portátil, que deve ser instalado a 2 m de altura, em relação ao solo (Figura 14).

A pressão de serviço, para cada teste, deve ser determinada no bocal ejetor do aspersor, utilizando-se um manômetro de Bourdon, graduado em kg cm^{-2} (bar), com precisão de 0,1 kg cm^{-2}, acoplado a um tubo de Pitot; ela deve ser ajustada por meio de um registro de gaveta, localizado na tubulação de recalque (Figura 14). Outro ponto importante é a medição da vazão do aspersor, em cada teste, que deve ser medida pelo processo direto, que consiste em usar um cronômetro e um recipiente de volume conhecido (pode ser usado um balão de vidro, com gargalo curto e estreito – 10 cm de comprimento e diâmetro de 4,4 cm) de pelo menos 40 L. Para medir o tempo gasto para completar esse volume, deve ser utilizado um cronômetro. Na medição da vazão do aspersor, devem ser conectados aos bocais do aspersor pedaços de mangueira de 25,4 mm de diâmetro e 1,5 m e 3,0 m de comprimento. Desse modo, consegue-se desviar os jatos d'água de cada bocal para o interior do balão. Devem ser realizadas pelo menos cinco repetições para determinar a vazão média de cada bocal. A vazão do aspersor é dada pela soma das vazões de seus bocais (caso de aspersor com dois bocais, ejetor e propulsor).

Os testes e as avaliações da aplicação e distribuição de água de campo, envolvendo um único aspersor, disposto na posição central da área, devem ser realizados obedecendo às recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (NBR, 7749-1 (1999a), NBR ISSO 7749-2 (1999b), de acordo com a seguinte rotina:

1) Colocação da seção de captação de todos os pluviômetros virada para baixo.

2) Colocação do sistema em funcionamento.

Fotos: Reinaldo Lúcio Gomide

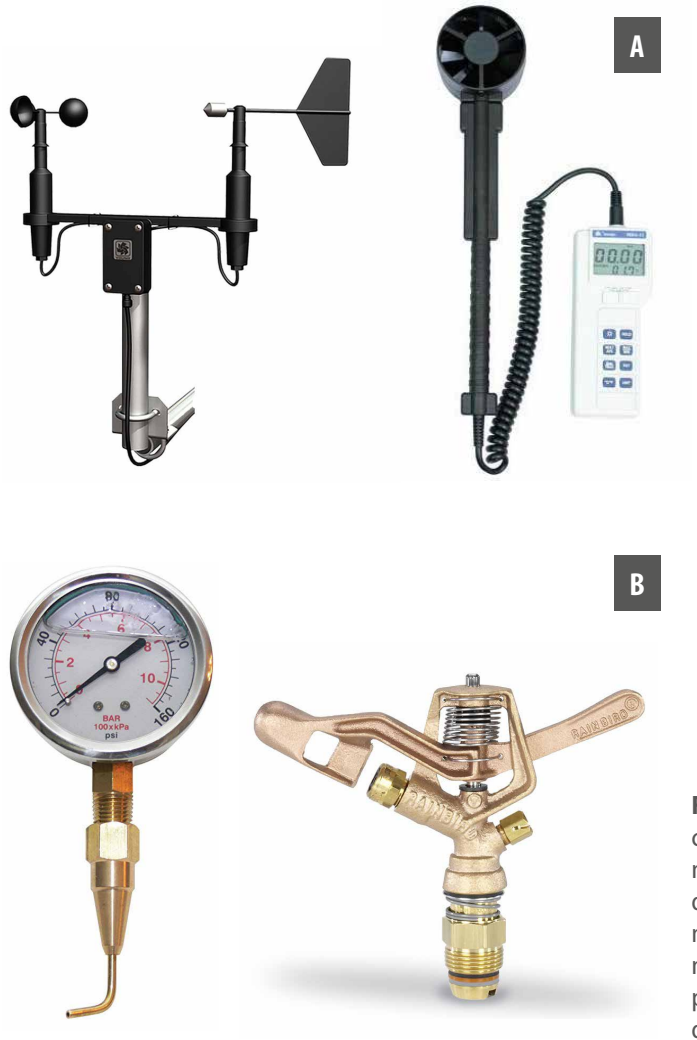


Figura 14. Material utilizado nas avaliações da aplicação e distribuição de água de um único aspersor no campo: anemômetros portáteis digitais com datalogger, para medições de direção e velocidade média do vento (A); e manômetro de Bourdon, banhado em glicerina, acoplado a um tubo de Pitot, para medição da pressão de serviço no bocal ejetor do aspersor (B).

3) Ajustamento da pressão de serviço desejada.

4) Determinação da vazão do aspersor.

5) Colocação dos pluviômetros em posição de trabalho, depois do desligamento da bomba.

6) Colocação de um volume conhecido (200 mL é muito usado) de água em pelo menos quatro coletores, em cada quadrante, a fim de quantificar as perdas de água por evaporação, durante o período de realização dos testes e das leituras de todos os pluviômetros.

7) Início do teste/sistema posto novamente em funcionamento.

8) Verificação da velocidade de rotação do aspersor.

9) Realização de leituras no anemômetro, a intervalos de 10 minutos.

10) Desligamento da moto-bomba, depois de transcorrido o tempo mínimo necessário para a realização do ensaio.

11) Medição do conteúdo de água de cada pluviômetro em termos volumétrico ou altura de lâmina de água coletada.

12) Acréscimo das perdas de água por evaporação, quantificadas no item 6, aos volumes de água (ou alturas de lâminas de água) medidos de cada pluviômetro.

Exemplo: teste de uniformidade de distribuição de água em aspersor

Um exemplo de cálculo de CUC para os dados de aplicação e distribuição de água obtidos nos coletores (pluviômetros), em relação a um único aspersor (aspersão convencional), na área de realização de testes, é apresentado a seguir na Tabela 1.

No cálculo do CUC, para aspersores no espaçamento 18 m x 18 m, são somados os valores dos volumes sobrepostos. Para facilitar no cálculo, na Tabela 1, as linhas estão identificadas por seis números (de 1 a 6) e as colunas, por seis letras (de A a F), as quais são resultados da divisão da simulação do espaçamento entre aspersores 18 m x 18 m pelo espaçamento entre coletores 3 m x 3 m.

Portanto, somando-se todas as quatro quadrículas (células) correspondentes a A1 (0 + 0 + 0 + 27), obtém-se o valor 27; a A2 (0 + 0 + 0 + 25), obtém-se 25; a C5 (8 + 4 + 0 + 0), obtém-se 12; e assim sucessivamente para todas as 36 quadrículas (Tabela 2).

Acrescentando-se os 3 mL evaporados, obtêm-se os totais apresentados na Tabela 3. Os valores dos desvios (mL) estão na Tabela 4.

O cálculo final do CUC é de 63,234%. Portanto, um valor muito baixo para a irrigação por aspersão.

Tabela 1. Teste de uniformidade em aspersores (volumes obtidos, em mL, em coletores dispostos em espaçamento de 3 m x 3 m entre si).

Local: Embrapa Milho e Sorgo						**Data: 27/5/1994**						
Diâmetros dos bocais: 4,8 mm x 5,5 mm						**Altura da haste: 1,5 m**						
Pressão de serviço: 300 kPa						**Vazão média: 3,42 $m^3 h^{-1}$**						
Tempo por rotação: 2 min 38 s						**Evaporação: início: 200 mL; final: 197 mL**						
Hora: início: 13:58; final: 14:28 (30 min)						**Malha: 3 m x 3 m**						
Diâmetro do coletor: 7,8 cm						**Área do coletor: 47,78 cm^2**						
Dados coletados (mL)												
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	3	0,5	0	0	0	0	0
4	0	0	0	4	9	15	19	15	10	0	0	0
5	0	0	8	24	33	32	29	18	4	0	0	0
6	0	2	20	27	35	34	33	26	10	0	0	0
1	0	2	10	27	32	31	27	25	6	0	0	0
2	0	0	9	21	25	30	25	16	2,5	0	0	0
3	0	0	3	10	13	13	4	3	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obs.: o aspersor encontra-se no centro (cruzamento) das medidas de 34 mL, 33 mL, 31 mL e 27 mL (em azul).

Tabela 2. Resultado do somatório dos volumes (em mL) dos coletores para uma simulação de espaçamento entre aspersores de 18 m x 18 m.

Colunas → / Linhas ↓	A	B	C	D	E	F
1	27	27	16	27	32	31
2	25	16	11,5	21	25	30
3	4	3	3	10	16	13,5
4	15	10	4	9	15	19
5	29	18	12	24	33	32
6	33	28	30	27	35	34

Tabela 3. Acréscimo do volume evaporado de 3 mL aos resultados da Tabela 2.

Colunas → / Linhas ↓	A	B	C	D	E	F
1	30	30	19	30	35	34
2	28	19	14,5	24	28	33
3	7	6	6	13	19	16,5
4	18	13	7	12	18	22
5	32	21	15	27	36	35
6	36	31	33	30	38	37
Somatório total: 853						
Volume médio (mL): 23,694						
Lâmina média : 5 mm						

Tabela 4. Valores dos desvios dos dados oriundos da Tabela 3 (em mL).

Colunas → / Linhas ↓	A	B	C	D	E	F
1	6,31	6,31	4,69	6,31	11,31	10,31
2	4,31	4,69	9,19	0,31	4,31	9,31
3	16,69	17,69	17,69	10,69	4,69	7,19
4	5,69	10,69	16,69	11,69	5,69	1,69
5	8,31	2,69	8,69	3,31	12,31	11,31
6	12,31	7,31	9,31	6,31	14,31	13,31
Somatório dos desvios: 313,61						
CUC (%): 63,234 (Muito baixo)						

CUC: coeficiente de uniformidade de Christiansen.

Avaliação da distribuição de água no sistema de irrigação por lateral móvel

O abastecimento de água de um sistema de irrigação por lateral móvel é feito de uma fonte, localizada o mais próximo possível (rio, lagoa, etc.), por meio de adutora, hidrantes e bombeamento. O sistema de alimentação de água geralmente é feito por mangueira flexível, que é conectada por meio de engate rápido a hidrantes distribuídos ao longo de uma linha principal pressurizada (normalmente enterrada), ou por canal (valeta retilínea em nível construída no centro ou na lateral da área a ser irrigada), de onde a água é bombeada (Figura 15). A mangueira usada é de polietileno flexível, de 4" ou 6" de diâmetro, dependendo da vazão utilizada, com comprimento variando de 100 m até 200 m.

No funcionamento do sistema, a mangueira é conectada ao hidrante e ao engate do carro de comando. Previamente, o cabo de aço ou a própria mangueira é esticada ao longo do percurso ou faixa de molhamento e fixada ao final da área a ser irrigada. À medida que o cabo ou a mangueira vai sendo enrolada pelo carretel, o equipamento desloca-se continuamente, irrigando uma faixa que é função da vazão, da pressão de serviço da barra de difusores móvel e da velocidade de deslocamento. Ao final do percurso, é feita a operação de recolhimento da mangueira ou cabo e a mudança do equipamento para a posição da faixa seguinte a ser irrigada.

A uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação linear móvel é avaliada com base na metodologia apresentada por Merriam e Keller (1978). A Figura 16 ilustra a disposição dos coletores de água e equipamentos de controle e registro de pressão, vazão e umidade no solo nos testes de aplicação e distribuição de água aplicada nesse sistema de irrigação, dotado de carro de comando sobre rodas pneu-

Fotos: Cleber Morais Guimarães



Figura 15. Sistema de irrigação por lateral móvel em cultura de arroz, ilustrando a barra com os difusores de uma faixa irrigada (A) e a alimentação de água realizada por meio de mangueira flexível, conectada a hidrantes distribuídos ao longo de uma linha principal pressurizada enterrada (B).

máticas, painel de controle, alimentação por mangueira central, carreta enroladora de cabo de aço e âncora, linha lateral móvel com difusores, moto-bomba e hidrantes.

A pressão de serviço do sistema é determinada utilizando-se manômetros de Bourdon, imersos em glicerina e graduados de 0 KPa a 600 KPa, com variação de divisão de 10 KPa. Eles devem ser conectados em mangueiras plásticas com 0,20 m de comprimento e 0,008 m de diâmetro e fixados, próximo ao painel de controle e à conexão da linha lateral móvel, na tubulação da pequena torre do carro de comando, nas duas extremidades da linha lateral móvel com os difusores e no hidrante da mangueira de alimentação do sistema (Figura 16). A pressão de serviço é regulada por meio de dois registros de gaveta, um instalado perto do hidrante, ao qual é conectada a mangueira de alimentação, e outro no carro de comando próximo à conexão da barra móvel (linhas laterais com os difusores).

A área de realização dos testes deve apresentar relevo suavemente plano, com no máximo 2,0% de declividade transversal do terreno, em relação ao sentido de deslocamento do carro, de preferência sem cobertura vegetal. Quando houver vegetação, certificar-se de que a altura dos coletores esteja acima do dossel da cultura para evitar a interceptação de água pelas folhas das plantas. A coleta da água aplicada pelos difusores na superfície do solo é feita com coletores, que podem ser de latas de alumínio de 0,10 m de diâmetro e capacidade de 1,0 L ou então de plástico com hastes e proveta, que possuem 0,08 m de diâmetro e 0,102 m de altura e são apoiados sobre hastes de 0,75 m de altura, as quais, uma vez instaladas no campo, deixa a seção de captação de água de cada coletor nivelada a aproximadamente 0,60 m da superfície do solo.

Recomenda-se instalar os coletores na posição transversal da área útil irrigada, no sentido de deslocamento do sistema de irrigação linear móvel, uma linha de coletores, espaçados de no máximo 2 m, para medições da aplicação de água na lateral móvel com os difusores (Figura 16). Essa linha de coletores deve ser posicionada em pelo menos três pontos da área útil irrigada (ou parcela com cultura), situados respectivamente a distâncias equivalentes a 1/4, 2/4 e 3/4 do comprimento total dessa área ou parcela, no início, meio e final da faixa irriga-

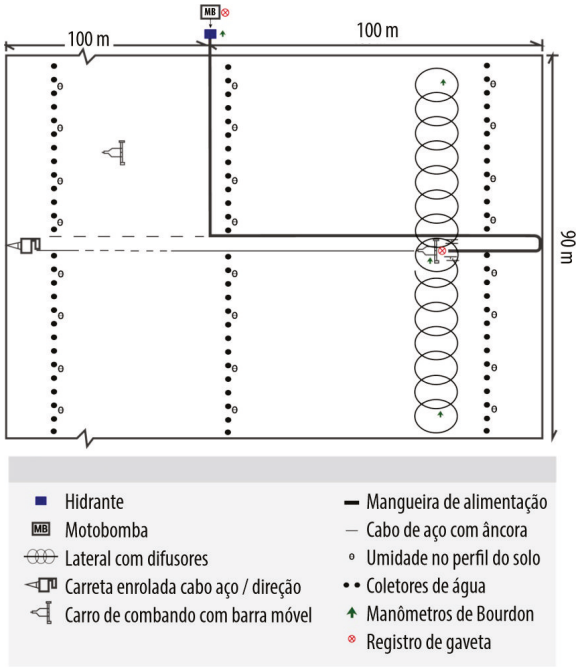


Figura 16. Disposição dos coletores de água e equipamentos de controle e registro de pressão, vazão e umidade no solo, para os testes de aplicação e distribuição de água em um sistema de irrigação por lateral móvel, dotado de carro de comando sobre rodas pneumáticas, painel de controle, alimentação por mangueira central, carreta enroladora de cabo de aço e âncora, linha lateral móvel com difusores, moto-bomba e hidrantes.

Ilustração: Reinaldo Lúcio Gomide.

da, respectivamente. Recomenda-se, também, realizar medições do teor de água no perfil do solo e amostragens de solo em pelo menos oito posições ao longo da linha transversal de coletores, espaçados de forma equidistantes, em no mínimo quatro profundidades no perfil do solo (Figura 16).

Os dados climáticos relativos à temperatura e umidade relativa do ar podem ser obtidos de uma estação meteorológica automática (EMA), localizada próximo ao local dos testes (100 m a 200 m, no máximo). A velocidade e direção do vento devem ser medidas a intervalos de pelo menos 10 minutos, com o sensor anemômetro instalado a 2,0 m de altura da superfície do solo (Figura 17). A medição da evaporação da água ocorrida durante os testes deve ser realizada em quatro coletores colocados próximo à área útil da faixa irrigada, com volume conhecido de água, adicionado no seu interior por ocasião do início do teste. Esses dois coletores devem estar fora do raio de ação da água da lateral móvel com os difusores em avaliação.



Foto: Reinaldo Lúcio Gomide

Figura 17. Registro de direção e velocidade média do vento por uma estação meteorológica automática, nas avaliações da aplicação e distribuição de água de um sistema de irrigação por lateral móvel.

A rotina e sequência dos procedimentos durante a realização dos testes no sistema de irrigação por lateral móvel é a que se segue:

1) Calibração, regulagem e instalação dos equipamentos de medição do teor de água do perfil solo (sondas de nêutrons ou capacitivas, hastes TDR, blocos de resistência elétrica, etc.).

2) Determinação do teor médio de umidade do solo atual à base de volume na área útil, por método gravimétrico ou leituras nos equipamentos de medição do teor de água do perfil solo.

3) Cálculo da lâmina de água necessária para elevar o teor de água atual do solo à capacidade de campo até a profundidade de solo estudada.

4) Determinação do tempo de irrigação do teste com base nas informações de vazão e intensidade de precipitação da lateral móvel com os difusores, obtidas nos catálogos dos fabricantes do sistema de irrigação.

5) Colocação da linha transversal dos coletores de água (pluviômetros) com a seção de captação nivelada e voltada para cima.

6) Colocação de 200 mL de água em cada um dos quatro coletores destinados à medição da evaporação de água no início do teste.

7) Acionamento da moto-bomba do sistema de irrigação e início da irrigação (teste).

8) Regulagem da pressão de serviço por meio de registros de gaveta e manômetros, realizada no início do teste, com monitoramento e ajustes realizados de 15 em 15 minutos, durante toda a duração da irrigação.

9) Realização das leituras de velocidade e direção do vento feito no anemômetro da EMA, a cada 10 minutos.

10) Desligamento da moto-bomba do sistema de irrigação, depois de transcorrido o tempo de irrigação.

11) Medição do volume de água coletado em cada coletor (pluviômetro), tanto nos destinados à medição da evaporação de água (situados fora da área útil) como nos coletores dentro da área útil, para a determinação dos coeficientes de uniformidade de distribuição de água na superfície do solo, com o uso de provetas graduadas de 100 mL, 250 mL, 500 mL e 1.000 mL.

12) Determinação do teor médio de água do solo final à base de volume na área útil, por método gravimétrico ou leituras nos equipamentos de medição do teor de água do perfil do solo.

O período de duração do teste é uma função do tempo de molhamento da linha transversal de coletores, que depende diretamente da velocidade de deslocamento do carro de comando junto com a lateral móvel. O início do teste é registrado quando o jato d'água da lateral móvel atinge a linha de coletores, e o final é marcado quando esse mesmo jato d'água deixa de ser coletado pela linha transversal de coletores durante a passagem do sistema.

Avaliação da distribuição de água no sistema de irrigação por pivô central

Nos testes clássicos de avaliação e determinação da aplicação e distribuição de água no sistema de irrigação por pivô central, os coletores ou pluviômetros devem ser instalados no campo, dispostos em duas linhas radiais, formando um ângulo de três graus, em pelo menos três diferentes posições, de acordo com a topografia da área irrigada e movimentação angular da linha lateral/difusores, isto é, em declive, em nível e em aclive (Merriam et al., 1973; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998). No entanto, na prática, utiliza-se a disposição dos coletores de água no campo em uma única linha radial, conforme ilustra a Figura 18, com o equipamento deslocado para a parte mais alta da área irrigada, ou seja, posição do terreno de maior aclive, para verificar todas as medidas de pressões, já que esta é a posição mais crítica do dimensionamento hidráulico do pivô central, em que deverá ser testada e avaliada qualquer deficiência de pressão e, consequentemente, de distribuição de água.

A partir do ponto pivô ou centro, os coletores devem ser distribuídos e numerados em ordem crescente, espaçados de 3 m e 5 m, para o caso de difusores e aspersores de impacto, respectivamente. Como representam áreas maiores, conforme aumenta a distância em relação ao ponto pivô, os volumes de água coletados devem ser ponderados, isto é, deve-se multiplicar o volume coletado em cada coletor, distribuído no sentido radial, pelo respectivo número de ordem correspondente à sua posição (Figura 19). Para determinar a perda por evaporação de água, durante a realização do teste, no momento em que os aspersores/difusores atingirem a linha radial de coletores, quatro pluviômetros com volume de água conhecido devem ser separados e mantidos próximo à área do teste. No final do teste, por diferença, deve ser



Foto: Reinaldo Lúcio Gomide

Figura 18. Disposição dos coletores em uma única linha radial na avaliação da distribuição de água de um pivô central, deslocado para a parte mais alta da área irrigada.

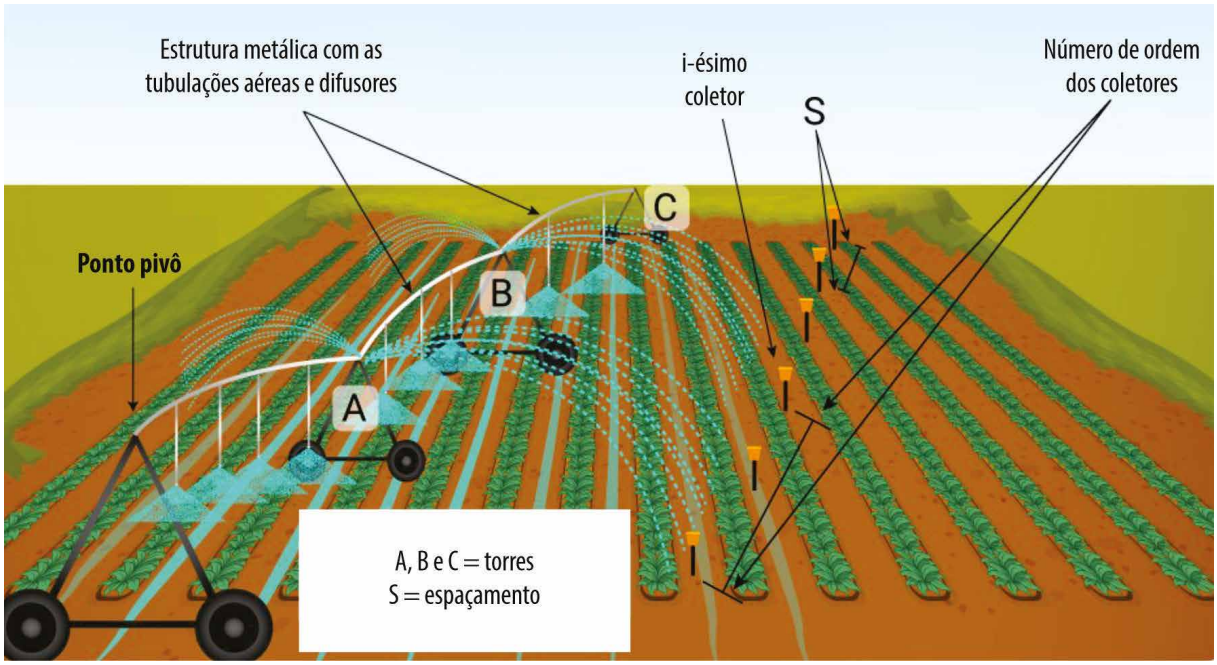


Figura 19. Distribuição dos coletores em uma única linha radial e numeração em ordem crescente a partir do ponto pivô (centro) nos testes de campo de avaliação da distribuição de água de um pivô central.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

determinada a média das perdas de água por evaporação.

A regulagem da velocidade de deslocamento do pivô central deve ser feita no seu painel de controle, por meio do relé percentual. O sistema deve ser testado com, pelo menos, três velocidades, 100%, 40% e 20%; e para cada velocidade devem ser realizadas três repetições. Durante cada teste, deve ser determinada a velocidade de deslocamento da unidade propulsora de extremidade (V) ou última torre do pivô, estabelecendo-se, com estacas, uma distância de 10 m a 20 m ao longo da trilha da roda externa dessa torre, formando um pequeno arco com a linha de raio de coletores. Com um cronômetro, procede-se a medição do tempo (T) necessário para que essa torre faça o percurso entre as estacas. O ideal é medir essa velocidade (V) nas posições de movimentação angular da linha lateral com os difusores de declive, nível e aclive; e, no final, como velocidade do sistema, deve ser considerada a média das medições dessas três posições.

Para calcular o tempo (T) necessário para que o sistema complete uma revolução, deve-se dividir o perímetro da circunferência, descrito pela roda externa, pela velocidade da unidade propulsora da extremidade (V). A área irrigada deve ser dividida em quadrantes, cada um tendo como bissetriz o raio de distribuição da linha de coletores. Dessa maneira, é possível determinar o tempo gasto pelo sistema para percorrer o perímetro da circunferência irrigada, com a respectiva velocidade média de deslocamento do sistema, correspondente a um raio determinado. A partir do raio irrigado, determina-se a área irrigada de cada setor, e, a partir do raio médio irrigado, a área total irrigada.

A lâmina de água total média aplicada por revolução (L), em mm, do sistema deve ser calculada com a soma da lâmina média de evaporação da água (ev_m), em mm, medida nos quatro pluviômetros separados para essa finalidade, com a lâmina média da água aplicada total ponderada coletada (X_{mp}), em mm, considerando todos os pluviômetros, ou seja,

$$L = X_{mp} + ev_m \quad (11)$$

Com essa lâmina (L), a vazão estimada do sistema (Qe, em m^3h^{-1}) pode ser obtida por meio da seguinte expressão:

$$Qe = (10AL)/T \quad (12)$$

O teste também requer uma estimativa da largura da faixa molhada (F), em m, que deve ser determinada perpendicular à linha lateral próxima à unidade propulsora da extremidade. Dividindo F pela velocidade de deslocamento da unidade propulsora da extremidade (V), obtém-se o tempo de molhamento na extremidade (TE).

A velocidade e direção do vento devem ser medidas por meio de um anemômetro portátil (Figura 14), que deve ser instalado a 2 m de altura do solo, na área em que é realizado o teste de avaliação de desempenho do pivô, ou então por uma EMA (Figura 17) instalada nas proximidades. A pressão de operação do sistema (serviço) deve ser determinada por meio de um manômetro de Bourdon (Figura 14), com graduação de pelo menos 0,2 Kgf cm^{-2}, que deve ser acoplado à tubulação do pivô.

Durante a realização dos testes de um sistema de irrigação por pivô central, devem ser seguidas as seguintes rotina e sequência dos procedimentos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998):

1) Deslocar o equipamento para a parte mais alta da área irrigada, posição crítica do dimensionamento hidráulico do pivô central.

2) Ajustar na central programável, painel de comando, a velocidade de giro do pivô central, que possibilita diferentes regulagens de velocidade, propiciando a aplicação da irrigação com diferentes lâminas de

água (recomenda-se testar três velocidades: 100%, 40% e 20%).

3) Realizar as medidas das pressões na moto-bomba com o sistema em funcionamento e o registro de pressão fechado (*shutt-off*) e, posteriormente, com o registro aberto; no ponto do pivô – tubo de subida do pivô e no último difusor/aspersor – saída do emissor, com um manômetro de Bourdon, de precisão de 0,2 Kgf cm^{-2}.

4) A partir do ponto pivô ou centro, distribuir e numerar em ordem crescente os coletores, que devem ser igualmente espaçados entre si de 3 m e 5 m, para o caso de difusores e aspersores de impacto, respectivamente, tomando-se a precaução de evitar o caminho percorrido pelas rodas das torres.

5) Determinar a largura da faixa molhada (F), em m, pelo pivô (diâmetro de cobertura do difusor), junto à última torre ou unidade propulsora da extremidade. Mede-se com uma trena, quando o pivô sobrepuser a linha de coletores.

6) Determinar a velocidade de deslocamento da unidade propulsora de extremidade (V) ou última torre do pivô, marcando-se, com estacas, uma distância de 10 m a 20 m ao longo da trilha da roda externa dessa torre, formando um pequeno arco com a linha de raio de coletores nas proximidades. Usando um cronômetro, procede-se a medição do tempo (t) necessário para que essa torre faça o percurso entre essas estacas.

7) Medir a velocidade e direção do vento por meio de um anemômetro portátil, instalado a 2 m de altura do solo, juntamente com a temperatura e umidade relativa do ar de uma EMA nas proximidades da área do teste.

8) Após a passagem completa do equipamento sobre a linha radial de coletores, medir o volume de água coletado em cada coletor com auxílio de uma proveta de 100 mL, 250 mL, 500 mL e 1.000 mL.

9) Adicionar, ao volume de água medido em cada coletor, a lâmina média de água evaporada (ev_m), em mm, obtida dos quatro pluviômetros colocados separados fora da área do teste.

10) No quadro de comando do conjunto moto-bomba e no painel de comando do pivô, medir o consumo de energia do sistema, de acordo com a corrente elétrica, relacionado com a tensão da rede e o número de horas de operação do equipamento: informação retirada do horímetro, durante o período de duração do teste.

11) Proceder à sequência de cálculos do teste de uniformidade de aplicação e distribuição de água do pivô central, conforme ilustra o exemplo a seguir (Tabela 5).

Tabela 5. Dados de lâmina de água coletada (mm) obtidos em coletores instalados no sentido radial em teste de uniformidade de aplicação e distribuição de água em pivô central da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Vão nº	Nº de ordem do coletor (Ni)	Lâmina coletada no coletor de ordem i (Li) (mm)	Lâmina coletada ponderada (LiNi) (mm)	Desvio (Si) (mm)	Desvio ponderado (Spi) (mm)
1	1	0	0	5,67	5,67
1	2	0	0	5,67	11,34
1	3	2,0	6,0	3,67	11,01
1	4	2,6	10,4	3,07	12,28
1	5	3,5	17,5	2,17	10,85

Continua...

Tabela 5. Continuação.

Vão nº	Nº de ordem do coletor (Ni)	Lâmina coletada no coletor de ordem i (Li) (mm)	Lâmina coletada ponderada (LiNi) (mm)	Desvio (Si) (mm)	Desvio ponderado (Spi) (mm)
1	6	3,6	21,6	2,07	12,42
1	7	5,6	39,2	0,07	0,49
1	8	3,4	27,2	2,27	18,16
1	9	5,0	45,0	0,67	6,03
2	10	4,8	48,0	0,87	8,7
2	11	4,3	47,3	1,37	15,07
2	12	4,6	55,2	1,07	12,84
2	13	5,5	71,5	0,17	2,21
2	14	5,0	70,0	0,67	9,38
2	15	4,7	70,5	0,97	14,55
2	16	5,6	89,6	0,07	1,12
2	17	5,2	88,4	0,47	7,99
2	18	5,3	95,4	0,37	6,66
3	19	6,4	121,6	0,73	13,87
3	20	5,8	116,0	0,13	2,6
3	21	6,0	126,0	0,33	6,93
3	22	5,8	127,6	0,13	2,86
3	23	5,3	121,9	0,37	8,51
3	24	5,1	122,4	0,57	13,68
3	25	5,2	130,0	0,47	11,75
3	26	6,0	156,0	0,33	8,58
3	27	6,3	170,1	0,63	17,01
4	28	5,2	145,6	0,47	13,16
4	29	5,5	159,5	0,17	4,93
4	30	5,7	171,0	0,03	0,9
4	31	5,6	173,6	0,07	2,17
4	32	5,1	163,2	0,57	18,24
4	33	5,2	171,6	0,47	15,51
4	34	5,7	193,8	0,03	1,02
4	35	5,2	182,0	0,47	16,45
4	36	6,4	230,4	0,73	26,28
5	37	5,0	185,0	0,67	24,79
5	38	6,5	247,0	0,83	31,54
5	39	5,2	202,8	0,47	18,33
5	40	6,3	252,0	0,63	25,2
5	41	6,5	266,5	0,83	34,03
5	42	7,0	294,0	1,33	55,86
5	43	6,0	258,0	0,33	14,19

Continua...

Tabela 5. Continuação.

Vão nº	Nº de ordem do coletor (Ni)	Lâmina coletada no coletor de ordem i (Li) (mm)	Lâmina coletada ponderada (LiNi) (mm)	Desvio (Si) (mm)	Desvio ponderado (Spi) (mm)
5	44	5,5	242,0	0,17	7,48
5	45	6,0	270,0	0,33	14,85
6	46	5,3	243,8	0,37	17,02
6	47	3,5	164,5	2,17	101,99
6	48	5,0	240,0	0,67	32,16
6	49	7,2	352,8	1,53	74,97
6	50	7,1	355,0	1,43	71,5
6	51	5,3	270,3	0,37	18,87
6	52	4,3	223,6	1,37	71,24
6	53	5,8	307,4	0,13	6,89
6	54	0	0		
Soma	**1.485**	**269,7**	**7.959,8**	**46,02**	**972,13**
Soma até raio irrigado	**1.281**		**7.261,9**	**26,36**	**805,75**
Lâmina média coletada ponderada (Lp)		**5,67**			
Coeficiente de Uniformidade de Christiansen-raio irrigado (CUCr %)					**88,9**

O procedimento é ilustrado pelo exemplo a seguir.

Exemplo: teste de uniformidade de distribuição de água em pivô central

O exemplo de um teste de campo para determinação da uniformidade de aplicação e distribuição de água em pivô central, com os principais dados referentes às características técnicas do pivô, o número de ordem dos coletores, as lâminas de água coletadas e os cálculos necessários para determinação da lâmina média ponderada, é apresentado na Tabela 5.

Como a disposição dos coletores é radial, a proporção de cada segmento, em relação à respectiva área (A), não é linear, mas quadrática ($A = \pi R^2$). Por essa razão, faz-se necessário estabelecer um critério de ponderação para a representatividade de cada coletor com relação à sua lâmina coletada. Essa ponderação é feita com base no posicionamento (Ni) de cada coletor. Desse modo, o coletor de nº 1 tem $N_1 = 1$, o nº 2 tem $N_2 = 2$, e assim por diante até $Nn = n$. Seguindo esse raciocínio, as lâminas ponderadas (Lpi) serão obtidas respectivamente pelas ponderações $Lp_1 = L_1N_1$; $Lp_2 = L_2N_2$; $Lpn = LnNn$ (Tabela 5). Por conseguinte, extraindo e desdobrando a Equação 10, o somatório das lâminas coletadas ponderadas (Lpi), a lâmina média ponderada (Lp), o desvio (Si) e o desvio ponderado (Spi) são calculados por:

$$\sum_{i=1}^{n} Lpi = \sum_{i=1}^{n} LiNi$$

$$Lp = \left(\sum_{i=1}^{n} LiNi \Big/ \sum_{i=1}^{n} Ni\right);\ S_i = Li - Lp \qquad (13)$$

$$Spi = (Li - Lp)Ni\ ;\ \text{Somatório}\ Spi = \sum_{i=1}^{n} Spi$$

Os somatórios até o raio irrigado (coletor $n = 51$) das lâminas coletadas ponderadas

$$\left(\sum_{i=1}^{51} LiNi\right)$$

e dos números de ordem dos coletores

Teste de uniformidade de aplicação e distribuição de água em pivô central

Local: Embrapa Milho e Sorgo

Data: 27/5/94

Bocal do difusor: 17 mm

Velocidade da última torre: 33,5 m/21 min = 1,595 m/min = 95,7 m/h

Velocidade de teste: 80%

Pneu: 12.4.28 (diâm. = 120 cm)

1. Vão Nº 6 – Balanço;
2. Coletor Nº 51 – Raio irrigado;
3. Raio irrigado = 255 m;
4. Área útil = 20,4 ha

$(\sum_{i=1}^{51} Ni)$

são iguais a 7.261,9 e 1.281 (Tabela 5), respectivamente. A lâmina média coletada ponderada (Lp) até o raio irrigado é calculada pela equação:

$$Lp = (\sum_{i=1}^{51} LiNi \,/\, \sum_{i=1}^{51} Ni) = 7.261,9/1.281 =$$

$$= 5,6689 = 5,67 \text{ mm}$$

Avaliação da distribuição de água no sistema de irrigação localizada

O sistema de irrigação localizada é caracterizado pela aplicação da água no solo diretamente sobre um volume restrito do sistema radicular da cultura, propiciando, assim, a irrigação de apenas uma porção da superfície do solo com a formação de bulbos ou faixas contínuas molhadas, dependendo do espaçamento entre os emissores. A aplicação da água é sempre realizada em pequena intensidade e alta frequência, fazendo com que o solo mantenha o seu teor de água sempre próximo da capacidade de campo. Isso faz com que a evaporação da água, diretamente da superfície do solo, seja minimizada, uma vez que a aplicação de água não molha a totalidade da área irrigada (Figura 20).

Os sistemas de irrigação localizada são geralmente fixos, com tantas linhas laterais com emissores quantas forem necessárias para cobrir e suprir toda a área irrigada. No entanto, somente um determinado número de laterais (seção) opera, simultaneamente, com a finalidade de diminuir a capacidade do cabeçal de controle, o diâmetro das laterais (menor vazão) e a capacidade do conjunto moto-bomba (Figura 20).

Os procedimentos de campo para avaliação e determinação da aplicação e distribuição de água ao longo dos emissores na linha lateral, em um sistema de irrigação localizada, estão diretamente relacionados com a vazão desses emissores, que pode variar por causa de perdas por atrito ao longo dos tubos, da ligação dos emissores, dos ganhos e perdas de energia, pela elevação do terreno (topografia), qualidade dos tubos, enfim quaisquer obstruções e entupimento, e também pelos efeitos da temperatura da água no regime de fluxo e geometria dos emissores (Howell; Hiller, 1974).

Para essa avaliação de campo da vazão dos tubos e emissores, em seções do sistema pré-selecionadas, geralmente é utilizado um método volumétrico direto, por meio de provetas graduadas de 100 mL ou 500 mL e cronômetros,



Foto: Reinaldo Lúcio Gomide

Figura 20. Distribuição de água no sistema de irrigação localizada por gotejamento na cultura do milho, ilustrando os registros, filtros e válvulas volumétricas, que fazem com que a aplicação de água seja realizada apenas em algumas seções de linhas laterais.

com pelo menos três repetições. A pressão de serviço (operação) do sistema deve ser medida no início da linha principal, nas linhas secundárias, e nas linhas de emissores com um manômetro de Bourdon de leitura até 100 kPa, com uma precisão de 2 kPa (Figura 21). É recomendada a realização de pelo menos cinco testes de determinação de vazão em intervalos de 7 dias,

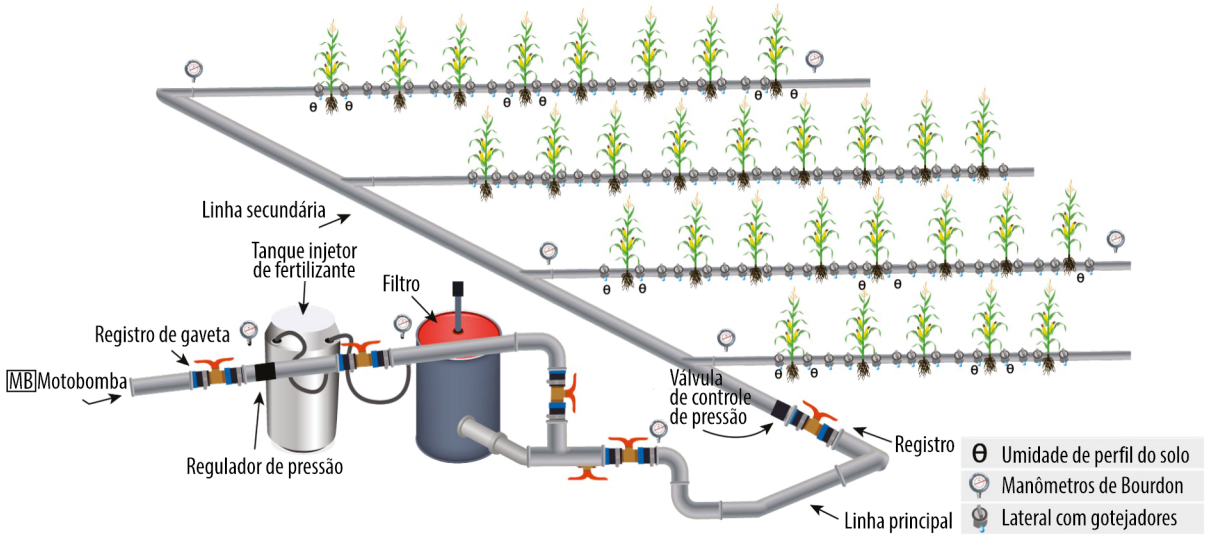


Figura 21. Sistema de irrigação localizada, composto de emissores (gotejadores), tubulações de polietileno (linhas laterais, secundárias e de derivação), para avaliação de aplicação e distribuição da água, junto com o cabeçal de controle, moto-bomba (MB), sistema de filtragem, injetores de fertilizantes e dispositivos de controle de pressão e vazão (manômetros de Bourdon e registros).

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

para que se detectem oscilações de condições de operação do sistema.

A uniformidade da quantidade de água aplicada e distribuída ao longo da lateral com os emissores é medida pela uniformidade de emissão (UE) e expressa em porcentagem. As baixas UE podem ser causadas por:

- Variabilidade nas características hidráulicas devido a deficiências no controle de qualidade do processo de fabricação de tubulações e emissores;
- Sistemas de irrigação/projetos mal dimensionados e operados;
- Sistemas de irrigação/projetos operando com pressões de serviço fora dos padrões recomendados;
- Alterações físicas nos sistema que podem ocorrer com o tempo de funcionamento devido a obstruções, entupimento, aos efeitos da temperatura da água no regime de fluxo e também à geometria de emissores.

A avaliação de campo da UE deve ser conduzida coletando-se os dados de vazão ao longo da linha lateral de emissores e em várias laterais no campo, com recipientes graduados (volume conhecido e/ou escala no caso de provetas) e cronômetros, segundo um esquema pré-determinado e a seguinte recomendação: obter e registrar os valores de vazão nas laterais avaliadas em quatro pontos (Figura 22), ou seja:

- No primeiro emissor;
- No emissor situado a ⅓ do comprimento;
- No emissor situado a ⅔ do comprimento;
- No último emissor.

Na linha de derivação secundária selecionada (seção) para a execução do teste, coletam-se esses dados de vazão dos emissores nas seguintes laterais (Figura 22):

- Primeira lateral;
- Na lateral situada a ⅓ da linha de derivação;
- Na lateral situada a ⅔ da linha de derivação;
- Na última lateral.

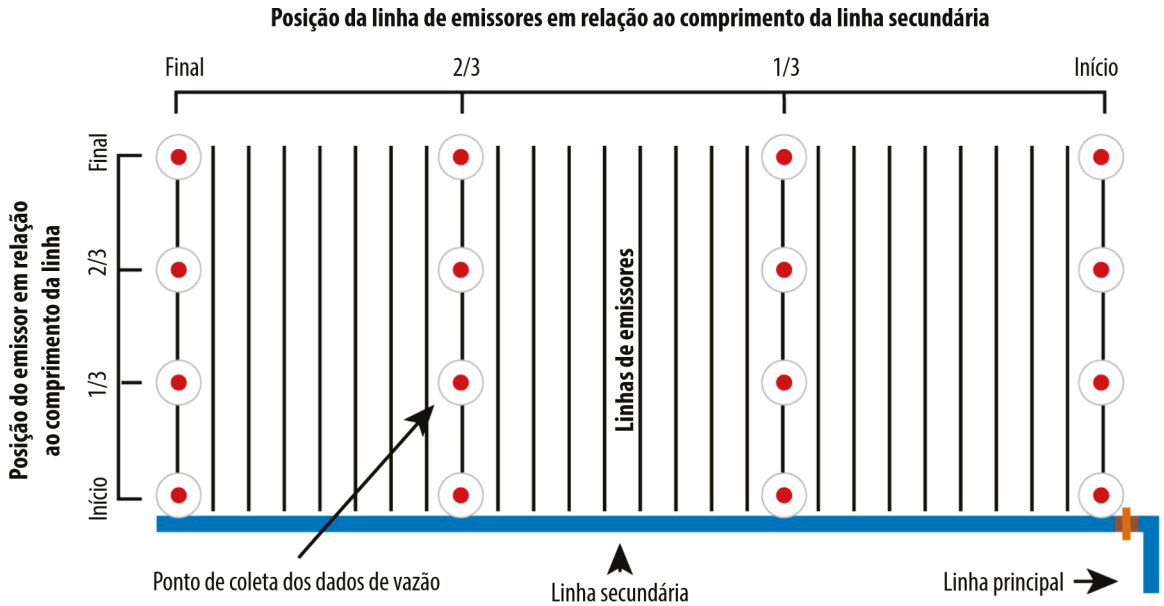


Figura 22. Ilustração dos pontos de coleta dos dados de vazão dos emissores na avaliação de campo da uniformidade de aplicação e distribuição de água, com as respectivas indicações de posições em relação aos comprimentos da linha secundária e das linhas de emissores, em um sistema de irrigação por gotejamento.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Desse modo, consegue-se formar um quadro abrangendo toda a seção do sistema de irrigação localizada selecionada.

Na irrigação localizada, a área umedecida é apenas uma parte (entre 30% e 70%) da área total cultivada, ficando o sistema radicular restrito a um volume de solo definido pela frente de molhamento, que se origina no emissor (gotejador ou microaspersor), volume esse de forma aproximadamente elíptica, chamado bulbo úmido. Para compensar a redução na área molhada, o método tem como característica a alta frequência de irrigação, com intervalos geralmente entre 1 e 3 dias, o que possibilita a manutenção do teor de água do solo sempre próximo da capacidade de campo.

A cultura, no entanto, torna-se mais dependente do grau de uniformidade do sistema, pois, no caso de haver muitos emissores com vazão abaixo da média, o comprometimento da produtividade será mais severo que nos outros métodos de irrigação. Por esse motivo, o conceito de uniformidade na irrigação localizada torna-se mais rigoroso, procurando-se prevenir principalmente contra a ocorrência de emissores com vazão inferior à média do que os casos de vazão superior. Keller e Bliesner (1990) recomendam que o cálculo do coeficiente de uniformidade seja feito de maneira diferenciada da aspersão, sendo chamado de UE, cuja representação matemática é a seguinte:

$$UE = q_{1/4}/q_m \quad (14)$$

em que $q_{1/4}$ é a vazão média do quarto menor, i.e., dos 25% de emissores com menor vazão; e q_m é a vazão média de todos os emissores.

O cálculo de UE pode ser ilustrado pelo exemplo no box abaixo.

Avaliação do desempenho de projetos de irrigação

A avaliação apenas do desempenho dos sistemas de irrigação, embora importante e imprescindível, não é suficiente para assegurar um bom desempenho da agricultura irrigada. É necessário avaliar o desempenho (performance) do projeto como um todo, do qual o sistema de irrigação é obviamente parte integrante. Além dos aspectos técnicos (irrigação, qualidade

Uniformidade de distribuição de água em irrigação localizada

Supondo que os dados do exemplo da Tabela 3, que é o resultado da sobreposição do teste de uniformidade de distribuição de água em aspersor, fossem resultados de um teste com emissores de irrigação localizada (por exemplo, microaspersão), como calcular o seu coeficiente UE?

Colunas → / Linhas ↓	A	B	C	D	E	F
1	30	30	19	30	35	34
2	28	19	14,5	24	28	33
3	7	6	6	13	19	16,5
4	18	13	7	12	18	22
5	32	21	15	27	36	35
6	36	31	33	30	38	37

Solução: os valores coletados são 36 ao todo. O quarto menor, i. e., os 25% de valores mais baixos, consiste dos nove menores valores, que são 6; 6; 7; 7; 12; 13; 13; 14,5 e 15, cuja média é 10,39. A média de todos os 36 valores é 23,69 e, portanto, UE será:

UE = (10,39/23,69)100 = 43,8%

É um valor consideravelmente menor que o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC = 63,23%) encontrado para os mesmos dados, o que significa que UE é um coeficiente mais rigoroso que CUC, uma vez que enfatiza o quartil da área irrigada que recebeu menos água.

da água e do solo, produtividade, fertilidade, aspectos sanitários, manejo de culturas, etc.), faz-se necessário associá-los com aspectos econômicos (relação custo-benefício, comercialização, custo de insumos, etc.) e até sociais (nível de renda do irrigante, escolaridade, saúde, ambiente, qualidade de vida, entre outros).

Entretanto, não existe ainda metodologia definida para fazer tal avaliação, que seja quantitativa e sistemática.

Uso de indicadores de desempenho

Para se chegar a tal metodologia, é preciso definir um elenco de indicadores de desempenho que, em conjunto, permita chegar a uma avaliação global de projetos, que possibilite a medição do desempenho deles e, assim, possa compará-los entre si, bem como acompanhar a evolução de cada um ao longo do tempo. Vários fatores contribuem para um bom, ou mau, desempenho de projetos/perímetros irrigados, quer sejam técnicos, econômicos e/ou sociais. Um dos aspectos primordiais na análise desses fatores é a possibilidade de monitorá-los, ou seja, transformá-los de alguma maneira em parâmetros mensuráveis. O nível desse monitoramento deverá estar entre o desejável e o viável, considerando-se, para isso, o padrão de avaliação a que se pretende proceder e os custos operacionais necessários à medição dos indicadores (Brito, 1986).

No Brasil, diversos projetos/perímetros de irrigação foram implantados com recursos públicos, e muitos deles ainda operam com um baixo desempenho, causando problemas de redução na produtividade das culturas, salinização de solos e, consequentemente, abandono de áreas irrigadas pelos colonos produtores.

A Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (Icid) criou, há cerca de 14 anos, um grupo de trabalho sobre performance de irrigação, com a finalidade principal de buscar as bases para o desenvolvimento de procedimentos metodológicos para esse fim. Simultaneamente foi criado, também, o Programa de Pesquisa em Desempenho de Irrigação (Research Program on Irrigation Performance – RPIP), com o objetivo de selecionar indicadores e conduzir pesquisa de campo, em vários países, visando criar uma metodologia de avaliação que possa ser adotada em âmbito universal.

O referido programa (RPIP) realizou testes de campo, partindo de um total de 40 indicadores em potencial, os quais foram e ainda vêm sendo testados, principalmente na Argentina. Esse programa foi implementado no Brasil em 1997, usando como áreas-piloto os projetos Jaíba, MG, Paracatu/Entre-Ribeiros, MG, e Nilo Coelho, PE, e foi um trabalho conjunto da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), da Secretaria de Recursos Hídricos e da Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (Codevasf). Os indicadores que inicialmente foram selecionados (Bos, 1997) podem ser agrupados como:

- Indicadores de balanço hídrico;
- Indicadores de sustentabilidade ambiental e drenagem;
- Indicadores de manutenção;
- Indicadores socioeconômicos.

Os indicadores de balanço hídrico compreendem os aspectos de condução, distribuição, aplicação, eficiência e uniformidade de irrigação; já os indicadores de sustentabilidade ambiental e drenagem envolvem parâmetros de sustentabilidade dos projetos, lençol freático, poluição química e biológica, salinidade e matéria orgânica. Os indicadores de manutenção estão associados com operação e manutenção de canais e estações de bombeamento, vazões e infraestrutura; e os indicadores socioeconômicos estão relacionados com a viabilidade econômica e financeira dos projetos, custos de operação e manutenção, lucratividade da agricultura irrigada e capacidade social da comunidade irrigante.

Os indicadores de balanço hídrico referem-se à avaliação do suprimento de água, aos sistemas/projetos de irrigação, envolvendo os componentes volumétricos ligados à condução, distribuição, aplicação, eficiência e uniformidade de aplicação de água de irrigação, o que permite, aos gerentes de projetos, verificarem o quanto de água é fornecido durante determinado tempo, para qualquer parte dos sistemas de irrigação, e avaliarem se essa vazão é maior ou menor do que a pretendida.

Os indicadores de sustentabilidade ambiental e drenagem estão relacionados com a sustentabilidade das áreas irrigadas, que representam a taxa de ocupação dos projetos, geralmente sendo a razão entre as áreas irrigadas atuais e as áreas totais irrigáveis. Com relação à avaliação da profundidade relativa do lençol freático adequada para os sistemas de irrigação, é comum a utilização da razão entre a profundidade atual do lençol freático e a profundidade crítica para prevenir salinização. Recomenda-se também que sejam monitorados poluentes cujas concentrações possam ser determinadas com baixo custo, e é necessário saber quais são os níveis críticos de cada poluente que não vão causar problemas e impacto negativo ao ambiente.

O parâmetro utilizado para monitorar a salinidade dentro das áreas irrigadas é a condutividade elétrica (CE) da água, e o valor considerado normal de CE varia entre 0 dS m^{-1} e 3 dS m^{-1}; na CE da água do estrato saturado, esse valor é igual a 1,5 vez o valor da água de irrigação, ou seja, 4,5 dS m^{-1}, considerando uma fração de lixiviação de 15% a 20%. Também é usada como indicador a CE relativa que é definida como a razão entre a CE atual da água do solo e a CE crítica das culturas, para prevenir queda de produtividade. A matéria orgânica resultante de queda de folhas da vegetação e de entulhos ao longo dos canais pode trazer problemas para o sistema de condução da água e deve ser monitorada. As fontes de poluição química podem ser em razão da água de esgotos, urbanos e industriais, que escoam pelos canais, ou pesticidas e fertilizantes lixiviados da rizosfera. Recomenda-se que sejam medidas as concentrações de nitrato (NO_3^{-1} em meq L^{-1}) e fósforo (P em meq L^{-1}).

Os indicadores de manutenção têm três propósitos principais, que são:

- Dar segurança, mantendo os canais em boas condições para minimizar as perdas de água por infiltração.
- Manter o nível de água dos canais e planejar a relação vazão-carga.
- Manter a infraestrutura de canais em condições de trabalho.

Com relação aos indicadores socioeconômicos, existem dois mais utilizados, a saber:

- Lucros em termos de área irrigada e lucros em termos de entrega de água. A razão produtividade versus suprimento de água ($RPSA$) é calculada pela razão entre a massa do produto (MP) e o volume de água derivado para a parcela ($VADP$) a ser irrigada.
- Razão entre o custo de operacional e manutenção e o orçamento total do projeto/distrito.

Alguns desses indicadores propostos para avaliação de desempenho de projetos estão sumarizados na Tabela 6.

Os indicadores propostos para avaliação de desempenho, quando adequadamente escolhidos, demonstram, ao longo do tempo, os resultados alcançados dos projetos de irrigação e também indicam as modificações necessárias para que sejam alcançadas as metas previstas, visando à sustentabilidade deles sem risco de impactos negativos ao ambiente. Esses indicadores possibilitam fazer comparações e avaliações de como os diferentes sistemas de irrigação estão desempenhando dentro dos projetos/distritos de irrigação, constituindo uma importante ferramenta para produtores, técnicos e gerentes de projetos interessados em saber quando e quanto investir na agricul-

Tabela 6. Conjunto mínimo de indicadores propostos para avaliação de desempenho de projetos de irrigação.

Indicador de balanço hídrico	Indicador ambiental e de sustentabilidade	Indicador econômico e social
Razão global de consumo Razão entre evapotranspiração da cultura (ETc) menos precipitação efetiva e volume de água total derivado para o sistema	Sustentabilidade da área irrigada Razão entre a área irrigada atual e área total irrigável	Taxa de coleta de tarifa de água Razão entre montante de tarifas coletadas e tarifas devidas
Razão de aplicação no campo Razão entre ETc menos precipitação efetiva e volume de água derivado para a parcela	Profundidade relativa de lençol freático Razão entre a profundidade atual e a profundidade crítica	Fração de operação & manutenção (O & M) Razão entre o custo de O & M e o orçamento total do projeto/distrito
Performance da entrega de água Razão entre volume derivado e volume planejado	Condutividade elétrica (CE) relativa Razão entre a CE atual e a CE crítica	Relação produtividade vs. suprimento de água Razão entre a massa de produção e o volume de água derivado para a(s) cultura(s)

tura irrigada, principalmente em termos de manejo de irrigação e infraestrutura ou alocação de água nos perímetros irrigados.

Vale mencionar que os avanços alcançados no campo do sensoriamento remoto, pelo uso de imagens de satélite, associados com alguns dados climáticos de superfície, tornaram mais ágeis alguns procedimentos de campo que antes eram conduzidos pontualmente e manualmente, como no caso do cálculo da evapotranspiração em áreas globais de perímetros irrigados, usada na determinação da chamada Razão Global de Consumo. Algoritmos foram desenvolvidos permitindo a determinação quase instantânea de ETc, seja em tempo real ou em datas anteriores, quando se dispõem de imagens de satélite. Entre esses algoritmos, podem-se mencionar os modelos *Surface Energy Balance Algorithm for Land* – Sebal (Bastiaanssen et al., 1998), *Mapping Evapotranspiration at High Spatial Resolution with Internalized Calibration* – Metric (Allen et al., 2007) e *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* – Safer (Teixeira et al., 2008). Um exemplo de uso do modelo Sebal para o perímetro irrigado de Nilo Coelho, PE, no Semiárido brasileiro, pode ser visto no artigo de Bastiaanssen et al. (2001).

Produtividade da água

Um conceito relativamente recente diz respeito à produtividade da água. Inicialmente, definiu-se um indicador que quantificasse qual o retorno de produção de uma cultura (por exemplo, em kg) para cada unidade volumétrica de água (por exemplo, em m^3) utilizada na sua produção, em kg m^{-3}.

Posteriormente, o conceito foi ampliado com o objetivo de mensurar o retorno do uso da água para diferentes fins, não se restringindo apenas ao resultado em termos de massa de cultura por volume de água. Assim, procurou-se estabelecer um conceito de produtividade cujo retorno poderia ser econômico/financeiro (por exemplo, R$ m^{-3}) ou energético (por exemplo, kcal m^{-3}, MJ m^{-3}). Essa nova conceituação, além de permitir a comparação (econômica ou energética), no âmbito da agricultura irrigada, da produtividade da água em diferentes culturas, pode ainda ser utilizada como um possível indicador comparativo sobre o desempenho de alternativas de uso múltiplo dos recursos hídricos.

Como exemplo, a Figura 23 apresenta os resultados obtidos de produtividade da água física (kg m^{-3}), econômica (R$ m^{-3}) e energética (MJ m^{-3}), para valores acumulados de evapotranspiração da cultura (ETc) de 461 mm,

401 mm e 303 mm, e de lâminas brutas de irrigação (*Lb*) de 435 mm, 304 mm e 174 mm, correspondentes, respectivamente, à porcentagem de reposição de *ETc* e *Lb* acumulada ao longo do ciclo da cultura de milho de 94%, 76% e 57%, sendo os dados acumulados também aos valores de uma precipitação efetiva de 160 mm (Brito et al., 2008). Na condição mais baixa de reposição da *ETc* de 57%, a cultura apresentou uma condição evidente de estresse hídrico, em que, naturalmente, os resultados de produção de grãos foram em parte compensados pela ocorrência de chuvas, e o efeito da irrigação foi apenas suplementar. Os valores mostrados de produtividade da água (*PA*) econômica referem-se ao retorno, ou receita bruta auferida para cada unidade (m^3) de água aplicada pela irrigação, ou usada pela *ETc*. Nos cálculos dos indicadores de PA econômico e energético, foram utilizadas as respectivas conversões de 0,40 R$ kg^{-1} e 8,75 MJ kg^{-1}. Os resultados mostram uma tendência diferenciada dos indicadores de *PA*, para *ETc* e *Lb*.

Considerando o caso da *PA* física (kg m^{-3}), enquanto os valores associados à *ETc* variam de 1,05 kg m^{-3}, 1,12 kg m^{-3} e 1,09 kg m^{-3}, respectivamente, para os três níveis de *ETc* de 461 mm, 401 mm e 303 mm, os valores associados à *Lb* variam de 1,11 kg m^{-3}, 1,48 kg m^{-3} e 1,90 kg m^{-3} para os níveis respectivos de *Lb* de 435 mm, 304 mm e 174 mm; ou seja, enquanto o efeito da *ETc* permanece praticamente estável, o efeito da *Lb* tem uma tendência crescente na *PA* física (Figura 23). Observa-se o mesmo comportamento com os valores de *PA* econômica e energética.

Do ponto de vista do retorno físico, econômico ou energético da água aplicada na irrigação, em condições semelhantes às da área estudada dos resultados mostrados na Figura 23, seria mais vantajoso para o produtor investir numa condição de irrigação suplementar. Em outras palavras, uma decisão a ser tomada em um cenário de diferentes opções quanto ao uso múltiplo dos recursos hídricos, a alternativa de irrigação suplementar poderia favorecer a opção pelo cultivo do milho, se as condições de mercado forem favoráveis.

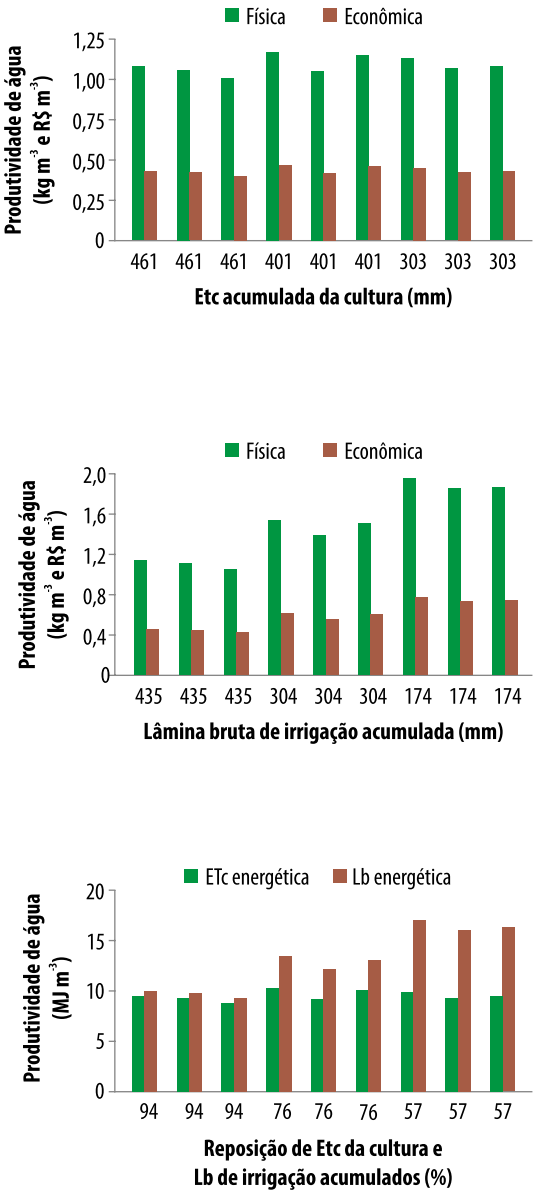


Figura 23. Produtividade da água física (kg m^{-3}), econômica (R$ m^{-3}) e energética (MJ m^{-3}), para valores acumulados de evapotranspiração da cultura (ETc) de 461 mm, 401 mm e 303 mm, e de lâminas brutas de irrigação (Lb) de 435 mm, 304 mm e 174 mm, correspondentes a porcentagem de reposição de ETc e Lb acumulada ao longo do ciclo da cultura de milho de 94%, 76% e 57%, respectivamente.

Fonte: Brito et al. (2008).

Na medida em que o fornecimento de água vai se restringindo, dentro de determinados limites de escassez, a cultura aumenta seu retorno de produção relativo ao insumo escasso. Esse com-

portamento corrobora a teoria da reação da planta, no sentido de aumentar sua eficiência de uso do insumo água, quando a disponibilidade dele se restringe.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. Brasília, DF, 2017. 86 p.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSSEN, W.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. W. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 395-406, Aug. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14244**: equipamentos de irrigação mecanizada: pivô central e lateral móvel providos de emissores fixos ou rotativos: determinação da uniformidade de distribuição de água. Rio de Janeiro, 1998. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 7749-1**: equipamentos de irrigação agrícola: aspersores rotativos. Parte 1: Requisitos para projetos e operação. Rio de Janeiro, 1999a. 22 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 7749-2**: equipamentos de irrigação agrícola: aspersores rotativos. Parte 2: Uniformidade de distribuição e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1999b. 6 p.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; BRITO, R. A. L.; BOS, M. G.; SOUZA, R. A.; CAVALCANTI, E. B.; BAKKER, M. M. Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 15, n. 1, p. 53-79, 2001.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). **Journal of Hydrology**, v. 212/213, p. 198-212, 1998. DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00253-4.

BOS, M. G. Performance indicators for irrigation and drainage. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 11, n. 2, p. 119-137, May 1997. DOI: 10.1023/A:1005826407118.

BRANSCHEID, V. O.; HART, W. E. Predicting field distributions of sprinkler systems. **Transactions of the ASAE**, v. 11, n. 6, p. 801-808, 1968. DOI: 10.13031/2013.39526.

BRASIL**. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, 9 jan. 1997. Seção 1, p. 470.

BRITO, R. A. L. Avaliação do desempenho de um perímetro irrigado: proposta para um modelo conceitual. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7., 1986, Brasília, DF. **Anais [...]** Brasília, DF: Abid, 1986. v. 3, p. 749-775.

BRITO, R. A. L.; GOMIDE, R. L.; ALBUQUERQUE, P. E. P. Produtividade da água na cultura do milho sob irrigação suplementar no Centro-Oeste de Minas Gerais. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 27., 2008, Londrina. **Anais** [...] Londrina: Iapar; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. p. 636-643.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California, 1942. 124 p. (Bulletin, 670).

CRIDDLE, W. D.; DAVIS, S.; PAIR, C. H.; SHOCKLEY, D. G. **Methods for evaluating irrigation systems**. Washington, DC: Usda, 1956. 24 p. (USDA. Soil Conservation Service. Agriculture Handbook, 82).

DAVIS, J. R. Measuring water distribution from sprinklers. **Transactions of the ASAE**, v. 9, n. 1, p. 94-97, 1966. DOI: 10.13031/2013.39885.

GOMIDE, R. L.; BERNARDO, S.; VIEIRA, M.; SEDUYAMA, G. C. Análise da uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão. **Revista Ceres**, v. 27, n. 153, p. 457-470, 1980a. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1079429/1/Analiseuniformidade.pdf. Acesso em: 11 maio 2017.

GOMIDE, R. L.; BERNARDO, S.; VIEIRA, M. E.; SEDIYAMA, G. C. Modelo matemático para determinar a uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão. **Revista Ceres**, v. 27, n. 153, p. 471-485, 1980b. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1079485/1/Modelomatematico.pdf. Acesso em: 11 maio 2017.

HEERMANN, D. F.; HEIN, P. R. Performance characteristics of selfpropelled center pivot sprinkler irrigation system. **Transactions of the ASAE**, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1968. DOI: 10.13031/2013.39320.

HOWELL, T. A.; HILLER, E. A. Designing trickle irrigation laterals for uniformity. In: INTERNATIONAL DRIP IRRIGATION CONGRESS, 2., 1974, San Diego. **Proceedings** [...] Riverside: Department of Soil Science and Agricultural Engineering, 1974. p. 299-304.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Chapman & Hall, 1990. 652 p.

MERRIAM, J. L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation**: a guide for management. Logan: Utah State University, 1978. 271 p.

MERRIAM, J. L.; KELLER, J.; ALFARO, J. **Irrigation system evaluation and improvement**. Logan: Utah State University, 1973.

NELSON, D. O. **Dynamic fitness**. Logan: Utah State University, 1974. 106 p.

REICHARDT, K. **Controle da irrigação do milho**. Campinas: Fundação Cargill, 1993. 20 p. (Série Técnico-Científica, 182).

ROCHA, E. M. de M.; COSTA, R. N. T.; MAPURUNGA, S. M. da S.; CASTRO, P. T. Uniformidade de distribuição de água por aspersão convencional na superfície e no perfil do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 154-160, maio/ago. 1999. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v3n2p154-160.

RODRIGUES, L. N.; MELLO, J. L. P.; MANTOVANI, E. C.; RAMOS, M. M. Coeficientes de uniformidade: sensibilidade a mudanças nos fatores operacionais. **Irriga**, v. 2, n. 2, p. 90-99, 1997. Disponível em: https://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3459/2212. Acesso em: 11 maio 2017.

STEGMAN, E. C. Irrigation scheduling: applied time criteria. In: HILLEL, D. (ed.). **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, 1983. p. 1-30.

TEIXEIRA, A. H. D. C.; BASTIAANSSEN, 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, p. 1524-1537, 2008. DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.05.004.

WILCOX, J. C.; SWAILES, G. E. Uniformity of water distribution by some under tree orchard sprinkler. **Scientific Agriculture**, v. 27, n. 11, p. 565-583, 1947. DOI: 10.4141/sa-1947-0067.

Capítulo 9

Estratégias de manejo de irrigação

Paulo Emílio Pereira de Albuquerque

Introdução

A água, no contexto da agricultura irrigada, contribui com aproximadamente 33% a 38% do custo de produção (Resende et al., 1990; Richetti et al., 2015) conforme será apresentado em capítulo posterior. Por isso, reduções em produtividade não podem ser esperadas em decorrência da falta ou do excesso de água aplicada.

A aplicação de pouca água (irrigação com deficit) pode ser um desperdício óbvio, tendo em vista que a produção não poderia obter o benefício esperado. A aplicação excessiva é, entretanto, muito mais destrutiva, pois ocorre saturação do solo, o que impede a sua aeração, lixivia nutrientes, induz maior evaporação e provoca maior desperdício de água e de energia para o bombeamento (elétrica ou outras). Além disso, excesso de água propicia microclima favorável ao desenvolvimento de doenças e pragas que podem causar prejuízo à cultura.

Assim, pode-se dizer que o manejo da irrigação cobre os seguintes objetivos básicos:

- Maximizar a produtividade da cultura.
- Melhorar a qualidade do produto.
- Minimizar o custo da água e da energia.
- Aumentar a eficiência de fertilizantes.
- Diminuir a incidência de doenças e pragas.
- Manter ou melhorar as condições químicas e físicas do solo.

Apesar de todos esses benefícios e do alto investimento realizado pelos agricultores, a maioria deles não dá a devida importância ao manejo da irrigação. Segundo Silveira e Stone (1994), várias causas podem ser citadas para explicar tal atitude:

- **Custo da água:** na maioria das situações, a água nada custa ao produtor irrigante.
- **Custo da energia elétrica:** o custo da energia elétrica geralmente não é tão alto, podendo girar em torno de 10% do custo total da produção.
- **Carência de dados edafoclimáticos:** o irrigante normalmente não dispõe de análises físico-hídricas do solo e de dados climáticos da sua área.
- **Prioridade das atividades:** a preocupação maior dos produtores no dia a dia é com o calendário de aplicação de adubos, com um possível ataque de doenças e pragas em sua lavoura e com o desenvolvimento da cultura em campo.
- **Técnico e/ou consultoria especializada:** a assistência técnica ao produtor não fornece as opções de manejo da irrigação ou por desconhecimento ou por falta de interesse ou, ainda, porque não há demanda por parte do irrigante.
- **Metodologia:** embora disponível, ainda não foi apresentada aos produtores de forma acessível, de modo que facilite a sua adoção.

Para exemplificar, em determinadas situações, o consumo de água de uma cultura pode ser três vezes maior no meio do ciclo dessa cultura em relação à fase inicial. Além disso, dependendo da região, a evapotranspiração da cultura (ETc) pode ser muito maior no verão do que no inverno. Isso está ilustrado na Tabela 1, que mostra

Tabela 1. Influência do estádio de desenvolvimento da cultura do milho e época do ano sobre a evapotranspiração da cultura (ETc) e sobre o intervalo entre as irrigações (Fazenda Sooretama, Incaper, ES).

Plantio	Mês da irrigação	Kc	ETo (mm dia^{-1})	ETc (mm dia^{-1})	Z (cm)	f	LL	F (dias)
Novembro	Janeiro	1,10	5,60	6,16	25	0,60	13,4	2
Julho	Julho	0,45	2,27	1,02	20	0,80	14,2	14
Variações (%)	-	144	147	500	25	25	-	600

Kc = Coeficiente de cultura (Doorenbos; Pruitt, 1977). Eto = Evapotranspiração de referência. Etc = Evapotranspiração da cultura ($ETc = ETo \times Kc$). Z = Profundidade efetiva do sistema radicular. f = Fator de disponibilidade da água no solo. LL = Lâmina líquida de irrigação. F = Frequência de irrigação.

variação de 500% na necessidade de água e de 600% no intervalo entre irrigações, estimados para as condições da Fazenda Sooretama, do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper), situada no norte do estado do Espírito Santo. Essas variações se deveram principalmente ao estádio de desenvolvimento da cultura e da época do ano em que as irrigações foram realizadas.

Pode-se verificar redução de produtividade com a aplicação insuficiente de água ao longo do ciclo da cultura. Essas perdas de produtividade em relação à produtividade com nível ótimo de água podem atingir níveis elevados de forma não linear, ou seja, por exemplo, uma redução pela metade (50%) da água necessária à cultura nas doses unitárias de irrigação pode representar uma perda muito grande de rendimento (maior até que 90%).

A suspensão das irrigações muito antecipada à completa maturação da cultura pode também apresentar um efeito negativo na produtividade. E essa redução também ocorre normalmente de forma não linear, ou seja, por exemplo, supressão de seis das últimas irrigações previstas pode causar redução do rendimento de ordem maior que 80%, e supressão das duas últimas irrigações previstas pode causar redução de cerca de 50% (Albuquerque et al., 1992).

Neste capítulo, pretende-se apresentar alguns métodos simples para responder as duas perguntas clássicas no manejo da irrigação: quando e quanto irrigar. Definido o momento e a quantidade de água a aplicar, o irrigante passa a depender exclusivamente do desempenho e das características do seu sistema ou equipamento de irrigação. O mau desempenho de qualquer sistema ou equipamento, quanto à uniformidade de distribuição de água e à aplicação de lâminas de água diferentes daquelas solicitadas, diminui a eficiência do manejo.

Alguns critérios de manejo de irrigação

Muitos conceitos e nomenclaturas que serão usados, neste capítulo, são considerados já conhecidos pelo leitor, pois foram vistos em capítulos anteriores. Portanto, somente os novos conceitos serão mais detalhados.

Frequência de irrigação fixa

A frequência de irrigação (F), também comumente denominada turno de rega, é o intervalo entre duas irrigações sucessivas. Quando se utiliza o seu valor fixo, há uma grande facilidade no manejo da irrigação, porém os erros podem ser maiores, tendo em vista que é um método baseado num valor fixo da ETc, que é a utilizada no projeto ou planejamento do sistema de irrigação. Entretanto, na realidade, seu valor é variável com o tipo e a fase da cultura e a época de plantio. Para minimizar esses erros, poder-se-ia variar a frequência de irrigação de acordo com os estádios da cultura (ver seção Fases do Ciclo de Culturas Anuais), o que será discutido um pouco mais adiante.

Assim, de acordo com o grau de aproximação que se deseja, a lâmina líquida (LL) de irrigação pode ser calculada por:

$$LL = CAD \times f \times Z \quad (1)$$

em que LL é a lâmina líquida de irrigação (mm); CAD é a capacidade de água total disponível do solo (mm de água cm^{-1} de solo); f é o coeficiente de disponibilidade ($0 < f < 1$); e Z é a profundidade efetiva do sistema radicular (cm).

A capacidade de água total disponível do solo (CAD) é a água no solo que está retida entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). Assim:

$$CAD = [(CC - PMP) \times d]/10 \quad (2)$$

em que CAD é a capacidade de água total disponível no solo (mm de água cm^{-1} de solo); CC é o conteúdo de água no solo na capacidade de campo (%peso); PMP é o conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente (%peso); e d é a densidade do solo (g de solo cm^{-3} de solo).

Quando CC e PMP são dados em % volume, é desnecessário incorporar o valor de d na Equação 2, pois esse termo já está implícito no volume de solo.

As metodologias para determinação dos valores de CC e PMP já foram vistas em outro capítulo. Como recapitulação, vale lembrar que a CC é a quantidade de água retida no solo após a drenagem do excesso da água gravitacional, cujo valor está compreendido entre os potenciais matriciais de -10 kPa a -30 kPa (-0,01 MPa a -0,03 MPa – veja a tabela de conversão de unidades de pressão no box a seguir. A melhor forma de definir com maior exatidão o seu valor é determiná-lo no próprio local, conforme metodologia apresentada por Reichardt (1987). O PMP é o limite inferior do conteúdo de água no solo, no qual a CAD se esgotou; nesse ponto, as plantas não têm condições de manter a turgescência do tecido vegetal e murcham de forma permanente. O valor normalmente estabelecido para o PMP está sob o potencial matricial de -1.500 kPa (-1,5 MPa).

1 bar = 100 cbar	
1 bar = 0,1 MPa = 100 kPa	1 atm = 0,1013 MPa = = 101,3 kPa
1 bar = 1.020 cmH_2O	1 atm = 1.033,3 cmH_2O
1 bar = 0,9869 atm	1 atm = 1,0133 bar
1 cmHg = 13,6 cmH_2O	1 cmH_2O = 0,0736 cmHg

A curva de retenção da água no solo, exemplificada na Figura 1, auxilia bastante a definição da CAD.

Na maioria das situações, a CAD de um solo não é conhecida. Nesses casos, pode-se estimá-la, de modo mais expedito, pelos valores constantes na Tabela 2, desde que se tenha ideia da textura do solo.

A utilização da Tabela 2 requer certo cuidado, principalmente em alguns Latossolos do Cerrado, pois, apesar de a textura desses se apresentar argilosa, eles se comportam como solos de textura arenosa (CAD entre 70 mm m^{-1} e 100 mm m^{-1}), em função da presença de óxidos

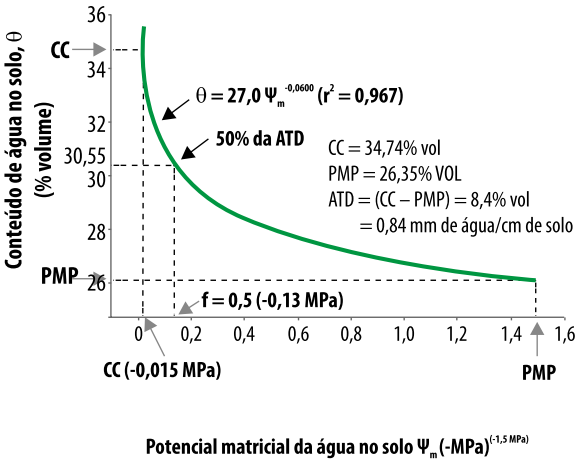


Figura 1. Curva de retenção da água no solo, em que se definem a capacidade de campo (CC), o ponto de murcha permanente (PMP), a capacidade total de água disponível (CAD) e o coeficiente de disponibilidade (f), para o perfil de 0 a 90 cm do Latossolo Vermelho-Escuro da área experimental da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Fonte: Albuquerque (1997).

Tabela 2. Valores[1] aproximados para algumas características físico-hídricas dos solos, segundo a sua classe textural.

Textura do solo	VIB[2] (cm h^{-1})	Densidade (g cm^{-3})	CC[3] (%peso)	PMP[4] (%peso)	CAD[5] (%peso)	CAD[6] (mm m^{-1})
Arenoso	5 (2,5–22,5)	1,65 (1,55–1,80)	9 (6–12)	4 (2–6)	5 (4–6)	85 (70–100)
Franco-arenoso	2,5 (1,3–7,6)	1,50 (1,40–1,60)	14 (10–18)	6 (4–8)	8 (6–10)	120 (90–150)
Franco	1,3 (0,8–2,0)	1,40 (1,35–1,50)	22 (18–26)	10 (8–12)	12 (10–14)	170 (140–190)
Franco-argiloso	0,8 (0,25–1,5)	1,35 (1,30–1,40)	27 (25–31)	13 (11–15)	14 (12–16)	190 (170–220)
Silto-argiloso	0,25 (0,03–0,5)	1,30 (1,25–1,35)	31 (27–35)	15 (13–17)	16 (14–18)	210 (190–230)
Argiloso	0,05 (0,01–0,1)	1,25 (1,20–1,30)	35 (31–39)	17 (15–19)	18 (16–20)	230 (200–250)

[1] Primeiro valor representa a média e os valores entre parênteses representam a faixa de variação. [2] VIB = velocidade de infiltração básica. [3] CC = umidade do solo na capacidade de campo. [4] PMP = umidade do solo no ponto de murcha permanente. [5] CAD = água total disponível = ($CC - PMP$). [6] CAD em lâmina de água por profundidade de solo.
Fonte: Vermeiren e Jobling (1997).

de ferro, que favorecem a formação de agregados pequenos, bastante estáveis, de comportamento semelhante à areia (Resende et al., 1995).

A capacidade total de água disponível (CAD), como foi visto, depende da textura e da estrutura do solo, portanto, é variável com o tipo de solo. Apesar de o conceito de CAD definir que toda a água em sua faixa está disponível para a planta, na realidade a água é mais facilmente disponível quando está próxima da capacidade de campo (CC). Como pode ser observado pela curva de retenção (Figura 1), à medida que há extração de água pelo sistema radicular das plantas, o potencial da água no solo diminui, e a água restante torna-se mais difícil de ser retirada, tendo em vista estar retida a uma maior sucção.

A Figura 2 mostra as curvas do coeficiente ou fator de disponibilidade (f) da água no solo em função do potencial matricial (ψ_m) para solos de diferentes texturas. O valor de $f = 0$ representa que não há depleção, ou seja, solo com umidade na capacidade de campo, e $f = 1$ representa solo sem água disponível, ou seja, no PMP. As curvas são diferentes para cada tipo de solo por causa da diferença na distribuição dos

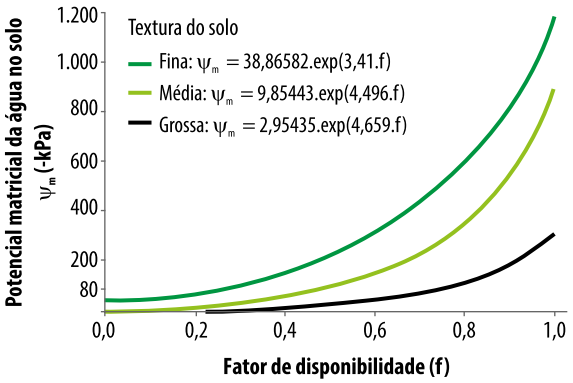


Figura 2. Coeficiente ou fator de disponibilidade (f) da água no solo em função do potencial matricial da água no solo (ψ_m), para solos de diferentes texturas.
Fonte: Adaptado de Grattan et al. (1989).

tamanhos de poros. Nota-se que a maior parte da CAD em solo de textura grossa (arenosos) está retida no potencial maior que -100 kPa (-0,1 MPa), enquanto, em solos de textura fina (argilosos), a maior parte está retida em potenciais bem menores do que -100 kPa.

Por causa desse maior grau de dificuldade de extração de água pelas plantas em potenciais menores é que se definiu o termo água facilmente disponível (AFD). A AFD é usada no lugar da CAD porque não se deve deixar que o

conteúdo de água no solo atinja o PMP. Por isso, em função da cultura, das condições de clima e de solo, é estabelecido o coeficiente ou fator de disponibilidade ou de depleção (f), tendo em vista o maior ou menor grau de dificuldade que a planta poderá ter para extrair água do solo. O termo ($CAD \times f$), na Equação 1, representa a AFD. O coeficiente ou fator de disponibilidade f representa a fração de esgotamento de água no solo, que pode ser obtido na Tabela 3, em função do grupo de culturas e da ETc máxima. Assim, por exemplo, para culturas altamente exigentes em água, como as hortaliças, o valor de f está em torno de 0,25, permanecendo o solo com uma reserva de 75%. Culturas como cereais e pastagens podem ter o valor de f em torno de 0,50, e as fruteiras perenes em torno de 0,40 (Doorenbos; Kassam, 1979).

A profundidade efetiva do sistema radicular (Z) pode ser estimada para algumas culturas pela Tabela 4. Obviamente, nessa tabela estão os valores após a cultura ter atingido o seu pleno desenvolvimento; na fase inicial, esses valores são menores, pois o sistema radicular ainda está se desenvolvendo. Pode-se considerar que, na fase inicial, o sistema radicular vai-se desenvolvendo a partir da profundidade de semeadura até atingir o seu valor máximo, que deve ocorrer no término da fase 2 em culturas de ciclo curto. Ainda pode-se assumir que o seu desenvolvimento é linear a partir da profundidade de semeadura até atingir a fase 3, como está representado na Figura 3. As fases do ciclo cultural, representadas na Figura 3, são as mesmas supostas para a obtenção do coeficiente de cultura (Kc), conforme metodologia descrita no manual 24 da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura – FAO (Doorenbos; Pruitt, 1977), e que também serão apresentadas mais adiante.

Tabela 4. Profundidade efetiva média (Z) do sistema radicular de algumas culturas.

Cultura	Z (cm)
Abacaxi	20
Algodão	30
Amendoim	50–60
Arroz	20–30
Banana	40
Batata	20–30
Café	50
Cana-de-açúcar	50–70
Cebola	20
Culturas perenes	50–70
Feijão	20–30
Melancia, melão	30
Milho	40–50
Pastagem	30
Soja	40–50
Tomate, fumo	20–50
Trigo	30–40
Videira	50

Fonte: Arruda et al. (1987) e Moreira (1993).

Ao se assumir uma profundidade efetiva (Z) para o sistema radicular da cultura, pode ser que na realidade esse esteja mais raso ou mais

Tabela 3. Fator de disponibilidade (f) para grupos de cultura em função da evapotranspiração máxima da cultura (ETc).

Grupo de cultura[1]	ETm (mm dia^{-1})								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,50	0,425	0,35	0,30	0,25	0,225	0,20	0,20	0,175
2	0,675	0,575	0,475	0,40	0,35	0,325	0,275	0,25	0,225
3	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,425	0,375	0,35	0,30
4	0,875	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,425	0,40

[1] 1 – cebola, pimentão e batata; 2 – banana, repolho, uva, ervilha e tomate; 3 – alfafa, feijão, citros, amendoim, abacaxi, girassol, melancia e trigo; 4 – algodão, milho, azeitona, açafrão, sorgo, soja, beterraba, cana-de-açúcar e fumo.

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979).

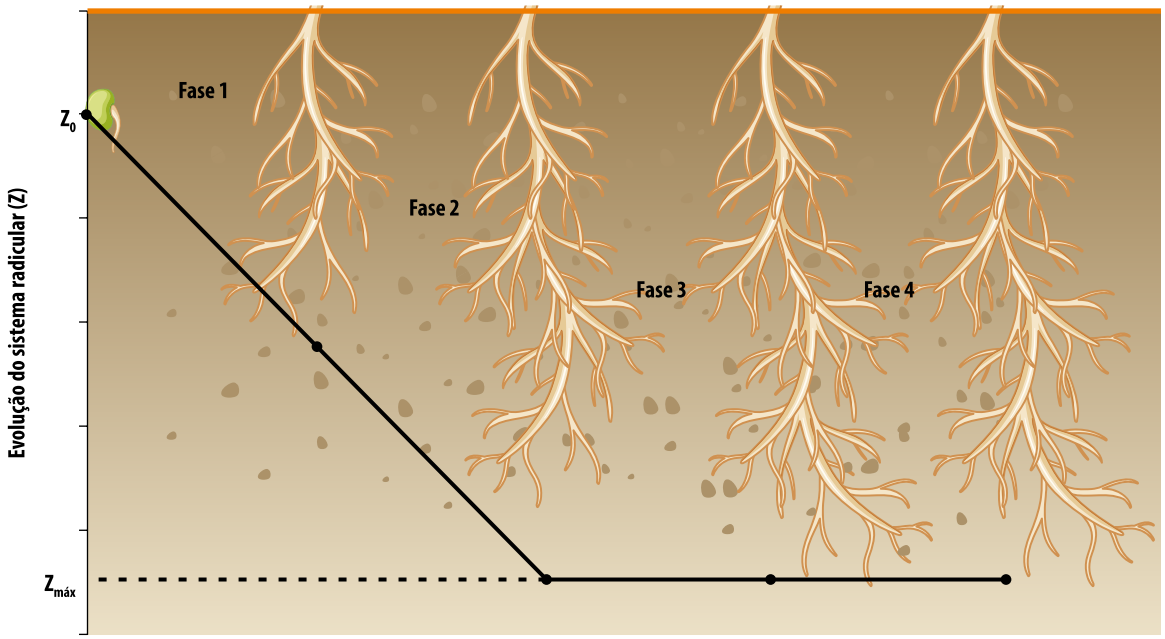


Figura 3. Estimativa do desenvolvimento do sistema radicular de culturas de ciclo curto em função das fases do ciclo da cultura (Z_0 é a profundidade de semeadura, e $Z_{máx}$ é a profundidade efetiva do sistema em seu desenvolvimento máximo).

Ilustração: Carlos Eduardo Felice Barbeiro.

profundo. Desse modo, pode-se enfatizar o seguinte:

- Se o Z estiver realmente mais raso, supondo que esteja mais profundo – isso significa que o solo na zona radicular ficará seco por mais tempo, com irrigações menos frequentes.
- Se o Z estiver realmente mais profundo, supondo que esteja mais raso – isso significa que o solo na zona radicular permanecerá sempre úmido, com irrigações mais frequentes.

Tendo-se obtido a LL pela Equação 1, pode-se estimar a lâmina bruta (LB) por:

$$LB = LL/Ei \quad (3)$$

em que LB é a lâmina bruta de irrigação (mm); LL é a lâmina líquida de irrigação (mm); e Ei é a eficiência do sistema de irrigação (decimal, ou seja, %/100) (Tabela 5).

A frequência de irrigação (F), caso se baseie na ETc do projeto do sistema de irrigação, apresentar-se-á com o seu valor fixo, como já foi mencionado, do seguinte modo:

$$F = LL/ETc \quad (4)$$

em que F é a frequência de irrigação (dias); LL é a lâmina líquida de irrigação (mm); e ETc é a evapotranspiração da cultura obtida do projeto (mm dia^{-1}).

A ETc normalmente obtida no projeto do sistema de irrigação é o valor crítico para uma determinada cultura e situação edafoclimática, dentro de um nível de probabilidade de ocorrência de valores menores ou iguais ao preestabelecido. Para projetos com finalidade agrícola, geralmente, esse nível é de 75%. Dessa forma, por exemplo, se o valor estabelecido foi de 6 mm dia^{-1}, com 75% de probabilidade de ocorrência, haverá 25% de chance de esse valor ser ultrapassado, ou seja, há um risco de 25% de probabilidade de a cultura sofrer deficit hídrico, caso essa se encontre na fase crítica de consumo de água, que ocorre comumente no período reprodutivo. Outra interpretação que pode ser dada é que, a cada 4 anos (período de

Exemplo de cálculo de frequência de irrigação fixa

Tabela 5. Alguns valores de eficiência de irrigação (Ei), segundo o sistema de irrigação.

Sistema	Ei atingível (%)
Irrigação superficial	
Tabuleiros inundáveis	80 a 90
Faixas	70 a 85
Sulcos	60 a 75
Irrigação por aspersão	
Convencional fixo	70 a 80
Convencional móvel	65 a 75
Autopropelido	60 a 70
Pivô central e Linear móvel	75 a 90
Irrigação localizada	
Gotejamento	75 a 90
Microaspersão	70 a 85

Fonte: Solomon (1990).

retorno = 1/(1 - probabilidade) = 1/0,25 = 4), há risco de a cultura sofrer deficit hídrico nessa fase considerada.

O problema maior de se adotar um valor fixo de ETc é porque, na realidade, é variável ao longo dos dias. Portanto, pode haver valores menores ou maiores do que o valor fixo, interferindo no manejo de irrigação. A probabilidade de 75% é usada para fins de projeto, mas para fins de manejo não é muito adequada.

Exemplo de cálculo de frequência de irrigação variável por fase de cultura

Outra questão é que apesar da grande simplicidade e comodidade da frequência de irrigação fixa, essa é estabelecida dentro de uma situação crítica da cultura. Então, inevitavelmente, haverá muita perda de água por percolação, haja vista que as fases de desenvolvimento vegetativo e de maturação não são períodos críticos de demanda hídrica, além de nem sempre uma cultura ser plantada em período de máxima demanda evaporativa. Para atenuar o problema, sugere-se que se adotem frequências fixas somente nos períodos do mesmo estádio do ciclo fenológico, conforme a metodologia para determinação do Kc do manual FAO-24 (Doorenbos; Pruitt, 1977). Segundo essa metodologia, o ciclo é geralmente dividido em quatro estádios, de tal modo que se poderia também obter quatro frequências diferentes de irrigação, de acordo com essas fases (ver seção Fases do Ciclo de Culturas Anuais). Os valores de Kc poderiam servir de referência para reduzir os valores da ETc de projeto.

Medição do potencial ou do conteúdo da água no solo

Instrumentos com sensores que medem o potencial matricial (ψ_m) da água no solo, como tensiômetros e blocos de resistência elétrica, são muito úteis para determinar, indiretamente, com o auxílio da curva de retenção, o conteúdo de água no solo. Instrumentos com sensores que medem diretamente o conteúdo de água no solo, como a sonda de nêutrons e o *time domain reflectometry* (TDR), são mais complexos na utilização e mais caros. O método gravimétrico, apesar de mais confiável e servir como padrão, é laborioso e de longo tempo de resposta.

A metodologia para o manejo de irrigação que será, aqui, discutida é independente do instrumento usado. A única diferença está entre instrumentos que medem o potencial (ou tensão) e o conteúdo de água (umidade) do solo. Os primeiros necessitam da conversão do potencial para conteúdo de água, o que normalmente é feito pela curva de retenção, como está exemplificado pela Figura 1.

De modo geral, a maioria das plantas tem seu crescimento afetado quando o potencial matricial da água no solo atinge valores menores que -0,5 MPa (-500 kPa). Dessa forma, a não ser em períodos específicos, nos quais a cultura exige um estresse de água, nunca se deve permitir que o potencial atinja valores menores que -0,3 MPa (-300 kPa). Esse fato se reforça ainda mais quando se observam com detalhe as curvas de retenção de água de solos (Figura 1). Como o potencial de pressão varia com a umidade do solo (função exponencial ou potencial), a umidade (conteúdo de água) varia muito

pouco quando o potencial passa de -0,5 MPa a -1,5 MPa (-500 kPa a -1.500 kPa).

Quando se deseja ser mais preciso, cada cultura tem um intervalo ótimo de potenciais da água, para cada estádio de desenvolvimento. A execução, na prática, de uma irrigação que atenderia a um critério rígido desse é, porém, muito difícil. Isso depende muito do sistema de irrigação empregado.

Tabela 6. Potencial matricial (kPa) no qual a água deve ser aplicada, para diferentes culturas, para solos fertilizados e manejados para máxima produção.

Cultura[1]	Potencial matricial (kPa)
Alfafa	-150
Café	[3]
Cana-de-açúcar	-100 a -200
Citros	-20 a -100
Feijão	-75 a -200
Milho (fase vegetativa)	-50
Milho (maturação)	-800 a -1.200
Tomate	-80 a -150
Uva (no início)	-40 a -50
Uva (na maturação)	-100
Hortaliça[2]	
Aipo	-20 a -30
Alface	-40 a -60
Alface (semente)	-80
Alho	-40 a -50
Batata	-30 a -50
Brócolis (crescimento)	-45 a -50
Brócolis	-60 a -70
Cebola	-45 a -65
Cebola (semente)	-150
Cenoura	-30
Cenoura (semente)	-400 a -600
Ervilha	-30 a -50
Melão	-30 a -80
Milho-doce	-50 a -100
Morango	-20 a -30
Pepino	-100 a -300
Repolho	-60 a -70
Tomate	-30 a -200
Vagem	-40 a -80

Fontes: [1] Reichardt (1987) e [2] Marouelli et al. (1986). [3] Requer períodos de potencial baixo, para quebrar dormência, seguidos de período de alto potencial.

Para as regiões temperadas, já existem dados experimentais para muitas culturas. Na Tabela 6, são apresentados alguns desses valores, incluindo-se também alguns dados para hortaliças.

Como se pode notar, a partir dos dados da Tabela 6, os potenciais ótimos para a maioria das culturas são maiores que -80 kPa (-0,08 MPa), o que faz com que o tensiômetro se torne um instrumento bastante útil no controle da irrigação.

Para uma área a ser tratada como uma unidade de irrigação, deve-se medir o potencial ou o conteúdo da água do solo. As medidas devem ser feitas em pelo menos três a quatro pontos representativos da área e, no mínimo, a duas profundidades, uma na zona de máxima atividade radicular e outra nas proximidades da parte inferior da zona radicular, como está indicado na Figura 4. As medidas no ponto A, dentro da zona radicular ativa, são as que devem ser utilizadas para o critério de estabelecimento da época de irrigação. As medidas no ponto B, no limite da zona radicular, servem como medidas complementares para que se tenha um controle sobre o movimento da água no solo durante

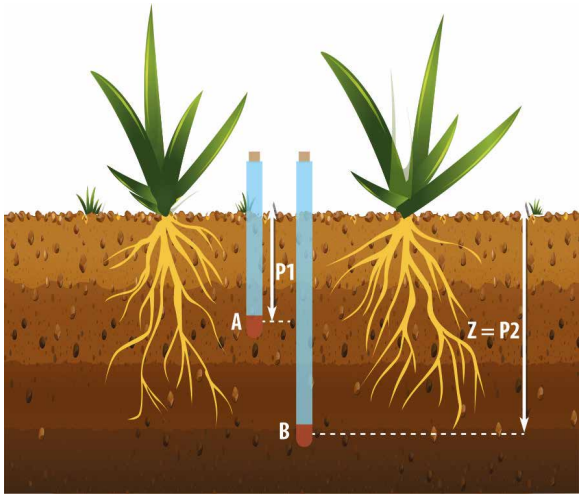


Figura 4. Posição dos instrumentos de medição do potencial ou do conteúdo de água no solo próximo às plantas e profundidades de instalação.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

a extração de água pela cultura, e mesmo durante os processos de irrigação (infiltração) e redistribuição da água no perfil.

Um procedimento conveniente é traçar um gráfico do potencial matricial (ψm) ou do conteúdo de água no solo (θ) como uma função do tempo e da profundidade do solo (Z), durante o desenvolvimento da cultura a ser eventualmente irrigada, como indica a Figura 5. A vantagem de fazer o gráfico está na possibilidade de extrapolar a curva do potencial matricial para os dias futuros e, razoavelmente, prever com antecedência de 3 a 5 dias a época de irrigação.

Convém salientar que, controlando-se a irrigação por meio de instrumentos, a época de irrigar fica completamente independente do estabelecimento prévio de frequências de irrigação. Contudo, deve-se acompanhar o desenvolvimento do sistema radicular, para determinar a zona ativa das raízes (Z) e considerar a leitura do potencial, ou do conteúdo de água, feita no ponto médio dessa profundidade como a indicadora de quando irrigar.

Usando-se esse método como manejo de irrigação, a LL é dada por:

$$LL = [(CC - Ui)/10] \times d \times Z \quad (5)$$

em que LL é a lâmina líquida de irrigação (mm); CC é a capacidade de campo (%peso); Ui é o conteúdo de água no solo, considerado como o limite para início da irrigação (%peso); d é a densidade do solo (g cm^{-3}); e Z é a profundidade efetiva do sistema radicular (cm).

Observa-se que a Equação 5 é semelhante às Equações 1 e 2, em conjunto. A diferença está no fator de disponibilidade f que não aparece na Equação 5, porque esse fator já está implícito ao se estabelecer um limite mínimo no conteúdo de água no solo para reinício da irrigação (Ui). Entretanto, quando se utilizam instrumentos com sensores que medem o potencial matricial (como o tensiômetro), é necessário converter o seu valor para conteúdo de água (umidade) do solo, por meio da curva de retenção. Nesse caso, os valores de Ui podem ser obtidos pela

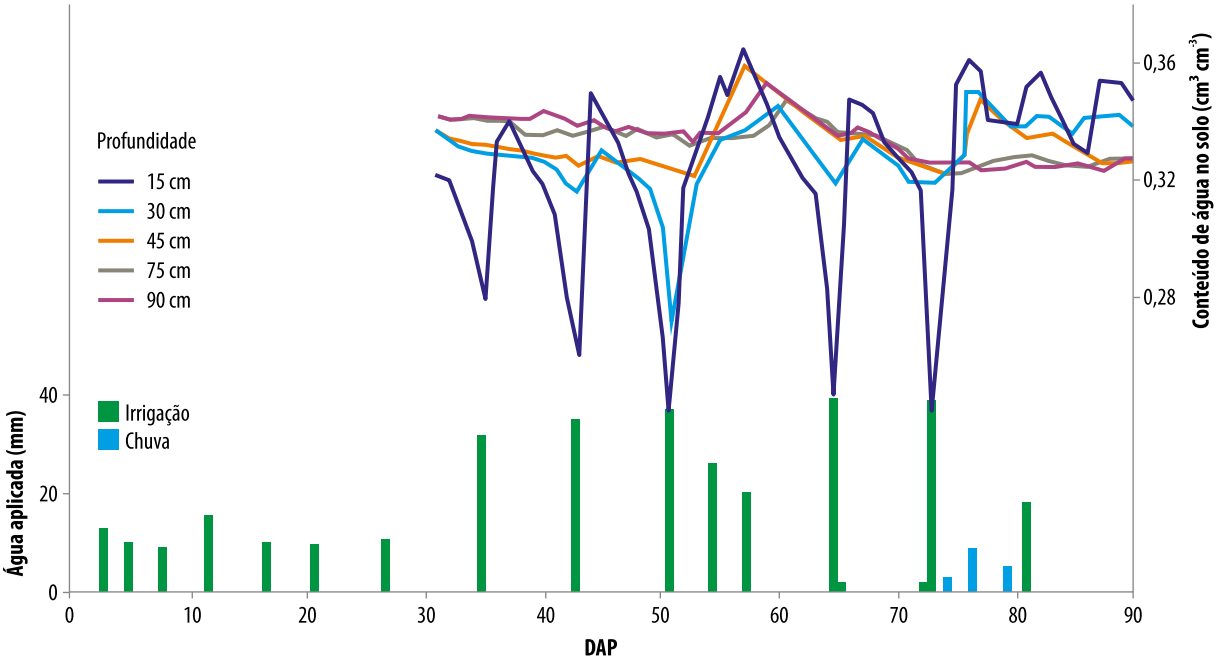


Figura 5. Conteúdo de água no solo, por profundidade de solo, e água aplicada (irrigação e chuva), em relação aos dias após o plantio (DAP), em cultura de feijão irrigada com frequência de 8 dias.

Fonte: Albuquerque (1997).

conversão dos valores de ψ_m mostrados nas tabelas das páginas 271 e 273, pela curva de retenção do solo específico da localidade.

Da mesma forma, como visto anteriormente, a LB pode ser obtida pela Equação 3.

Há outro modo de estimar a LL, quando se utilizam instrumentos com sensores instalados em diversas profundidades do solo. Desse modo, pode-se traçar o perfil de extração de água pelo solo, sem necessidade de estimar a profundidade efetiva do sistema radicular (Z), melhorando a precisão na estimativa da lâmina de irrigação. Essa metodologia é simples, apesar de um pouco laboriosa, é apresentada por Reichardt (1987) e foi utilizada por Albuquerque (1997) em cultura de feijão (Figura 6).

Exemplo de cálculo de água no solo por meio de instrumentos

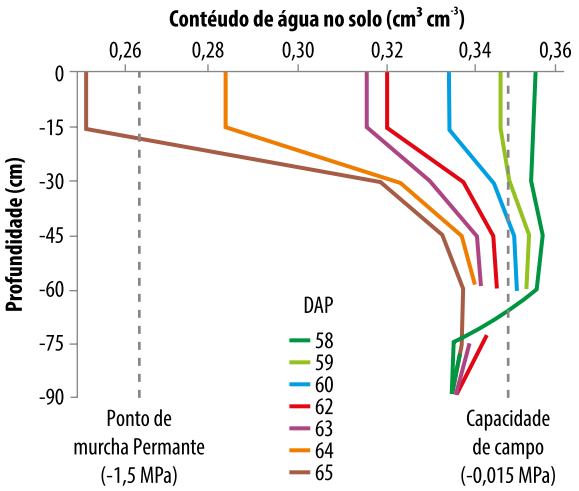


Figura 6. Conteúdo de água no solo, em vários dias após o plantio (DAP), em cultura de feijão, submetida à frequência de irrigação de 8 dias.

Fonte: Albuquerque (1997).

Medição ou estimativa da evapotranspiração da cultura

A partir de medições ou estimativas da ETc, em períodos diários, semanais, decendiais, etc., é possível programar a irrigação da cultura.

Como relatado em outro capítulo, medições diretas da evapotranspiração de referência (Eto) ou mesmo da ETc são de uso muito limitado, geralmente se restringindo ao uso em pesquisa. Para as estimativas da ETc, os métodos empíricos ou semiempíricos são os mais utilizados, principalmente os métodos Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Radiação e Penman, em razão das suas menores necessidades de obtenção de parâmetros meteorológicos.

O Tanque Classe A (Figura 7) é muito utilizado para a estimativa da ETo. Esse baseia em medições diretas da evaporação da água e, a partir daí, com o coeficiente de tanque (Kp), fazem-se as estimativas da evapotranspiração de referência (ETo). Com o coeficiente de cultura (Kc), estima-se a ETc.

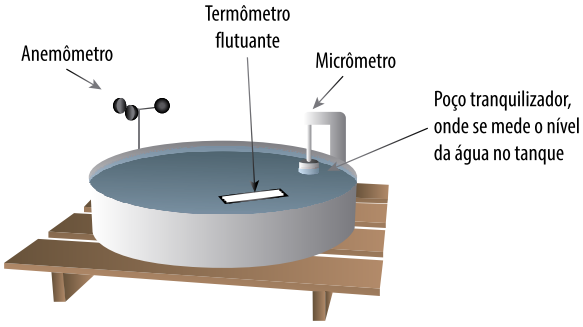


Figura 7. Tanque Classe A.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Será apresentada aqui a metodologia para se fazer o manejo de irrigação, quando se obtém a ETo medida ou estimada diariamente por qualquer um dos métodos citados anteriormente. Obviamente, a ETo estimada pela evaporação da água do Tanque Classe A instalado próximo à área da cultura torna essa forma de manejo muito mais simples (ver capítulo Requerimento de Água de Culturas).

Para realizar a irrigação da cultura, quando se têm dados diários da ETc, a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$\sum_{i=1}^{n}(ETc)_i \approx CAD \times f \times Z \qquad (6)$$

em que $(ETc)_i$ é a evapotranspiração da cultura no dia i (mm dia^{-1}); i é o dia da obtenção da ETc (i = 1, 2, 3, ..., n); n é o número total de dias necessários para satisfazer a condição da equação, ou seja, é a frequência de irrigação (dias); CAD é a capacidade de água total disponível no solo (mm cm^{-1}); f é o fator de disponibilidade (0 < f < 1); e Z é a profundidade efetiva do sistema radicular (cm).

A incógnita da Equação 6 é o termo n, que é a frequência de irrigação procurada. Logicamente, quando o somatório da ETc estiver próximo de igualar ou ultrapassar ligeiramente o valor do segundo membro da Equação 6, deve-se proceder a irrigação. Assim, a LL é obtida do primeiro membro da Equação 6, ou seja:

$$LL = \sum_{i=1}^{n} (ETc)_i \qquad (7)$$

em que LL é a lâmina líquida de irrigação (mm).

Na ocorrência de precipitação, deve-se subtrair a sua porção efetiva da ETc na Equação 7.

Da mesma forma que descrito na seção Frequência de Irrigação Fixa, a LB pode ser obtida pela Equação 3.

Uma forma prática e fácil de operacionalizar esse método é fazer um balanço da água no solo, por meio de planilhas de cálculos ou de programas específicos de informática. Alguns desses serão comentados posteriormente.

Uso combinado de variáveis do solo e do clima

As seções Medição do Potencial ou do Conteúdo da Água no Solo e Medição ou Estimativa da Evapotranspiração da Cultura referem-se a métodos de manejo da irrigação que usam variáveis do solo e do clima, respectivamente. Uma combinação entre ambos pode ser feita visando à programação da irrigação.

A utilização de instrumentos que monitoram o potencial matricial ou o conteúdo de água no solo (tensiômetros, blocos de resistência elétrica, sonda de nêutrons, etc.) pode ser útil para verificar o momento de irrigar a cultura, por meio de um valor preestabelecido do potencial ou do conteúdo de água no solo para efetuar a irrigação. Do mesmo modo como descrito na seção Medição do Potencial ou do Conteúdo da Água no Solo, podem-se usar as tabelas das páginas 271 e 273 como referência para estipular esse valor. Assim, a frequência de irrigação é encontrada.

Exemplo de cálculo de ETc diária

Variáveis do clima, que estão relacionadas à obtenção da ETc, fornecerão a quantidade de água a aplicar, que é a lâmina líquida de irrigação (LL) constante na Equação 7. O valor de n da Equação 7, nesse caso, é a frequência de irrigação (F) encontrada com o instrumento de monitoramento do solo.

Da mesma forma relatada na seção Frequência de Irrigação Fixa, a LB pode ser obtida pela Equação 3.

Balanço diário da água no solo

Tendo-se conhecido alguns dos métodos de manejo de irrigação, pode-se realizar o balanço da água no solo diariamente (Figura 8). Esse balanço é feito à semelhança de uma conta ban-

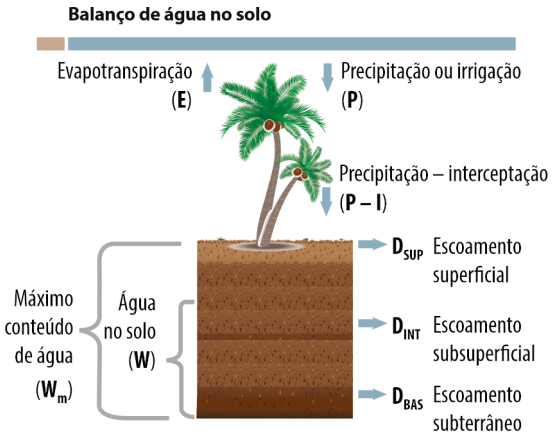


Figura 8. Balanço da água no solo.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

cária, em que os depósitos são feitos através da irrigação ou chuva, e as retiradas através da ETc. Entretanto, o tamanho dessa conta é limitado, pois o sistema radicular ocupa um volume limitado do solo, e este tem uma capacidade de armazenamento também limitada, conforme já visto.

O critério do manejo de irrigação, apresentado na seção Medição ou Estimativa da Evapotranspiração da Cultura, é mais fácil de ser operacionalizado através do balanço hídrico diário, em que se utiliza uma tabela ou planilha para avaliar, diariamente, os valores do consumo de água, precipitações, variações no armazenamento de água no solo e irrigações.

Nesse balanço, são desprezados os volumes de água escoados superficialmente no solo, de água interceptada pela planta, de água perdida por percolação profunda no solo e adicionada ao sistema radicular por ascensão capilar. Quando a irrigação é bem efetuada, na condição ótima, em que não há excesso nem deficit, não existem ou, na pior das hipóteses, são minimizadas as perdas de água escoada pela superfície do solo e por percolação. A perda por interceptação e o ganho de água por ascensão capilar, nesse caso, são considerados desprezíveis.

A título de exemplo de programas disponíveis para fazer o manejo de irrigação, há planilhas eletrônicas que utilizam também o balanço da água no solo, segundo descrevem Albuquerque e Andrade (2001), Albuquerque (2003, 2007), Albuquerque et al. (2013, 2014).

Atualmente, com o avanço da informática, está cada vez mais fácil utilizar ferramentas como as planilhas eletrônicas e programas específicos que calculam o balanço hídrico diário. Há alguns softwares disponíveis, como o *Cropwat*, do manual FAO-46 (Smith, 1993), Saaci (Moreira, 1992; Moreira; Torres Filho, 1993), entre outros.

Seleção do coeficiente de cultura

Parte desse tópico já foi comentada anteriormente, porém neste capítulo será discutida a metodologia usada para a estimativa do Kc, segundo os manuais 24 (Doorenbos; Pruitt, 1977) e 56 (Allen et al., 1998) da FAO, adaptados por Albuquerque e Andrade (2001) e Albuquerque e Guimarães (2004).

A ETc é a soma da transpiração da cultura e a evaporação da água da superfície do solo. A partir da cobertura completa do solo pela cultura, a evaporação torna-se desprezível, de modo que somente no período do plantio e no início do crescimento vegetativo a evaporação do solo é considerável, particularmente se a sua superfície estiver úmida em decorrência de irrigações e chuvas frequentes.

Transpiração e evaporação são regidas por diferentes processos físicos. No entanto, mesmo no período de crescimento vegetativo, a evaporação do solo forma parte da Etc, e, para efeito de simplicidade, o coeficiente que relaciona ETo com a evaporação do solo é apresentado pelo coeficiente de cultura (Kc), o qual também exprime o efeito das características da cultura sobre a sua necessidade de água.

Os valores de Kc relacionam a evapotranspiração da cultura livre de doenças e pragas e da competição com plantas invasoras, que se desenvolvem num campo de tamanho relativamente extenso, sob condições ótimas de água e de fertilidade no solo, e que pode atingir o pleno potencial de produção (evapotranspiração máxima). Portanto, a relação entre ETc e ETo se expressa por:

$$ETc = Kc \times ETo \quad (8)$$

em que ETc é a evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}); Kc é o coeficiente de cultura (adimensional); e ETo é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

Os procedimentos para selecionar os valores apropriados de Kc serão mostrados a seguir, os quais são influenciados pelas características da cultura, época de plantio ou semeadura, estádio de desenvolvimento da cultura e condições gerais de clima.

O efeito das características da cultura sobre a relação entre ETc e ETo é mostrado na Figura 9. A grande variação entre os grupos de cultura é em razão da resistência à transpiração de diferentes tipos de plantas, tais como as que mantêm os estômatos fechados durante o dia (abacaxi) e com folhas cerosas (citros). Também diferenças na altura, rugosidade da cultura, reflexão e cobertura do solo produzem a variação ilustrada na relação ETc/ETo.

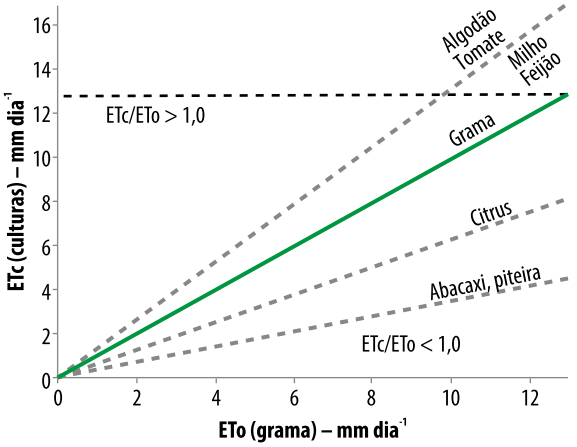


Figura 9. Evapotranspiração da cultura (ETc) comparada com a evapotranspiração de referência (ETo).

Fonte: Doorenbos e Pruitt (1977).

Para condições de evaporação elevada, isto é, clima quente, ventos fortes e baixa umidade do ar, os valores de ETo podem alcançar de 12 mm dia^{-1} a 14 mm dia^{-1}, e valores de ETc de 15 mm dia^{-1} a 17 mm dia^{-1} podem ser reais, particularmente para culturas baixas em regiões áridas que são fortemente afetadas por ventos e ar seco (Doorenbos; Pruitt, 1977; Allen et al., 1998).

Fases do ciclo de culturas anuais

A época de plantio afetará a duração do ciclo de desenvolvimento e a taxa de crescimento da cultura. Por exemplo, dependendo do clima, a beterraba pode ser semeada no outono, na primavera ou no verão, perfazendo um ciclo total de 230, 200 e 160 dias, respectivamente. O ciclo da soja varia de 100 dias, em regiões de clima quente e de baixa latitude, a 190 dias, em 2.500 m de altitude na África Equatorial; e o ciclo do milho, de 80 a 240 dias (Allen et al., 1998).

De acordo com o método da FAO para a estimativa de valores Kc (Doorenbos; Pruitt, 1977; Allen et al., 1998), a cultura de ciclo anual é dividida em quatro fases do ciclo fenológico, conforme a Figura 10. Nessa figura, estão evidenciadas a fase 1, que corresponde ao estádio inicial até o início do desenvolvimento vegetativo pleno (Kc_{ini}), e a fase 3, que corresponde ao estádio de florescimento até o início do enchimento de grãos ($Kc_{méd}$), cujos valores normalmente são os máximos apresentados para o Kc.

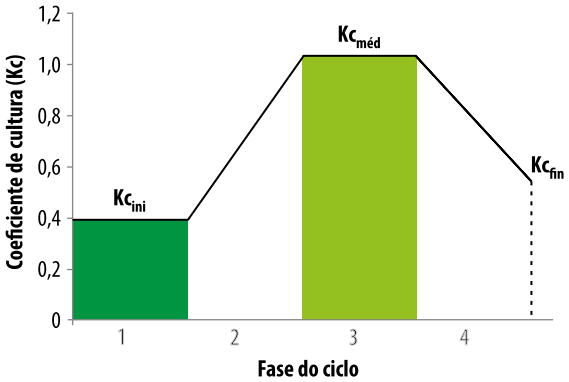


Figura 10. Evolução do coeficiente de cultura (Kc) ao longo do ciclo fenológico de culturas de ciclo anual, evidenciando-se as fases 1 ou inicial (Kc_{ini}) e 3 ou de florescimento ($Kc_{méd}$).

Fonte: Doorenbos e Pruitt (1977) e Allen et al. (1998).

As quatro fases ou estádios do ciclo de desenvolvimento são descritas como:

1) **Estádio inicial (fase 1) –** Corresponde ao início do crescimento da cultura, quando a superfície do solo não está completamente coberta pela cultura (cobertura do solo < 10%).

2) **Estádio de desenvolvimento vegetativo (fase 2) –** Corresponde de 10% a 80% de cobertura do solo.

3) **Estádio de florescimento ou reprodutivo (fase 3) –** Corresponde ao início da cobertura plena do solo (início do florescimento) até o início da maturação, que é indicada pela descoloração ou queda das folhas.

4) **Estádio de maturação (fase 4) –** Corresponde ao início da descoloração (ou queda) das folhas até a plena maturação ou ponto de colheita.

Como referência, a faixa de duração total do ciclo de algumas culturas anuais e o percentual de duração para cada uma das quatro fases estão mostradas na Tabela 7, a qual foi gerada a partir da adaptação de dados médios obtidos em diferentes localidades, segundo Doorenbos e Pruitt (1977).

Como exemplo para uso da Tabela 7, tem-se: uma cultura com duração total de 120 dias, dos quais 20% de duração são para a fase 1; 35%, para a fase 2; 25%, para a fase 3; e 20%, para a fase 4, o que corresponde, respectivamente, a uma duração de 24, 42, 30 e 24 dias. Isso significa que a fase 1 inicia com 0% e termina com 20% – 0 a 24 dias – do ciclo total; a fase 2 inicia com 20% e termina com 55% – 25 a 66 dias – do ciclo total; a fase 3 inicia com 55% e termina com 80% – 67 a 96 dias – do ciclo total; e a fase 4 inicia com 80% e termina com 100% – 97 a 120 dias – do ciclo total.

Tabela 7. Faixas de duração total do ciclo (em dias) e duração de cada uma das quatro fases (em percentagem do total) de algumas culturas de ciclo curto, segundo dados obtidos e adaptados de algumas regiões do mundo.

Cultura	Duração total do ciclo (dias)	Percentual de duração de cada uma das 4 fases[1] (1 – 2 – 3 – 4)
Alface	75 a 140	(27-37-26-10)
Algodão	180 a 195	(16-27-31-26)
Amendoim	130 a 140	(22-26-34-18)
Batata	105 a 145	(21-25-33-21)
Berinjela	130 a 140	(22-32-30-16)
Beterraba	70 a 90	(25-35-28-12)
Cebola (seca)	150 a 210	(10-17-49-24)
Cebola (verde)	70 a 95	(28-45-18-9)
Cenoura	100 a 150	(19-27-39-15)
Crucíferas[2]	80 a 95	(26-37-25-12)
Feijão-vagem	75 a 90	(21-34-33-12)
Feijão seco	95 a 110	(16-25-40-19)
Girassol	125 a 130	(17-27-36-20)
Melão	120 a 160	(20-28-37-15)
Milho-doce	80 a 110	(23-29-37-11)
Milho (grãos)	125 a 180	(17-28-33-22)
Pepino	105 a 130	(19-28-38-15)
Rabanete	35 a 40	(20-27-40-13)
Tomate	135 a 180	(21-28-33-18)
Trigo	120 a 150	(13-20-43-24)

[1] Percentual de duração em relação ao tempo de duração total.
[2] Repolho, couve-flor, brócolis, etc.
Fonte: Doorenbos e Pruitt (1977).

Coeficiente de cultura para culturas de ciclo anual em condição padrão

Na Tabela 8, estão listados valores típicos de Kc em três fases do ciclo de desenvolvimento das culturas, de acordo com o esquema apresentado na Figura 10 (Kc_{ini}, $Kc_{méd}$ e Kc_{fin}). Os coeficientes integram os efeitos tanto da transpiração quanto da evaporação no tempo ao longo do ciclo. Os efeitos da integração no tempo representam uma frequência média de umedecimento para cultura padrão, sob condições típicas de desenvolvimento numa área irrigada.

Os valores para o $Kc_{méd}$ e Kc_{fin} da Tabela 8 são apresentados, para a condição de clima subúmido, com umidade relativa mínima ($UR_{mín}$), média diária de cerca de 45%, e com velocidades médias de vento (medidas a 2 m da superfície – u_2) moderado em torno de 2 m s^{-1}.

Coeficiente de cultura da fase inicial

No período específico da semeadura ou do plantio e durante o estádio seguinte de cres-

Tabela 8. Coeficientes de cultura único (Kc) e alturas máximas médias de plantas, para cultivos sob condição padrão (culturas bem manejadas, não estressadas, em clima subúmido (umidade relativa mínima diária = 45% e velocidade do vento a 2 m da superfície = 2 m s^{-1}).

Cultura	Kc_{ini}	$Kc_{méd}$	Kc_{fin}	Altura máxima da cultura (m)
Leguminosas	**0,40**	**1,15**	**0,55**	
Amendoim		1,15	0,60	0,4
Ervilha		1,15[2]	1,10–0,30[1]	0,5
Feijão	0,40	1,05–1,15[1]	0,90–0,35[1]	0,4
Feijão Caupi		1,05	0,60–0,35[1]	0,4
Grão-de-bico		1,00	0,35	0,4
Lentilha		1,10	0,30	0,5
Soja		1,15	0,50	0,5–1,0
Fibras	**0,35**			
Algodão		1,15–1,20	0,70–0,50	1,2–1,5
Oleaginosas	**0,35**	**1,15**	**0,35**	
Canola		1,00–1,15[3]	0,35	0,6
Girassol		1,00–1,15[3]	0,35	2,0
Mamona		1,15	0,55	2,0
Cereais	**0,30**	**1,15**	**0,40**	
Arroz	1,05	1,20	0,90–0,60	1,0
Aveia		1,15	0,25	1,0
Cevada		1,15	0,25	1,0
Milheto		1,00	0,30	1,5
Milho		1,20	0,60–0,35[4]	2,0
Sorgo		1,00–1,10	0,55	1,0–2,0
Trigo		1,15	0,25–0,40[5]	1,0
Cana-de-açúcar	**0,40**	**1,25**	**0,75**	**3,0**

Kc_{ini}, $Kc_{méd}$ e Kc_{fin}: coeficientes de cultura da fase inicial, reprodutiva e de maturação, respectivamente.
[1] O primeiro valor é para colheita fresca e o segundo para colheita de grãos secos. [2] Algumas vezes são utilizadas estacas com 1,5 m a 2,0 m de altura, assim o valor de $Kc_{méd}$ pode atingir 1,20. [3] Os valores mais baixos referem-se a condições chuvosas com menor densidade populacional. [4] O primeiro valor para Kc_{fin} é para colheita com alta umidade nos grãos. O segundo valor para Kc_{fin} é para cultura colhida após o grão estar seco (cerca de 18% de umidade à base de peso úmido). [5] O valor mais alto é para colheita manual.
Fonte: Allen et al. (1998).

cimento vegetativo, a frequência de chuva ou irrigação (F) é um parâmetro que influencia muito o Kc nessa fase (Kc_{ini}). Também o tipo de preparo de solo (convencional ou plantio direto) pode interferir nesse coeficiente. É sabido que a palhada (restos culturais provenientes da cultura antecessora num sistema de plantio direto), mantida sobre o solo, pode reduzir a evaporação na fase inicial do ciclo da cultura e também diminuir o valor do Kc_{ini} para um patamar de até 50%. Portanto, refinamentos dos valores usados para o Kc_{ini} deveriam ser sempre utilizados. Para umedecimentos frequentes, tais como irrigação por aspersão ou chuva de alta frequência, os valores do Kc_{ini} podem aumentar significativamente.

Também a demanda evaporativa da atmosfera, ou seja, a intensidade da ETo, pode afetar sig-

nificativamente o Kc_{ini}. Demanda mais elevada fará com que o solo seque mais rápido entre eventos de aplicação de água, e o valor do Kc_{ini} será menor num determinado período.

Para facilitar a escolha do valor de Kc_{ini}, pode-se contar com o auxílio da seguinte equação, de acordo com a ETo e com a frequência de irrigação (F) escolhida para essa fase (Albuquerque; Andrade, 2001):

$$Kc_{ini} = 1{,}41704 - 0{,}092412ETo - 0{,}11001F + \\ + 0{,}0042672ETo^2 + 0{,}0033743F^2 + \\ + 0{,}00028724\ ETo\ F \quad (9)$$

em que Kc_{ini} é o coeficiente de cultura para a fase 1 do ciclo vegetativo de qualquer cultura de ciclo curto; ETo é a evapotranspiração de referência reinante na época da fase 1 (1 mm dia^{-1} ≤ ETo ≤ 10 mm dia^{-1}); e F é a frequência de irrigação na fase 1 (1 dia ≤ TI ≤ 20 dias).

A Equação 9 foi gerada pelo ajuste realizado por Albuquerque e Andrade (2001) nas curvas apresentadas de $Kc \times ETo \times F$ por Doorenbos e Pruitt (1977), para a estimativa dos valores de Kc para qualquer cultura de ciclo curto na fase 1 do seu ciclo de desenvolvimento.

Coeficientes de cultura da fase reprodutiva e de maturação

O valor do coeficiente de cultura relativo à fase de florescimento ou reprodutiva ($Kc_{méd}$) se refere à fase 3 e, na data de maturação, se refere a um valor pontual no fim da fase 4 (Kc_{fin}), conforme esquema da Figura 10.

Os efeitos da diferença das propriedades aerodinâmicas entre a grama como cultura de referência e as culturas agrícolas não são apenas intrínsecos à planta em si, mas também variam com as condições climáticas e a altura da cultura. Climas mais áridos e condições de velocidades de vento maiores originarão valores maiores para o $Kc_{méd}$ ou Kc_{fin}, ao passo que em climas mais úmidos e condições de vento mais baixas os valores serão menores.

Segundo Allen et al. (1998), para fazer ajustes ao $Kc_{méd}$ e Kc_{fin} apresentados na Tabela 8, quando a $UR_{mín}$ for diferente de 45% ou a velocidade do vento (u_2) for maior ou menor do que 2 m s^{-1}, é necessária a seguinte equação:

$$Kc = Kc(tab) + [0{,}04(u_2 - 2) - \\ - 0{,}004(UR_{mín} - 45)](h/3)^{0{,}3} \quad (10)$$

em que $Kc = Kc_{méd}$ ou Kc_{fin} (adimensional); $Kc(tab)$ é o valor do $Kc_{méd}$ ou Kc_{fin} apresentados na Tabela 8; u_2 é o valor médio da velocidade do vento diário a 2 m da superfície (m s^{-1}), durante a fase 3 (para $Kc_{méd}$) ou a 4 (para Kc_{fin}); $UR_{mín}$ é o valor médio da umidade relativa mínima diária (%) durante a fase 3 (para $Kc_{méd}$) ou a 4 (para Kc_{fin}); e h é a altura média da planta (m) durante a fase 3 (para $Kc_{méd}$) ou a 4 (para Kc_{fin}).

Os valores de Kc determinados com a Equação 10 são ajustes médios para a fase reprodutiva ($Kc_{méd}$) e de maturação (Kc_{fin}). Os valores para as variáveis u_2 e $UR_{mín}$ devem ser tomados como valores médios para aqueles períodos. Também os limites impostos para ambas as variáveis e h devem ser observados.

No caso de Kc_{fin}, a Equação 10 deve ser aplicada somente quando os valores tabulados do Kc excederem 0,45. A equação reduz o valor do Kc_{fin} com o aumento da $UR_{mín}$. Essa redução é característica de culturas que são colhidas verdes, ou antes que se tornem completamente secas (ou seja, Kc_{fin} > 0,45). Nenhum ajuste é necessário quando Kc_{fin}(tab) < 0,45 (isto é, $Kc_{fin} = Kc_{fin}(tab)$). Quando as culturas são deixadas senescendo e secando no campo (como evidenciado por Kc_{fin} < 0,45), u_2 e $UR_{mín}$ têm menos efeito sobre o Kc_{fin}, e o ajuste é desnecessário.

Passos para obtenção da curva do coeficiente de cultura

Somente três valores do coeficiente de cultura são necessários para descrever e construir a curva do Kc, segundo esquema mostrado na Figura 10. Esses valores correspondem ao Kc_{ini}, $Kc_{méd}$ e Kc_{fin}.

Os passos necessários para obter os diferentes valores de Kc nos estádios são dados a seguir (referência):

1) Estabelecer a data de plantio (ou semeadura) e informações locais do clima ou de regiões próximas de condições similares.

2) Determinar a duração total do ciclo de desenvolvimento e a duração de cada fase a partir de informações locais (como referência, verificar a Tabela 7).

3) Estádio inicial (fase 1): prever a frequência de irrigação ou de chuva; para um valor predeterminado de ETo, obter o Kc_{ini} oriundo da Equação 9 e plotar o seu valor como está representado na Figura 10.

4) Estádio de desenvolvimento vegetativo (fase 2): para uma conhecida condição de clima (umidade relativa e vento), selecionar o valor de $Kc_{méd}$ pela Equação 10 e Tabela 8, para a fase 3, e plotá-lo para a fase 2 como uma linha reta entre o valor da fase 1 (Kc_{ini}) e o da fase 3 ($Kc_{méd}$).

5) Estádio reprodutivo (fase 3): para uma conhecida condição de clima (umidade relativa e vento), selecionar o valor de $Kc_{méd}$ conforme o item anterior e assumi-lo como uma linha reta (valor constante) até o início da fase 4.

6) Estádio de maturação (fase 4): também obter o Kc_{fin} (valor pontual) pela Equação 10 e Tabela 8 e plotá-lo como o último valor do ciclo (maturação completa ou ponto de colheita) e ligar esse valor com uma linha reta até o final da fase 3 (Figura 10).

Coeficientes de cultura para culturas perenes

Os valores de Kc para a cultura da banana são apresentados na Tabela 9 para regiões tropicais. Os valores menores do Kc, após o décimo mês, refletem o rápido declínio da área foliar ativa da planta-mãe. Os baixos valores no período inicial se aplicam onde houver muita cobertura morta no solo, enquanto, se a cultura estiver em solo nu e em regiões de chuvas frequentes, os valores de Kc podem ser de 0,8 a 1,0, e a Equação 9 pode ser utilizada.

Os valores de Kc para citros incluem diferentes coberturas de solo, sendo em solo limpo ou sem controle de plantas daninhas (Tabela 10). Esses mesmos valores têm sido utilizados para a cultura da manga.

O efeito de ventos mais fortes é desprezado, tendo em vista que citros têm bom controle de transpiração. Esse controle ou resistência estomática varia com a umidade relativa e temperatura do ar, ou seja, alta resistência sob condições quente e seca e baixa resistência sob condições mais úmida e fria. No entanto, os valores apresentados na Tabela 10 necessitam de um acréscimo de 15% a 20% durante a estação de verão em climas mais úmidos e frios.

Em pomares mais jovens, com baixa porcentagem de árvores cobrindo o solo, os valores de Kc são assumidos de 20% a 50% mais baixos

Tabela 9. Valores do coeficiente de cultura (Kc) para a banana cultivada em clima tropical.

Meses após o plantio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Kc	0,40	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,85	1,00	1,10	1,10	0,90	0,80	0,80	0,95	1,05

Fonte: Doorenbos e Pruitt (1977).

Tabela 10. Valores do coeficiente de cultura (Kc) para citros e manga cultivados no hemisfério sul, cujo cultivo seja em regiões predominantemente secas com vento fraco a moderado.

Condição	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Pomar adulto com aproximadamente 70% de cobertura												
Cultivo limpo	0,65	0,65	0,65	0,70	0,70	0,70	0,75	0,75	0,70	0,70	0,70	0,65
Sem controle[1]	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,90	0,90	0,85	0,85	0,85	0,85
Pomar jovem com aproximadamente 50% de cobertura												
Cultivo limpo	0,55	0,55	0,55	0,55	0,60	0,60	0,65	0,65	0,60	0,60	0,60	0,55
Sem controle[1]	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,90	0,90	0,85	0,85	0,85	0,85
Pomar jovem com aproximadamente 20% de cobertura												
Cultivo limpo	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50	0,45
Sem controle[1]	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	1,00	1,00	0,95	0,95	0,95	0,95

[1] Cultivo sem controle de plantas daninhas.
Fonte: Doorenbos e Pruitt (1977).

em relação à cobertura das árvores adultas. Sob chuva ou irrigações frequentes, os valores para cultivo em solo limpo se aproximarão daqueles com nenhum controle de plantas daninhas.

Alguns estudos indicam valores mais elevados do Kc (de 10% a 15%) para culturas de toranja e de limão, quando comparadas com outros citros.

Os valores de Kc para a cultura da uva podem variar consideravelmente, em função das práticas culturais, variedades, espaçamento, etc. As plantas cultivadas normalmente em solo limpo utilizam menos água do que qualquer outra cultura em razão das suas práticas culturais, resultando em apenas 30% a 50% de cobertura do solo. Também há um maior controle da transpiração pelos estômatos, em comparação com outras culturas.

Na Tabela 11, estão os valores de Kc para cultivo em clima quente e seco, em solo limpo. Os valores deverão ser reduzidos se a cobertura do solo for menor do que 35%.

Entretanto, no cultivo dito em latada, que cobre completamente o solo, deverão ser adotados valores diferentes dos apresentados por Doorenbos e Kassam (1979), os quais serão maiores, de acordo com Soares e Costa (1998). Esses autores apresentam valores de Kc na Tabela 11,

Tabela 11. Valores do coeficiente de cultura (Kc) para uva cultivada no hemisfério sul, em região predominantemente quente e seca e cobertura do solo na fase reprodutiva de 30% a 35%, sob cultivo limpo e vento fraco a moderado.

Idade da cultura[1]	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
< 1 ano	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
1 a 2 anos	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,50	0,50

Idade da cultura[2]	Fase da cultura				
	Poda/ floração	Floração/ chumbinho	Desenvolvimento do fruto/maturação	Maturação/ colheita	Repouso fenológico
> 2 anos	0,40	0,50 a 0,60	0,70 a 0,85	0,70 a 0,50	0,50
	0 a 25 dias	26 a 40 dias	41 a 100 dias	101 a 120 dias	0 a 60 dias

Fonte: [1] Doorenbos e kassam (1979) e [2] Soares e Costa (1998).

para diferentes percentuais de cobertura do solo, em cultivos com mais de 2 anos.

Segundo Doorenbos e Kassam (1979), o valor de Kc para a cultura do abacaxi varia de 0,4 a 0,5 durante todo o período do ciclo da cultura.

Para a cultura do café, no caso de plantas adultas sem sombreamento, em local limpo (sem plantas daninhas), o Kc pode ser considerado 0,90 para todo o ano. Em cultivo em que há ocorrência de plantas daninhas, esse valor se eleva para 1,05 a 1,10. Por ser cultura de ciclo permanente, muitas vezes são considerados os mesmos valores empregados para citros e manga.

Uso do coeficiente de redução em sistemas localizados

Foi visto pela Equação 8 o cálculo da ETc que corresponde ao uso consuntivo estimado convencionalmente.

As copas de plantas jovens (que ainda não cobrem completamente o solo) e de culturas com espaçamentos maiores cobrem somente uma porção da área superficial do solo (menor projeção horizontal) e interceptam apenas uma fração da radiação incidente. As estimativas convencionais de requerimento de água de culturas jovens consideram parte da água aplicada que será perdida pelo uso consuntivo não efetivo. Essas perdas podem ser por meio da evaporação da superfície úmida do solo ou da transpiração de vegetação indesejável (plantas invasoras).

A irrigação localizada reduz as perdas por evaporação ao mínimo; portanto, a transpiração da cultura é considerada praticamente a água total consumida. Entretanto, a estimativa do uso consuntivo que assume uma superfície completamente úmida deve ser modificada para efeito de irrigação localizada.

A transpiração de uma cultura sob irrigação localizada é uma função da evapotranspiração (ETc) calculada convencionalmente e da dimensão da copa da planta. Deve-se, portanto, ao se calcular as necessidades hídricas das culturas na irrigação localizada, aplicar um coeficiente de redução (Kr) ou coeficiente de cobertura, da seguinte forma:

$$ETc_L = Kr \times ETc \quad (11)$$

em que ETc_L é a evapotranspiração da cultura irrigada por sistema localizado (mm dia^{-1}); Kr é o coeficiente de redução para irrigação localizada (adimensional, $Kr \leq 1$); e ETc é a evapotranspiração da cultura estimada convencionalmente (mm dia^{-1}).

Embora a estimativa mais exata de Kr necessite de uma investigação experimental mais profunda, podem-se utilizar várias equações (Keller; Karmeli, 1974, citados por Vermeiren e Jobling, 1997), e a mais recente é aquela apresentada por Keller e Bliesner (1990):

$$Kr = 0{,}1 \times \sqrt{Cs} \quad (12)$$

em que Kr é o coeficiente de redução para irrigação localizada (adimensional, $Kr \leq 1$); e Cs é a porcentagem da área superficial do solo coberta (projetada) pelas copas das culturas ao meio-dia solar (%).

A Equação 12 é baseada na observação de que, mesmo que a copa da planta seja muito pequena (por exemplo, Cs = 1% ou mais), a transpiração mínima da planta sob irrigação localizada será maior que 0,1 ETc (ou 10% da evapotranspiração da cultura calculada no método convencional). Isso é considerado porque ocorre um efeito oásis (advecção), e alguma vegetação adicional comumente cresce na área umedecida pelos emissores. No entanto, quando as copas da planta se desenvolvem até atingirem a cobertura plena (Cs = 100%), o Kr é igual a 1.

A Tabela 12 apresenta os diferentes valores de Kr que resultam do cálculo da Equação 12, segundo a porcentagem de cobertura do solo.

Tabela 12. Valores de coeficiente de redução (Kr) sobre a evapotranspiração da cultura (ETc) segundo a Equação 12.

Cobertura do solo (%)	Kr
10	0,32
20	0,45
30	0,55
40	0,63
50	0,71
60	0,77
70	0,84
80	0,89
90	0,95
100	1,00

Pela Figura 11, pode-se demonstrar como se estima a porcentagem de cobertura (Cs). Essa porcentagem é dada por:

$$Cs = (Ac/Ae) \times 100 \quad (13)$$

em que Cs é a porcentagem de cobertura (%); Ac é a área da copa projetada sobre o solo (m²); e Ae é a área dos espaçamentos entre linhas de plantio e entre plantas (m²).

A área da copa (Ac) pode ser estimada aproximadamente pela área da elipse:

$$Ac = (\pi \times D_1 \times D_2)/4 \quad (14)$$

em que D_1 é o diâmetro maior da elipse projetada no solo (m); e D_2 é o diâmetro menor da elipse projetada no solo (m).

A área dos espaçamentos (Ae) é:

$$Ae = EL \times EP \quad (15)$$

em que EL é o espaçamento entre linhas de plantio (m); e EP é o espaçamento entre plantas (m).

Substituindo as Equações 14 e 15 na Equação 13, então a Cs fica:

$$Cs = (25\pi \times D_1 \times D_2)/(EL \times EP) \quad (16)$$

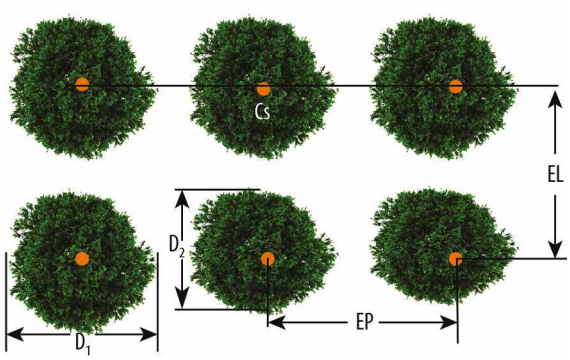


Figura 11. Esquema da projeção horizontal da cobertura da cultura sobre o solo (Cs), sendo EL o espaçamento entre linhas e EP o espaçamento entre plantas. D_1 é o diâmetro maior da projeção da copa no solo e D_2 é o diâmetro menor.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Um pomar maduro de cultura perene tem geralmente um valor máximo de Cs igual a 80%, tendo em vista que a copa tem uma projeção circular sobre um espaçamento quadrado, cujos lados são os espaçamentos entre fileiras e plantas, formando uma relação máxima de $\pi/4$ entre a área circular (da projeção da copa, Ac) e a quadrada (dos espaçamentos, Ae).

Alguns técnicos (irrigação, s.d.) fazem uma correção para a área da copa (Ac) em função da relação entre o diâmetro e a altura da planta, conforme está apresentado na Tabela 13. Assim, por exemplo, se uma árvore tem a sua altura duas vezes maior que o diâmetro (relação diâmetro: altura igual a 2), deverá ser multiplicado o fator de 1,08 sobre a área da sua copa (Ac).

Tabela 13. Valores do fator de correção para a área da copa (Ac) da cultura, em função da relação diâmetro: altura das plantas.

Relação diâmetro : altura	Fator de correção[1]
1:1	1,00
1:2	1,08
1:3	1,13
1:4	1,17
1:5	1,20
1:6	1,23

[1] O fator de correção é multiplicado pela área da copa (Ac).

Uso do coeficiente de estresse para condição de evapotranspiração da cultura fora do padrão

A ETc em condição padrão se refere à cultura em pleno desenvolvimento sem nenhum fator limitante interferindo sobre ela. Esses fatores limitantes principais podem ser deficiência nutricional ou hídrica, ataques de doenças e pragas e competição com plantas invasoras.

A ETc fora do padrão é também denominada de evapotranspiração real (ETr), embora a ETr possa em determinados momentos se igualar à condição padrão, ou seja, $ETr = ETc$. Portanto, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura pode ser que a $ETr \leq ETc$.

A relação entre a ETr e a ETc é regida por um fator de estresse (Ks), assim representado:

$$ETr = Ks \times ETc \quad (17)$$

em que ETr é a evapotranspiração real da cultura (mm dia^{-1}); Ks é o coeficiente de estresse (adimensional); e ETc é a evapotranspiração máxima da cultura (mm dia^{-1}).

O fator limitante que tem efeito sobre o Ks que será dado enfoque aqui é o que se limita ao conteúdo de água no solo. O Ks é mais afeito à transpiração da planta do que à evaporação da água no solo. Por isso, o Ks varia em função do tipo de cultura, conforme já relatado na Tabela 3, em que se visualiza o efeito do coeficiente ou fator de disponibilidade f sobre as culturas, cujo valor obtido se define a água facilmente disponível (AFD).

O valor de Ks é igual a 1 (interpretando-se aqui que não há estresse hídrico ocorrendo) toda vez que a AFD não seja totalmente consumida, ou seja, não há estresse hídrico (ou deficit de água no solo) perturbando a ETr de tal forma que, nesse caso, ETr é igual a ETc. Todavia, toda vez que a AFD seja consumida (e a reserva de água no solo fica além da AFD), o valor de Ks é menor que 1, e então ETr é menor que ETc.

Define-se o termo água não facilmente disponível ($ANFD$) como a capacidade total de água disponível do solo (CAD) subtraída da água facilmente disponível (AFD), e também o termo lâmina de água armazenada no solo ($LArm$) que é lâmina de água presente no solo num tempo qualquer. Tudo isso está representado na Figura 12, em que a umidade volumétrica θ_i (que tem relação com o coeficiente de disponibilidade f) indica a umidade crítica no solo que estabelece o momento da irrigação. Esses valores de θ_i relacionam-se com ψ_i (potencial matricial) pela curva de retenção; eles são apresentados na Tabela 6 para algumas culturas.

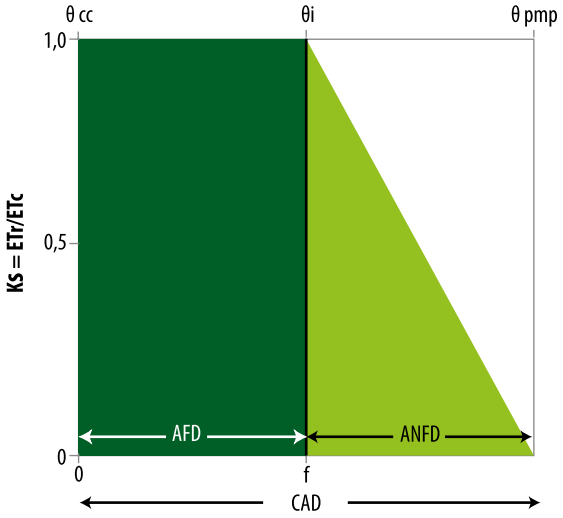


Figura 12. Curva do coeficiente de estresse hídrico (Ks), em função da capacidade total da água disponível no solo (CAD), água facilmente disponível (AFD), coeficiente de disponibilidade (f), água não facilmente disponível (ANFD), umidades do solo na capacidade de campo (θ_{cc}), no ponto de irrigação (θ_i), no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}). (AFD = f × CAD; Ks = ETr/ETc; evapotranspiração real – ETr; evapotranspiração máxima da cultura – ETc).

Há três situações possíveis para obtenção do valor de Ks:

- Se $LArm > (CAD - AFD) \rightarrow Ks = 1{,}0$, ou seja, condição sem estresse;

- Se $LArm = (CAD - AFD) \rightarrow Ks = 1{,}0$, que é o ponto crítico correspondente ao θ_i e onde AFD passa para $ANFD$;
- Se $LArm < (CAD - AFD) \rightarrow Ks < 1{,}0$, condição de estresse em que a $LArm$ entra na faixa de $ANFD$.

A partir do momento em que $Ks < 1{,}0$, a relação do Ks com a CAD e AFD ($= f \times CAD$) do solo pode ser assim definida:

$$Ks = (CAD - LArm)/(CAD - AFD) \quad (18)$$

em que Ks é o coeficiente de estresse hídrico (adimensional, $0 < Ks \leq 1$); CAD é a capacidade de água total disponível do solo (mm cm^{-1}); $LArm$ é a lâmina de água armazenada no solo num tempo qualquer que está dentro da CAD (mm água cm^{-1} solo); AFD é a água facilmente disponível no solo ($= f \times CAD$) (mm cm^{-1}); e f é o coeficiente de disponibilidade de água (adimensional, Tabela 3).

Nas boas práticas para o planejamento do manejo da irrigação, deve-se evitar que Ks se torne menor que 1, de modo a não causar restrição hídrica à cultura que possa comprometer a produtividade e/ou a qualidade do produto final.

Irrigação no dia do plantio e nos dias próximos subsequentes

É recomendável que a irrigação do dia do plantio ou da semeadura se faça de modo a umedecer uma profundidade de solo preestabelecida até a capacidade de campo. Essa camada de solo a considerar deverá ser de, no mínimo, a profundidade máxima efetiva do sistema radicular.

Assim, a equação para calcular a lâmina líquida da irrigação de plantio é semelhante à Equação 1 combinada com a Equação 2 e é escrita da seguinte forma:

$$LL(plantio) = [(CC - Uo)/10] \times d \times Prof \quad (19)$$

em que LL é a lâmina líquida de irrigação a ser aplicada no dia do plantio (mm); CC é a umidade do solo na capacidade de campo (% peso); Uo é a umidade inicial do solo, ou seja, no dia do plantio (% peso); d é a densidade do solo (g cm^{-3}); 10 é a constante necessária para conversão de unidades; e $Prof$ é a profundidade do solo (cm) que se deseja umedecer até a capacidade de campo (CC).

Recomenda-se que $Prof$ seja a profundidade efetiva máxima prevista para o sistema radicular (Z) (cm).

A umidade inicial (Uo) pode ser determinada pelo método gravimétrico por meio de amostra retirada do local até a profundidade $Prof$. Dependendo da condição climática, como, por exemplo, após um período de seca prolongado, o seu valor poderá até ser menor do que o ponto de murcha permanente (PMP).

Considerações sobre o desenvolvimento da cultura logo após o período subsequente ao plantio

Logo após o plantio, a semente ou a muda necessitará de umidade no solo para iniciar o processo de germinação, emergência e de desenvolvimento. A reserva de água no solo necessária à germinação se limita à profundidade de semeadura (Zo) e um pouco além dela. Portanto, é de fundamental importância manter o solo sempre úmido nesse período de pré-emergência. A grande perda de água pelo solo nesse período é em razão da evaporação pela sua superfície. A prática do plantio direto sobre a palhada da cultura antecessora pode contribuir para manter a superfície mais úmida, por causa de menores perdas por evaporação.

Nos cálculos da lâmina líquida (LL) para a fase 1 do ciclo da cultura, normalmente fixa-se a fre-

quência de irrigação (F). Porém, pode ocorrer que a F fixada não seja a adequada para o desenvolvimento da plântula. Como saber se F fixada arbitrariamente é a mais adequada? Vamos, por meio de um exemplo hipotético, analisar essa questão:

Consideremos um solo com CAD de 1,0 mm cm^{-1} de solo, coeficiente de disponibilidade (f) de 0,50 e profundidade de semeadura (Zo) de 5 cm. Se a ETc nessa fase for de 4 mm dia^{-1} e se fixarmos a frequência de irrigação (F) em 2 dias, pode-se calcular a LL por meio da Equação 4 de modo inverso, ou seja:

$$LL = ETc \times F$$

$$LL = 4 \times 2 = 8 \text{ mm}$$

Agora, se usarmos a Equação 1 de modo inverso, para analisarmos o que pode ocorrer com o f ao usarmos LL de 8 mm, então fica:

$$f = LL/(CAD \times Zo)$$

$$f = 8/(1 \times 5) = 1{,}6$$

Com efeito, o coeficiente f não pode ser maior do que 1, o que pressupõe que haverá retirada de água do solo abaixo do PMP, o que causará estresse hídrico à plântula ou prejudicará o processo de germinação.

Analisando de outra forma, se o solo foi irrigado no dia do plantio, estando em sua capacidade máxima de água disponível, a lâmina disponível em 5 cm de profundidade é de 1,0 (mm cm^{-1}) × 5 cm = 5 mm. Não há como retirar 8 mm por evaporação ou pela plântula se a capacidade do solo é de apenas 5 mm.

Portanto, haverá necessidade de reduzir a F para 1 dia, fazendo assim a $LL = ETc = 4$ mm. E o f ficará igual a 4/5 = 0,8. Ainda não é o ideal, mas não haverá redução de umidade no solo aquém do PMP. Nesse presente caso, para manter o f igual a 0,5, haveria necessidade de F ser menor que 1 dia (em horas), o que, às vezes, é inviável para um manejo prático em condição de campo.

Referências

ALBUQUERQUE, P. E. P. de. **Evapotranspiração, balanços de energia e da água no solo e índices de estresse hídrico da cultura, em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), submetido a diferentes frequências de irrigação**. 1997. 147 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

ALBUQUERQUE, P. E. P. de. **Planilha eletrônica para a programação de irrigação em pivôs centrais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 9 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 25).

ALBUQUERQUE, P. E. P. de. **Planilha eletrônica para programação da irrigação em sistemas de aspersão convencional, pivô central e sulcos**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. 18 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 97).

ALBUQUERQUE, P. E. P. de.; ANDRADE, C. L. T. **Planilha eletrônica para a programação da irrigação de culturas anuais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001. 14 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 10).

ALBUQUERQUE, P. E. P. de; GUIMARÃES, D. P. Gestão da água na agricultura: coeficientes de cultivo (Kc) e de tanque classe A (Kp): um exemplo metodológico de estimativa do Kc da cultura do milho e do Kp para o Estado de Minas Gerais. **Item**, v. 63, p. 12-19, 2004.

ALBUQUERQUE, P. E. P. de; GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C.; COELHO, E. A.; FARIA, C. M. de. **Aplicativo computacional "Irrigafácil" versão 2.1 implementado via web para o manejo de irrigação de algumas culturas anuais no Brasil**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014. 4 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado técnico, 208).

ALBUQUERQUE, P. E. P. de; LANDAU, E. C.; GUIMARÃES, D. P. **Aplicativo computacional "Irrigafácil" versão 2.0 implementado via web para o manejo de irrigação de algumas culturas anuais em Minas Gerais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 25 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 164).

ALBUQUERQUE, P. E. P. de; RESENDE, M.; FRANCA, G. E.de; MAGALHÃES, P. C. Efeito da época de suspensão da irrigação na produtividade do milho. In: EMBRAPA. Centro de Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. **Relatório técnico anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo 1988-1991**. Sete Lagoas, 1992. p. 29-30.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 56).

ARRUDA, F. B.; ZULLO JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, J. B. de. Parâmetros de solo para cálculo da água disponível baseado na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 11-15, 1987.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos del agua en el rendimento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212 p. (Estudio FAO riego y drenage, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Roma: FAO, 1977. 144 p. (Irrigation and drainage paper, 24).

GRATTAN, S. R.; SNYDER, R. L.; ROBINSON, F. E. Yield threshold soil water depletion. In: GOLDHAMER, D. A.; SNYDER, R. L. (ed.). **Irrigation scheduling**: a guide for efficient on-farm water management. Oakland: University of California, 1989. p. 32-33.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Chapman & Hall, 1990. 652 p.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, H. P. R.; SILVA, W. L. C. **Manejo da irrigação em hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa-CNPH, 1986. 12 p. (Embrapa-CNPH. Circular técnica, 2).

MOREIRA, H. J. da C. **S.A.A.C.I. - Sistema Agroclimatológico para o Acompanhamento das Culturas Irrigadas**: manual prático para o manejo da irrigação. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Irrigação, 1992. 86 p.

MOREIRA, H. J. da C.; TORRES FILHO, D. R. **S.A.A.C.I. - Sistema Agroclimatológico para o Acompanhamento das Culturas Irrigadas**: manual do usuário. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Irrigação, 1993. 75 p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

RESENDE, M.; ALVES, V. M. C.; FRANÇA, G. E.; MONTEIRO, J. A. Manejo de irrigação e fertilizantes na cultura do milho. **Informe Agropecuário**, v. 14, n. 164, p. 26-34, 1990.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. Viçosa, MG: Ed. da UFV, 1995. 304 p.

RICHETTI, A.; FLUMIGNAN, D. L.; ALMEIDA, A. C. S. **Viabilidade econômica da soja irrigada na safra 2015/2016, na região Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2015. 7 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado técnico, 203). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1025764/1/COT2015203.pdf. Acesso em: 11 fev. 2017.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. **Manejo da irrigação do feijoeiro**: uso do tensiômetro e avaliação do desempenho do pivô central. Brasília, DF: Embrapa-SPI, 1994. 46 p. (Embrapa-CNPAF. Circular técnica, 27).

SMITH, M. **CROPWAT - Programa de ordenador para planificar y manejar el riego**. Roma: FAO, 1993. 133 p. (Estudio FAO riego y drenaje, 46).

SOARES, J. M.; COSTA, F. F. Irrigação na cultura da videira. **Informe Agropecuário**, v. 19, n. 194, p. 58-59, 1998.

SOLOMON, K. H. Irrigation systems and their water application efficiencies. **Agribusiness worldwide**, v. 12, n. 5, p. 16-24, 1990.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. **Irrigação localizada**. Campina Grande: Ed. da UFPB, 1997. 184 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 36).



Capítulo 10

Aplicação de fertilizantes e agroquímicos via água de irrigação

José Maria Pinto
Ricardo Augusto Lopes Brito
Davi José Silva

Introdução

A irrigação desenvolveu-se consideravelmente nas últimas décadas, tanto no que diz respeito ao aprimoramento de novos métodos e equipamentos de se levar água ao solo e às culturas, como no incremento de novas áreas irrigadas, com acréscimo na demanda por recursos hídricos. Dentre as vantagens da irrigação, está aquela que possibilita utilizar o próprio sistema de irrigação como meio condutor e distribuidor de produtos químicos como fertilizantes (fertirrigação) e agroquímicos (inseticidas, herbicidas, nematicidas, reguladores de crescimento, entre outros), simultaneamente com a água de irrigação (quimigação).

Com a evolução dos sistemas de irrigação, a introdução de novos agroquímicos e produtos biológicos no mercado, o aumento crescente do custo da mão de obra e a necessidade de elevar a eficiência da aplicação de insumos e, consequentemente, a eficiência na produção agrícola, grande relevância tem sido dada à quimigação.

Entre as vantagens que podem ser apontadas nesse tipo de manejo, cita-se a redução de custos e de riscos de contaminação de operadores na aplicação de produtos químicos, aliada ao aumento da eficiência de uso dos insumos agrícolas, inclusive a água, que, além de distribuída heterogeneamente espacial e temporalmente, está se tornando escassa em algumas regiões produtoras importantes do mundo.

No Brasil, o manejo mais utilizado na quimigação é a aplicação de fertilizantes (fertirrigação), pelos resultados gerados e já validados para diversas culturas agrícolas, estando entre as técnicas mais eficientes e econômicas de aplicação de fertilizantes às plantas, principalmente em regiões áridas e semiáridas. No entanto, a aplicação de agroquímicos está crescendo em função das vantagens e praticidade inerentes a essa tecnologia para agricultura irrigada.

Fertirrigação

A fertirrigação é a técnica que consiste em distribuir nutrientes no solo cultivado através da água empregada na irrigação. No processo, é feita a introdução de uma solução com fertilizante via água de irrigação, com o objetivo de aplicar os nutrientes apenas no volume de solo explorado pelo sistema radicular da cultura, conforme a curva de absorção de nutrientes pela planta (Lorenz; Maynard, 1988; Sousa et al., 2011) e, portanto, diferindo da aplicação de fertilizantes diretamente no solo. A fertirrigação também deve permitir que a concentração na solução do solo seja suficiente para proporcionar a absorção dos elementos em quantidade necessária.

Entre as principais vantagens da fertirrigação, destacam-se:

- Melhoria da eficiência e uniformidade de aplicação de nutrientes, desde que o sistema de irrigação também tenha boa uniformidade de distribuição de água.

- Possibilidade de redução na dosagem de nutrientes pela sua aplicação nos momentos e nas quantidades exatas requeridas pelas plantas.
- Maior aproveitamento do equipamento de irrigação.
- Menor compactação do solo e redução dos danos físicos às plantas com a redução do tráfego de máquinas dentro da área.
- Redução de contaminação do meio ambiente em razão do melhor aproveitamento dos nutrientes móveis no solo quando aplicados via água em irrigação localizada.
- Diminuição da utilização de mão de obra.
- Otimização da distribuição dos nutrientes durante o ciclo do desenvolvimento fenológico, ou seja, sincronização do suporte nutricional no solo com a exportação realizada pela planta (Pinto; Soares, 1990).
- Possibilidade de aumento do retorno financeiro e preservação ambiental, em razão do aumento na produtividade, da melhora na qualidade do produto, do uso eficiente das aplicações e da economia de energia, de insumos, de mão de obra e do uso racional de recursos hídricos (Papadopoulos, 2001).

Como limitações[1] têm-se:

- Exigência de adubos específicos e cálculos das formulações.
- Possibilidade de causar corrosão nos equipamentos do sistema de irrigação.
- Favorecimento das obstruções do sistema de irrigação.

[1] Adotou-se o termo "limitação" em vez do termo "desvantagem" em razão de a prática de fertirrigação em si, se corretamente executada, não apresentar desvantagens quando comparada à adubação convencional. Alguns inconvenientes ocorrem quando não são observados aspectos relacionados à nutrição das plantas, à química, à física e à fertilidade dos solos, à fisiologia vegetal, à qualidade da água utilizada na irrigação e ao manejo adequado da irrigação.

Com o desenvolvimento da agricultura orgânica e oferta de insumos apropriados para esse tipo de cultivo, a fertirrigação pode ser mineral ou orgânica, conforme se trate de aplicação de fertilizantes químicos ou resíduos orgânicos como vinhaça, biofertilizantes, chorumes e águas residuais provenientes de esgotos domésticos (Hernandez, 1993; Frizzone et al., 1994). Para quaisquer destes, deve-se obedecer ao princípio de aplicação de fertilizantes via fertirrigação, que preconiza o uso de fertilizantes solúveis em água e de equipamentos específicos para injetar a solução nas linhas de irrigação. Essa característica permite uma aplicação adequada e uniforme de fertilizantes com água de irrigação, viabilizando o acompanhamento e o controle dos nutrientes no perfil do solo e de seus efeitos na água, no solo e na planta.

Equipamentos para a fertirrigação

Para a aplicação da fertirrigação, os sistemas de irrigação pressurizados são os mais indicados, destacando-se a irrigação localizada, especialmente o gotejamento, dado às suas características de aplicação de água pontual no volume de solo onde há concentração das raízes das plantas, onde a água e os nutrientes são distribuídos, obedecendo às exigências da cultura, conforme as fases de seu ciclo, o que favorece a absorção simultaneamente deles pelas raízes das plantas (Lopez, 2001).

Para a correta utilização da fertirrigação, são necessários alguns equipamentos e acessórios que variam de acordo com o sistema de irrigação utilizado (Antunes et al., 2001). Para a escolha dos equipamentos, devem ser considerados: o volume a ser aplicado, a capacidade, a precisão de funcionamento, a forma de operação, a mobilidade do equipamento e a diluição dos fertilizantes (Brito; Pinto, 2008).

O primeiro passo é a dissolução dos fertilizantes em um tanque com sistema de agitação, tanque reservatório e sistema de injeção da solução no sistema de irrigação.

Tanque ou reservatório para dissolução de fertilizantes

Todo sistema de injeção de fertilizante requer um tanque ou reservatório para dissolução dos produtos químicos e um sistema de agitação para esses produtos. O material utilizado na confecção desse tanque deve resistir à corrosão causada pelos fertilizantes. O sistema de agitação pode ser manual ou mecânico (Figura 1). Existem estudos para uso de aeração forçada para misturar os produtos a serem dissolvidos. O tamanho e o formato são funções da estratégia agronômica da produção, tamanho da parcela a receber a fertirrigação, da capacidade de injeção e da solubilidade do fertilizante utilizado.

O volume mínimo do reservatório deve ser suficiente para a fertirrigação de uma unidade de rega, sem que se requeira o reabastecimento. O volume do reservatório pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$V = (nQ_f \times A)/sol \quad (1)$$

em que V é o volume do reservatório (m^{-3}); n é o número de aplicações; Q_f é a quantidade de fertilizantes (kg ha^{-1}); A é a área a ser fertirrigada (ha); e sol é a solubilidade do fertilizante (kg m^{-3}).

Sistemas de injeção de fertilizantes

Para a realização da fertirrigação, é necessário que o sistema de irrigação seja dotado de um equipamento para injetar os adubos na água de irrigação, que difere segundo o tipo de energia exigida para seu funcionamento, o seu custo e a sua facilidade de manuseio.

Os métodos de injeção de produtos químicos via água de irrigação podem ser classificados em diversos grupos (Haman et al., 1990; Pizarro, 1996), os quais didaticamente estariam classificados em:

- Bomba centrífuga (bomba dosadora, pressão positiva e negativa);
- Diferencial de pressão (Venturi);
- Gravidade (carga estável, variável e orifício).

Tanque de derivação ou tanque fertilizante (diferencial de pressão)

O tanque de derivação de fluxo é um recipiente metálico ou de plástico com tampas herméticas, geralmente de forma cilíndrica e de volume variado, é conectado em dois pontos da tubulação principal do sistema de irrigação (Figura 2). Consiste em um depósito onde se coloca a solução de fertilizantes a ser aplicada e



Fotos: José Maria Pinto

Figura 1. Tanques para dissolução de fertilizantes com agitador manual (A) e mecânico, em que se programa o deslocamento do conjunto motor com hélice (B).

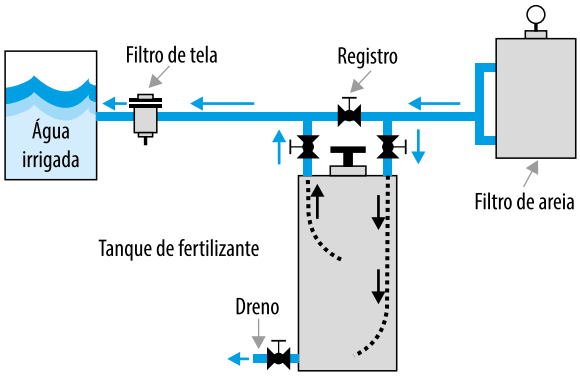


Figura 2. Tanque de fertilizante.

Ilustração: Carlos Eduardo Felice Barbeiro.

que, uma vez fechado, alcança em seu interior a mesma pressão que a rede de irrigação. Por isso o tanque deve ser capaz de suportar a pressão estática e dinâmica da rede. O normal é que resista cerca de 300 kPa, como mínimo, ainda que se recomende suportar uma pressão de trabalho cerca de 600 kPa (Lopez et al., 1997; Lopez, 1998). Seu volume varia entre 20 L e 200 L, e o dimensionamento pode ser calculado, utilizando-se a equação:

$$V = (Q_f \times A_s)/C_f \quad (2)$$

em que V é o volume do tanque de fertilizante (L); Q_f é a quantidade de fertilizantes a ser aplicada por irrigação (kg ha^{-1}); A_s é a área que o sistema irriga por vez (ha); e C_f é a concentração do fertilizante (kg L^{-1}).

Para haver injeção da solução fertilizante que está dentro do tanque, é necessário que haja um diferencial de pressão entre o ponto de entrada da água do sistema no tanque e o de saída da solução. A solução é incorporada na tubulação de descarga do sistema de irrigação através da segunda tubulação que sai do reservatório. Um registro de fechamento lento é instalado entre os pontos de entrada e saída das duas tubulações citadas, justamente para criar o diferencial de pressão, que permite o funcionamento do tanque pressurizado, que faz com que a água seja desviada, em maior ou menor volume, para o interior do tanque. A tubulação de entrada conduz a água limpa para o tanque que contém a solução a ser aplicada, e, após a diluição, ela passa a ser conduzida pela tubulação de saída e introduzida na tubulação principal do sistema de irrigação.

Esses dispositivos são colocados em paralelo com relação à tubulação de irrigação, e a diferença de pressão da ordem de 10 kPa a 50 kPa, entre a entrada e a saída do tanque de fertilizante, causadora do fluxo através do tanque, é alcançada por intermédio da instalação de um registro na linha principal do sistema, entre os pontos de saída para o tanque e de retorno do tanque.

Para a injeção do fertilizante na tubulação de irrigação, fecha-se até certo ponto o registro que está na linha principal, para que parte da água destinada à irrigação passe pelo tanque. Portanto, pode-se regular a vazão até o tanque, mediante o registro na linha principal. Como a vazão de água que entra no tanque é igual à vazão da solução fertilizante que sai dele, evidentemente a solução de fertilizante que fica no tanque vai diluindo com o tempo de funcionamento, e a concentração da solução incorporada à rede também vai diminuindo.

A quantidade de fertilizante (Q_f) que permanece no interior do tanque, depois de transcorrido o tempo (T), é dada pela equação:

$$Q_f = Q_0 \times e^{-(qT/V)} \quad (3)$$

em que Q_0 é a quantidade inicial de fertilizante (kg L^{-1}); q é o fluxo que circula através do tanque (L h^{-1}); V é o volume do tanque (L); T é o tempo transcorrido de aplicação (h); e e é a base do logaritmo neperiano.

Passando pelo tanque um volume de solução correspondente a duas vezes o volume do tanque, a quantidade de nutrientes incorporada à água de irrigação será de 95%; e, quando houver circulado quatro vezes o volume do tanque, a quantidade de nutrientes incorporada se aproxima de 98% do fertilizante inicial (Figura 3).

Na prática, a concentração de fertilizante restante no tanque, ao final da fertirrigação, deve ser inferior a 2%.

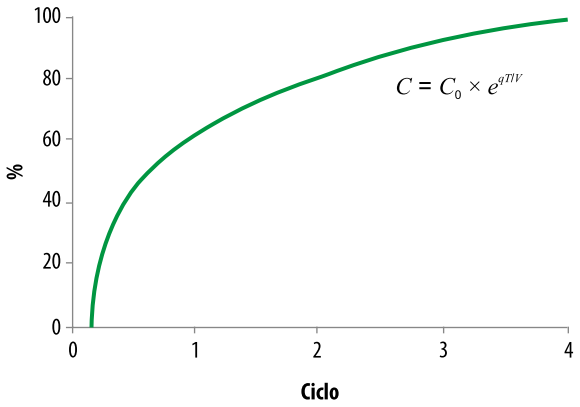


Figura 3. Porcentagem de fertilizante aplicado por ciclo.

O tempo será:

$$T = (V/q) \times ln(Q_f/Q_0) \quad (4)$$

A vazão, q (L h^{-1}), que deve passar através do tanque para aplicar o fertilizante pode ser calculada pela equação:

$$q = 4V/(tr \times ta) \quad (5)$$

em que $tr \times ta$ é o tempo útil de aplicação de fertilizante, sendo tr a relação entre o tempo de aplicação de fertilizante e o tempo de aplicação da irrigação, que usualmente é de 0,8; e ta, o tempo de aplicação da irrigação (h).

O tempo mínimo de aplicação da irrigação quando se está fazendo fertirrigação pode ser determinado pela equação:

$$ta = 5V/q \quad (6)$$

em que V é o volume do tanque (L); e ta é o tempo de aplicação da irrigação (h).

Esse método baseia-se no princípio de transformação de formas de energia, ou seja, a energia de velocidade da água, dentro da tubulação, transforma-se em energia de pressão, a qual novamente transforma-se em energia de velocidade. Esse processo ocorre mediante perda de energia, que deve ser mínima para que o método torne-se eficiente.

As vantagens do sistema são simplicidade de construção e operação e seu baixo custo. Não há necessidade de um suprimento externo de energia e não é sensível às mudanças na pressão ou na taxa de fluxo. As desvantagens do sistema são a concentração variável de nutrientes que causa um aumento da dose do produto químico a ser aplicado no início do ciclo de irrigação, e a obrigatoriedade de o tanque ser reabastecido com a solução a cada irrigação. Esse sistema não é recomendável para irrigação automática.

Injetor tipo Venturi (diferencial de pressão efetiva negativa)

O injetor tipo Venturi é um equipamento de PVC, polietileno ou acrílico, constituído de seção convergente gradual, seguida de uma seção estrangulada e de uma seção divergente gradual, para diâmetro igual ao da tubulação a que ele está conectado (Figuras 4 a 7). Seu princípio de funcionamento baseia-se na transformação de formas de energia, ou seja, parte da energia de pressão da água de irrigação é transformada em energia cinética quando passa pela secção estrangulada do equipamento. As vantagens são: custo baixo, capacidade de injeção para pressões e vazões bem definidas, possibilidade de controle da taxa, usando-se apenas um registro, e pode ser usado para outros tipos de produtos na quimigação. É de fácil manutenção, mas pode sofrer variação na taxa de injeção do produto. Entretanto, as perdas de carga podem alcançar de 20% a 30% da pressão de serviço. A concentração da solução fertilizante no injetor tipo Venturi é constante no decorrer do tempo de aplicação.

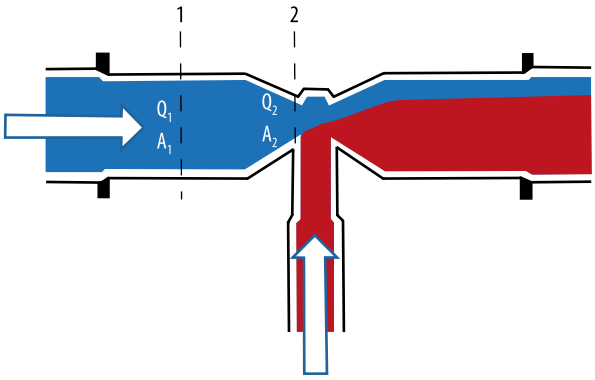


Figura 4. Detalhe do sistema hidráulico de um Venturi.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

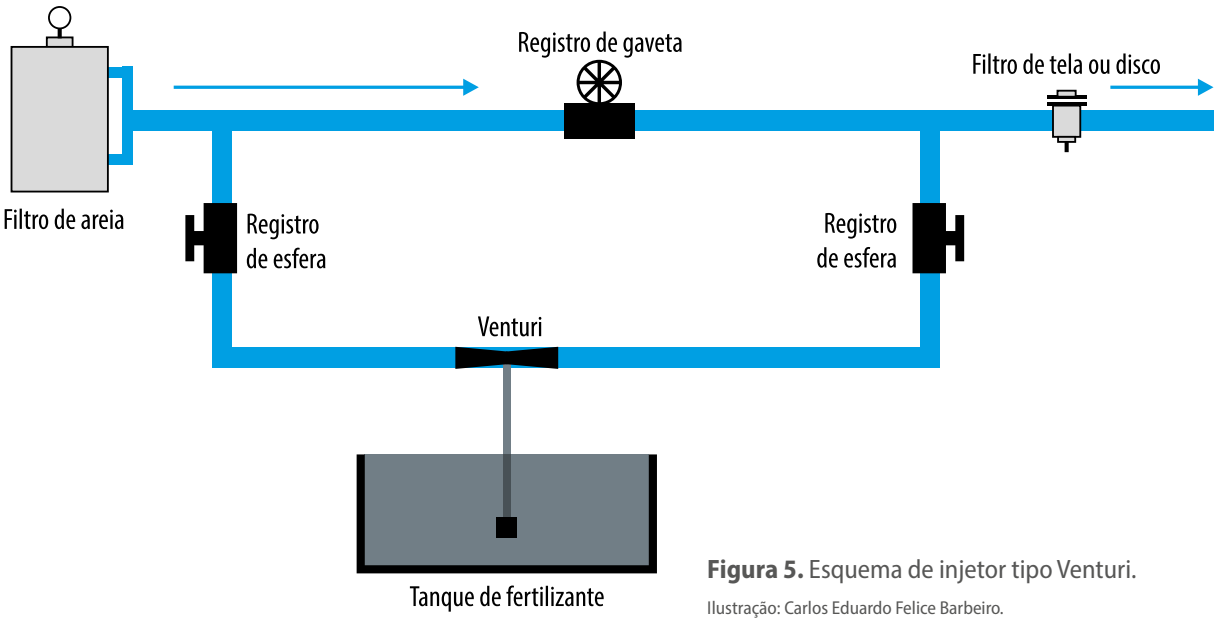


Figura 5. Esquema de injetor tipo Venturi.

Ilustração: Carlos Eduardo Felice Barbeiro.

Partindo-se do pressuposto que a vazão no ponto 1 é igual à vazão no ponto 2 (Figura 4), de acordo com a equação da continuidade:

$$Q_1 = Q_2 = A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2 \quad (7)$$

em que Q é a vazão da linha de irrigação ($m^3\ s^{-1}$); A é a área da seção transversal da tubulação (m^2); e V é a velocidade do fluxo da água ($m\ s^{-1}$).

A área A_1 (tubulação) é superior à área A_2 (Venturi). Para que a equação da continuidade seja observada, é necessário que a velocidade do fluxo V_2 seja superior à velocidade do fluxo V_1. É essa transformação de energia cinética que provoca o diferencial de pressão entre os pontos 1 e 2, provocando uma pressão negativa ou sucção no ponto 2, onde se encontra conectado o depósito com a solução fertilizante.

As características desses injetores de fertilizantes são a simplicidade do dispositivo, baixo custo, fácil manutenção e durabilidade, além de não necessitar de uma fonte de energia especial. Como limitação, pode-se citar a grande

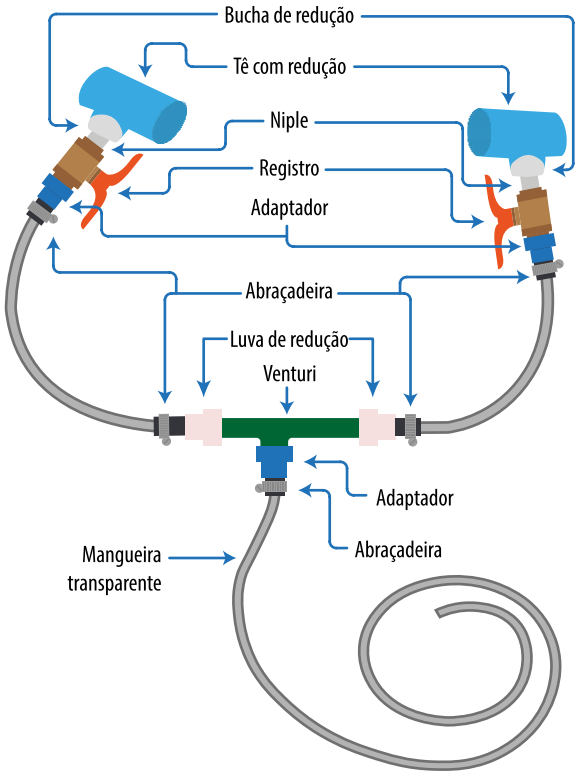


Figura 6. Esquema de montagem de um injetor de fertilizante tipo Venturi.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

perda de carga provocada pelo estrangulamento da tubulação, podendo variar de 10% a 50% da pressão de entrada (Pascual, 1996), dependendo do modelo. Entretanto, existem soluções alternativas para contornar essa limitação, como a instalação do injetor com uma bomba auxiliar.

Instalação de injetor com bomba auxiliar

Em muitos casos, quando se quer evitar grandes perdas de carga, instala-se um pequeno equipamento de bombeamento antes do Venturi, denominado bomba *buster*, que é uma bomba auxiliar instalada para proporcionar o diferencial de pressão necessário para injeção do fertilizante através do Venturi (Figura 8). Apresenta como desvantagem o custo mais elevado de instalação do sistema. O cálculo da pressão que deve fornecer o equipamento de bombeamento é feito por meio da equação:

$$H' = H\,[\Delta p/(1 - \Delta p)] \qquad (8)$$

em que Δp é a perda de carga do Venturi em relação à pressão da rede (decimal); H é a pressão da rede; e H' é a pressão a fornecer pelo equipamento de bombeamento.

Bombas injetoras (pressão efetiva positiva)

As bombas injetoras são equipamentos que trabalham com pressão efetiva positiva e superior àquela do sistema de irrigação. São confeccionadas com material resistente à corrosão e são dos tipos centrífuga, diafragma e pistão. Apresentam a vantagem de injetar a solução na água de irrigação em taxa constante, o que nem sempre acontece com outros sistemas. Como desvantagem, seu alto custo, que às vezes inviabiliza sua aplicabilidade. O princípio de operação é o seguinte: injeção da solução em



Fotos: José Maria Pinto

Figura 7. Detalhe de Venturi no cabeçal de controle.

Foto: José Maria Pinto



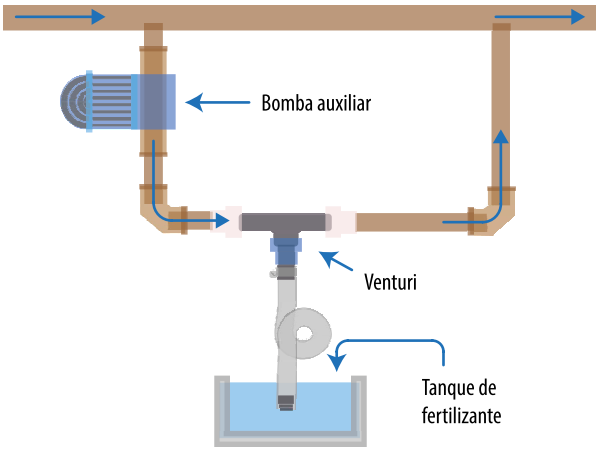


Figura 8. Instalação de Venturi utilizando bomba auxiliar (à esquerda).

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

um tanque aberto, na rede de irrigação, a uma pressão superior à água na tubulação de irrigação, utilizando uma bomba apropriada. Essa bomba pode ser acionada por sistema elétrico, hidráulico ou por motor à combustão. Em geral, injetam uma quantidade de fertilizantes calculada para que proporcione uma concentração de nutriente específica na água de irrigação (Brito; Pinto, 2008).

1) Bombas injetoras com motor elétrico

As bombas injetoras com motores elétricos foram desenvolvidas para a injeção de fertilizantes. Consistem em bombas de deslocamento positivo, que podem ser de pistão ou de diafragma, acionadas por um motor elétrico de baixa potência (0,25 kw a 1 kw), fabricadas com materiais não corrosivos (Figura 9). As vazões variam de 20 L h^{-1} a mais de 600 L h^{-1}.

A vazão teórica injetada por uma bomba injetora elétrica de pistão é dada por:

$$Q = \pi \times N \times R^2 \times C \qquad (9)$$

em que Q é a vazão da bomba (L h^{-1}); N é o número de ciclos aspiração-impulsão (1 hora); R é o raio do pistão (cm); e C é o deslocamento horizontal (cm).

Para modificar a vazão, pode-se variar a velocidade do pistão ou o número N de ciclos por hora. O usual é o primeiro: as bombas injetoras têm um comando exterior para regular a vazão

Fotos: José Maria Pinto



Figura 9. Bomba injetora com motor elétrico.

(parafuso micrométrico), que atua deslocando a excêntrica, modificando a velocidade do pistão, o qual regula a vazão. A regulagem pode ser feita com a bomba parada ou em funcionamento.

Nas bombas de membrana, o elemento alternativo é um diafragma flexível que oscila por um dispositivo mecânico como nas bombas de pistão, ou pelas pulsações de pressão iniciadas em uma câmara de fluidos. Esse tipo se denomina de acionamento hidráulico.

2) Bombas injetoras com acionamento hidráulico

O injetor hidráulico é uma bomba constituída por uma pequena câmara que alternativamente se enche e esvazia acionada por um motor hidráulico de movimento alternado, que utiliza a pressão da própria rede de irrigação. O período de enchimento da câmara corresponde à sucção da solução de fertilizante de um depósito que, quando se esvazia, injeta-a na rede de irrigação. O dosificador é conectado à tubulação de irrigação entre dois pontos (Figuras 10 e 11). Alguns modelos necessitam de uma pressão mínima de operação de 2 kPa, o que pode constituir um inconveniente, sobretudo em sistema de irrigação de baixa pressão. Podem trabalhar com pressão até 8 kPa. A água utilizada para acionar o dosificador é drenada e corresponde a um volume de, aproximadamente, o dobro da solução de fertilizante injetada.

O volume injetado está definido pela equação:

$$V = v \times n \times t \qquad (10)$$

em que V é o volume injetado no tempo t (L); v é o volume injetado em um movimento do êmbolo (L); n é o número de movimento do êmbolo por unidade de tempo; e t é o tempo de funcionamento.

Para controlar a dosificação, o n varia ajustando a pressão de entrada na bomba mediante uma válvula. Para cada modelo, o fabricante deverá proporcionar um gráfico ou uma tabela que relacione a pressão de entrada com o número de movimento do êmbolo por unidade de tempo.

As vantagens desse sistema são: utilizam como fonte de energia para acionamento a própria pressão da água na rede de irrigação; a vazão pode ser regulada, normalmente entre 20 L h^{-1} e 300 L h^{-1}; são portáteis; e não provocam perda de carga na tubulação de irrigação. Tem como

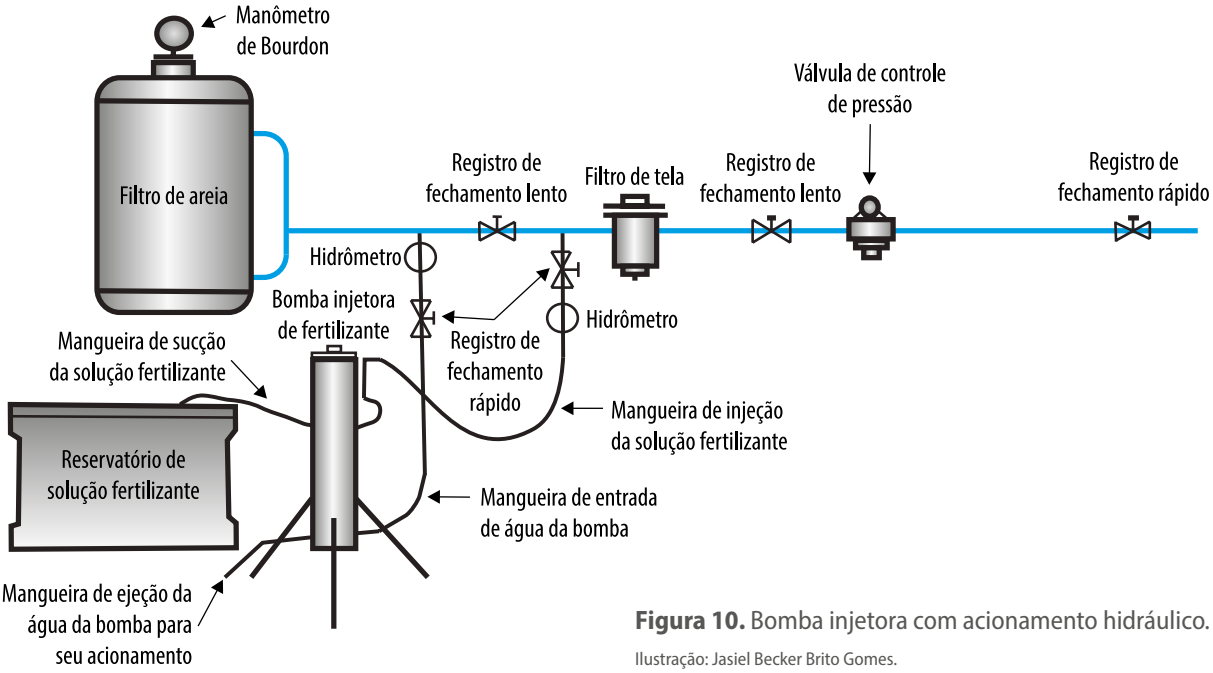


Figura 10. Bomba injetora com acionamento hidráulico.
Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Fotos: José Maria Pinto



Figura 11. Bomba injetora com acionamento hidráulico TMB.

desvantagens a necessidade de uma pressão mínima de 2 kPa e o alto custo.

3) Bomba injetora de
ação hidráulica por pistão

Como a bomba injetora por acionamento hidráulico, o dosificador hidráulico acionado por pistão também não requer energia elétrica para o seu funcionamento. Sua instalação se dá da mesma forma que o injetor Venturi. Eles são indicados em instalações comunitárias, onde a água é fornecida com pressão muito superior à necessária, ou então, quando se dispõe de um reservatório que se encontra em uma cota muito elevada. Em razão da complexidade do equipamento, por possuir numerosas peças móveis, a qualidade da água é de fundamental importância, considerando que qualquer impureza pode afetar o bom funcionamento do injetor.

Na Figura 12, está apresentado um modelo comercial como também os métodos de instalação do equipamento. Esse modelo tem a capacidade de injetar soluções fertilizantes uniformemente na faixa de 20 L h^{-1} a 250 L h^{-1}, em uma razão de diluição de 1:500 a 1:50, ou seja, de 0,2% a 2%.

Critérios de escolha dos equipamentos de injeção de fertilizantes

Para seleção do injetor de fertilizante, devem-se considerar fatores específicos inerentes ao método de aplicação, como disponibilidade de energia elétrica no local e pressão disponível na tubulação. Quando há disponibilidade de energia elétrica, só podem ser instaladas bombas e dosificadores elétricos. Quando não se dispõe de eletricidade, as alternativas são os tanques de derivação ou de fertilizantes, injetores Venturi e os dosificadores hidráulicos que aproveitam apenas a pressão hidráulica da rede de irrigação.

A quantidade de solução que o reservatório de fertilizante pode conter e as vazões totais que se podem introduzir na rede de irrigação são funções da frequência de irrigação, necessidade total de fertilizante e forma de aplicação dos fertilizantes. Sistemas de irrigação localizados podem ser subdivididos em parcelas menores, diferente de sistema de irrigação por pivô central, que irriga áreas maiores, consequentemente o volume e a capacidade do sistema de fertirrigação devem ser conhecidos. Na Tabela 1, consta a comparação dos métodos de injeção de produtos químicos.

Foto: José Maria Pinto

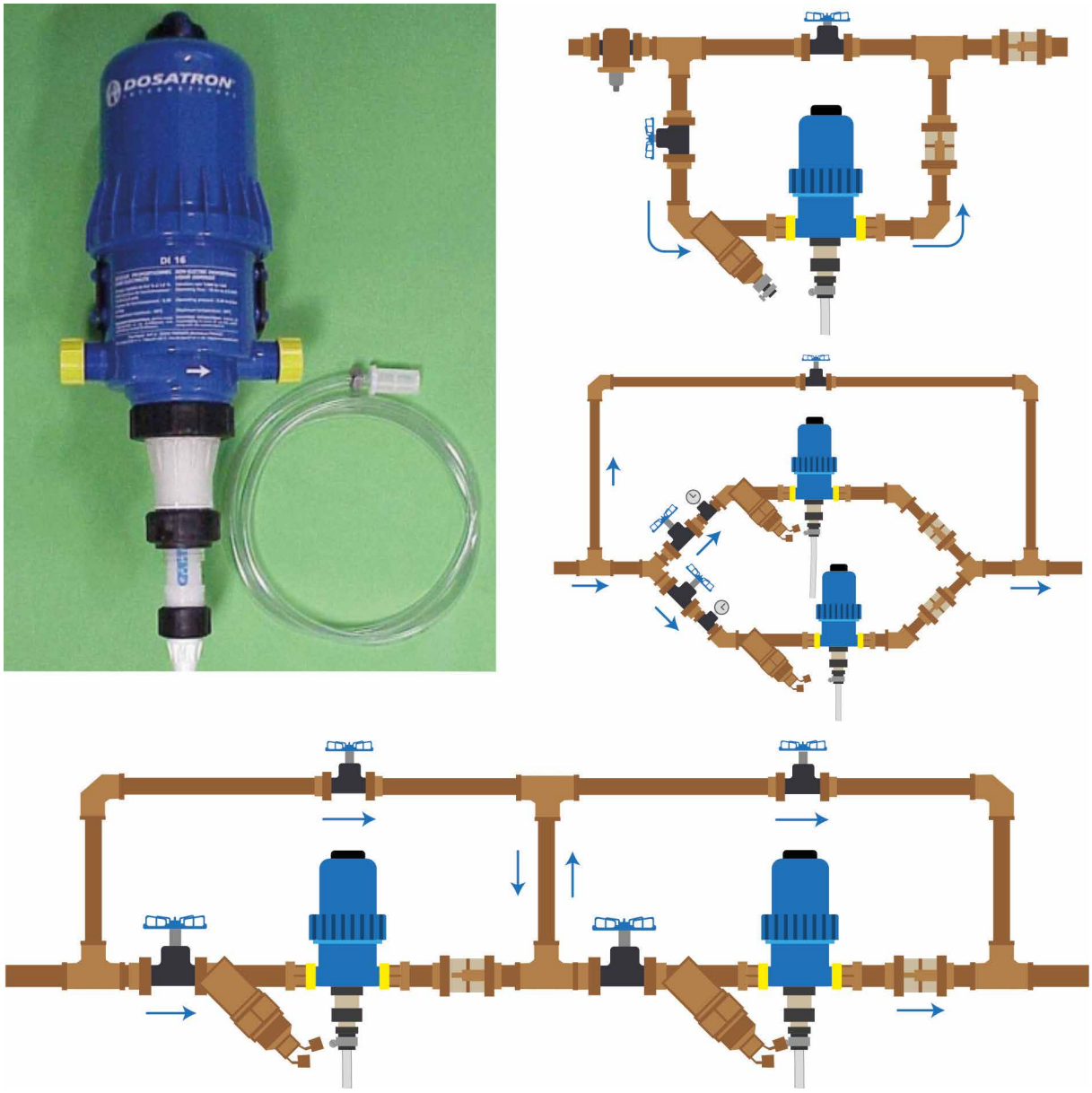


Figura 12. Bomba injetora de ação hidráulica por pistão.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Calibração

A calibração é extremamente importante, envolvendo o sistema de irrigação e o sistema de aplicação de produtos químicos, pois a distribuição da água no sistema de irrigação deve ser uniforme para distribuir também, uniformemente, os produtos químicos. A calibração é um procedimento simples e análogo para os diversos métodos de irrigação. Além disso, é essencial para o bom desempenho da tecnologia de aplicação de produtos químicos.

Aplicação de fertilizantes

Fertilizantes solúveis em água podem ser aplicados via água de irrigação. No Brasil, não temos lei que normatiza a aplicação de produtos químicos via água, diferente de outros países. Como exemplo, cita-se a Califórnia, os USA, que permitem aplicar 10 ppm de nitrogênio (N). Outro fator a ser considerado é a legislação brasileira para fertilizantes que é antiga, atende à aplicação manual e mecanizada de fertilizantes, mas não é adequada à fertirrigação, pois os fer-

Tabela 1. Comparação dos diversos métodos de injeção de produtos químicos.

Injetor	Vantagem	Desvantagem
Bomba centrífuga		
Pressão positiva "recalque"	Baixo custo. Pode ser calibrada, durante o funcionamento	Calibração depende da pressão do sistema. Baixo controle da dose do nutriente injetado
Dosadora "piston"	Alta precisão e pressão de trabalho	Alto custo
Pressão negativa "sucção"	Baixo custo. Pode ser calibrada durante o funcionamento	Injeção do produto depende da bomba do sistema. Possibilidade de corroê-la e poluir manancial. Baixo controle da qualidade do produto injetado
Diferencial de pressão "Peças especiais"		
Venturi	Médio custo. Fácil uso; movido pela energia d'água do sistema calibração; possível durante a operação	Cria zona de baixa pressão no sistema. Calibração depende da concentração do produto no depósito
Combinado/Composto "gravitacional, bomba principal e auxiliar"	Médio custo. Movido pela energia d'água do sistema (principal e auxiliar) e gravitacional	Controle relativo da quantidade de produto injetado, baixa precisão

tilizantes permitidos por lei contêm impurezas. Para a fertirrigação, há necessidade de ajustar a legislação brasileira sobre fertilizantes.

Fertilizantes

Os fertilizantes para uso em irrigação podem ser agrupados em duas classes:

- Fertilizantes líquidos: abastecidos nos tanques na forma de solução, sem necessidade de tratamento prévio.
- Fertilizantes sólidos facilmente solúveis: devem dissolver-se facilmente antes do início da fertirrigação.

Esses fertilizantes podem ser apresentados na forma simples ou em combinações com dois ou mais elementos.

A escolha do fertilizante deve ser feita com base nas características de cada produto, visando atender às necessidades dos demais elementos envolvidos no processo, tais como: sistema de irrigação, textura do solo, qualidade da água, custo e exigências nutricionais da planta.

Fertilizantes nitrogenados

O nitrogênio (N) é o nutriente utilizado com maior frequência na fertirrigação. Existem vários fertilizantes contendo compostos nitrogenados que podem ser usados na fertirrigação. As formas mais comuns desses compostos são: nitratos, amônio, amida e aminoácidos (Tabela 2). Todas essas formas são passíveis de sofrer transformações ou serem absorvidas pelas plantas em maior ou menor proporção. Outra característica do nitrogênio é sua alta mobilidade no solo, principalmente na forma de nitrato (NO_3^-) (Haynes, 1990).

A seguir, são apresentadas características de alguns compostos nitrogenados.

Amônio

O cátion amônio (NH_4^+), aplicado em baixa concentração, vai adsorver-se aos coloides do solo, movendo-se pouco no perfil em relação ao ponto de aplicação. Dependendo da taxa de aplicação, a concentração dos íons amônio pode ser alta, e, nesse caso, eles podem saturar os sítios de troca no solo ao longo do perfil e com isso mover-se gradativamente em profundidade.

Normalmente, a maior parte do amônio no solo será transformada biologicamente em nitrato, em 2 a 3 semanas, numa temperatura do solo de 25 °C a 30°C. No entanto, especificamente para aplicação localizada, essas transformações podem ser mais demoradas na zona logo abaixo do emissor por causa da alta concentração de amônio e porque o processo de nitrificação necessita de oxigênio (O_2), elemento que nessas regiões ocorre em menor concentração, em função de ser o local mais saturado em água. Concentrações de amônio próximas de 400 mg N kg^{-1} a 800 mg N kg^{-1} são suficientes para inibir a nitrificação.

Ureia

A molécula de ureia, antes de se hidrolisar no solo, não apresenta carga, o que a torna inicialmente móvel. Após a hidrólise e a formação de NH_4^+, o movimento do nitrogênio (N) torna-se restrito. A conversão de ureia em amônio é dependente de uma série de fatores. Há resultados em que 50% da ureia foi convertida em NH_4^+ com 3 horas após a aplicação (60 kg ha^{-1} de N). Nesse caso, toda a ureia foi hidrolisada com 48 horas após a aplicação (Freney et al., 1985).

Nitrato

O nitrato move-se para a periferia da frente de molhamento. Embora as plantas absorvam prontamente o NO_3^-, o NH_4^+ e a ureia, respostas para NO_3^- são normalmente mais rápidas, porque o nitrato é carregado pela água até a superfície da raiz via fluxo de massa.

Embora tenha custo elevado, o nitrato de cálcio apresenta-se como fonte alternativa de N nas fases de alta demanda das culturas por cálcio, naquelas situações em que os teores de cálcio (Ca) no solo são baixos e também existe demanda por N. Essa situação é bastante comum em solos arenosos e de baixa capacidade de troca catiônica (CTC), principalmente quando a calagem não foi suficiente para suprir a demanda por cálcio ou não foi realizada calagem nem gessagem. A vantagem desse fertilizante sobre as demais fontes de cálcio é sua solubilidade em água, possibilitando a aplicação via fertirrigação.

> As fontes de nitrogênio estão sujeitas a perdas por lixiviação, volatilização e desnitrificação. Na lixiviação, o nitrato é carreado através da água de irrigação ou de chuva para regiões mais profundas do solo, longe do acesso das raízes. Dependendo da intensidade da água, o nitrato poderá alcançar o lençol freático, vindo a contaminar os mananciais de água.

O nitrogênio aplicado via irrigação poderá ficar de forma residual dentro das tubulações. A presença de N nas mangueiras favorece o desenvolvimento microbiano, que poderá causar obstrução nos emissores. Para contornar o problema, basta lavar com a própria água de irrigação antes de finalizar a operação.

O balanço nitrato/amônio pode ter importância na absorção de outros íons. As plantas jovens (até 3 semanas) ainda não desenvolveram a enzima nitrato redutase e, por isso, preferencialmente, o amônio é a forma mais importante. Já no final do ciclo, a absorção de fonte amoniacal diminui a absorção de Ca, o que afeta a qualidade dos frutos.

Fertilizantes potássicos

O potássio (K) é absorvido pelas plantas na forma de K^+. Participa de processos fisiológicos durante todo o ciclo de cultivo, e as quantidades removidas pelos frutos e imobilizadas na planta são elevadas. Os fertilizantes potássicos apresentam menor solubilidade que os nitrogenados, e não existem, contudo, limitações para sua aplicação via água de irrigação. Dentre as fontes de K para fertirrigação, destacam-se o cloreto, o sulfato e o nitrato de potássio (Tabela 2). O cloreto e o nitrato de potássio possuem alta solubilidade, enquanto o sulfato de potássio, além de ser menos solúvel, possibilita a formação de sulfato de cálcio, ainda menos solúvel, quando a água de irrigação é rica em cálcio e magnésio – Mg (mais de 50 mg L^{-1} de

Tabela 2. Composição dos fertilizantes mais usados para fertirrigação.

Tipo	Composição				Fórmula	pH	Solubilidade a 20 °C (g 100 mL^{-1})
	N	P_2O_5	K_2O	Outros			
Fertilizantes nitrogenados							
Nitrato de amônio	34	0	0	-	NH_4NO_3	6,6	118
Sulfato de amônio	21	0	0	24% S	$(NH_4)_2SO_4$	5,4	71
Amônia anidra	82	0	0		NH_3		38
Nitrato de cálcio	15,5	0	0	19% Ca	$Ca(NO_3)_2$	4,0–8,0	102
Nitrato de magnésio	11	0	0	9,5% Mg	$Mg(NO_3)_2$	7,5	72
Ureia	46	0	0		$CO(NH_2)_2$	8,0–8,5	100
Fertilizantes fosfatados							
Fosfato monoamônio (MAP)	12	61	0		$NH_4H_2PO_4$	4,7	37
Fosfato diamônio (DAP)	16	46	0		$(NH_4)_2HPO_4$		40
Fosfato de ureia	17	44	0		$CO(NH_2)_2.H_3PO_4$	2,0	62
Ácido fosfórico	0	53	0		H_3PO_4	2,3	46
Fertilizantes potássicos							
Fosfato monobásico de potássio (MKP)	0	52	34		KH_2PO_4	4,5	22
Cloreto de potássio	0	0	60	46% Cl	KCl	6,7	32
Nitrato de potássio	13	0	46		KNO_3	8,0	34
Sulfato de potássio	0	0	50	18% S	K_2SO_4	3,4	11
Micronutrientes							
Ácido bórico	17,5% B				H_3BO_3		6
Solubor	20% B				$Na_2B_8O_{13}\ 4H_2O$		22
Sulfato de cobre (acidificado)	25% Cu				$CuSO_4\ 5H_2O$		31
Sulfato de ferro (acidificado)	20% Fe				$FeSO_4\ 7H_2O$		16
Sulfato de manganês (acidificado)	27% Mn				$MnSO_4\ 4H_2O$		105
Molibdato de amônio	54% Mo				$(NH_4)_6Mo_7O_{24}\ 4H_2O$		43
Molibdato de sódio	39% Mo				Na_2MoO_4		56
Sulfato de zinco	36% Zn				$ZnSO_4\ 7H_2O$		96
Quelato de zinco	5%–14% Zn				DTPA & EDTA		alta
Quelato de manganês	5%–12% Mn				DTPA & EDTA		alta
Quelato de ferro	4%–14% Fe				DTPA, HOEDTA & EDDHA		alta
Quelato de cobre	5%–14% Cu				DTPA & EDTA		alta
Outros							
Sulfato de magnésio	9,7% Mg; 12,8% S				$MgSO_4\ 7H_2O$	6,5	20

Fonte: Adaptado de Burt et al. (1995).

Ca^{2+}+ Mg^{2+}). O cloreto é a fonte mais usada, por apresentar o menor custo por unidade de K_2O.

O movimento de K no solo depende do tipo de solo e, na maioria dos casos, se move com limitação. O potássio pode ser lixiviado em solos arenosos e com baixa CTC, porém, quando se aplicam doses normais de fertilizantes, perdas por lixiviação são extremamente baixas para a maioria das condições. O K pode movimentar-se no perfil do solo quando ocorrer concentração do elemento próximo ao emissor, com aplicações frequentes de K via água de irrigação.

Em fertirrigação, para culturas hortícolas, o K normalmente é aplicado, procurando-se evitar o acúmulo desse nutriente no solo.

Em relação à compatibilidade, a mistura de cloreto de potássio com outra fonte contendo sulfato poderá diminuir a solubilidade do K, pois poderá haver formação de K_2SO_4, que apresenta solubilidade três vezes menor que o KCl.

Fertilizantes fosfatados

O fósforo (P), que é absorvido principalmente na forma de $H_2PO_4^-$, caracteriza-se por apresentar baixa mobilidade no solo, em razão da sua alta capacidade de interação com os coloides do solo. Esse nutriente é adsorvido pelos coloides do solo, o que reduz temporariamente a sua disponibilidade para as plantas. Consequentemente, o seu movimento no solo é limitado. Isso ocorre com maior frequência em solos de textura argilosa, principalmente os mais intemperizados, em regiões tropicais. No entanto, várias fontes e métodos de aplicação de P tentam evitar, pelo menos parcialmente, os problemas de distribuição desse elemento no solo. Além do custo, as fontes inorgânicas de P têm diferenças quanto ao conteúdo de P e também quanto à solubilidade na água de irrigação.

A maioria dos adubos fosfatados apresenta baixa solubilidade e facilidade de precipitação, causando entupimento nos sistemas de irrigação. Assim, deve-se observar o pH e a presença de Ca na água de irrigação, a textura do solo e a compatibilidade com outros nutrientes (Silva; Borges, 2009). Com o crescimento da utilização dos métodos de irrigação localizada, a aplicação de P ao solo passou a ser realizada via fertirrigação, na forma de ácido fosfórico e outras fontes solúveis (Tabela 2). O ácido fosfórico é um fertilizante apresentado na forma líquida, que possui de 46% a 76% de P_2O_5, densidade 1,68 g cm^{-3}, solubilidade 457 g L^{-1} e pH 2,3. Apresenta como características marcantes alta solubilidade e elevada acidez.

Burt et al. (1995) recomendam que a aplicação de fontes de P na água de irrigação seja realizada com fertilizantes ácidos, em sistemas de irrigação localizada. Assim, o uso do ácido fosfórico, além de ser uma de fonte de P, atua na limpeza dos resíduos químicos da tubulação, baixa o pH da água de irrigação e ajuda a manter os emissores livres de microrganismos. Deve-se destacar que a aplicação de ácido fosfórico via água de irrigação somente será efetiva quando o pH da água de irrigação permanecer em torno de 3,0 durante 30 a 60 minutos, para evitar a precipitação de fosfato de cálcio. Deve-se, contudo, tomar cuidados na aplicação deste e de outros ácidos, porque valores de pH menores que 5,5 podem aumentar a corrosão de equipamentos metálicos do sistema de irrigação e aumentar a toxicidade de alguns micronutrientes, ou mesmo causar danos às raízes das plantas.

Outras fontes de P empregadas na fertirrigação são o fosfato monoamônio (MAP) e o fosfato diamônio (DAP), além de fosfato monopotássico (MKP ou Peak) e fosfato de ureia, que apresentam custo mais elevado.

Na fertirrigação com MAP, DAP ou ácido fosfórico, é importante conhecer a concentração de Ca e Mg e também de bicarbonatos da água de irrigação, para evitar problemas de precipitação e entupimento. Se a água é ácida, não há limitação para o uso do DAP, porém, caso haja Ca e o pH for superior a 7, deve-se utilizar o MAP, que tem efeito acidificante, o que leva a um abai-

xamento do pH. Outra possibilidade é o uso do ácido fosfórico concentrado. A quantidade aplicada deve ser suficiente para abaixar o pH, porém, há um limite para que não produza corrosão em peças metálicas da rede. Recomenda-se que a soma das concentrações de Ca e de Mg não ultrapasse 50 mg L^{-1}, e a concentração de bicarbonatos seja inferior a 150 mg L^{-1}.

No geral, a aplicação de P através da irrigação por gotejamento requer cuidados e conhecimentos técnicos. Os sistemas de irrigação localizada são os mais adequados à aplicação de P, em razão da melhor localização do nutriente em relação ao sistema radicular.

Movimentação de fósforo (P) no solo

Embora o movimento de P dependa de muitos fatores químicos e físicos do solo, a textura, a taxa de aplicação e a quantidade de água aplicada são as variáveis que mais afetam o seu movimento.

A irrigação por gotejamento pode aumentar o movimento de P no solo de 5 a 10 vezes se comparado à aplicação convencional. O movimento é maior dessa forma, porque uma maior concentração, em uma faixa estreita do solo, satura os sítios de fixação próximo ao ponto de aplicação. O movimento de P no solo aumenta com a taxa de aplicação e também com o raio de molhamento (Hergert; Reuss, 1976).

Fertilizantes contendo cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S)

A aplicação de Ca via água de irrigação mostra-se vantajosa para culturas que apresentam demanda elevada por esse nutriente, comparável ao N e ao K. A calagem, que é normalmente realizada nos solos ácidos, é uma das principais fontes de Ca para as culturas. Em culturas que apresentam alta demanda por Ca, outras aplicações podem ser necessárias, além da calagem. Como fontes alternativas de Ca, tem-se o gesso, aplicado no solo, nitrato de cálcio, cloreto de cálcio e as formas quelatizadas de Ca que podem ser aplicadas via água de irrigação.

O nitrato de cálcio é a fonte de Ca mais solúvel. Recomenda-se adicionar ácido nítrico concentrado na base de 0,3 L kg^{-1} de nitrato de cálcio, quando o pH da água de irrigação for superior a 6,5.

Dos produtos que apresentam Mg, normalmente se utiliza o sulfato como fonte de Mg, dada a sua boa solubilidade. As formas quelatizadas de Mg, apesar de terem custos mais elevados, são boas alternativas. Como regra geral, tanto o Ca como o Mg devem ser aplicados antes do plantio, através da calagem, e apenas complementados através da fertirrigação.

Como fonte de S para fertirrigação, pode-se utilizar sulfato de amônio, sulfato de magnésio e sulfato de potássio. Porém, deve-se tomar cuidado com a incompatibilidade do sulfato com o Ca.

Fertilizantes contendo micronutrientes

Os quelatos e os sulfatos contendo micronutrientes são os compostos geralmente utilizados para corrigir deficiências dos cátions de micronutrientes. Os boratos solúveis são as principais fontes de boro (B). Em função da facilidade de lixiviação que esse nutriente apresenta, o seu parcelamento é a prática mais recomendada. Na Tabela 2, são apresentadas algumas características desses fertilizantes.

Micronutrientes como zinco (Zn), ferro (Fe), cobre (Cu) e manganês (Mn) podem reagir com sais da água de irrigação e causar precipitação e entupimento dos emissores. Por isso, em muitos casos, esses micronutrientes são aplicados como quelatos, que são facilmente solúveis e causam poucos problemas de precipitação e entupimento. No solo, os micronutrientes quelatizados reagem menos e, por isso, apresentam maior mobilidade do que os sais. Como esses produtos apresentam custo elevado, a utilização dos quelatos em fertirrigação requer

maior atenção com relação ao manejo da fertirrigação, que vai desde a qualidade da água (pH e condutividade elétrica) e da lâmina aplicada, até a compatibilidade com outros produtos.

Solubilidade dos fertilizantes

Para se alcançar êxito na fertirrigação, devem-se utilizar fontes de alta solubilidade para que a concentração de nutrientes na solução aplicada seja, de fato, aquela calculada. Outro aspecto importante da solubilidade é que alguns fertilizantes que não apresentam dissolução completa podem causar entupimento nos emissores, principalmente nos gotejadores. No preparo da solução, deve-se observar a solubilidade de cada fertilizante a fim de que todo fertilizante dissolvido permaneça na solução.

Na Tabela 3, são apresentadas as solubilidades de vários fertilizantes à temperatura de 20 °C. A própria mistura de fertilizantes pode promover o abaixamento da temperatura da água, em função das reações de dissolução absorver calor. É o que ocorre quando fertilizantes nitrogenados são solubilizados.

O nitrato de amônio (34% N), aplicado numa concentração de 10 g L^{-1}, promove abaixamento de 2 °C na temperatura da solução; porém, numa concentração de 100 g L^{-1}, a temperatura diminui 7,2 °C. Assim como a temperatura, a pureza do fertilizante pode interferir na sua solubilidade. Como a solubilidade normalmente é determinada a partir de produtos puros, deve-se considerar que os valores tabelados são máximos e podem ser aplicados apenas a fertilizantes com alto grau de pureza. Para fertilizantes comerciais, o limite de solubilidade normalmente é mais baixo.

Deve-se, também, estar atento a fertilizantes que apresentem:

- Condicionadores: usados para prevenir a quebra dos grânulos.

Tabela 3. Solubilidade de alguns fertilizantes a 20 °C.

Fertilizante	Solubilidade[1]
Nitrogenados (N)	
Nitrato de amônio	118
Nitrato de cálcio	102
Sulfato de amônio	71
Ureia	78
Nitrato de sódio	73
Soluções nitrogenadas	Alta
Uran	Alta
Fosfatados (P)	
Superfosfato simples	2
Superfosfato triplo	4
Ácido fosfórico	45,7
Potássicos (K)	
Cloreto de potássio	34
Sulfato de potássio	11
N e P	
MAP	23
MAP purificado	37
DAP	40
N e K	
Nitrato de potássio	32
Ca e Mg	
Cloreto de cálcio pentahidratado	67
Sulfato de magnésio	71
Gesso	0,241
Micronutrientes	
Bórax	5
Molibdato de amônio	40
Molibdato de sódio	56
Sulfato de Cobre	22
Sulfato de cobre pentahidratado	24
Sulfato de ferro	24
Sulfato ferroso	33
Sulfato de manganês	105
Sulfato manganoso	742
Sulfato de zinco	75
Quelatos (Fe, Cu, Mn e Zn) EDTA, DTPA	Alta

[1] Partes solubilizadas em 100 partes de água a 20 °C.

Fonte: Vitti et al. (1994).

- Substâncias como óleo ou parafina: revestem os fertilizantes que têm problemas de higroscopicidade.
- Argilas presentes nos adubos fluidos: mantém o potássio em suspensão.
- Outras impurezas, como óxido de ferro, presentes no cloreto de potássio vermelho, entre outros: fertilizantes com estas características devem ser evitados em fertirrigação.

Em termos de características físicas dos fertilizantes sólidos para uso em fertirrigação, deve-se dar preferência àqueles que se apresentam na forma de cristais, que, em função do tamanho de grânulo reduzido, solubilizam-se mais facilmente em relação aos granulados.

Compatibilidade dos fertilizantes

A compatibilidade entre os adubos e destes com os íons presentes na água de irrigação é outro fator de suma importância. No preparo das soluções, muitas vezes é necessário misturar mais de uma fonte. Nesse caso, deve-se recorrer aos quadros de compatibilidade como o da Tabela 4, a fim de certificar se a mistura pode ou não ser realizada.

Como regra geral, o íon sulfato é incompatível com Ca, e os fosfatos com Ca e Mg. Do mesmo modo, águas ricas em Ca e Mg podem formar compostos insolúveis com P e sulfato. A aplicação de fertilizantes incompatíveis (por exemplo, $Ca(NO_3)_2$, K_2SO_4) devem ser feitas a partir

Tabela 4. Solubilidade de misturas de fertilizantes líquidos[1].

Fertilizante	Ureia	Nitrato de amônio	Sulfato de amônio	Nitrato de cálcio	Nitrato de potássio	Cloreto de potássio	Sulfato de potássio	Fosfato de amônio (MAP, DAP)	Sulfato de Fe, Zn, Cu e Mn	Quelato de Fe, Zn, Cu e Mn	Sulfato de magnésio	Ácido fosfórico	Ácido sulfúrico	Ácido nítrico
Ureia		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	I	C
Nitrato de amônio	C		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Sulfato de amônio	C	C		I	C	C	R	C	C	C	C	C	C	C
Nitrato de cálcio	C	C	I		C	C	I	I	I	R	I	C	I	C
Nitrato de potássio	C	C	C	C		C	C	C	C	C	C	C	C	C
Cloreto de potássio	C	C	C	C	C		R	C	C	C	C	C	C	C
Sulfato de potássio	C	C	R	I	C	R		C	R	C	R	C	R	C
Fosfato de amônio (MAP, DAP)	C	C	C	I	C	C	C		I	R	I	C	C	C
Sulfato de Fe, Zn, Cu e Mn	C	C	C	I	C	C	R	I		C	C	R	C	I
Quelato de Fe, Zn, Cu e Mn	C	C	C	R	C	C	C	R	C		C	I	C	C
Sulfato de magnésio	C	C	C	I	C	C	R	I	C	C		C	C	C
Ácido fosfórico	C	C	C	C	C	C	C	C	R	I	C		C	C
Ácido sulfúrico	I	C	C	I	C	C	R	C	C	C	C	C		C
Ácido nítrico	C	C	C	C	C	C	C	C	I	C	C	C	C	

[1] Algumas formulações são incompatíveis em concentrações na solução estoque, devendo ser evitadas.

C: compatível; R: solubilidade reduzida; I: incompatível.

Fonte: Landis et al. (1989).

de tanques independentes ou em momentos diferentes, de modo que não haja contato entre as soluções concentradas desses fertilizantes. Sempre que forem feitas misturas de fertilizantes diferentes dos utilizados convencionalmente, deve-se fazer o teste da jarra, que consiste em se misturar os fertilizantes em uma jarra na mesma proporção que será utilizada no reservatório, esperando por 2 horas após a mistura. Nesse caso, deve-se ter o cuidado de usar a própria água de irrigação para solubilizar os fertilizantes, agitar a solução por alguns minutos e observar, por pelos menos 1 hora, a ocorrência de precipitação ou turbidez acentuada na solução. Se a solução permanecer clara e transparente, será provavelmente seguro injetar os fertilizantes testados.

Se não ocorrer a formação de precipitado, a mistura poderá ser feita sem problemas.

Efeito do fertilizante no pH da solução e no pH do solo

Os fertilizantes, após serem dissolvidos, poderão alterar o pH da solução nos tanques. Esse efeito ocorre em função da reação do íon com a água ou ainda em razão da presença de ácidos do processo de fabricação de fertilizantes.

Poderão ocorrer mudanças nas propriedades físicas e químicas do solo, dependendo dos produtos utilizados, principalmente com a mudança no pH do solo. As mudanças no pH do solo ocorrem normalmente com redução (acidificação), por causa do aumento de íons de hidrogênio (H^+), pela oxidação feita por bactérias no NH_4^+ das fontes nitrogenadas, seguindo a reação:

$$NH_4^+ + 2O^- \rightarrow NO_3^- + H_2O + 2H^+$$

Na irrigação por gotejamento, os problemas de redução no pH ocorrem normalmente em pontos localizados no perfil do solo, logo abaixo dos emissores e ao lado das linhas laterais, o que dificulta os trabalhos corretivos, a não ser com emprego de ácidos ou bases também pelo sistema de irrigação para elevar ou reduzir o nível de acidez, respectivamente.

Outro fator que afeta o pH do solo na interface solo-raiz é a razão NH_4^+/NO_3 da solução fertirrigada. Quando o NH_4^+ predomina, H^+ é excretado da raiz e acidifica a solução do solo. Quando NO_3^- é o íon mais absorvido, o OH^- ou HCO_3^- são liberados para a solução do solo, e o pH do solo aumenta. Portanto, as diferentes relações NH_4^+/NO_3^- apresentam efeitos diferentes sobre o desenvolvimento das raízes.

Salinidade e potencial salino dos fertilizantes

A salinidade do solo se refere ao conteúdo de sais solúveis na solução do solo. Os sais mais comuns são os cloretos, sulfatos, bicarbonatos, nitratos e boratos de sódio (Na), Mg e Ca.

A intemperização das rochas pelo tempo e a aplicação de fertilizantes e água dão origem aos sais solúveis no solo. Em regiões chuvosas, a maioria dos sais são lixiviados, enquanto em regiões áridas os níveis de sais são elevados.

A água de irrigação pode ser uma fonte de sais que, se manejada de forma inadequada, poderá produzir efeito salino no solo. Portanto, é recomendável que, antes de se iniciar um projeto de irrigação, a água a ser utilizada seja analisada.

O potencial salino é tanto maior quanto mais seco estiver o solo, e uma das formas de minimizar o problema é manter o solo úmido o maior tempo possível. Por isso, em casos em que a salinidade pode ser considerada problema, deve-se adotar irrigação com menores volumes de água por aplicação, no entanto, com irrigações mais frequentes.

A condutividade elétrica é o método mais simples de quantificar o total de sal na amostra e define a carga elétrica das partículas de sal na água. Uma corrente elétrica é aplicada entre dois eletrodos que são inseridos na amostra de água e diretamente determina-se a condutividade elétrica, que aumenta à medida que

aumentam os sais dissolvidos. Embora os condutivímetros sirvam para medir a condutividade elétrica da amostra de água, não há como qualificar os sais dissolvidos na água de irrigação. A unidade que expressa a condutividade elétrica, atualmente, é Siemen (S) por metro (dS m^{-1}), normalmente expressa em múltiplos, como decisiemen por metro (dS m^{-1}).

Exemplos de cálculo na fertirrigação

Muitos irrigantes, que imaginam estar fazendo a fertirrigação, às vezes estão colocando produtos de mais ou de menos no solo ou na água, o que pode contribuir para o desequilíbrio nutricional nas culturas, perdas de qualidade dos produtos e de produtividade, toxidade nas culturas e contaminação do ambiente.

Existem várias formas para estimar as quantidades de nutrientes que serão colocadas na água de irrigação:

- Preparo de soluções a partir de concentrações preestabelecidas para as culturas. Esse sistema é bastante utilizado para cultivos de hortaliças em estufa, quando se utiliza substratos inertes.
- Soluções calculadas a partir da demanda das culturas, considerando a concentração de nutrientes no solo. Nesse caso, é preciso avaliar a disponibilidade de nutrientes em extensão e profundidade das camadas de solo que podem ser exploradas pelo sistema radicular efetivo das culturas.
- Soluções calculadas a partir da extração de nutrientes pelas culturas. Com base em tabelas que informam as quantidades de macro e micronutrientes extraídas pelas culturas, as quantidades de nutrientes que devem ser aplicadas na fertirrigação visam fornecer os nutrientes necessários para suprir a extração para um determinado valor de colheita.
- Soluções calculadas a partir da produtividade das culturas, da disponibilidade de nutrientes no solo e sua concentração nos tecidos vegetais. São utilizadas informações sobre a produtividade esperada na próxima safra, assim como a concentração de nutrientes disponíveis no solo e do estado nutricional da cultura, ou seja, se a concentração dos nutrientes nas plantas encontra-se deficiente, adequada ou em excesso.

De acordo com o que foi explanado acima, a primeira opção é mais adequada para cultivos em estufas; a segunda e terceira podem ser aplicadas em condições experimentais e de cultivos comerciais; e a última é a mais prática pela utilização de parâmetros semelhantes à adubação convencional.

Contudo, qualquer que seja a forma utilizada para os cálculos da necessidade de nutrientes a ser aplicada na fertirrigação, os resultados da análise de água de irrigação devem ser essencialmente considerados nesses cálculos, uma vez que a composição da água é fundamental para a tomada de decisão sobre a nutrição da cultura, a viabilidade da fertirrigação e o risco de salinização ou alcalinização do solo.

Exemplo 1

Cálculo da quantidade de fertilizantes a ser aplicado via água de irrigação

As quantidades de fertilizantes recomendadas para uma determinada cultura foram: 400 kg ha^{-1} de N; 140 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 250 kg ha^{-1} de K_2O. Dispõe-se dos seguintes produtos:

- Fosfato diamônio: 21% de N e 53% de P_2O_5.
- Nitrato de potássio: 13% de N; 46% de K_2O.
- Ureia: 46% de N.

a) O cálculo deve ser iniciado pelo nutriente demandado em menor quantidade. Considerando o cálculo da dosagem de P; o fosfato diamônio possui N (21%) e P (53%). Calculando, tem-se:

Fosfato diamônio:

100 kg de fosfato diamônio	53 kg de P_2O_5
X	140
X = (100 × 140)/53 =	264 kg de fosfato diamônio

Para calcular a quantidade de N em 264 kg de fosfato diamônio, tem-se:

100 kg de fosfato diamônio	21 kg de N
264	X
X = (264 × 21)/100 =	55 kg de N

b) Dando continuidade, realiza-se o cálculo para o K, nutriente demandado em segundo lugar. Tem-se o nitrato de potássio (46% de K_2O e 13% de N):

Nitrato de potássio:

100 kg de nitrato de potássio	46 kg de K_2O
X	250
X = (100 × 250)/46 =	544 kg de nitrato de potássio

Para calcular a quantidade de N em 544 kg de nitrato de potássio, tem-se:

100 kg de nitrato de potássio	13 kg de N
544	X
X = (13 × 544)/100 =	71 kg de N

c) Calculando-se a quantidade de N, deduzindo-se os valores já fornecidos pelo fosfato diamônio e nitrato de potássio, tem-se:

400 kg – 55 kg – 71 kg = 274 kg.

Para o cálculo da quantidade de ureia a ser aplicada, tem-se:

100 kg de ureia	46 kg de N
X	274
X = (100 × 274)/46 =	596 kg de ureia

Devemos aplicar 264 kg de fosfato diamônio; 544 kg de nitrato de potássio e 596 kg de ureia.

Exemplo 2

Cálculo da concentração de nutrientes na água de irrigação

A vazão de um sistema de irrigação por gotejamento é de 45,5 $m^3 h^{-1}$ com uma concentração natural de N na água igual a 12 ppm. Deseja-se que a concentração de N, na forma de ureia, na água de irrigação, seja igual a 80 ppm. Pode-se calcular a quantidade de ureia a ser colocada em um tanque de 500 L com o injetor tipo Venturi, com vazão média de sucção de 400 L h^{-1}.

Dados:

q_1 (vazão do sistema de irrigação): 45,5 $m^3 h^{-1}$ = 45.500 L h^{-1};

C_1 (concentração natural de N na água de irrigação): 12 ppm[2];

q_2 (vazão do injetor): 400 L h^{-1};

C_2 (concentração a ser colocada no tanque): ?

C_3 (concentração desejada na água de irrigação): 80 ppm (0,00008 kg de N por kg de água);

q_3 (vazão do sistema de irrigação mais vazão do injetor): (45.500 + 400) = 45.900 L h^{-1}.

Solução:

a) Cálculo da concentração no tanque de mistura

Pela equação da conservação da massa, tem-se:

$$q_1 \times C_1 + q_2 \times C_2 = q_3 \times C_3 \therefore$$

$$C_2 = [(q_3 C_3) - (q_1 C_1)]/q_2 =$$

$$= [(45.900 \times 0{,}000080) - (45.500 \times 0{,}000012)]/400 =$$

$$= 0{,}007815 \text{ kg}$$

[2] Ppm: partes por milhão. 1 ppm = 1 mg kg^{-1} ou 1 mg L^{-1}. Considerando a densidade da água igual a 1, consequentemente 1 L de água é igual a 1 kg. Portanto 12 ppm pode ser escrito como 0,000012 kg de N por kg de água.

b) Cálculo da quantidade de N a ser colocada no tanque

$Q_N = V_t \times C_t = 500 \times 0{,}007815 = 3{,}9075$ kg de N

Como a água já possui 12 ppm de N que corresponde a 0,006 kg de N (500 × 0,000012), devem-se acrescentar no tanque apenas 3,9015 kg de N (3,9075 – 0,006). A quantidade de ureia (46% de N) será:

Ureia = (3,9015 × 100)/46 = 8,481 kg ≈ 8,5 kg de ureia

Exemplo 3

Distribuição da fertirrigação durante o ciclo da cultura do melão

Para cultivo em solo, nem todos os nutrientes necessitam ser aplicados via fertirrigação. Pesquisas com a cultura do melão irrigado por gotejamento recomendam que 10% a 20% do N e K, 40% a 60% do Ca e 50% a 100% do P e demais macro e micronutrientes sejam aplicados como adubação de fundação. As outras partes dos nutrientes devem ser aplicadas via irrigação ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura. No trabalho de Pinto et al. (1996), N e K foram aplicados diariamente via fertirrigação, enquanto a dose de P recomendada foi totalmente aplicada em fundação, na época do plantio. A quantidade relativa de N e K a ser aplicada via fertirrigação, ao longo do ciclo de desenvolvimento do meloeiro irrigado por gotejamento para cultivares de ciclo inferior a 70 dias é apresentada na Tabela 5.

Outra opção é a distribuição dos fertilizantes ao longo do ciclo da cultura proporcionalmente ao desenvolvimento das plantas, ou seja, de acordo com o crescimento, aumenta-se a dose de fertilizante aplicado (Tabela 6).

Tabela 5. Fontes, doses, frequência e período de aplicação de nutrientes na cultura do melão.

Fonte de fertilizantes	
Nitrogênio (N)	
Opção 1	**Ureia**
Período de aplicação	3 a 42 dias após a germinação
Frequência	Diária
Dose	80 kg ha^{-1}
Opção 2	**Ureia/sulfato de amônio/nitrato de potássio**
Período de aplicação	Ureia: 3 a 15 dias após a germinação
	Sulfato de amônio: 16 a 30 dias após a germinação
	Nitrato de potássio: 31 a 42 dias após a germinação
Potássio (K_2O)	
Período de aplicação	Na fundação, antes do plantio
Dose	120 kg ha^{-1}
Produtividade esperada (Latossolo)	30 kg ha^{-1}
Produtividade esperada (Vertissolo)	40 t ha^{-1}

Fonte: Pinto et al. (1996).

Tabela 6. Distribuição de fertilizantes em doses proporcionais ao desenvolvimento na cultura do melão com irrigação por gotejamento.

Nutriente	Ciclo (dias)								
	0	1–7	8–14	15–21	22–28	29–35	36–42	43–49	50–56
	Quantidade relativa de nutriente (%)								
Solos de textura argilosa									
N	20	2	3	5	10	20	20	15	5
K	20	2	3	5	10	20	20	15	5
Ca	60	0	0	0	10	10	10	10	0
P	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Solos de textura arenosa									
N	10	3	5	5	15	21	21	15	5
K	10	3	5	5	15	21	21	15	5
Ca	40	0	0	10	10	15	15	10	0
P	60	0	5	5	10	10	10	0	0

Fonte: Sousa et al. (2011).

Exemplo 4

Planejamento da fertirrigação para um ciclo da cultura do melão

a) Informações do cultivo

Área: 1,8 ha – dividida em quatro setores de tamanho igual

Sistema de irrigação: gotejamento

Injeção de fertilizantes: na entrada de cada setor

b) Fertilizantes disponíveis

Ureia: 45% de N

MAP: 10% de N, 48% de P_2O_5

Cloreto de potássio: 60% de K_2O

c) Solo – Os resultados da análise química do solo são mostrados na Tabela 7 e as doses de cada nutriente, calculadas em função desses resultados, constam na Tabela 8.

Tabela 7. Resultado de análise química de solo.

CE	pH	MO	P	K	Ca	Mg	Na	Al	H+Al	SB	CTC
$dS\ m^{-1}$	H_2O	$g\ kg^{-1}$	$mg\ dm^{-3}$	$cmol_c\ dm^{-3}$							
1,19	8,2	9,6	26,9	0,39	14,4	3,5	0,19	0,00	0,00	18,48	18,48

Tabela 8. Quantidades de fertilizantes recomendadas.

Dose recomendada pela análise de solo ($kg\ ha^{-1}$)		Quantidade de adubo por 1,8 ha (kg)		Quantidade de adubo por setor (kg por setor)	
N	90	MAP	150	MAP	37,5
P_2O_5	40	Ureia	326,7	Ureia	82,0
K_2O	40	Cloreto de potássio	120	Cloreto de potássio	30,0

d) Manejo da adubação: três vezes por semana

MAP: 3 a 21 dias após a germinação

Ureia: 3 a 21 dias após a germinação; 28 a 42 dias após a germinação

Cloreto de potássio: 3 a 21 dias após a germinação; 28 a 55 dias após a germinação

Uma sugestão de programação da fertirrigação para distribuição dos fertilizantes durante o ciclo de produção é apresentada na Tabela 9.

Durante a quarta semana, as flores deverão estar abertas, e deverá ocorrer a polinização pelos insetos. Orienta-se não prever fertirrigação nesse período, para permitir um ajuste no calendário, caso ocorra algum atraso no início da aplicação dos fertilizantes ou que o florescimento se atrase ou antecipe em função da época do ano e das condições climáticas, com variações da luminosidade e temperatura.

Tabela 9. Distribuição dos fertilizantes durante o ciclo de produção.

Período	Aplicação	Fertilizante (kg setor^{-1})		
		MAP	Ureia	Cloreto de potássio
1ª semana	1ª	4,2	4,5	1,0
	2ª	4,2	4,5	1,0
	3ª	4,2	4,5	1,0
2ª semana	1ª	4,2	4,5	1,0
	2ª	4,2	4,5	1,0
	3ª	4,2	4,5	1,0
3ª semana	1ª	4,2	4,5	1,0
	2ª	4,2	4,5	1,0
	3ª	4,2	4,5	1,0
4ª semana	1ª	-	-	-
	2ª	-	-	-
	3ª	-	-	-
5ª semana	1ª	-	6,9	1,8
	2ª	-	6,9	1,8
	3ª	-	6,9	1,8
6ª semana	1ª	-	6,9	1,8
	2ª	-	6,9	1,8
	3ª	-	6,9	1,8
7ª semana	1ª	-	-	1,8
	2ª	-	-	1,8
	3ª	-	-	1,8
8ª semana	1ª	-	-	1,8
	2ª	-	-	1,8
	3ª	-	-	1,8

Cálculo da lâmina de água a ser aplicada

Para fazer a fertirrigação, devemos calcular a lâmina de água a ser aplicada pela irrigação. Para a cultura do melão, com adoção de espaçamento de 1,8 m entre linhas de plantas e 0,4 m entre plantas na linha, considerando a fase de desenvolvimento vegetativo da cultura cujo coeficiente de cultura (Kc) seja igual a 0,6; vazão do emissor 1,0 L h^{-1}, com dois emissores por planta espaçados de 0,20 m; evapotranspiração potencial (ETo) determinada por estação meteorológica automática igual a 6,51 mm dia^{-1}; fator de cobertura 1, com 75% ou mais de cobertura; eficiência de irrigação igual a 90%, pede-se para calcular o tempo de irrigação.

Cálculos:

Cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc)

$ETc = ETo \times Kc$

$ETc = 6{,}51 \times 0{,}6 = 3{,}91$

Cálculo da lâmina bruta (LB)

$LB = ETc/E$

$LB = 3{,}91/0{,}90 = 4{,}34$

Cálculo do tempo de irrigação (TI)

$TI = Vol/nq$

$Vol = LB \times Fc \times Ap$

$Ap = 1{,}8 \times 0{,}4 = 0{,}72$ m^2

$Vol = 4{,}34 \times 1 \times 0{,}72$

$Vol = 3{,}12$

$TI = 3{,}12/(2 \times 1)$

$TI = 1$h35

Considerações sobre o manejo da fertirrigação

Admitindo-se um tempo de deslocamento da solução contendo nutrientes entre o ponto de injeção de fertilizante até o último emissor igual a 12 minutos, e os tempos para equilíbrio hidráulico do sistema de irrigação de 15 minutos; para a presente situação adotaremos:

- Tempo para equilíbrio hidráulico do sistema de irrigação: 17 minutos.
- Tempo para distribuição dos fertilizantes e lavagem do sistema de irrigação: 18 minutos.
- Tempo para aplicação dos fertilizantes: 60 minutos.
- Concentração de N na água a ser usada na irrigação: 5 ppm.
- Concentração sugerida de N na água de irrigação (máxima): 300 ppm.
- Área a ser irrigada: 1,8 ha.
- Número de setores: 4.
- Dimensões da área: 220 m x 80 m.
- Dimensões de cada setor: 55 m x 80 m.
- Número de linhas laterais: 30, espaçada de 1,8 m.
- Comprimento da linha lateral: 80 m.
- Número de emissores por lateral: 400.
- Espaçamento entre emissores: 0,20 m.
- Número total de emissores por setor: 12.000.
- Vazão do injetor tipo Venturi: 200 L h^{-1}.
- Volume do tanque de dissolução de nutrientes: 200 L.

Dados:

- q_1 (vazão do sistema de irrigação): 12 m^3 h^{-1} = 12.000 L h^{-1}.
- C_1 (concentração natural de N na água de irrigação): 5 ppm, correspondendo a 5 mg L^{-1} e 0,000005 kg L^{-1}.
- q_2 (vazão do injetor): 200 L h^{-1}.
- C_2 (concentração a ser colocada no tanque): ?
- C_3 (concentração desejada na água de irrigação): 300 ppm (0,00030 kg de N por litro de água).
- q_3 (vazão do sistema de irrigação mais vazão do injetor): 12.000 + 200 = 12.200 L h^{-1}.

Solução:

a) Cálculo da concentração no tanque de mistura

Pela equação da conservação da massa, tem-se:

$q_1 \times C_1 + q_2 \times C_2 = q_3 \times C_3 \therefore$

$C_2 = [(q_3 C_3) - (q_1 C_1)]/q_2 =$

$= [(12.200 \times 0{,}0003) - (12.000 \times 0{,}000005)]/200 =$

$= 0{,}018$ kg

b) Cálculo da quantidade de N a ser colocada no tanque

$Q_N = V_{tanque} \times C_{tanque} = 200 \times 0{,}018 = 3{,}6$ kg de N

Como a água já possui 5 ppm de N que corresponde a 0,001 kg de N (200 x 0,000005), devem-se acrescentar no tanque apenas 3,599 kg de N (3,6 – 0,001). A quantidade de ureia (45% de N) será:

Ureia = (3,599 × 100)/45 = 8,0 kg de ureia

A quantidade máxima de ureia que deve ser dissolvida no tanque é 8,0 kg. Pela Tabela 9, a maior quantidade de ureia a ser aplicada é 6,9 kg; consequentemente, as condições especificadas são atendidas, pois podemos aplicar até 8,0 kg de ureia.

As lâminas de água a serem aplicadas devem ser calculadas para cada fase do ciclo de desenvolvimento da cultura, com os respectivos coeficientes de cultura (Kc); fator de cobertura do solo

(*Fc*); e evapotranspiração potencial, em função das alterações dos parâmetros climáticos.

Exemplo 5

Fertirrigação em videira de mesa sem sementes

Neste exemplo, será mostrado o cálculo de fertirrigação para a videira de mesa sem sementes, na fase de produção. Por questão de praticidade na obtenção das informações, o método utilizado é aquele que considera a produtividade esperada (Tabela 10) e os resultados de análise de solo e de tecido vegetal.

Observações:

- Uvas de mesa sem semente apresentam baixa demanda por N e maior demanda por K em relação àquelas com sementes. As doses de N a serem aplicadas na fase de produção são definidas em função do vigor da planta e do porta-enxerto (Tabela 11). As doses de K devem ser aumentadas em 30% nessas cultivares em relação às uvas com sementes.
- As doses de P e K serão definidas em função da produtividade esperada e da textura do solo, no caso de P. Para o K, além da produtividade esperada, será necessário avaliar os teores de K disponível no solo ou a saturação de K em relação a CTC: saturação de K > 15%, não aplicar potássio se CE > 2 dS m^{-1}.
- Quando os teores de Mg estão abaixo do nível crítico no solo ou em desequilíbrio com os teores de Ca e K, deve ser realizada aplicação de Mg no solo ou foliar.
- A aplicação de micronutrientes deve ser realizada com base em análise de solo e, preferencialmente, foliar. A dose a ser aplicada deve estar em torno de: 1,0 g/planta de B; 4,5 g/planta de Zn; e pulverização com molibdato de sódio ou de amônio a 0,05%, no período de brotação, como fonte de molibdênio (Mo).

Informações sobre o cultivo

Cultura: videira

Cultivar: Sugraone

Porta-enxerto: IAC 766

Plantas com vigor alto

Espaçamento: 3 m x 2 m (1.666 plantas ha^{-1})

Idade: 2 anos (2º ciclo de produção)

Produtividade esperada: 25 t ha^{-1}

Tabela 10. Quantidades de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) indicadas para a adubação de produção para uvas com e sem sementes, em função da produtividade estimada e da disponibilidade de nutrientes no solo.

Produtividade esperada (t ha^{-1})	N[1] (kg ha^{-1})	P no solo (mg dm^{-3})					K no solo ($cmol_c$ dm^{-3})			
		Solo arenoso					< 0,16	0,16–0,30	0,31–0,45	> 0,45
		< 11	11–20	21–40	41–80	> 80				
		Solo argiloso					Saturação de K			
		< 6	6 a 10	11 a 20	21–40	> 40	< 5	5–10	11–15	> 15
		kg ha^{-1} de P_2O_5					kg ha^{-1} de K_2O			
< 15	60–150	120	80	40	20	0	100	75	50	0
15–25	60–150	160	120	80	40	0	200	150	75	50
26–35	60–150	200	160	120	60	0	300	225	100	75
> 35	60–150	240	200	160	80	0	400	300	150	100

[1] Doses indicadas apenas para videiras com sementes.

Fonte: Cavalcanti (2008).

Tabela 11. Doses de N indicadas para a adubação de produção de uvas sem semente.

Vigor da copa	Porta-enxerto		
	Pouco vigoroso	Médio	Muito vigoroso
	kg ha^{-1} de N		
Médio	90	75	50
Alto	60	50	25
Muito alto	30	25	0

Sistema de irrigação: gotejamento, uma linha de distribuição com emissores espaçados de 0,5 m e vazão de 4 L h^{-1}

Interpretação dos resultados de análise de solo e de folhas

A CE do solo apresenta valor adequado, o pH está na faixa adequada, os teores de matéria orgânica são baixos, e os teores de P, K, Ca e Mg estão adequados ao cultivo da videira (Tabela 12). A CTC apresenta valores médios, e a saturação por base está adequada. Com relação aos micronutrientes, os teores de Mn e Zn no solo são altos.

Nas folhas, os teores de K, Ca, Mg e S estão abaixo do padrão recomendado para a videira, principalmente os teores de K e Mg (Tabela 13). Com relação aos micronutrientes, Cu e Fe apresentam valores ligeiramente abaixo do padrão nutricional, e os teores de Zn são baixos.

Os resultados de análise foliar são utilizados para a realização de um ajuste fino na recomendação de adubação.

1) Recomendação de adubação

As quantidades de N, P_2O_5 e K_2O são recomendadas de acordo com as Tabelas 10 e 11. As doses de N foram definidas em 50 kg ha^{-1}, em função do vigor alto da copa e vigor médio do porta-enxerto (Tabela 11), de acordo com as informações sobre o cultivo. As doses de P_2O foram definidas em 40 kg ha^{-1} em função do resultado da análise de solo (Tabela 12), considerando a textura arenosa, e da produtividade esperada de 25 t ha^{-1} (Tabela 10). As doses de K_2O foram definidas em 150 kg ha^{-1} em função da saturação de potássio no solo, de 7,7% (Tabela 12), e da produtividade esperada de 25 t ha^{-1} (Tabela 10). Essa dose de K_2O deve ser suficiente para suprir a deficiência diagnosticada na análise foliar. A deficiência de Ca pode ser suprida por meio de um fertilizante solúvel que tem o Ca como íon acompanhante, como nitrato de cálcio, aplicado via fertirrigação, ou por meio da aplicação de gesso no solo antes da poda de produção, uma vez que não há necessidade de calagem.

As doses de Mg equivalem a 200 kg ha^{-1} de sulfato de magnésio, visando suprir a deficiência de Mg diagnosticada pela análise foliar da videira. Essas podem ser aplicadas no solo, antes da poda de produção, via fertirrigação, ou ainda em pulverização durante o ciclo de produção.

O S é suprido como íon acompanhante no sulfato de potássio e de magnésio, portanto não

Tabela 12. Resultados de análise de solo.

CE	pH	MO	P	K	Ca	Mg	Na	Al	H+Al	SB	CTC	V	Cu	Fe	Mn	Zn
dS m^{-1}	H_2O	g kg^{-1}	mg dm^{-3}	cmol$_c$ dm^{-3}								%	mg dm^{-3}			
0,2	6,9	12,3	70	0,39	2,6	1,0	0,03	0,05	0,99	4,02	5,01	80	0,9	20	23	5

Tabela 13. Resultado de análise foliar.

N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na
g kg^{-1}						mg kg^{-1}					
30,2	2,7	5,0	11,1	2,6	2,7	54,3	15,0	79,0	220,0	20,0	60,0

será necessária uma aplicação específica desse nutriente. O Fe pode ser fornecido como fertilizante comercial solúvel na forma quelatizada, aplicado via fertirrigação. Contudo, essa aplicação seria mais importante para cultivares de uvas tintas, o que não é o caso da 'Sugraone'.

O Cu normalmente é fornecido em grande quantidade pelos defensivos agrícolas, dispensando a adubação com esse nutriente. O Zn deve ser fornecido via foliar, uma vez que já existe Zn em grande quantidade no solo, mas a planta não consegue absorvê-lo em razão da competição com outros íons no solo. Existe ainda a possibilidade de que a análise de solo apresente contaminação com esse íon, o que justifica a sua aplicação.

As quantidades de nutrientes recomendadas, fertilizantes e forma de aplicação (Tabela 14) são uma sugestão para o manejo nutricional da videira 'Sugraone'. Entretanto, existem outras formas de interpretar os resultados e de realizar a adubação ou a fertirrigação.

Plano de fertirrigação

Na fase de produção, a fertirrigação da videira, assim como a fertilização via solo, é realizada em função das fases de desenvolvimento da planta (Figura 13).

A distribuição dos nutrientes, durante o ciclo de produção, é realizada em função da demanda nas fases de desenvolvimento da planta (Tabela 15). São realizadas aproximadamente três aplicações por semana.

A participação de nutrientes em cada fase do ciclo de produção é apresentada na Tabela 16.

Doses de fertilizantes aplicadas em cada fertirrigação

Com base nos dados das Tabelas 14, 15 e 16, foram calculadas as doses de fertilizantes para cada evento de fertirrigação (Tabela 17). Esses fertilizantes também podem ser preparados em solução estoque para uma determinada fase, por exemplo, para a fase de brotação à floração, entre

Tabela 14. Recomendação de fertilizantes, fontes e forma de aplicação para o manejo nutricional da videira 'Sugraone'.

Nutriente	Dose (kg ha^{-1})	Fonte	Forma de aplicação
N	50	Nitrato de cálcio; ureia; nitrato de potássio	Fertirrigação
P_2O_5	40	Ácido fosfórico	Fertirrigação
K_2O	150	Nitrato de potássio; sulfato de potássio	Fertirrigação
Mg	17	Sulfato de magnésio	Fertirrigação
S		Íon acompanhante	Fertirrigação
Fe		Fertilizante quelatizado	Fertirrigação
Cu		Defensivo	Pulverização
Zn		Fertilizante foliar	Pulverização



Figura 13. Fenologia da videira: etapas de desenvolvimento da planta durante um ciclo de produção.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Tabela 15. Distribuição dos nutrientes durante o ciclo de produção.

Nutriente	Período (DAP)	Nº de aplicações
N, P, K, Mg	3 a 28	11
N	36 a 63	12
P, K, Mg	36 a 70	15
P, K	71 a 84	6

DAP: dias após a poda.

Tabela 16. Participação de nutrientes em cada fase do ciclo de produção.

Período (DAP)	N	P_2O_5	K_2O	Mg
	%			
3 a 28	60	20	20	50
36 a 63	40	-	-	-
36 a 70	-	60	70	50
71 a 84	-	20	10	-

DAP: dias após a poda.

Tabela 17. Concentração de nutrientes nos fertilizantes.

Fertilizante	Composição
Nitrato de cálcio	14% N; 20% Ca
Ureia	45% N
Ácido fosfórico	62% P_2O_5, d = 1,684 g cm^{-3}
Nitrato de potássio	46% K_2O; 13% N
Sulfato de potássio	50% K_2O; 18% S
Sulfato de magnésio	9,7% Mg; 12,8% S

3 e 28 dias após a poda (DAP), que prevê 11 aplicações. Contudo, para preparo da solução estoque, deve ser observada a compatibilidade entre os fertilizantes. Nesse exemplo, o ácido fosfórico não poderá ser armazenado na solução estoque por causa do risco de precipitação com o nitrato de cálcio. Nesse caso, ele deve ser aplicado separadamente, após a fertirrigação dos demais, ou armazenado em recipiente individual, separado dos demais fertilizantes.

Cálculo da lâmina de água a ser aplicada

Para fazer a fertirrigação devemos calcular a lâmina de água a ser aplicada pela irrigação. Para a cultura da uva com adoção de espaçamento de 3 m entre linhas de plantas e 2 m entre plantas na linha, considerando a fase de desenvolvimento vegetativo da cultura, cujo coeficiente de cultura (Kc) seja igual a 1,0; vazão do emissor 4,0 L h^{-1}, com quatro emissores por planta espaçado de 0,50 m; evapotranspiração potencial (ETo) determinada por estação meteorológica automática igual a 7,2 mm; fator de cobertura um, com 75% ou mais de cobertura; e eficiência de irrigação igual a 85%. Pede-se: calcular o tempo de irrigação.

Cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc)

$$ETc = ETo \times Kc$$

$$ETc = 7{,}2 \times 1 = 7{,}2$$

Cálculo da lâmina bruta (LB)

$$LB = ETc/E$$

$$LB = 7{,}2/0{,}85 = 8{,}47$$

Cálculo do tempo de irrigação (TI)

$$TI = Vol/nq$$

$$Vol = LB \times Fc \times Ap$$

$$Ap = 3 \times 2 = 6\ m^2$$

$$Vol = 8{,}47 \times 1 \times 6$$

$$Vol = 50{,}82$$

$$TI = 50{,}82/(4 \times 4)$$

$$TI = 3h10$$

Considerações sobre o manejo da fertirrigação

Admitindo-se um tempo de deslocamento da solução contendo nutrientes, entre o ponto de injeção de fertilizante até o último emissor, igual a 20 minutos. Tempo para equilíbrio hidráulico do sistema de irrigação de 25 minutos. Para a presente situação adotaremos:

- Tempo para equilíbrio hidráulico do sistema de irrigação: 30 minutos.
- Tempo para distribuição dos fertilizantes e lavagem do sistema de irrigação: 30 minutos.
- Tempo para aplicação dos fertilizantes: 2h10.

- Concentração de N na água a ser usada na irrigação: 5 ppm.
- Concentração sugerida de N na água de irrigação (máxima): 100 ppm.
- Área a ser irrigada: 1,0 ha.
- Número de setores: 1.
- Dimensões de uma suposta área: 125 m x 80 m.
- Número de linhas laterais: 40 (espaçadas de 3 m).
- Comprimento da linha lateral: 80 m.
- Número de emissores por lateral: 160 (espaçamento entre emissores igual a 0,50 m).
- Vazão do emissor: 4 L h^{-1}.
- Número total de emissores por setor: 6.400.
- Vazão do injetor tipo Venturi: 400 L h^{-1}.
- Volume do tanque de dissolução de nutrientes: 400 L.

Dados:

- q_1 (vazão do sistema de irrigação): 25,6 m^3 h^{-1} = 25.600 L h^{-1}.
- C_1 (concentração natural de N na água de irrigação): 5 ppm, correspondendo a 5 mg L^{-1} e 0,000005 kg L^{-1}.
- q_2 (vazão do injetor): 400 L h^{-1}.
- C_2 (concentração a ser colocada no tanque): = ?
- C_3 (concentração desejada na água de irrigação): 100 ppm (0,00010 kg de N por L de água).
- q_3 (vazão do sistema de irrigação mais vazão do injetor): 25.600 + 400 = 26.000 L h^{-1}.

Solução:

a) Cálculo da concentração no tanque de mistura

Pela equação da conservação da massa, tem-se:

$q_1 \times C_1 + q_2 \times C_2 = q_3 \times C_3 \therefore$

$C_2 = [(q_3C_3) - (q_1C_1)]/q_2 =$

$= [(26.000 \times 0{,}0001) - (25.600 \times 0{,}000005)]/400 =$

$= 0{,}00618$ kg

b) Cálculo da quantidade de N a ser colocada no tanque

$Q_N = V_t \times C_t = 400 \times 0{,}00618 = 2{,}472$ kg de N

Como a água já possui 5 ppm de N que corresponde a 0,002 kg de N (400 x 0,000005), deve-se acrescentar no tanque apenas 2,470 kg de N. A quantidade de nitrato de cálcio (15% de N) será:

Nitrato de cálcio = (2,47 × 100)/15 = 16,47 kg

A quantidade máxima de ureia que deve ser dissolvida no tanque é 16,47 kg. Pela Tabela 16, a maior quantidade de nitrato de cálcio a ser aplicada é de 13,89 kg; consequentemente, as condições especificadas são atendidas, pois podemos aplicar até 16,47 kg de nitrato de cálcio.

Lembrando-se que os cálculos foram feitos para um dia específico, para o ciclo da cultura, as lâminas de água a serem aplicadas, consequentemente os tempos de irrigação, devem ser calculadas para cada fase do ciclo de desenvolvimento da cultura, com os respectivos coeficientes de cultura (Kc), fator de cobertura do solo (Fc), e considerando a evapotranspiração potencial, que é função dos parâmetros climáticos.

Considerando a Tabela 18, vamos elaborar o planejamento da fertirrigação referente ao período de 3 a 28 dias após a poda, com 11 aplicações (Tabela 19).

Para os outros períodos 36 a 63 (N – 12 aplicações); 36 a 70 (P, K, Mg – 15 aplicações); e 71 a 84 (P, K – 6 aplicações), deve-se elaborar o planejamento.

Tabela 18. Doses de fertilizantes para cada fase de desenvolvimento da planta.

Período (DAP)	Fertilizante	Dose por aplicação
3 a 28	Nitrato de potássio	5,93 kg ha^{-1}
	Nitrato de cálcio	13,98 kg ha^{-1}
	Ácido fosfórico	0,70 L ha^{-1}
36 a 63	Ureia	3,70 kg ha^{-1}
36 a 70	Sulfato de potássio	14,00 kg ha^{-1}
	Sulfato de magnésio	9,35 kg ha^{-1}
	Ácido fosfórico	1,54 L ha^{-1}
71 a 84	Sulfato de potássio	5,00 kg ha^{-1}
	Sulfato de magnésio	5,84 kg ha^{-1}
	Ácido fosfórico	1,22 L ha^{-1}

DAP: dias após a poda.

Tabela 19. Distribuição dos fertilizantes durante o ciclo de produção.

Período (DAP)	Aplicação	Fertilizante (kg/setor)		
		Nitrato de potássio (kg ha^{-1})	Nitrato de cálcio (kg ha^{-1})	Ácido fosfórico (mL ha^{-1})
		Opção A		
3 a 28	1ª	1,5		
	2ª		3,5	
	3ª			240
	4ª	1,5		
	5ª		3,5	
	6ª			240
	7ª	1,5		
	8ª		3,5	
	9ª			240
	10ª	1,5		
	11ª		3,5	
		Opção B		
3 a 28	1ª	0,550	1,275	65
	2ª	0,550	1,275	65
	3ª	0,550	1,275	65
	4ª	0,550	1,275	65
	5ª	0,550	1,275	65
	6ª	0,550	1,275	65
	7ª	0,550	1,275	65
	8ª	0,550	1,275	65
	9ª	0,550	1,275	65
	10ª	0,550	1,275	65
	11ª	0,550	1,275	65

DAP: dias após plantio.

Exemplo 6

Fertirrigação em pastagem

Os principais sistemas de irrigação em pastagem são pivô central e sistemas de aspersão em malha, que pode ser automatizada ou semiautomatizada.

Para o sistema de irrigação por aspersão, se o aspersor selecionado possui diâmetro de bocais 5,00 mm x 2,5 mm, pressão de serviço de 3 bar, vazão de 1,95 com espaçamento entre aspersores de 18 m x 18 m, será aplicada uma lâmina de água de 6,02 mm h^{-1}.

Em 1 ha teremos 6 linhas laterais e 36 aspersores. Possivelmente, o Venturi não atende às condições para realizar a fertirrigação; então, deve-se adquirir um injetor elétrico.

Elaborar um programa de fertirrigação para pastagem que atenda às seguintes condições: para capacidade de suporte de nove unidades de animais por hectare (9 UA ha^{-1}), deve-se aplicar 1.000 kg de ureia por hectare por ano; 250 kg de MAP por hectare por ano; 720 kg de cloreto de potássio por hectare por ano; e 160 kg de sulfato de amônio por hectare por ano.

Lembrando que para os cálculos das doses, deve-se fazer análise de solo. Considerando piquetes com rotação a cada 20 dias, teremos 18 rotações por ano.

Se planejarmos a fertirrigação na saída dos animais, teremos 18 fertirrigações por ano.

Ureia: 18 aplicações de 56 kg em cada aplicação por hectare.

MAP: 18 aplicações de 14 kg em cada aplicação por hectare.

Cloreto de potássio: 18 aplicações de 40 kg em cada aplicação por hectare.

Sulfato de amônio: 18 aplicações de 9 kg em cada aplicação por hectare.

Se planejarmos a fertirrigação na entrada e na saída dos animais, teremos 36 fertirrigações por ano.

Ureia: 36 aplicações de 23 kg em cada aplicação por hectare.

MAP: 36 aplicações de 7 kg em cada aplicação por hectare.

Cloreto de potássio: 36 aplicações de 20 kg em cada aplicação por hectare.

Sulfato de amônio: 36 aplicações de 4,5 kg em cada aplicação por hectare.

O tempo deve ser dividido em três etapas:

- 1ª para equilíbrio hidráulico do sistema de irrigação;
- 2ª para aplicação dos fertilizantes;
- 3ª para distribuição dos fertilizantes na área.

Deve-se ter cuidado especial com a corrosão de bombas e aspersores e usar, sempre que possível, tubos de PVC.

Manejo da fertirrigação

Para a realização da fertirrigação, recomenda-se dividir o processo em três etapas, a primeira para eliminar o ar das tubulações e proporcionar o equilíbrio hidráulico do sistema de irrigação, a segunda para a aplicação dos fertilizantes e a terceira para a lavagem do sistema de irrigação. Assim, eliminam-se partículas e vestígios de nutrientes, consequentemente, evita-se a proliferação de algas e bactérias, e propicia melhor incorporação do fertilizante na zona de maior concentração do sistema radicular da cultura.

Para definir o tempo de cada etapa, o primeiro passo será determinar o tempo que a água, já então na solução de nutrientes, demora para percorrer a distância entre o injetor de fertilizantes e o emissor situado no ponto mais distante. Um procedimento prático para determinar o tempo necessário para deslocar essa solução de nutrientes, entre o injetor de fertilizantes e

o ponto mais distante, é colocar um corante na água e computar o tempo de deslocamento, do início da aplicação da água com o corante dissolvido até o momento em que a água atinge o último emissor, usando cronômetros. Esse tempo, acrescido de uma margem de segurança de 15% a 20% do tempo de deslocamento da água, será o tempo necessário para lavar o sistema de irrigação. Para o equilíbrio hidráulico, recomenda-se deixar o sistema de irrigação funcionar por um período de 15 a 20 minutos. O restante do tempo será para aplicação dos fertilizantes.

A frequência da fertirrigação depende, dentre outros fatores, do tipo de fertilizante e do solo. Fertilizantes com maior potencial de lixiviação, como os nitrogenados, devem ser aplicados mais frequentemente que aqueles com menor potencial, como os potássicos. Todavia, na prática, os fertilizantes são aplicados com a mesma frequência. Solos de textura argilosa, por apresentar maior capacidade de armazenamento de água, requerem aplicação menos frequente de água e também de fertilizantes. Entretanto, em solos de textura arenosa, que requerem aplicação de água mais frequente, a fertirrigação deve ser na mesma frequência da irrigação.

Existem orientações a serem observadas na dissolução dos fertilizantes (Burt et al., 1995):

- Verificar a compatibilidade dos fertilizantes a serem dissolvidos simultaneamente. Fertilizantes contendo cálcio, se misturado com fertilizantes contendo sulfatos, resulta na formação de sulfato de cálcio, de baixa solubilidade, e consequente aumento de precipitação de partículas, que obstruem os emissores de água.
- Quando se dissolvem fertilizantes líquidos e sólidos no mesmo recipiente, deve-se colocar os fertilizantes líquidos antes dos fertilizantes sólidos, pois os fertilizantes líquidos podem proporcionar aumento de temperatura da água, e alguns fertilizantes sólidos causam a redução da temperatura da solução, interferindo na solubilidade dos componentes da solução.
- Deve-se efetuar a agitação dos fertilizantes, evitando, consequentemente, a formação de precipitados.
- Adicionar os ácidos à água, e não o contrário.
- Recomenda-se cautela ao usar água rica em cálcio e magnésio ao dissolver fertilizantes fosfatados e sulfúricos, pois podem formar substâncias insolúveis.

Os tanques utilizados para dissolução dos fertilizantes devem ser confeccionados de materiais não corrosivos, pois a maioria dos fertilizantes são corrosivos, em maior ou menor grau. Recomenda-se o uso de dois tanques, sendo o primeiro instalado a uma altura maior que o segundo. No primeiro tanque, dissolvem-se os fertilizantes. Após a completa dissolução deles, transfere-se a solução para o tanque colocado na posição mais baixa, tendo o cuidado de fazer uma filtragem para reter as impurezas na solução (Figura 14).

Limpeza do sistema de irrigação

A limpeza do sistema de irrigação, no mínimo uma vez por semestre, pode ser feita aplicando ácido (Burt et al., 1995). O processo consiste em fazer a aplicação de ácido, desligar o sistema de irrigação, aguardar 2 horas, abrir todos os finais de linha de gotejadores, ligar o sistema de irrigação e aguardar até que a água saia completamente limpa nos finais de linhas.

Exemplo de cálculo para limpeza de sistema de irrigação

Calcular a quantidade de ácido necessária para realizar a limpeza de um sistema de irrigação, com parcela irrigada composta por 400 plantas, cada planta recebe água de quatro emissores com vazão de 3,75 L h^{-1}. A vazão do Venturi é igual a 60 L h^{-1}. A água usada na irrigação tem pH igual a 8,6 e condutividade elétrica (dS m^{-1}) igual a 0,7. O pH da solução para limpeza do sistema de irrigação, ácido e água, deve ser menor que 2.

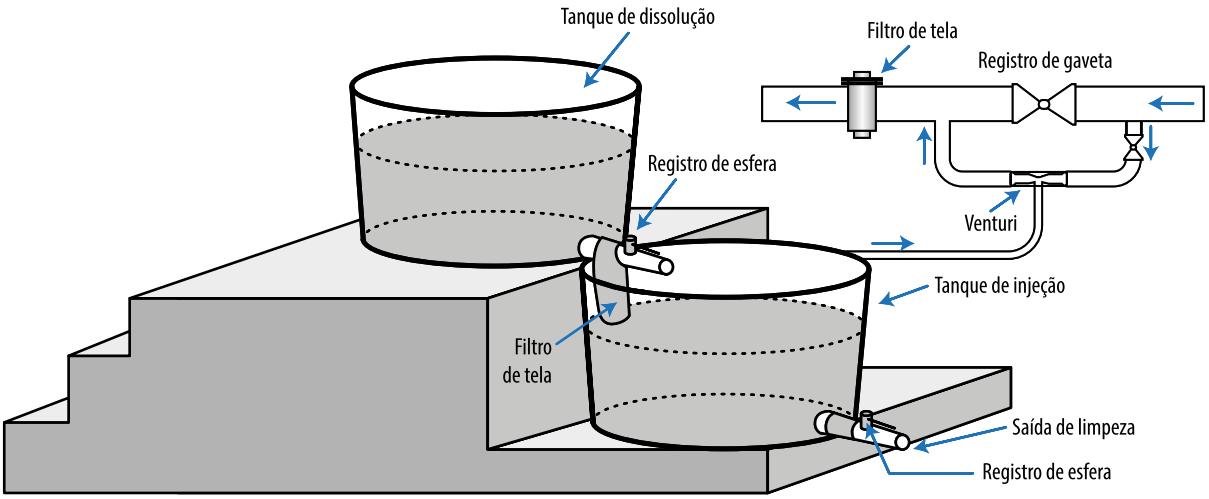


Figura 14. Disposição dos tanques para o preparo da solução de fertilizantes.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Cálculos

Primeiro passo, calcula-se a vazão do sistema de irrigação necessária para irrigar a parcela. Têm-se 400 plantas, com 4 gotejadores por planta. O número de gotejadores da parcela é igual a 400 plantas x 4 gotejadores por planta que é igual a 1.600 gotejadores. A vazão de cada gotejador é igual a 3,75 L h^{-1}, consequentemente a vazão total é igual a 1.600 x 3,75 L h^{-1} que é igual a 6.000 L h^{-1}.

Segundo passo, calcula-se a quantidade de ácido necessária para abaixar o pH da água (8,6) para 2. Deve-se diluir o ácido na proporção de 5:1.000, para evitar quedas bruscas do pH. Coleta-se uma amostra de 200 mL (0,2 L) da água usada na irrigação. Adiciona-se ácido diluído na amostra de água até o valor do pH chegar a 2, sempre medindo o volume de ácido adicionado. No presente caso, o volume de ácido diluído necessário para o pH atingir 2 foi igual a 40 cm^3 (0,04 L) de ácido diluído.

Calculou-se, para um volume de água igual a 0,2 L, o volume de ácido diluído para 1 L de água, usando regra de três:

0,2 L de água	0,04 L de ácido diluído
1 L de água	X
X (1 × 0,04)/0,2 =	0,2 L (200 cm^3) de ácido nítrico diluído por litro de água

Terceiro passo, determina-se o volume de ácido puro necessário para a água chegar a pH igual a 2 por litro de água usada na irrigação.

O ácido foi diluído na proporção de 5:1.000, ou seja, em 1 L (1.000 cm^3) de solução tem 5 cm^3 de ácido.

1.000 cm^3 de sol	5 cm^3 de ácido nítrico
200	Y
Y (200 × 5)/1.000 =	1 cm^3 (0,001 L) de ácido nítrico puro por litro de água

A vazão do sistema de irrigação é igual a 6.000 L h^{-1}. Pode-se calcular o volume de ácido nítrico puro necessário para abaixar o pH da água (8,6) para 2, usando regra de três.

1 L de água	0,001 L de ácido nítrico puro
6.000 L de água	Z
Z = (6.000 × 0,0010)/1 =	6 L de ácido nítrico puro, ou seja, para os 6.000 L de água, necessita-se de 6 L de ácido nítrico puro

Quarto passo, calcula-se o volume de solução a ser aplicado pelo Venturi. A vazão do Venturi é igual a 60 L h^{-1}. A aplicação será realizada em 1 hora. Logo, o volume de solução a ser aplicado pelo Venturi será 60 L. Em 1 hora, o volume

de água aplicado pelo sistema de irrigação é igual a 6 mil litros de água. Para esse volume de água, necessita-se de 6 L de ácido, conforme calculado anteriormente (Z = 6 L de ácido). Também em 1 hora o Venturi aplica 60 L de solução, que será formada por 6 L de ácido e 54 L de água.

Quinto passo, aplica-se a solução durante 1 hora. Finalizada a aplicação, desliga-se o sistema de irrigação, espera-se, no mínimo, 2 horas; após esse tempo, abrem-se todos os finais de linhas de gotejadores e liga-se novamente o sistema de irrigação, aplicando-se água pura para a lavagem do sistema de irrigação.

Aplicação de agroquímicos

Atualmente, assim como a fertirrigação, a técnica de aplicação de agroquímicos vem se aperfeiçoando. Essa técnica está se intensificando pelos produtores que dispõem de equipamentos de irrigação, pois é uma técnica eficiente para aplicação de produtos químicos e economicamente viável. Os mais diversos tipos de produtos, entre eles os herbicidas, os inseticidas, os fungicidas, os nematicidas, produtos biológicos, são passíveis de serem aplicados via irrigação.

A aplicação de agroquímicos pode ser realizada com todos os métodos de irrigação: superfície, aspersão e localizada. Nas irrigações por superfície e localizada, apenas é possível aplicar agroquímicos que têm como alvo o solo. Na irrigação por aspersão, a aplicação é feita em área total, e os agroquímicos podem ter como alvo tanto o solo quanto a parte aérea das plantas, ou ambos. Diferente da fertirrigação, que é de uso contínuo, a aplicação de agroquímicos é realizada quando houver necessidade de aplicação de cada produto específico.

Devem-se conhecer as características química e física dos produtos a serem aplicados via água de irrigação, como: solubilidade, adsorção, dessorção, volatilidade e fotossensibilidade do solo e da água. O que mais influencia na adsorção de herbicida é o solo, com o tipo e a quantidade de argila e de matéria orgânica presentes. Recomenda-se, em solos argilosos e, principalmente, em orgânicos, aplicar maior dose de herbicida que em arenosos, para o controle adequado de plantas daninhas (Lima et al., 2012).

No Brasil, não existem leis específicas para aplicação de produtos via água de irrigação. Todavia, a aplicação de produtos químicos para tratamentos fitossanitários via água de irrigação deve seguir a legislação vigente para os tratamentos sanitários, com as recomendações de cada produto, inclusive obedecer aos períodos de carências, registros para as respectivas culturas e as dosagens especificadas no rótulo de cada produto. Vale ressaltar que os defensivos devem estar devidamente registrados nos órgãos federais e estaduais competentes.

A vantagem da aplicação de agroquímicos consiste na não contaminação dos operadores, pois não há derivas de produtos, principalmente em sistemas de irrigação localizada. Para os sistemas de irrigação por aspersão e pivô central, devem-se evitar horários com vento, minimizando as derivas e, consequentemente, perdas dos produtos aplicados.

Herbicidas podem ser aplicados, via água de irrigação, para evitar o crescimento de raízes nos emissores de água e evitar a obstrução deles (Tales, 2002).

No Brasil, somente nos últimos anos é que a quimigação tem-se firmado como técnica, e os proprietários dos sistemas de irrigação localizada e pivô central são os que fazem uso mais frequente dessa prática. Com a evolução dos sistemas de irrigação, a introdução de novos defensivos no mercado, o aumento crescente do custo da mão de obra e a necessidade de elevar a eficiência dos insumos agrícolas, criou-se expectativa em relação à utilização dessa tecnologia. Entretanto, no Brasil, como não há legislação específica sobre as precauções a serem tomadas, as medidas e os equipamentos de segurança a serem adotados dependem,

basicamente, da conscientização do produtor irrigante e do custo envolvido.

Um exemplo prático pode ser visto para cultura de ciclo curto, como o meloeiro, em que os métodos de aplicação dos agroquímicos são realizados por pulverização e via irrigação. No primeiro caso, são realizadas com equipamento costal e/ou pulverizadores em barra de trator. Para o uso via sistema de irrigação, os neonicotinoides são a única opção, e possuem ação sistêmica e recomendações específicas para sua aplicação por esse método. O neonicotinoide tiametoxan, aplicado via irrigação, possui período de carência de 64 dias. Consequentemente, o único momento possível de sua utilização por esse método é logo após a germinação ou transplantio, já que o tempo para colheita é de aproximadamente 65 dias para o melão. Para as áreas de meloeiro que já estejam com presença de mosca branca, é recomendada uma aplicação preventiva de neonicotinoide. Essa deve ser realizada via irrigação na emergência das plântulas. Na sequência, deve-se iniciar o monitoramento de mosca branca, a cada 3 dias.

Em geral, os produtos químicos aplicados via água de irrigação por gotejamento estão sendo utilizados para o combate do bicho mineiro e pulgão, especialmente, tiametoxan, abamectina e cipermetrina.

Sistema de prevenção do refluxo

Os equipamentos mínimos requeridos na quimigação são: sistema de irrigação (sucção, eletro ou motobomba, recalque e linhas laterais de irrigação), bomba injetora, depósito de agroquímicos, válvula de retenção e manômetro.

A instalação e manutenção dos equipamentos para prevenir o refluxo dos químicos dentro da fonte de água ou do depósito de agroquímico são fundamentais para o sucesso dessa tecnologia de aplicação de produtos químicos.

A prevenção de retorno de fluxo é crítica em sistema de fertirrigação. Quando não se utilizam sistemas de prevenção, o fertilizante que permanece no sistema, no momento em que o sistema de irrigação é desligado, será sifonado através da bomba, atingindo a fonte de água.

Os equipamentos de prevenção de refluxo são diversos, cujo sistema consiste em:

Válvula de retenção na linha principal de irrigação, ventosa-sifão e um dreno

A válvula de retenção e a ventosa-sifão impedem o produto químico e/ou a solução de retornar à fonte d'água. As válvulas de retenção devem situar-se entre a bomba de irrigação e o ponto de injeção na linha principal de irrigação. A função do dreno de baixa pressão é remover qualquer solução de produto químico que tenha passado pela válvula de retenção.

Sistema bloqueador de injeção de químicos

O sistema que interrompe a injeção de produtos químicos consiste de uma válvula de retenção, uma válvula solenoide, localizada na linha de sucção, suprimento de energia do sistema de irrigação e a bomba de injeção de químicos. A válvula de retenção na linha de injeção de químicos é necessária para prevenir o fluxo de água do sistema de irrigação para o interior do tanque.

Bomba injetora

A bomba injetora de produtos químicos deve ter precisão de 0,5% a 1%, fácil ajuste para diferentes doses, mesmo durante a operação, material não corrosivo e de mecânica robusta. O motor elétrico deve ser totalmente selado para minimizar a possibilidade de combustão, quando combustíveis ou vapor químico estejam presentes.

A instalação do sistema de injeção usando a bomba do sistema de irrigação como injetor de fertilizante, como ilustrado na Figura 15, é encontrada na prática. Todavia, tecnicamente, não se recomenda fazer injeção de produtos químicos na água de irrigação, incluindo fertilizante que utilize a bomba de sucção para inje-

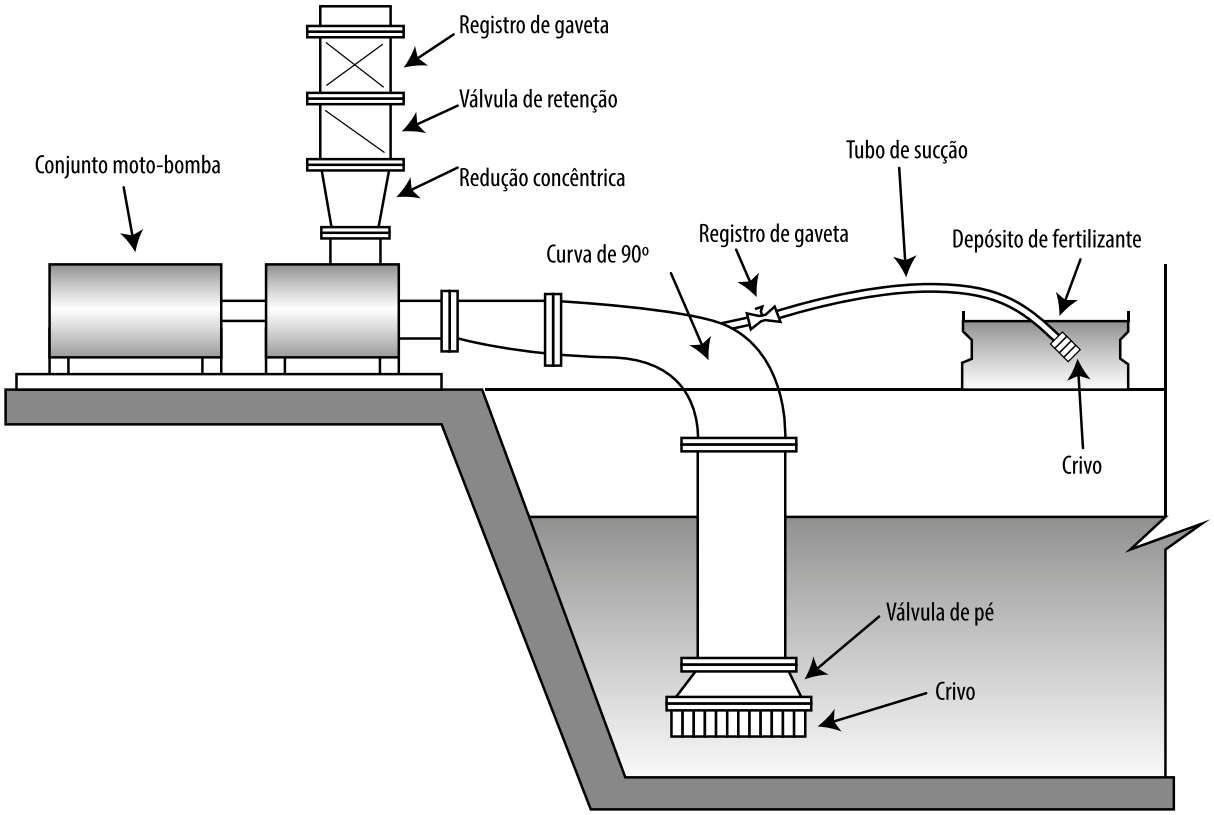


Figura 15. Injeção de fertilizantes adotando a bomba como injetor de fertilizantes (não indicado tecnicamente).
Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

ção de produtos químicos. Qualquer problema que ocorrer pode contaminar a fonte de água. Também, afeta negativamente as condições hidráulicas da sucção do bombeamento e provoca corrosão e cavitação dos componentes da bomba.

Estratégias de manejo da aplicação de fertilizantes e agroquímicos na água de irrigação

Na quimigação, existem aspectos essenciais para um eficiente desempenho do sistema. Dentre eles podem ser destacados:

- Conhecer o sistema de irrigação, vazão do emissor, pressão de serviço, volume de solo molhado e uniformidade de distribuição da água, pois se o volume de água for baixo, afetará a distribuição do produto aplicado.
- Estudar o clima, o solo, e determinar as características físicas e químicas da água, que interferem na aplicação de produtos via água de irrigação.
- Analisar as características químicas e físicas de cada produto a ser aplicado via água de irrigação. A solubilidade em água pura (geralmente entre 20 °C e 25 °C) é fornecida em mg L^{-1}. Os produtos podem ser classificados, quanto à solubilidade, em insolúvel (< 1 mg L^{-1}); 2 – muito baixa (entre 1 mg L^{-1} e 10 mg L^{-1}); 3 – baixa (entre 11 mg L^{-1} e 50 mg L^{-1}); 4 – média (entre 51 mg L^{-1} e 150 mg L^{-1}); 5 – elevada (entre 151 mg L^{-1} e 500 mg L^{-1}); 6 – muito elevada (entre 501 mg L^{-1} e 5.000 mg L^{-1}); e 7 – extremamente elevada (acima de 5.000 mg L^{-1}) (Deuber, 1992). Em geral, produtos com alta

solubilidade em água atingem maiores profundidades no solo que os pouco solúveis.

- Compreender o processo de adsorção e sua influência na concentração do produto na solução do solo, a qual afeta a sua disponibilidade para a absorção pelas plantas, para a degradação química e biológica, para a volatilização e para a lixiviação. O que mais influencia na adsorção é o solo com o tipo e a quantidade de argila e de matéria orgânica (Harper, 1994).

- Fazer uso de práticas de manutenção do sistema, a exemplo do processo de cloração para combater algas, o qual consiste na aplicação de produtos que contenham altas concentrações de cloro, como ácido hipocloroso, hipoclorito de sódio, hipoclorito de cálcio (Burt et al., 1995), com precaução, pela possibilidade de toxidez às plantas.

- Reduzir o crescimento bacteriano no sistema. Manejar as concentrações de manganês, uma vez que as bactérias têm crescimento adequado sob baixa concentração dele (menor que 0,2 mg L^{-1}), e cobrir pequenos reservatórios para evitar a entrada de luz solar, prevenindo o desenvolvimento de bactérias. Já para a ação desses microrganismos oxidando os componentes do sistema de irrigação confeccionados de ferro, ou seja, podendo causar obstrução nos emissores de água, recomenda-se a aeração da água para a precipitação do ferro (Lima et al., 2012).

Referências

ANTUNES, R. C. B.; RENA, A. B.; MANTOVANI, E. C. **Fertirrigação na cultura do cafeeiro arábica**. Viçosa, MG: Ed. da UFV, 2001. 39 p. (Boletim técnico, 5).

BRITO, R. A. L.; PINTO, J. M. Aplicação de produtos químicos via irrigação (quimigação). In: ALBUQUERQUE, P. E. P. de; DURÃES, F. O. M. (ed.). **Uso e manejo de irrigação**.

Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. p. 421-447.

BURT, C. M.; O´CONOR, K.; RUEHR, T. **Fertigation**. San Luis Obispo: Irrigation Training and Research Center-California Polytechnic State University, 1995. 295 p.

CAVALCANTI, F. J. de A. (coord.). **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**: 2a. aproximação. 3. ed. rev. Recife: Instituto Agronômico de Pernambuco, 2008. 212 p.

DEUBER, R. **Ciência das plantas daninhas**: fundamentos. Jaboticabal: Funep, 1992. v. 1, 431 p.

FRENEY, J. R.; SIMPSON, J. R.; DENMEAD, O. T.; MUIRHEAD, W. A.; LEUNING R. Transformation and transfers of nitrogen after irrigating a cracking clay soil with a urea. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 36, p. 685-694, 1985. DOI: 10.1071/AR9850684.

FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A.; NETO, D. D. **Aplicação de fertilizante via água de irrigação**. Piracicaba: Esalq, 1994. 35 p. (ESALQ. Série Didática, 8).

HAMAN, D. Z.; SMAJSTRIA, A. G.; ZAZUETA, F. S. **Chemical injectionmethods for irrigation**. Gainesville: University of Florida, 1990. 21 p. (Florida Cooperative Extension Service. Circular, 864).

HARPER, S. S. Sorption-desorption and herbicide behavior in soil. **Reviews of Weed Science,** v. 6, p. 207-225, 1994.

HAYNES, R. J. Movement and transformations of fertigated nitrogen below trickle emitters and their effects on pH in the wetted soil volume. **Fertilizer Research**, v. 23, p. 105-112, May 1990. DOI: 10.1007/BF01063337.

HERGERT, G. W.; REUSS, J. O. Sprinkler application of P and Zn fertilizers. **Agronomy Journal**, v. 68, p. 5-8, 1976. DOI: 10.2134/agronj1976.00021962006800010002x.

HERNANDEZ, F. B. T. Potencialidade da fertirrigação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE FERTILIZANTES FLUÍDOS, 1993, Piracicaba. **Anais** [...] Piracicaba: Esalq, 1993. p. 199-210.

LANDIS, T. D. Mineral nutrients and fertirrigation. In: LANDIS, T. D.; TINUS, R. W.; McDONALD, S. E.; BARNETTM, J. P. **The container tree nursery manual**. Washington, DC: Department of Agriculture, 1989. p. 1-67. (Agricultural Handbook, 674).

LIMA, P. L. T.; MAGALHÃES, C. A. de S.; CARVALHO, R. F. de; LIMA, L. A.; LIMA, J. M. de; ANDRADE, L. A. de B. Trifluralin leaching in soils cultivated with sugarcane irrigated by sub-surface drip system. **Irriga**, v. 17, n. 1, p. 39-45, 2012. DOI: 10.15809/irriga.2012v17n1p39.

LOPEZ, C. C. Fertirrigação: aplicação na horticultura. In: FOLEGATTI, M. V.; CASARINE, E.; BLANCO, F. F.; CAMPONEZ DO BRASIL, R. P.; RESENDE, R. S. (coord.). **Fertirrigação**: flores, frutas e hortaliças. Guaíba: Agropecuária, 2001. p. 269-288.

LOPEZ, J. R.; ABREU, J. M. H.; REGALADO, A. P.; HERNANDEZ, J. F. G. **Riego localizado**. 2. ed. Madri: Mundi-Prensa, 1997. 405 p.

LOPEZ, T. M. Cabezal de riego. In: LÓPEZ, C. C. **Fertirrigacion**: cultivos hortícolas y ornamentales. Madri: Mundi-Prensa, 1998. p. 247-263.

LORENZ, O. A.; MAYNARD, D. N. **Knott's Handbook for vegetables growers**. 3. ed. New York: John Wiley, 1988. 456 p.

PAPADOPOULOS, I. Tendências da fertirrigação: processos de transição na fertilização convencional para a fertirrigação. In: FOLEGATTI, M. V.; CASARINE, E.; BLANCO, F. F.; CAMPONEZ DO BRASIL, R. P.; RESENDE, R. S. (coord.). **Fertirrigação**: flores, frutas e hortaliças. Guaíba: Agropecuária, 2001. p. 9-59.

PASCUAL, B. **Riegos de gravedad y a presión**. Valência: UPV: ETSIA: SPUPV, 1996. 465 p.

PINTO, J. M.; SOARES, J. M. **Fertirrigação**: a adubação via água de irrigação. Petrolina: Embrapa-CPATSA, 1990. 16 p. (Embrapa-CPATSA. Documentos, 70).

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF)**: goteo, microaspersión y exudación. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513 p.

SILVA, D. J.; BORGES, A. L. Fertilizantes para fertirrigação. In: BORGES, A. L.; COELHO, E. F. (org.). **Fertirrigação em fruteiras tropicais**. 2. ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2009. p. 20-36.

SOUSA, V. F.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; NOGUEIRA, L. C.; COELHO FILHO, M. A.; ARAÚJO, A. R. de Manejo da fertirrigação em fruteiras e hortaliças In: SOUSA, V. F. de; 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, 2011. p. 319-337.

TALES, J. A. M. **Riego localizado y fertirrigación**. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2002. 534 p.

VITTI, G. C.; BOARETTO, A. E.; PENTEADO, S. R. Fertilizantes e fertirrigação In: VITTI, G. C.; BOARETTO, A. E. (ed.). **Fertilizantes fluidos**. Piracicaba: Potafós, 1994. p. 283-308.

Capítulo 11

Gestão e avaliação econômica de sistemas irrigados

Rubens Augusto de Miranda

Introdução

Ao longo das últimas décadas, o processo de globalização provocou alterações profundas nas atividades produtivas no Brasil e no mundo, principalmente no que concerne à competição global. Essa competição tem resultado na ocorrência de margens de lucro cada vez mais estreitas, tornando a eficiência produtiva fundamental para garantir a permanência no mercado. Ademais, no novo ambiente globalizado, os clientes passaram a ter voz, e a produção agora precisa ter uma orientação focada neles, especialmente quanto à produção de bens ou serviços que respondam concretamente às necessidades dos clientes.

Em meio a essas transformações, o agronegócio brasileiro foi pressionado a praticar uma agricultura mais moderna. Segundo Nantes e Scarpelli (2001), a necessidade de aumento de eficiência frente ao ambiente mais competitivo levou os produtores rurais a procurar novos modelos gerenciais e operacionais, principalmente aqueles focados no consumidor como agente definidor dos padrões de qualidade.

A escolha das culturas, práticas agrícolas e tecnologias passa, necessariamente, pelo processo de tomada de decisão do produtor, que muitas vezes carece das informações e do conhecimento técnico-gerencial para tal. Por mais que o produtor tenha seu conhecimento tradicional, além de prática e experiência nos aspectos produtivos do seu negócio, caso ele não avalie o desempenho econômico da atividade de forma objetiva, a estagnação e/ou saída da atividade são cenários prováveis. E isso é algo que vem acontecendo em muitos setores agropecuários, com a redução do número de produtores e concentração da atividade em poucos. Nesse sentido, uma prática de gestão capaz de planejar e monitorar sistematicamente o desempenho técnico (biológico, ambiental, etc.) e econômico da atividade produtiva é fundamental para o sucesso ao longo do tempo. Em termos de sistemas irrigados, algumas estruturas demandam um investimento de recursos considerável, e, se o produtor não tiver uma ideia de custos e retornos esperados, o resultado pode ser muito negativo. Ao longo desse módulo, serão apresentados alguns princípios de gestão, assim como a elaboração de informações elementares para a tomada de decisão na produção agropecuária. A compreensão dos aspectos de gestão e aplicação deles na gestão do sistema de produção agrícola irrigado não somente é relevante como é fundamental para o sucesso da atividade.

Gestão da atividade rural

Um dos maiores obstáculos ao gerenciamento adequado das atividades rurais no Brasil se deve a um aspecto cultural do produtor: realizar investimentos produtivos de forma pouco criteriosa, com pouco planejamento, controle e avaliação dos gastos e retornos obtidos.

Gestão é um termo corriqueiro do nosso dia a dia, mas o seu uso exacerbado não necessariamente é acompanhado do entendimento do seu significado. Afinal, qual o significado do termo? Segundo o dicionário Michaelis, gestão é o "ato de gerir ou administrar". Assim, o

termo remete à administração, sendo muitas vezes utilizado como sinônimo. Entretanto, seu significado e conteúdo vêm sofrendo transformações, por meio das diferentes teorias da administração, mas há uma convergência para a ideia de que a administração é o processo de planejar, organizar, dirigir e controlar o uso de recursos a fim de alcançar objetivos.



Conhecer os conceitos de gestão é importante, assim como encarar uma propriedade rural como se fosse uma empresa, que necessita ter funções administrativas bem definidas para se obter resultados satisfatórios.

Funções administrativas

As quatro ações (planejar, organizar, dirigir e controlar) vinculadas ao conceito de administração apresentado anteriormente, quando estudadas separadamente, são denominadas funções administrativas, e, quando estudadas em conjunto, compõem o processo administrativo, podendo ser definidas como:

Planejar: processo que permite tomada de decisões mais conscientes e que leva ao estabelecimento de um conjunto coordenado de ações visando à consecução de determinados objetivos.

Organizar: processo de estabelecimento das relações entre funções, pessoal e fatores físicos.

Dirigir: função responsável por estimular as ações desejadas, por meio da emissão de ordens ou por meio da motivação.

Controlar: acompanhamento das atividades conforme os planos desenvolvidos. Essa figura gerencial permite a identificação de falhas no processo de implementação e sua correção.

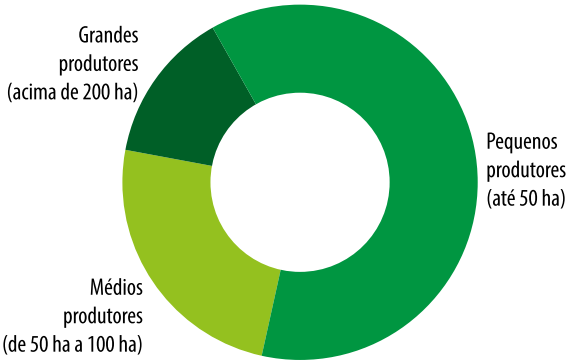
O planejamento é a primeira função administrativa, porque ele serve de base para as demais. É nessa etapa que se definem antecipadamente os objetivos e as ações necessárias para alcançá-los. Em qualquer negócio, há sempre algum nível de planejamento, mesmo ocorrendo de forma espontânea e informal. Na agricultura, quando o produtor define o que plantar e adquire insumos para realizar determinadas etapas de manejo, ele realizou algum tipo de planejamento. Na agricultura irrigada, o dimensionamento do sistema, a avaliação do seu desempenho e a operação dele são macrofases importantes que já condicionam um planejamento anterior, e também caracterizam as fases subsequentes de planejamento para tomada de decisão e execução. A grande questão é que esse processo de planejamento pode ocorrer de forma mais adequada se utilizadas ferramentas gerenciais apropriadas, as quais podem melhorar os resultados do negócio.

Ao tratarmos da organização enquanto função administrativa, o objetivo é o de basicamente dividir o trabalho e definir as responsabilidades das atividades planejadas anteriormente. Após a definição do planejamento e o estabelecimento da organização, é o papel da direção fazer as coisas andarem/acontecerem. Segundo Chiavenato (2003, p. 174), "a função da Direção se relaciona diretamente com a maneira pela qual o objetivo ou os objetivos devem ser alcançados por meio da atividade das pessoas que compõem a organização". Por fim, a função do controle consiste em verificar se as atividades controladas estão ou não alcançando os resultados desejados.

O produtor rural deve atentar para a utilização das funções de planejar, organizar, dirigir e controlar com o principal objetivo de aumentar a eficiência e a eficácia[1] das atividades, consequentemente diminuindo os desperdícios/custos e melhorando os resultados da atividade produtiva. Entretanto, as questões vinculadas ao gerenciamento no setor agropecuário brasileiro muitas vezes são delegadas a segundo plano.

[1] Basicamente, eficácia e eficiência se distinguem no sentido de que o primeiro termo se refere a "fazer as coisas certas" e o segundo de "fazer certo as coisas". Assim, a eficácia é um conceito aplicado em nível gerencial e eficiência é tratada em nível operacional.

Procurando avaliar a complexidade no gerenciamento de uma propriedade rural, Rezende e Zylbersztajn (1999) realizaram uma pesquisa, na qual entrevistaram produtores do estado de Goiás, que questionava ocorrência de determinadas atividades produtivas e gerenciais. Os entrevistados também foram alocados em três grupos, de acordo com o tamanho da propriedade:



A Tabela 1 apresenta alguns dos resultados da pesquisa, dentre eles, merece destaque o fato de que itens relacionados a atividades produtivas apresentaram maior frequência de ocorrência do que os relacionados à gestão, indicando que as propriedades rurais, no estado de Goiás, davam pouca ênfase aos aspectos gerenciais do negócio. Apesar de os resultados da pesquisa serem para o estado de Góias, é provável que também fossem representativos para outras regiões produtivas do País.

Quase duas décadas após a pesquisa de Rezende e Zylbersztajn (1999), é possível dizer que o cenário entre os produtores de grande porte aparentemente mudou, pelo menos entre os produtores de grãos, com uma gestão cada vez mais profissional. Entretanto, cabe mencionar que os grandes produtores são minoria dentro do universo de propriedades rurais, apesar de a ideia de porte variar entre culturas agrícolas em relação ao nível tecnológico e discernimento técnico para tomadas de decisão nessas propriedades. Outro ponto que merece cuidado é que infelizmente existe uma carência de pesquisas que investiguem práticas de gestão em propriedades com agricultura irrigada.

É imprescindível que uma propriedade rural que almeja o lucro adote práticas gerenciais que permitam saber onde os recursos estão sendo alocados e o retorno que se está obtendo. Por mais óbvia que essa afirmação possa parecer, tais práticas não são utilizadas de forma generalizada no campo. Muitos produtores sofrem perdas sucessivas, ano após ano, e não conseguem visualizar o detalhamento dessas perdas e de números associados.

Tabela 1. Frequência de atividades produtivas e administrativas em propriedades rurais do estado de Goiás de acordo com o porte do produtor.

Tipo de atividades	Porte do produtor		
	Pequeno	Médio	Grande
Produtivas			
Nível de tecnologia mecanizada nas atividades	Alta	Baixa	Alta
Nível de informatização	Baixa	Baixa	Baixa
Assistência técnica especializada	Alta	Alta	Alta
Empregados com formação técnica	Alta	Baixa	Alta
Gestão			
Assistência contábil	Baixa	Média	Baixa
Assistência comercial	Nula	Baixa	Nula
Confecção de planilhas de resultados	Baixa	Baixa	Baixa
Financiamento bancário	Baixa	Baixa	Baixa

Fonte: Rezende e Zylbersztajn (1999).

O papel do administrador rural

Ao se defrontar com as decisões sobre o quê, quando e como produzir, o administrador rural precisa avaliar uma série de informações para almejar a maximização (o máximo possível) dos lucros da(s) atividade(s) produtiva(s).

Segundo Santos et al. (2002), a eficácia das decisões do administrador rural depende do conhecimento dos fatores que afetam os resultados econômicos, que podem ser de natureza externa ou interna.

Principais fatores externos

- Preço dos produtos: histórico e tendência.
- Fatores climáticos: histórico e tendência.
- Existência de mercado para os produtos.
- Política de crédito e financiamento.
- Transporte/logística.
- Disponibilidade de mão de obra na região.

Principais fatores internos

- Tamanho da empresa (propriedade) agropecuária.
- Rendimento dos cultivos e criações (produtividade).
- Seleção e combinação de atividades produtivas.
- Eficiência de manejo e mão de obra.

Preço dos produtos: histórico e tendência

É impossível administrar de forma eficiente uma propriedade rural sem algum conhecimento sobre o comportamento dos preços agropecuários. Assim como em qualquer mercado, os preços na agricultura e pecuária dependem das condições de oferta e demanda. Entretanto, o setor agrícola possui algumas particularidades em relação à previsibilidade da oferta que o distingue dos demais setores da economia. Na indústria, é possível determinar a produção de certa quantidade de bens, de forma muito precisa, a partir de uma determinada quantidade de insumos. Essa não é a realidade da agricultura. O fator clima incorpora um elemento grande de incerteza na previsão de oferta agrícola. Assim, uma expectativa de aumento de produção, oriunda de uma maior área plantada e maior utilização de insumos, pode ser frustrada por um clima adverso. Ou seja, previamente não é possível estimar de forma precisa a produtividade na agricultura; logo, as previsões são alteradas conforme a safra avança, e o clima vai apresentando alterações. Em razão disso, é de extrema importância que o produtor conheça o comportamento dos preços, caracterizado por forte sazonalidade, para saber o que produzir e quando vender.

Fatores climáticos: histórico e tendência

O conhecimento relativo ao clima, principalmente no que se refere às épocas de chuvas, indica quando investir na lavoura ou até a mudança da cultura a ser plantada, por causa dos riscos climáticos decorrentes.

Existência de mercado para os produtos

A escolha da cultura a ser plantada depende da existência de mercado, compradores, para o produto. Determinados nichos de mercado garantem boas remunerações, mas não se deve esquecer de que a demanda também é restrita e precisa-se atentar para dificuldades de escoamento por falta de comprador. Isso pode ocorrer, principalmente, ao adentrar em novos mercados sem conhecer exatamente quem são os compradores.

Política de crédito e financiamento

Determinadas políticas de crédito e financiamento podem estimular a adoção de tecnolo-

gias ou a construção de uma melhor infraestrutura, por exemplo. Um bom exemplo consiste em programas de governo, como o Moderinfra (Programa de Incentivo à Irrigação e à Produção em Ambiente Protegido), que consiste numa modalidade de financiamento que apoia a melhoria da infraestrutura na propriedade. O financiamento de sistemas de irrigação (inclusive infraestrutura elétrica e reserva de água) é um dos focos desse programa.

Transporte/logística

A expansão da fronteira agrícola, no Brasil, viabilizou o aumento da produção de grãos no País, mas também impôs um desafio logístico para o escoamento da safra. O resultado prático é o alto custo de transporte da produção na fronteira agrícola para os centros de consumo. Em condições normais, o custo de transporte da saca de milho do Mato Grosso ao porto de Santos, SP, por exemplo, chega a ser maior que o próprio custo de produção do cereal. Nesse sentido, o gestor da propriedade tem que avaliar a sua estratégia de produção embutindo os custos de transporte até o consumidor intermediário ou final. Além disso, a localização da produção nas fronteiras agrícolas possui problemas logísticos de aquisição de insumos. Nesse sentido, uma solução frequentemente aplicada é que o mesmo fretamento que escoa a produção retorna cxom insumos, diminuindo os custos de transporte.

Disponibilidade de mão de obra na região

Atualmente, uma das maiores dificuldades na produção agrícola em todo o País é a escassez de mão de obra, que impõe a necessidade maior de mecanização, que, por sua vez, demanda uma mão de obra mais qualificada, também em falta. A falta de trabalhadores se constitui em um problema produtivo em várias regiões do País, e esse é um fator fundamental na gestão da propriedade.

Tamanho da propriedade

É determinante no dimensionamento dos investimentos. Certas culturas demandam áreas maiores, e o ganho só ocorre se existir escala de produção, viabilizando a mecanização, por exemplo. Investimentos em mecanização precisam ser cuidadosos para que os equipamentos não fiquem subutilizados.

Rendimentos/produtividade

A produtividade almejada da plantação depende da utilização de insumos programada (investimentos), do clima e da época de plantio. Um maior risco climático decorrente de um plantio tardio ou previsões de estiagem induzem à diminuição dos investimentos como forma de minimização das perdas. Em relação especificamente à previsão climática, dependendo se o cenário adverso é local, regional ou mesmo nacional, assim como a intensidade da estiagem, há diferentes impactos sobre os preços. Se for um clima ruim em escala nacional, há a expectativa de aumento de preços do produto, e os produtores podem lucrar, apesar da produtividade mais baixa. Uma estiagem apenas local afeta negativamente a produtividade, e os preços pouco se alteram, resultando em prejuízos para o produtor.

Seleção e combinação de atividades

Uma etapa importante do planejamento da produção é a de determinar as culturas e as áreas que ocuparão na propriedade. É preciso definir as combinações que garantam o uso mais eficaz de todos os fatores de produção disponíveis, principalmente terra. A produção intensiva resulta em custos fixos menores por unidade produtiva, viabilizando maiores lucros. É justamente para diluição dos custos fixos oriundos do investimento em infraestrutura que sistemas irrigados precisam intensificar a utilização de recursos e o uso da terra para maximizar a produção.

A Figura 1 apresenta um exemplo gráfico da divisão das áreas produtivas de uma proprieda-

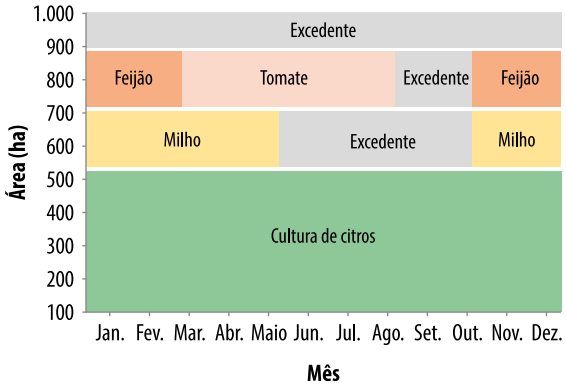


Figura 1. Modelo gráfico de uso da terra em propriedade rural.

Fonte: Santos et al. (2002).

de rural, onde a função do administrador é diminuir o máximo possível as áreas excedentes (aquelas ociosas) com a intensificação do uso da terra, excetuando-se aquelas designadas para pousio e preservação ambiental. Cabe ressaltar que as áreas sem plantio são justificadas somente dentro de uma estratégia de pousio. Nesse sentido, é comum pivôs de irrigação cuja área é dividida entre diferentes culturas e áreas de pousio (Figura 2). Também pode ocorrer um planejamento de sucessão de culturas em determinada área ao longo dos anos (Figura 3).

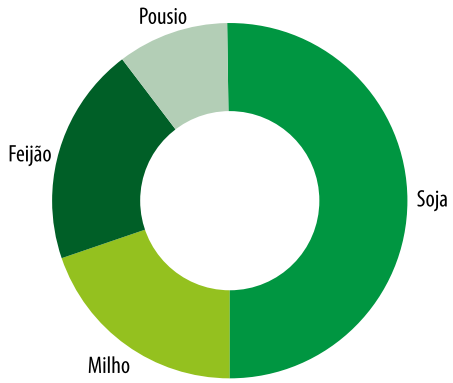


Figura 2. Modelo gráfico com agricultura irrigada com pivô.

Eficiência do manejo e da mão de obra

A qualificação da força de trabalho, ou mesmo a disponibilidade de mão de obra qualificada na região (que é um fator externo analisado), é algo que pode restringir a adoção de equipamentos e tecnologias mais modernas. Na aquisição de equipamentos para o manejo da lavoura, é preciso ter atenção ao dimensionamento adequado para diminuir a ociosidade das máquinas e dos implementos. Em sistemas irrigados, deve-se focar na diminuição de desperdícios e na conservação ambiental, considerando que a eficiência é imprescindível no cenário de escassez hídrica.

Avaliação econômica

Um negócio, uma atividade produtiva, pode aparentar ser bem-sucedido em função do volume dos recursos (dinheiro) que movimenta. No entanto, somente por meio de um processo sistemático de avaliação é que será possível saber de forma mais confiável a real situação do negócio. Nesse sentido, a chamada avaliação econômica se utiliza de uma série de ferramentas analíticas, que nada mais são do que a aplicação de procedimentos para identificar, medir, avaliar e comparar custos e receitas.

Na agricultura, a avaliação econômica cria um critério para a tomada de decisão na escolha entre diferentes culturas e sistemas produtivos (irrigados ou de sequeiro, por exemplo), além de auxiliar o produtor a avaliar se determinado nível de produção compensa o volume de recursos dispendidos para produzi-lo.

Os custos de produção que trataremos a seguir por si só constituem uma medida de desem-

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Ano 1	Soja	Soja	Soja	Soja	Milho	Milho	Milho	Milho	Milho	Soja	Soja	Soja
Ano 2	Soja	Milho	Milho	Milho	Milho	Milho				Soja	Soja	Soja
Ano 3	Soja			Feijão	Feijão	Feijão	Feijão	Milho	Milho	Milho	Milho	Milho

Figura 3. Plano de sucessão de plantio.

penho econômico que pode ser explorada em diferentes formas de avaliação.

Sistemas de custos

Na agricultura, assim como em qualquer negócio, o produtor só saberá se a atividade à qual se dedica está remunerando de fato os seus esforços caso consiga colocar no papel o que está entrando e saindo de recursos financeiros.

Nesse sentido, faz-se necessário algum conhecimento básico em sistemas de custos que auxilie o produtor a fazer essa conta. Segundo Santos et al. (2002, p. 34), "Sistema de Custos é um conjunto de procedimentos administrativos que registra, de forma sistemática e contínua, a efetiva remuneração dos fatores de produção empregados nos serviços rurais".

Santos et al. (2002) apontam quatro objetivos para esse sistema:

- Auxiliar o processo de planejamento rural, principalmente no que se refere à tomada de decisão do que plantar, quando plantar e como plantar.
- Auxiliar a gestão da atividade produtiva, indicando as operações de maior e menor custo e as vantagens de substituição de umas pelas outras.
- Permitir a correta valoração (determinação do valor) da produção em cada cultivo.
- Orientar políticas públicas, como preços mínimos e linhas especiais de crédito.

Entretanto, para que seja possível fazer uma avaliação de um sistema produtivo irrigado por intermédio de um sistema de custos, é preciso classificar as operações de forma a podermos determinar o que entra, ou não, na conta e também ordená-las adequadamente.

Principais nomenclaturas dos sistemas de custos

Muitas das nomenclaturas utilizadas em sistemas de custos são utilizadas de forma inadequada, quando terminologias distintas são utilizadas como sinônimos. Seguem abaixo as principais nomenclaturas:

- **Receita –** Corresponde, de forma geral, aos recursos oriundos da venda de mercadorias ou prestação de serviços. Entretanto, cabe lembrar que a receita também pode ocorrer de outras formas.
- **Gasto (dispêndio) –** É todo sacrifício[2] (esforço) para aquisição de um bem ou serviço. Veremos a seguir que, quando o gasto é pago no ato, é caracterizado como um desembolso, e quando a ser pago no futuro é classificado como dívida.
- **Desembolso –** É todo recurso (dinheiro) que sai do caixa para um pagamento. Todo gasto de certa forma é um desembolso, mas nem todo desembolso é um gasto. Uma dívida hoje no futuro passará a ser entendida como desembolso, quando for paga. Cabe ressaltar que pagamentos de empréstimos bancários são desembolsos, pois sai dinheiro do caixa, mas não são gastos, considerando que não há a aquisição de um bem[3].
- **Perda –** É um gasto involuntário decorrente de situações anormais, involuntárias, como de um incêndio, por exemplo.
- **Ativo –** A princípio, é um termo básico utilizado para expressar os bens, valores, créditos, direitos e assemelhados que, num determinado momento, formam o patrimônio de uma pessoa singular ou coletiva (empresa). Quando o objetivo de um gasto é trazer benefícios futuros ou ter potencial para gerar receitas, ele é denominado de investimento. Como investimentos são classificados como ativos, é

[2] No sentido de que há a necessidade de um pagamento.

[3] Os financiamentos consistem em dívidas para a aquisição de um bem.

comum denominar tais gastos simplesmente de ativos.

- **Custo –** Todo gasto vinculado diretamente ao processo produtivo é denominado de custo[4]. Em outras palavras, custo é o valor gasto com bens e serviços para a produção de outros bens e serviços. Como exemplos, podem ser citados a aquisição e o uso de matéria-prima, energia aplicada na produção de bens, salários e encargos do pessoal da produção, etc. É importante ressaltar que, quando a matéria-prima é adquirida, mas ainda não foi usada na produção, ela é considerada um ativo, e a partir do momento que ela é utilizada para produzir algo, ela passa a ser interpretada como custo.
- **Custo operacional –** Pode ser entendido como todos os custos que exigem desembolso monetário, além de incluir a depreciação.
- **Custo de oportunidade –** É o custo de algo em termos de uma oportunidade renunciada, ou seja, benefícios que poderiam ser obtidos em uma opção de investimento alternativa. Na agricultura, o custo de oportunidade da opção pelo uso da terra, com o plantio, por exemplo, é o dinheiro que se deixa de ganhar com arrendamento.
- **Despesa –** Ao contrário do ativo, a despesa é um gasto que não traz benefícios futuros para a empresa, mas a sua ocorrência é necessária na gestão do negócio. Salários em encargos do pessoal administrativo e limpeza, que não trabalham diretamente na produção, assim como juros de empréstimos, são exemplos de despesas.

Classificação dos custos quanto à identificação material com o produto: custos diretos e indiretos

Na atividade de apuração dos custos para se produzir algo, normalmente nos deparamos com custos que não podem ser apropriados de maneira objetiva (direta) aos produtos e serviços produzidos. Nessas circunstâncias, faz-se necessária a classificação em relação à identificação material com o produto ou serviço.

Custos diretos

São custos objetivamente (precisamente) ligados a determinado produto ou serviço. Sendo perfeitamente mensuráveis, tais custos são incluídos de forma direta nos cálculos de produção.

Quando a empresa/produtor conhece a quantidade exata de matérias-primas que são necessárias para a fabricação de uma unidade de produto, ou serviço, logo, conhecendo-se o preço de aquisição de determinada matéria-prima, o custo dela será apropriado diretamente ao produto. Por exemplo, certa matéria-prima custa R$ 9,00 kg^{-1}. A empresa/produtor utiliza 1,5 kg dessa matéria-prima para fabricar uma unidade do produto X. Assim, por meio de um cálculo rápido, sabe-se que o custo dessa matéria-prima será de R$ 13,50 para fazer uma unidade do produto X. Na agricultura, é difícil a ocorrência de custos diretos, pois não é possível determinar precisamente a quantidade produzida a partir de uma quantidade de insumos, de forma estável. Isso acontece porque fatores como o clima e a incidência de pragas não são passíveis de controle preciso, gerando oscilações ano a ano.

Custos indiretos

Os custos indiretos são aqueles que não se conseguem apropriar aos produtos e serviços diretamente no momento da sua ocorrência. Assim, há a necessidade de utilização de critérios de distribuição pré-determinados vinculados a indicadores correlatos, o chamado rateio. Uma forma simples de rateio é a divisão de determinado gasto (fertilizantes, por exemplo) pela área (hectare, alqueire, etc.) ou produção (saca de 60 kg, quilograma, tonelada, etc.). Os custos na agricultura naturalmente são indiretos, pela instabilidade dessa atividade econômica em estabelecer uma relação de insumo-produção

[4] Valor gasto com bens e serviços para a produção de outros bens e serviços.

fixa. O simples fato de a produtividade dentro de uma unidade produtiva (hectare, acre alqueire, talhão, etc.) não ser uniforme, mesmo que supostamente a distribuição dos insumos tenha sido, ilustra bem isso.

Classificação quanto ao volume produzido: custos variáveis e fixos

Conforme o volume produzido é alterado, os custos podem variar proporcionalmente a essas alterações ou podem permanecer constantes. Em decorrência disso, os custos podem ser classificados em:

- **Custos variáveis –** São custos que variam proporcionalmente de acordo com o nível de produção. Exemplos: matérias-primas (insumos como fertilizantes, defensivos e sementes) e horas-máquina.
- **Custos fixos –** São custos que não sofrem alterações em caso de aumento ou diminuição da produção, ou seja, permanecem constantes. Os custos fixos fazem parte da estrutura do negócio e, por isso, também são denominados de custos de estrutura. Exemplos: aluguéis; depreciação[5] de instalações, benfeitorias e máquinas agrícolas; amortização[6].

Custo de produção agrícola

Custos de produção nada mais são do que o somatório de todos os recursos (insumos e serviços) utilizados no processo produtivo de uma atividade econômica. Assim, na determinação dos custos de produção de uma cultura agrícola, o dispêndio é mensurado pela soma do desembolso de cada item de custo, calculado pela multiplicação do coeficiente técnico[7] de cada fator pelos correspondentes preços.

Em muitos levantamentos de custos de produção, é comum considerar somente os gastos com custo operacional, que envolvam a produção (custos) e que representam desembolsos monetários (dinheiro). Então, há planilhas que procuram calcular o custo operacional total e outras que calculam o custo total propriamente dito; neste último caso, há a inclusão da remuneração do custo de oportunidade dos fatores de produção. Ou seja, no custo total, consideram-se os recursos que o produtor poderia obter com aplicações alternativas do seu investimento na lavoura (como aplicar na poupança) ou por arrendar a sua terra ao invés de optar por produzir algo.

A planilha de custos de produção pode ser estruturada de diferentes formas. Uma maneira de fazer é simplesmente separar os custos variáveis e fixos, com o somatório de ambos resultando no custo total. As planilhas de custos elaboradas por instituições como a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), o Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária (Imea) e a Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento do Paraná (Seab) são dessa forma. Uma estrutura alternativa bastante útil é a de separar os itens de custos (serviços e insumos) de acordo com as etapas de operações agrícolas (preparo do solo, plantio, condução da lavoura, etc.). Esse método tem a vantagem de permitir uma análise sobre quais etapas da produção se concentram os custos. Como exemplo, o Instituto para o Fortalecimento da Agropecuária de Goiás (Ifag) (2019) opta por essa forma de estruturação das planilhas de custos. Para ilustrar, as Tabelas 2 e 3 apresentam exemplos de planilhas de custo de produção de milho da Conab e Ifag, respectivamente.

[5] Depreciação: encargo periódico que determinados bens sofrem, por uso, obsolescência ou desgaste natural.

[6] Amortização: redução de dívida por meio de pagamento parcial ou gradual acertado entre as partes.

[7] Coeficiente técnico: é um índice que determina o tempo necessário para realizar certa operação (hora-homem, hora-máquina, etc.) ou do consumo de determinado insumo. Assim, quando se trata de materiais, o coeficiente técnico é expresso em unidade (quilos, litros, metros, etc.).

Tabela 2. Exemplo de planilha de custos de produção de milho da Conab.

Custo de produção - Resumo	
Agricultura empresarial - Milho - Plantio direto - Alta tecnologia - OGM	
1ª Safra - 2018/2019 - Unaí, MG	
Ciclo de cultura: anual	Tipo de relatório: estimado
Mês/Ano: março/2018	
Produtividade : 9.000,00 kg	Ex-Ant

Discriminação	Custo ha^{-1}	Custo 60 kg^{-1}	Participação CV (%)	Participação CT (%)
I - Despesas de custeio da lavoura				
1 - Operação com animal	0,00	0,00	0,00	0,00
2 - Operação com avião	40,00	0,26	1,21	0,88
3 - Operação com máquinas				
3.1 - Tratores e colheitadeiras	234,80	1,57	7,11	5,16
3.2 - Conjunto de irrigação	0,00	0,00	0,00	0,00
4 - Aluguel de máquinas	0,00	0,00	0,00	0,00
5 - Aluguel de animais	0,00	0,00	0,00	0,00
6 - Mão de obra	0,00	0,00	0,00	0,00
7 - Administrador	46,52	0,32	1,41	1,02
8 - Sementes	645,99	4,30	19,57	14,20
8.1 - Royalties	0,00	0,00	0,00	0,00
9 - Fertilizantes	1.083,80	7,22	32,83	23,83
10 - Agrotóxicos	699,05	4,68	21,18	15,37
11 - Água	0,00	0,00	0,00	0,00
12 - Receita	0,00	0,00	0,00	0,00
13 - Outros:				
13.1 - Análise foliar	0,00	0,00	0,00	0,00
13.2 - Embalagens/Utensílios	0,08	0,00	0,00	0,00
13.3 - Vernalização (alho)	0,00	0,00	0,00	0,00
13.4 - Análise de solo	0,40	0,00	0,01	0,01
13.5 - Mudas	0,00	0,00	0,00	0,00
13.6 - Taxas ambientais	0,00	0,00	0,00	0,00
13.7 - Demais despesas	0,00	0,00	0,00	0,00
13.8 - Implementos manuais	0,00	0,00	0,00	0,00
14 - Serviços diversos	0,00	0,00	0,00	0,00
Total das despesas de custeio da lavoura (A)	**2.750,64**	**18,35**	**83,32**	**60,47**
II - Outras despesas				
15 - Transporte externo	0,00	0,00	0,00	0,00
16 - Despesas				

Continua...

Tabela 2. Continuação.

Discriminação	Custo ha^{-1}	Custo 60 kg^{-1}	Participação CV (%)	Participação CT (%)
16.1 - Despesas administrativas	82,52	0,55	2,50	1,81
16.2 - Despesas de armazenagem	245,43	1,64	7,43	5,40
16.3 - Beneficiamento	0,00	0,00	0,00	0,00
17 - Seguro da produção	0,00	0,00	0,00	0,00
18 - Seguro do crédito	0,00	0,00	0,00	0,00
19 - Assistência técnica	55,01	0,37	1,67	1,21
20 - Classificação	0,00	0,00	0,00	0,00
21 - Outros impostos/Taxas	0,00	0,00	0,00	0,00
22 - CDO	0,00	0,00	0,00	0,00
23 - CESSR	76,95	0,51	2,33	1,69
24 - Fundecitrus	0,00	0,00	0,00	0,00
Total das outras despesas (B)	**459,91**	**3,07**	**13,93**	**10,11**
III - Despesas financeiras				
25 - Juros do financiamento	90,60	0,60	2,74	1,99
Total das despesas financeiras (C)	**90,60**	**0,60**	**2,74**	**1,99**
Custo variável (A + B + C = D)	**3.301,15**	**22,02**	**99,99**	**72,57**
IV - Depreciações				
26 - Depreciação de benfeitorias/ instalações	153,19	1,02	4,64	3,37
27 - Depreciação de implementos	116,24	0,77	3,52	2,56
28 - Depreciação de máquinas	58,00	0,39	1,76	1,28
Total de depreciações (E)	**327,43**	**2,18**	**9,92**	**7,21**
V - Outros custos fixos				
29 - Manutenção periódica benfeitorias/instalações	39,50	0,26	1,20	0,87
30 - Encargos sociais	21,21	0,14	0,64	0,47
31 - Seguro do capital fixo	11,07	0,07	0,34	0,24
Total de outros custos fixos (F)	**71,78**	**0,47**	**2,18**	**1,58**
Custo fixo (E + F = G)	**399,21**	**2,65**	**12,10**	**8,79**
Custo operacional (D + G = H)	**3.700,36**	**24,67**	**112,09**	**81,36**
VI - Renda de fatores				
32 - Remuneração esperada sobre o capital fixo	119,41	0,80	3,62	2,63
33 - Terra própria	728,10	4,85	22,06	16,01
34 - Arrendamento	0,00	0,00	0,00	0,00
Total de renda de fatores (I)	**847,51**	**5,65**	**25,68**	**18,64**
Custo total (H + I = J)	**4.547,87**	**30,32**	**137,77**	**100,00**

Fonte: Conab (2018).

Tabela 3. Exemplo de planilha de custos de produção de milho do Instituto para o Fortalecimento da Agropecuária de Goiás (Ifag).

Safra: 2018/2019	**Produtividade esperada:**	**155**	**sc ha^{-1}**
Nível tecnológico: alto	**Preço esperado:**	**30,29**	**R$ por saca**
Atualização: abril/2019	**Receita bruta esperada:**	**4.694,95**	**R$ ha^{-1}**

Descrição		Unidade	Quantidade	Valor		Participação			Variação[1] %
				R$ por unidade	R$	% operação	% COE	% CT	
Pré-plantio					**233,28**	**100,00**	**6,26**	**3,84**	**7,7**
Operação com máquinas	Trator 85 hp + calcariador	hM	0,20	93,79	18,76	8,04	0,50	0,31	0,0
	Pulverizador autopropelido	hM	0,03	232,84	6,99	2,99	0,19	0,11	0,0
Mão de obra permanente	Auxiliar na aplicação de corretivos	dH	0,10	8,67	0,87	0,37	0,02	0,01	0,0
	Auxiliar de pulverização	dH	0,10	8,67	0,87	0,37	0,02	0,01	0,0
Corretivos e fertilizantes	Calcário (rateado 3 anos)	t	0,50	108,00	54,00	23,15	1,45	0,89	-1,8
	Gesso agrícola	t	0,30	116,90	35,07	15,03	0,94	0,58	0,0
	2,4D	L	0,50	27,67	13,84	5,93	0,37	0,23	28,7
Defensivos agrícolas	Produto xxx	L	0,10	650,00	65,00	27,86	1,75	1,07	29,5
	Produto xxx	L	2,00	18,95	37,90	16,25	1,02	0,62	-0,3
Plantio					**1.564,45**	**100,00**	**42,01**	**25,72**	**-1,4**
Operação com máquinas	Trator 120 hp + plantadora	hM	0,50	250,58	125,29	8,01	3,36	2,06	0,0
Mão de obra permanente	Auxiliar para tratamento de sementes	dH	0,02	8,67	0,17	0,01	0,00	0,00	0,0
	Auxiliar para plantio	dH	0,20	8,67	1,73	0,11	0,05	0,03	0,0
Fertilizante	Fomulado NPK 08.28.16 + FTE	t	0,40	1.829,00	731,60	46,76	19,65	12,03	-2,2
Semente	Híbrido transgênico	kg	25,00	26,13	653,25	41,76	17,54	10,74	0,0
Tratamento de semente	Produto xxx	L	0,10	385,00	38,50	2,46	1,03	0,63	-14,4
	Produto xxx	L	0,10	139,00	13,90	0,89	0,37	0,23	0,0

Continua...

Tabela 3. Continuação.

Descrição		Unidade	Quantidade	Valor		Participação			Variação[1] %
				R$ por unidade	R$	% operação	% COE	% CT	
Condução da lavoura					**956,06**	**100,00**	**25,68**	**15,72**	**-0,9**
Operação com máquinas	Pulverizador autopropelido	hM	0,12	232,84	27,94	2,92	0,75	0,46	0,0
	Trator 85 hp + adubadora	hM	0,50	93,79	46,89	4,90	1,26	0,77	0,0
Mão de obra permanente	Auxiliar de pulverização	dH	0,40	8,67	3,47	0,36	0,09	0,06	0,0
	Auxiliar de adubação	dH	0,20	8,67	1,73	0,18	0,05	0,03	0,0
Herbicida	Produto xxx	L	2,50	20,62	51,55	5,39	1,38	0,85	16,7
	Produto xxx	L	1,50	53,00	79,50	8,32	2,14	1,31	0,0
	Produto xxx	L	0,20	80,00	16,00	1,67	0,43	0,26	-6,5
Inseticida	Produto xxx	L	0,25	65,00	16,25	1,70	0,44	0,27	20,4
	Óleo mineral (2x)	L	1,00	22,00	22,00	2,30	0,59	0,36	-4,3
Fungicida	Produto xxx	L	0,75	105,50	79,13	8,28	2,12	1,30	5,5
Fertilizante	Ureia	kg	0,20	1.560,00	312,00	32,63	8,38	5,13	-2,8
	Formulado 20-00-20 (com enxofre)	t	0,20	1.498,00	299,60	31,34	8,05	4,93	-3,7
Colheita					**192,68**	**100,00**	**5,17**	**3,17**	**0,0**
Operação com máquinas	Colhedora	hM	0,80	210,28	168,22	87,30	4,52	2,77	0,0
	Trator 85 hp + bazuca	hM	0,25	90,92	22,73	11,80	0,61	0,37	0,0
Mão de obra permanente	Auxiliar de colheita	dH	0,20	8,67	1,73	0,90	0,05	0,03	0,0
Pós-colheita					**558,00**	**100,00**	**14,99**	**9,17**	**0,0**
Aluguel de máquinas	Caminhão graneleiro[2] R$ por saca		1,40	155,00	217,00	38,89	5,83	3,57	0,0
Outros custos	Recebimento/Secagem/ Armazenamento[3]	R$/sc	2,00	155,00	310,00	55,56	8,33	5,10	0,0
	Taxa administrativa	%	10,00	310,00	31,00	5,56	0,83	0,51	0,0

Continua...

Tabela 3. Continuação.

Descrição		Unidade	Quantidade	Valor		Participação			Variação[1] %
				R$ por unidade	R$	% operação	% COE	% CT	
Despesas financeiras					**219,17**	**100,00**	**5,89**	**3,60**	**-3,2**
Taxas	Juros (15% da lavoura)	%	6,50	553,15	35,96	16,40	0,97	0,59	-0,6
	Assistência técnica	%	1,50	4.694,95	70,42	32,13	1,89	1,16	-4,8
Tributos	Funrural/FAT/Senar	%	1,50	4.694,95	70,42	32,13	1,89	1,16	-4,8
Encargos	Encargos sociais	dH	1,22	34,73	42,37	19,33	1,14	0,70	0,0
Custo operacional efetivo (COE)					**3.723,65**			**61,23**	**-0,6**
					24,02	**R$ por saca**			
Depreciações	Benfeitorias, máquinas e implementos				316,12			5,20	0,0
Custo operacional total (COT)					**4.039,77**			**66,42**	**-0,5**
					26,06	**R$ por saca**			
Fatores fixos	Remuneração esperada sobre capital fixo	%	4,50	10.377,50	466,99			7,68	0,0
	Remuneração da terra	%	4,50	35.000,00	1.575,00			25,90	0,0
Custo total (CT)					**6.081,76**			**100,00**	**-0,4**
					39,24	**R$ por saca**			

[1] Variação relativa ao mês anterior.

Obs.: esta estimativa não reflete as particularidades de cada produtor rural.

[2] Transporte da produção em caminhão de 23 t a uma distância de 30 km.

[3] Armazenamento da produção por 30 dias – Metodologia.

Fonte: Instituto para o Fortalecimento da Agropecuária de Goiás (2019).

Como exemplificado pela Tabela 2, os itens de custo de produção agrícola podem ser estruturados segundo o padrão abaixo (Conab, 2010, p. 29)[8].

A – Custo variável

I – Despesas de custeio da lavoura

1 – Operações com máquinas e equipamentos
2 – Mão de obra e encargos sociais e trabalhistas
3 – Sementes
4 – Fertilizantes
5 – Agrotóxicos
6 – Despesas com irrigação
7 – Despesas administrativas
8 – Outros itens

II – Despesas pós-colheita

1 – Seguro agrícola
2 – Transporte externo
3 – Assistência técnica e extensão rural
4 – Armazenagem
5 – Despesas administrativas
6 – Outros itens

III – Despesas financeiras

1 – Juros

B – Custo fixo

IV – Depreciações e exaustão

1 – Depreciação de benfeitorias e instalações
2 – Depreciação de máquinas
3 – Depreciação de implementos
4 – Exaustão do cultivo

V – Outros custos fixos

1 – Mão de obra e encargos sociais e trabalhistas
2 – Seguro do capital fixo

C – Custo operacional (A + B)

VI – Renda de fatores

1 – Remuneração esperada sobre capital fixo
2 – Remuneração da terra

D – custo total (c + vi)

As operações com máquinas e implementos agrícolas consistem no uso deles em diversas fases de cultivo (preparo do solo, plantio, trato cultural, etc.). Uma das dificuldades no levantamento de custos de produção é a determinação do valor da hora-máquina. Caso o produtor contrate o serviço, esse valor é fácil de obter. Entretanto, a dificuldade ocorre quando os maquinários e equipamentos são próprios e, ainda assim, é preciso incorporar tais valores nos custos. Nessas situações, há a possibilidade de utilizar o preço do serviço terceirizado como referência, para facilitar o cálculo do serviço propriamente dito, que seria válido apenas para uma planilha genérica, com o objetivo de ser utilizada como referência. O uso desse procedimento para analisar um negócio real pode resultar numa informação equivocada sobre a verdadeira situação da atividade produtiva, podendo parecer lucrativo quando na verdade só há prejuízo.

Há diferentes metodologias de cálculo para a hora-máquina e uma forma didática é apresentada por Rialto e Araripe (2013), os quais propõem o cálculo do custo das máquinas agrícolas feito a partir do somatório de componentes de custos fixos (depreciação, seguro, juros) e variáveis (salários e encargos do operador, manutenção e combustível).

O cálculo da depreciação procede da seguinte forma:

$$Depreciação = (valor\ de\ compra - valor\ de\ venda)/vida\ útil\ (horas)$$

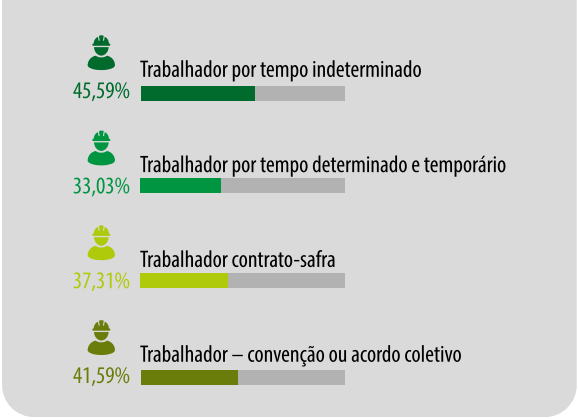
O Manual de Custos de Produção Agrícola da Conab (Conab, 2010) apresenta, no Anexo III, a informação da vida útil e do valor residual (valor de venda) de diversas máquinas e implemen-

[8] Aqui cabe uma observação: na estrutura de custos utilizada pela Conab, no primeiro tópico do custo variável é utilizado o termo despesas de custeio da lavoura, nomenclatura que pode gerar confusão. A razão é que despesas são gastos que não contribuem diretamente para a produção. Assim, o termo apropriado deveria ser simplesmente custeio da lavoura.

tos agrícolas, e que pode ser utilizada como referência.

Em relação aos juros para aquisição da máquina, a mensuração pode ser feita a partir de estimativas de crédito que o agricultor obtém com recursos do crédito rural oficial, com taxas de juros preferenciais, e com recursos provenientes de fontes alternativas para a complementação do financiamento da lavoura, remunerados pela taxa Selic[9]. A título de simplificação, foi considerada apenas a taxa Selic.

Para o cálculo do valor da mão de obra, o salário deve ser somado aos encargos sociais e trabalhistas, com percentual de encargos que varia conforme o tipo de contratação do trabalhador. O Manual da Conab (Conab, 2010) apresenta os seguintes percentuais por tipo de relação contratual:



O salário-hora pode ser obtido somando o salário ao percentual de encargos e divididos por 220 horas (4,33 semanas de 44 horas).

Para o cálculo do custo de manutenção de máquinas e implementos agrícolas, Rialto e Araripe (2013) adotam 100% do valor de compra distribuído no período da vida útil. O gasto com combustível é calculado pelo consumo hora da máquina e multiplicado por determinado preço de óleo diesel.

[9] É uma taxa básica de juros na economia e é frequentemente utilizada como referência.

Para ilustrar, tomemos como exemplo o cálculo da hora-máquina de um trator de 120 cv, com o valor de compra de R$ 113.794,17, a vida útil é estimada em 10 anos e/ou 12 mil horas (1.200 horas ano^{-1}), o valor residual é de 25%, o consumo de óleo diesel é de 21 L h^{-1} ao preço de R$ 2,60 o litro; o seguro de 0,75%; e os juros de 12,25%. O salário do operador é de R$ 1.200,00, e o contrato é por tempo indeterminado.

A Tabela 4 apresenta o resumo do cálculo da hora-máquina e abaixo encontra-se a memória de cálculo de cada tópico.

Depreciação

(R$ 113.794,17 – R$ 28.448,54)/12.000 = R$ 7,11

Seguro

(R$ 113.794,17 × 0,0075)/1.200 = R$ 0,71

Juros

(R$ 113.794,17 × 0,1225)/1.200 = R$ 11,62

Salário operador + encargos

(R$ 1.200 × 1,4559)/(4,33 × 44) = R$ 9,17

Manutenção

(R$ 113.794,17 × 0,10)/(12.000/10) = R$ 9,48

Combustível

21 × R$ 2,60 = R$ 54,60

As despesas administrativas consistem nos gastos não vinculados à produção. Segundo a Conab (2010, p. 44), "referem-se aos gastos de energia elétrica do imóvel, telefone, serviços de contador, rádio comunicador, material de consumo, computador, internet, veículo de passeio e combustível, assinaturas de revistas e jornais, capacitação". A Conab (2010) também sugere a utilização de 3% do total de custeio como simplificação desse cálculo.

No que se refere à remuneração do fator terra, a Conab (2010) sugere a utilização do valor de 3% sobre o preço real médio da terra. Em relação à remuneração de capital, os investimentos em benfeitorias e máquinas/implementos devem ser feitos no sentido de considerar a aplicação

Tabela 4. Custo hora-máquina de trator 120 cv.

Custos fixos	
Depreciação	R$ 7,11
Seguro (1,5%)	R$ 0,71
Juros (12,25%)	R$ 11,62
Total CF	**R$ 19,44**
Custos variáveis	
Salário operador + encargos	R$ 9,17
Manutenção	R$ 9,48
Combustível	R$ 54,60
Total CV	**R$ 73,25**
Total hora-máquina	**R$ 92,69**

desses recursos em investimentos alternativos. A Conab (2010) sugere a utilização da taxa de 6% para remuneração de capital. A remuneração da terra e do capital consiste na inclusão do custo de oportunidade nos custos de produção.

Resultados econômicos

Uma avaliação elementar de qualquer atividade econômica é verificar se está ocorrendo, ocorreu ou ocorrerá algum retorno pelos gastos do empresário/produtor rural. Antes de qualquer análise mais complexa, inicialmente é importante determinar se estão recebendo mais do que gastando com a atividade. O retorno positivo desse investimento, ou simplesmente ganho, é chamado de lucro. Assim, o chamado lucro é um indicador fundamental para se avaliar uma atividade econômica. Existem vários tipos de lucro, que se diferenciam pela inclusão ou exclusão de determinados itens e/ou aspectos do negócio. Considerando que o lucro é um ganho, ele é resultado de uma receita maior que os gastos em determinada atividade. Nas situações onde as receitas foram inferiores aos gastos, diz-se que ocorreu prejuízo, que de certa forma é um lucro negativo.

As duas definições de lucro que utilizaremos é a de lucro operacional e lucro total. No lucro total, a totalidade dos custos é subtraída da receita total. Já no lucro operacional, são descontados, além dos gastos em dinheiro, as depreciações de instalações, benfeitorias, máquinas e equipamentos. O lucro operacional é o ganho que o produtor enxerga da sua atividade, por envolver desembolsos, enquanto no lucro total se considera o pagamento dos fatores terra e capital. Ou seja, no lucro total há a inclusão dos custos de oportunidade de uso da terra (o produtor poderia arrendá-la para outro) e dos investimentos (tais recursos poderiam ser aplicados no banco, por exemplo). Assim, temos que:

$$Lucro\ operacional = Receita\ total - Custos\ operacionais$$

Podendo ocorrer os resultados a seguir:

< 0 → Há prejuízo. Terra e capital não estão recebendo qualquer remuneração. A atividade produtiva não é um bom negócio. É melhor optar pelo uso alternativo da terra e do capital (arrendamento e aplicações financeiras, por exemplo).

= 0 → Não há prejuízo, mas terra e capital não recebem qualquer remuneração. Assim, a fazenda é pouco atrativa como negócio. O uso alternativo da terra e do capital é uma possibilidade a ser levada em conta.

> 0 → Os recursos "terra" e "capital" estão sendo remunerados em parte ou no todo. Esse grau de remuneração, que depende da grandeza da margem, definirá a atratividade do negócio.

$$Lucro\ total = Receita\ total - Custo\ total$$

Podendo ocorrer os resultados a seguir:

< 0 → Fatores de produção não estão sendo remunerados na íntegra. Restringindo a avaliação a variáveis econômicas, é melhor optar pela aplicação da terra e do capital no seu uso alternativo (arrendamento e mercado financeiro).

= 0 → Fatores de produção plenamente remunerados. Dessa forma, o resultado será o mesmo se continuar com a fazenda ou optar pela aplicação da terra e do capital no seu uso alter-

nativo (arrendamento e juros com a aplicação do dinheiro gasto na lavoura).

> 0 → Todos os fatores de produção estão sendo plenamente remunerados. A fazenda é altamente atrativa do ponto de vista econômico, já que é, com sobras, a melhor alternativa de emprego da terra e do capital.

É comum em análises de viabilidade econômica tratar apenas do lucro operacional, no sentido de considerar somente a situação quando ocorre desembolso de recursos. Lembrando que na remuneração dos fatores, terra e capital, presente no cálculo do lucro total (custo total), não há necessariamente desembolsos, mas esses itens são inseridos com o objetivo de incorporar o custo de oportunidade na análise.

Para ilustrar essa situação, consideremos um caso em que um agricultor/produtor, cujas terras são de sua propriedade, obtém um lucro (operacional, considerando somente o que ele ganha e gasta de fato) de R$ 250,00 por hectare. Vamos supor que esse mesmo produtor poderia arrendar as suas terras por R$ 300,00 o hectare. Se analisarmos a situação operacional desse produtor, podemos chegar à conclusão de que ele está ganhando dinheiro, pois fatura mais do que desembolsa, com o lucro operacional de R$ 250,00. Entretanto, se analisarmos a situação dele de uma forma mais ampla, incluindo custos de fatores, como a terra, concluímos que ele, na verdade, está perdendo dinheiro. A razão é que o produtor poderia faturar mais R$ 50,00 por hectare fazendo nada, simplesmente arrendando as suas terras por R$ 300,00. Essa é a ideia do custo de oportunidade, ou seja, considerar investimentos alternativos no custo. Apesar do lucro operacional positivo, ao incluir o custo do arrendamento como aplicação alternativa, em termos de remuneração de fatores, o lucro total resulta em um prejuízo de R$ 50,00. Somente com um lucro total positivo é que o resultado da atual atividade produtiva seria melhor do que o uso alternativo da terra e/ou dinheiro (investido na lavoura).

Exemplo: análise comparativa da lucratividade entre um sistema de produção irrigado e de sequeiro

Richetti (2015) fez um levantamento dos custos de produção da soja transgênica RR1 (soja modificada geneticamente com tecnologia *Roundup Ready*) para a safra 2015/2016, em Mato Grosso do Sul. Para uma produtividade meta de 3.000 kg ha^{-1} (50 sacas), o custo operacional estimado foi de R$ 1.821,48, e o custo total chegou a R$ 2.451,52. No levantamento dos custos de produção da soja RR1 irrigada para Mato Grosso do Sul na safra 2015/2016, realizado por Richetti et al. (2015), o custo operacional chegou a R$ 2.302,79, e o custo total foi de R$ 3.108,32, para uma produtividade projetada de 4.200 kg ha^{-1} (70 sacas).

A partir das estimativas anteriores, considerando um preço de venda de R$ 55,00 por saca, podemos calcular a receita, o lucro operacional e o lucro total. A Tabela 5 apresenta um quadro comparativo entre os dois sistemas.

A Tabela 5 mostra que a soja RR1 irrigada apresentou melhores resultados, em termos de lucratividade, que a soja de sequeiro. Os resultados positivos do lucro operacional, em ambos os sistemas, indicam que a receita é mais do que suficiente para pagar os desembolsos e a depreciação. Quando se considera o pagamento dos fatores de produção, o lucro total, a situação ainda é positiva nos dois casos. Em anos

Tabela 5. Comparativo da soja de sequeiro e irrigada.

Item	Soja RR1 Sequeiro	Soja RR1 Irrigada
Custo operacional (R$)	1.821,48	2.302,79
Custo total (R$)	2.451,52	3.108,32
Produtividade (kg ha^{-1})	3.000	4.200
Preço da saca (R$)	55,00	55,00
Receita (R$)	2.750,00	3.850,00
Lucro operacional (R$)	928,52	1.547,21
Lucro total (R$)	298,48	741,68

Fonte: Adaptado de Richetti (2015) e Richetti et al. (2015).

com bom regime de chuvas, é esperada uma diminuição nos resultados entre os sistemas de sequeiro e irrigado, enquanto as diferenças devem ser maiores em anos de problemas climáticos, principalmente ao tratar-se de secas.

Avaliação de investimento em sistemas irrigados

Muitas atividades econômicas requerem um volume de investimentos que não se pagam no curto prazo (até 1 ano), mas necessitam de vários anos para possibilitarem um retorno. Normalmente, o ciclo produtivo dessas atividades econômicas perdura por vários anos, principalmente em decorrência dos investimentos que ocorreram.

Na agricultura, o ciclo produtivo de culturas temporárias ocorre no espaço de alguns meses, e, por isso, elas requerem uma análise anual ou por safra. Entretanto, as culturas permanentes demandam uma análise de longo prazo, de vários anos, pois os investimentos iniciais demoram a dar retornos.

Quando realizamos uma análise de vários períodos de tempo (meses ou anos), a passagem do tempo passa a ser uma variável importante. Partindo da premissa de que R$ 100,00 hoje vale mais do que R$ 100,00 a ser recebido no futuro, uma análise de múltiplos períodos precisa considerar a questão do valor do dinheiro no tempo. Primeiramente, isso ocorre porque o poder de compra dessa quantia no futuro é menor. A inflação fará com que os bens e as mercadorias compradas hoje tenham preços maiores no futuro. Por isso, no futuro, compraremos com R$ 100,00 uma quantidade menor de mercadorias do que hoje. Segundo, há a possibilidade de se investir essa quantia hoje (na poupança, por exemplo) e receber um valor maior no futuro. A ligação intertemporal (presente e futuro) do dinheiro, ao longo dos anos, é feita por alguma taxa. Normalmente, utiliza-se alguma taxa de juros ou inflação para essa finalidade.

Para uma análise considerando muitos anos, é necessário o entendimento de dois conceitos, o de valor presente (VP) e valor futuro (VF).

Valor presente

Valor presente (VP) significa o valor (dinheiro) que tenho hoje, no momento zero. Podemos ilustrar esse conceito da seguinte forma: quanto vale hoje o equivalente a R$100,00 daqui a 1 ano?

Resposta: é o valor presente (VP); e para calcularmos, basta descontar desses R$ 100,00 algum valor, pois é sensato afirmar que 100 reais daqui a 1 ano vale menos do que 100 reais hoje. Não só porque o dinheiro perde valor ao longo do tempo, por causa da inflação, mas também há a questão do custo de oportunidade de se gastar esse dinheiro hoje ao invés daqui a 1 ano, ou mesmo o de aplicar esse dinheiro. Assim, para chegarmos ao VP é preciso utilizar uma taxa para poder calcular o desconto, que pode ser uma taxa de juros de referência ou inflação, simplesmente.

Valor futuro

Valor futuro (VF) é o valor que teremos ao final de um período após a capitalização do VP. Em aplicações financeiras, o VP muitas vezes é conhecido como principal, e o VF é denominado de montante.

Pegando o caso de uma aplicação financeira, o VF caracteriza o resultado de uma aplicação hoje, VP, capitalizada[10] por uma determinada taxa de juros. Em um sistema de capitalização composta[11], o VF pode ser calculado da seguinte forma:

$$VF = VP \times (1 + j)^n$$

[10] Capitalizar refere-se a agregar ao capital; incorporar juros; etc.

[11] Capitalização composta é aquela em que a taxa de juros incide sobre o principal acrescido dos juros acumulados até o período anterior. Nesse regime de capitalização, a taxa varia exponencialmente em função do tempo.

em que n é o período de capitalização (número de dias, meses, anos, etc.); e j é o juros referentes à unidade do período (dia, mês, ano, etc.).

O VF pode ser usado para responder a seguinte pergunta: quanto teremos daqui a 12 anos se aplicarmos R$ 1.500,00 a 10% de juros ao ano?

Solução:

VF = R$ 1.500,00 × $(1 + 0{,}10)^{12}$ = R$ 4.707,64

Pela equação anterior, o VP pode ser obtido dividindo o VF por $(1 + j)^n$.

$$VP = VF / (1 + j)^n$$

Nessa reordenação da equação, o inverso do componente de capitalização é denominado de desconto. Ou seja, o VP nada mais é do que o VF com o desconto do tempo, e a taxa de juros (ou inflação) é chamada de taxa de desconto. O termo $1/(1 + j)^n$ é o que determina o desconto. Assim, a pergunta anterior pode ser reformulada para: quanto vale hoje R$ 4.707,64 pagos daqui a 12 anos, considerando uma taxa de desconto de 10% ao ano?

Solução:

VP = R$ 4.707,64 / $(1 + 0{,}10)^{12}$ = R$ 1.500,00

Tanto o VF como o VP podem ser facilmente calculados no Excel usando as funções com as mesmas siglas.

Existem várias metodologias que permitem avaliar investimentos que demoram muitos períodos de tempo para serem pagos. Uma das metodologias mais usadas é a de valor presente líquido (VPL). O VPL soma o valor presente dos fluxos de caixa, ou fluxos benefícios, ao longo do tempo, e os compara com os investimentos feitos. Os fluxos de caixa (FC) se referem aos recursos pagos e/ou recebidos por alguém, ou empresa, durante um determinado período de tempo. Para um investimento ser economicamente viável pela metodologia do VPL, o resultado final precisa ser positivo. Ou seja, o valor presente dos fluxos de caixa é maior que o investimento realizado.

$$VPL = \textit{valor presente de todos os fluxos de caixa somados} - \textit{investimento inicial}\ (FC_0)$$

Em equação matemática, a relação acima pode ser reescrita como:

$$VPL = \sum_{i=1}^{n} [FC_t/(1 + j)^t] - FC_0$$

Escrevendo essa mesma equação de forma extensa, temos:

$$VPL = -FC_0 + [FC_1/(1 + j)^1] + [FC_2/(1 + j)^2] + + FC_3/[(1 + j)^3] + ...$$

Esse somatório de fluxos ocorre até o último período de análise.

Exemplo: Qual o VPL de um investimento de R$ 50.000,00 que proporciona rendimentos de R$ 8.000,00 ao fim do primeiro ano, R$ 15.000,00 ao fim do segundo, R$ 11.500,00 ao fim do terceiro e R$ 35.000,00 ao fim do quarto ano, a uma taxa de desconto (juros) de 8% ao ano? Nos anos posteriores, também há investimentos e custos, mas eles são menores que as receitas. Logo, esses "rendimentos" são os lucros de cada ano.

Solução:

VPL = -R$ 50.000,00 + [R$8.000,00/$(1 + 0{,}08)^1$] +
+ [R$ 15.000,00/$(1 + 1{,}08)^2$] +
+ [R$ 11.500,00/$(1 + 0{,}08)^3$] +
+ [R$ 35.000,00/$(1 + 0{,}08)^4$] =
= -R$ 50.000,00 + R$ 7.407,41 +
+ R$ 12.860,08 + R$9.029,07 +
+ R$ 25.726,04 = R$ 5.122,61

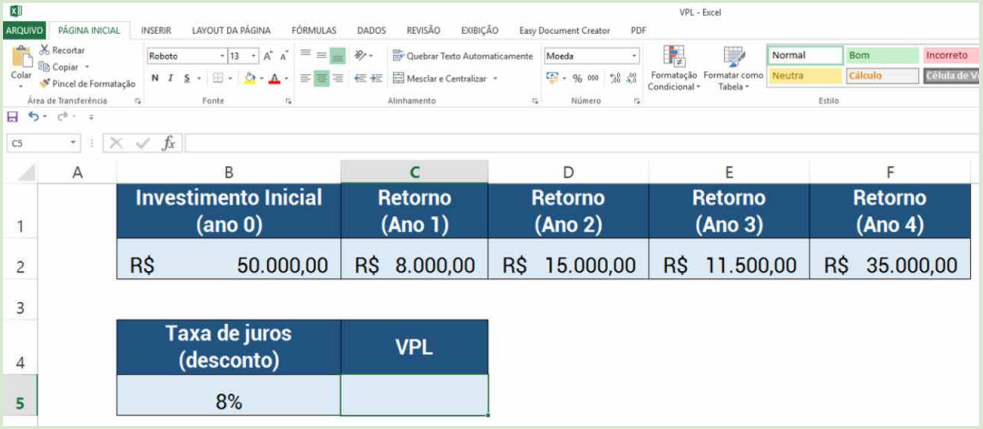
Atualmente, com a existência de planilhas eletrônicas, é desnecessário fazer os cálculos

algebricamente no papel, como no exemplo acima. Esses cálculos podem ser feitos no Excel de forma simples, usando a função *VPL*.

O passo a passo para fazer o cálculo do *VPL* com as informações do exemplo é apresentado a seguir.

Passo 1

Construir a planilha com os dados do investimento inicial, o retorno de cada ano e da taxa de juros (desconto) utilizada.



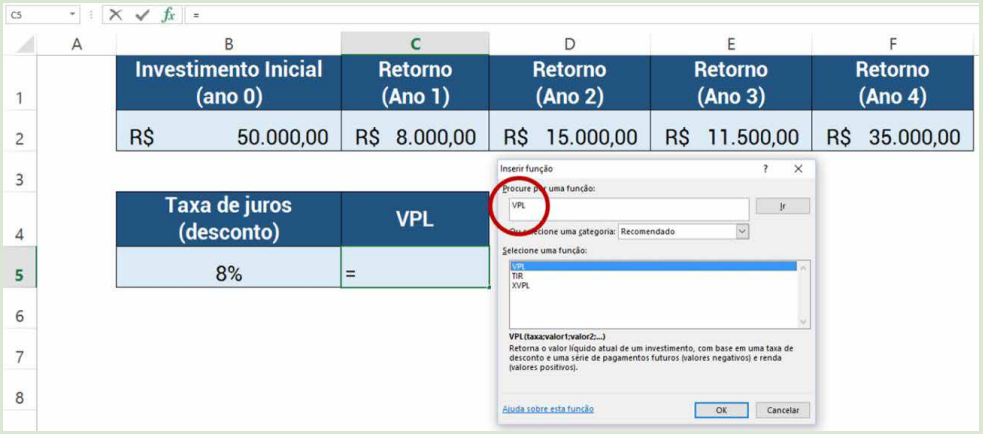
Passo 2

Selecione a célula do Excel em que se deseja que o cálculo seja feito, C5 no exemplo. Na barra de ferramentas do Excel, selecione inserir função nas fórmulas, conforme indicação abaixo.



Passo 3

Procure pela função VPL e a selecione.

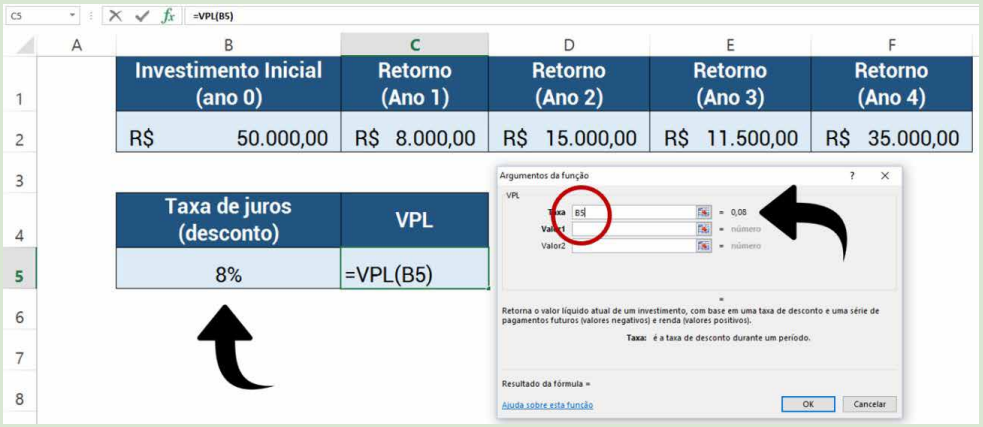


Passo 4

A seguir, é preciso selecionar os dados da planilha para o cálculo do VPL. A primeira informação é a taxa de desconto, conforme mostrado na figura abaixo.

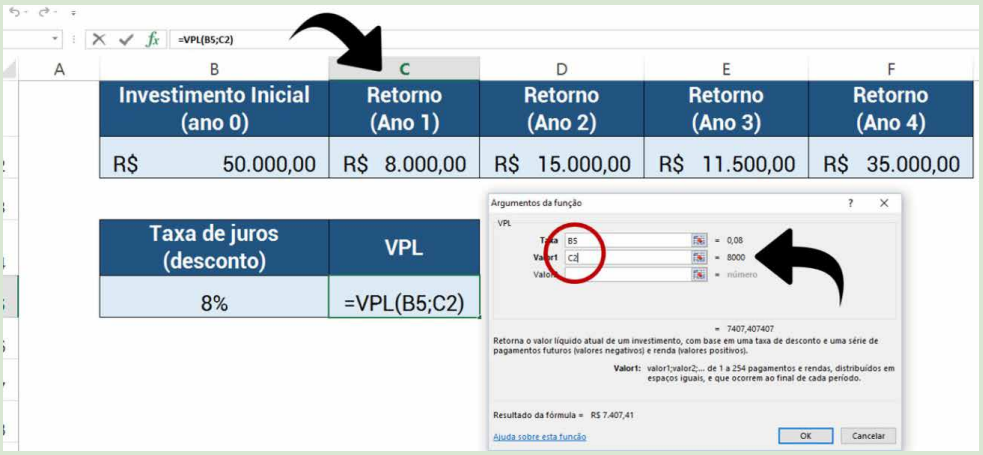


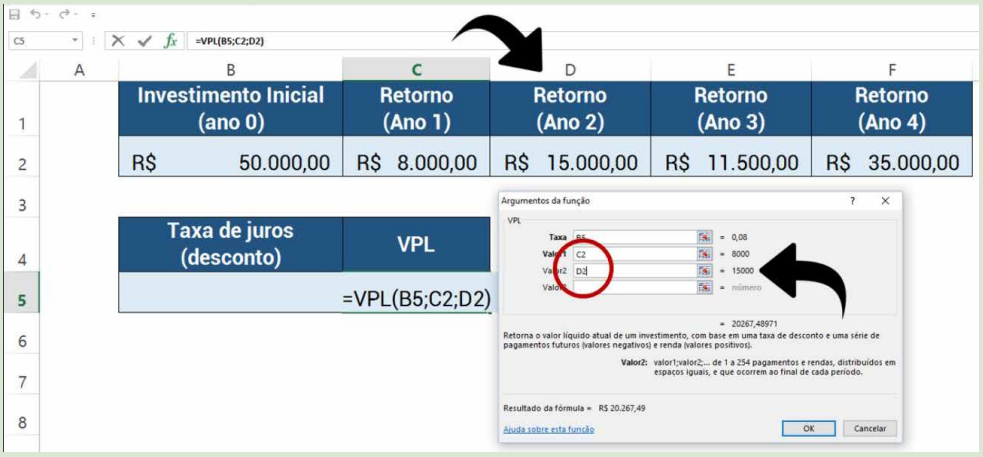
Posteriormente, selecione a célula da planilha com a informação desejada, no caso B5.

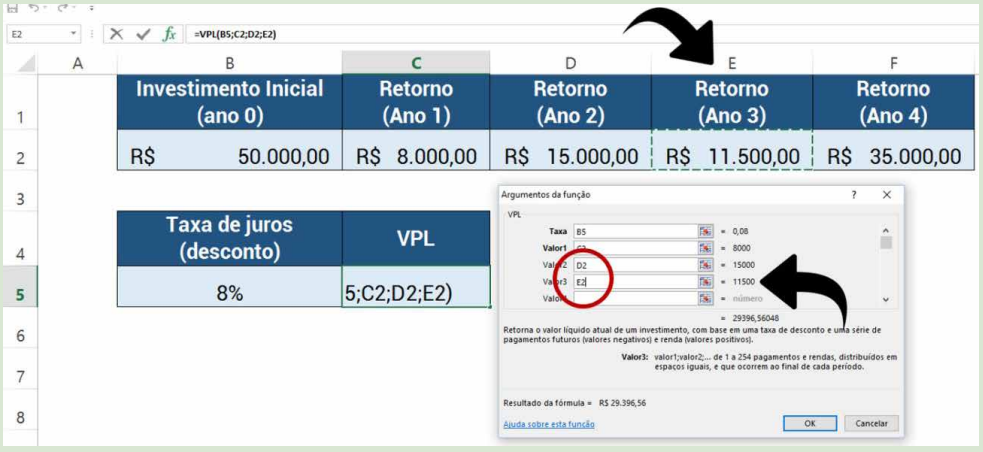


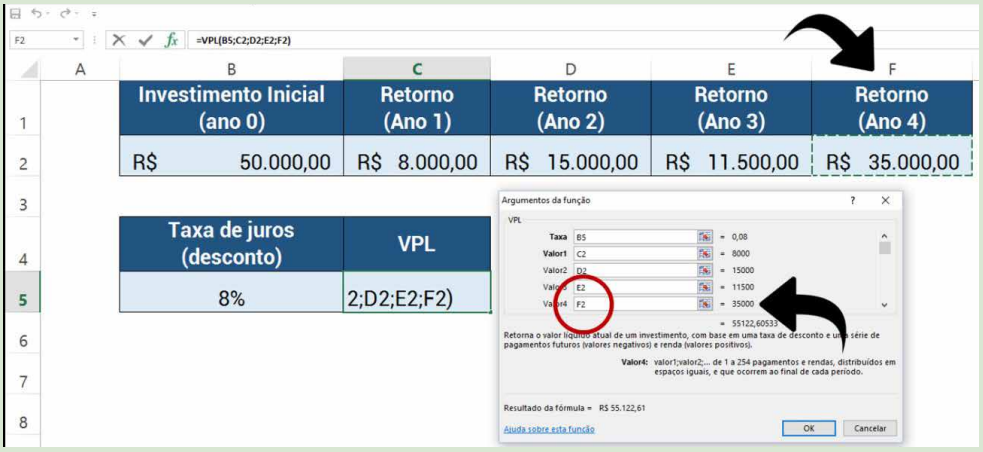
Passo 5

Após a seleção da taxa de desconto, é preciso incluir o retorno ao final de cada ano da mesma forma.







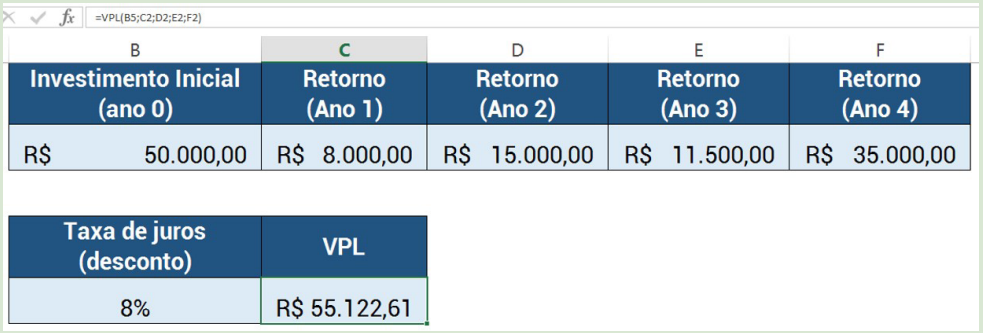


Passo 6

Inseridas todas as informações, aperte OK.

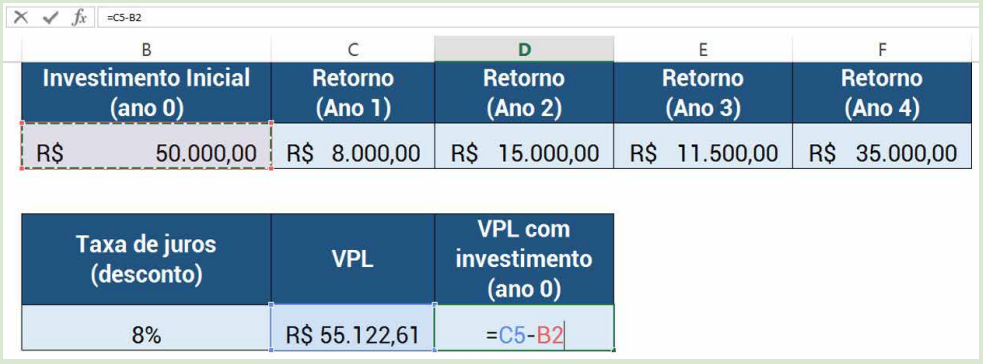


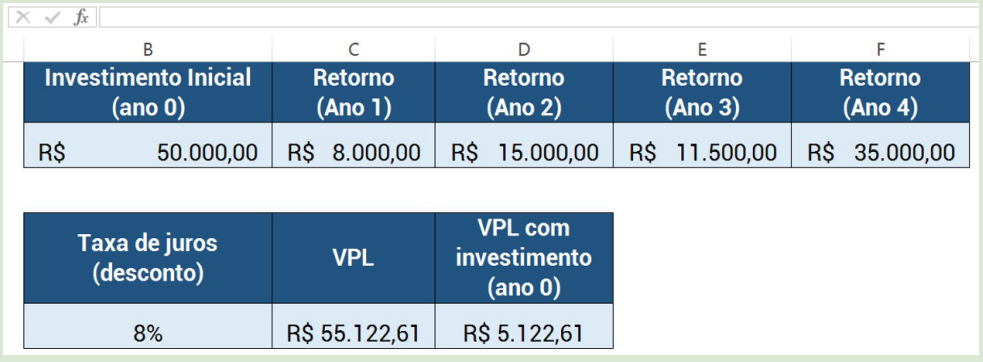
E teremos o VPL referente aos retornos de cada ano, considerando a taxa de 8%.



Passo 7

O investimento começa num período antes da data do fluxo de caixa de valor 1, ou seja, no período 0. Infelizmente, a função VPL do Excel não permite a inclusão de um fluxo de caixa do investimento no presente. Assim, para o cálculo do VPL, considerando o investimento inicial, basta subtrair do resultado o referido valor, os R$ 50.000,00 presentes na célula B2.





Estudo de caso: avaliação de um sistema de pivô central

O investimento num sistema de irrigação envolve um volume de recursos considerável, principalmente pelo método de aspersão – como um pivô central. Nesse sentido, uma técnica de análise de investimento como o VPL é fundamental para avaliar economicamente o referido investimento, se o empreendimento trará retornos positivos ao produtor ao longo do tempo.

Assim sendo, para fixar a metodologia do VPL, vamos analisar a viabilidade econômica da implementação de um pivô central de 70 ha que custa R$ 504.000,00, para a produção de soja no Mato Grosso do Sul. Cabe lembrar que esse montante de investimento pode variar de acordo com o fabricante e as características locais de cada propriedade e região.

Existem linhas de crédito para financiar investimentos dessa natureza, como o Moderinfra, que financiaria o investimento do presente exemplo em 12 anos, por uma taxa de juros de 8,5% ao ano, com até 3 anos de carência.

A Tabela 6 apresenta uma simulação do financiamento dos R$ 504.000,00 em 12 anos, com pagamentos anuais e sem carência. Apresentam-se também os valores referentes por hectare, relativos aos 70 ha do pivô.

De acordo com a Tabela 6, ao longo de 12 anos, o financiamento seria amortizado em R$ 42.000,00 anualmente, e a parcela de juros diminuiria com a redução do saldo devedor. Considerando a unidade de 1 ha, essa amortização seria de R$ 600,00 ao ano. Se considerarmos planilhas de custo de produção (por hectare) que levam em conta esse financiamento, basta incorporarmos a parcela de amortização e juros no levantamento.

Entretanto, para ilustrarmos melhor a metodologia de VPL, será considerado um investimento (desembolso) inicial que deve ser pago no horizonte de tempo de vida útil, 20 anos segundo a Conab (2010), pelos fluxos de caixa e sem utilizar o financiamento. Nesse esquema, o custo de oportunidade do investimento da infraestrutura de irrigação será a parcela anual dos juros do financiamento, que diminui ao longo do tempo (Tabela 7).

Tabela 6. Fluxo de pagamentos de financiamentos.

Amortização (R$)	Juros (R$)	Parcela (R$)	Amortização (R$ ha^{-1})	Juros (R$ ha^{-1})	Parcela (R$ ha^{-1})
42.000,00	44.755,20	86.755,20	600,00	639,36	1.239,36
42.000,00	41.025,60	83.025,60	600,00	586,08	1.186,08
42.000,00	37.296,00	79.296,00	600,00	532,80	1.132,80
42.000,00	33.566,40	75.566,40	600,00	479,52	1.079,52
42.000,00	29.836,80	71.836,80	600,00	426,24	1.026,24
42.000,00	26.107,20	68.107,20	600,00	372,96	972,96
42.000,00	22.377,60	64.377,60	600,00	319,68	919,68
42.000,00	18.648,00	60.648,00	600,00	266,40	866,40
42.000,00	14.918,40	56.918,40	600,00	213,12	813,12
42.000,00	11.188,80	53.188,80	600,00	159,84	759,84
42.000,00	7.459,20	49.459,20	600,00	106,56	706,56
42.000,00	3.729,60	45.729,60	600,00	53,28	653,28
504.000,00	290.908,80	794.908,80	7.200,00	4.155,84	11.355,84

Tabela 7. Custo de produção de soja RR1 irrigada.

Componente do custo	Unidade	Quantidade ha^{-1}	Preço unitário (R$)	Valor (R$ ha^{-1})
Insumos				**1.468,85**
Calcário dolomítico	t	0,50	102,75	51,38
Gesso	t	0,50	211,00	105,50
Semente de soja	kg	50,00	2,44	122,00
Tratamento de sementes	L	0,12	313,40	37,61
Micronutriente	L	0,07	92,19	6,45
Inoculante	ds	1,00	2,50	2,50
Fertilizante (manutenção)	t	0,35	1.400,00	490,00
Herbicida dessecante 1	L	3,00	11,33	33,99
Herbicida dessecante 2	kg	0,06	58,64	3,52
Herbicida dessecante 3	L	1,50	17,65	26,48
Herbicida pós-emergente 1	L	3,00	11,33	33,99
Herbicida pós-emergente 2	L	0,06	58,64	3,52
Inseticida 1	kg	0,12	112,82	13,54
Inseticida 2	L	0,06	586,43	35,19
Inseticida 3	L	0,25	141,00	35,25
Inseticida 4	L	0,40	85,95	34,38
Fungicida 1	L	0,60	141,30	84,78
Fungicida 2	L	1,00	14,50	14,50
Adjuvante	L	1,50	11,40	17,10
Energia elétrica (irrigação)	R$	1,00	317,17	317,17
Operações agrícolas				**488,45**
Distribuição de corretivos	hm	0,60	77,27	46,36
Semeadura	hm	0,45	177,89	80,05
Transporte interno	hm	0,20	105,06	21,01
Aplicação de herbicidas	hm	0,27	123,58	33,37
Aplicação de inseticidas	hm	0,36	123,58	44,49
Aplicação de fungicidas	hm	0,36	123,58	44,49
Irrigação	hh	1,00	20,75	20,75
Colheita	hm	0,50	227,85	113,93
Transporte externo	sc	70,00	1,20	84,00
Outros custos				**61,21**
Assistência técnica	%	2,00	1.141,75	22,84
Administração	%	2,00	1.141,75	22,84
Seguro	%	1,70	913,40	15,53
Depreciações				**507,87**
Benfeitorias	R$	1,00	11,42	11,42
Máquinas agrícolas	R$	1,00	153,12	153,12
Equipamentos agrícolas	R$	1,00	55,33	55,33
Infraestrutura de irrigação	R$	1,00	288,00	288,00

Continua...

Tabela 7. Continuação.

Componente do custo	Unidade	Quantidade ha^{-1}	Preço unitário (R$)	Valor (R$ ha^{-1})
Custo operacional				**2.526,38**
Remunerações dos fatores				**1.297,56**
Terra	R$	1,00	385,00	385,00
Capital fixo	R$	1,00	203,10	203,10
Custeio	%	6,00	1.168,40	70,10
Infraestrutura de irrigação	R$	1,00	639,36	639,36
Custo total				**3.823,94**

Fonte: Adaptado de Richetti et al. (2015), com alteração da depreciação e a remuneração de fatores da infraestrutura de irrigação.

A metodologia do VPL requer a projeção de fluxos de caixa futuros (lucro/prejuízo) para os 20 anos de horizonte de tempo de análise, o que sempre é um desafio, em razão da necessidade de determinar uma série de hipóteses e extrapolações.

Para a projeção de preços da soja ao longo dos próximos 20 anos, utilizou-se o histórico de cotações para definir uma taxa de crescimento médio anual. Segundo informações disponibilizadas por Agrolink (2017), os preços médios da saca da soja, entre abril de 2008 e março de 2017 (10 anos), aumentaram 39,34% no estado do Mato Grosso do Sul, o que equivale a uma taxa de crescimento anual de 3,3733%[12]. Considerando o preço de R$ 55,00 por saca no presente (período 0), a Tabela 8 apresenta as projeções de preços ao longo dos próximos 20 anos a partir do crescimento médio anual de 3,3733%.

A receita projetada varia de acordo com o aumento de preços, pois foi considerada uma produtividade estável de 70 sacas por hectare. No custo total projetado, considerou-se um aumento anual de 2,5% sobre o valor de R$ 3.184,58. Esse valor é o custo total da Tabela 7 subtraído da remuneração de fatores da infraestrutura de irrigação, que é somada após o aumento percentual. A ideia desse procedimento é que a remuneração dos fatores da infraestrutura de irrigação seja o custo de oportunidade do investimento no pivô. Definiu-se anteriormente que esses seriam os juros do financiamento, que, caso fosse feito, haveria o pagamento inicial de juros em R$ 639,36, com

Tabela 8. Projeção dos preços da soja para 20 anos no Mato Grosso do Sul.

Período	Preço saca (R$)
Presente	55,00
1	56,86
2	58,77
3	60,76
4	62,81
5	64,92
6	67,11
7	69,38
8	71,72
9	74,14
10	76,64
11	79,22
12	81,90
13	84,66
14	87,51
15	90,47
16	93,52
17	96,67
18	99,93
19	103,31
20	106,79

[12] Esse cálculo foi feito pela seguinte fórmula:

$$Taxa\ de\ crescimento = (última\ cotação/primeira\ cotação)^{1/n} - 1$$

em que n se refere à quantidade de períodos da taxa, 10 se considerarmos o período anual.

redução anual de R$ 53,28 até chegar a zero no 13º ano, lembrando que a linha de crédito de financiamento pode ser de até 12 anos.

A partir dessas considerações, a Tabela 9 apresenta o fluxo de caixa, por unidade de hectare, de um investimento num pivô de 70 ha para a produção de soja de verão, no período de 20 anos (referente à vida útil da infraestrutura de irrigação).

Feita essa projeção, pode-se verificar se o somatório do valor presente dos fluxos de caixa é maior que o investimento inicial, por meio da metodologia de VPL, e analisar se o investimento é remunerador, em caso de resultado positivo. Para tanto, definiu-se como taxa de desconto 8,5% da linha de crédito do Moderinfra. Assim, utilizando os procedimentos mostrados anteriormente, chega-se ao resultado de R$ 1.159,25 de VPL ha^{-1} e R$ 81.147,30 de VPL para o empreendimento total, considerando os 70 ha do pivô. Esse resultado basicamente mostra que o investimento no sistema de irrigação proposto (aspersão com pivô central) para a produção de soja de verão irrigada, no Mato Grosso do Sul, foi remunerador, lembrando que esse resultado se refere a dados, projeções e hipóteses assumidos no exercício.

Referências

AGROLINK. **Cotações**: soja em grão sc 60kg. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/cotacoes/graos/soja/soja-em-grao-sc-60kg. Acesso em: 17 abr. 2017.

CHIAVENATO, I. **Introdução à teoria geral da administração**. 7. ed. rev. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

CONAB (Brasil). **Custos de produção - culturas de 1ª safra**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-producao/

Tabela 9. Fluxo de caixa por hectare para produção de soja verão em 20 anos.

Ano	Investimento (R$)	Custo total (R$)	Receita (R$)	Lucro/Prejuízo (R$)
0	7.200,00			-7.200,00
1		3.903,55	3.979,87	76,32
2		3.931,88	4.114,13	182,25
3		3.912,30	4.252,91	340,61
4		3.994,70	4.396,37	401,67
5		3.942,27	4.544,68	602,40
6		4.066,10	4.697,98	631,89
7		4.105,14	4.856,46	751,31
8		4.146,50	5.020,28	873,78
9		4.190,22	5.189,63	999,41
10		4.236,37	5.364,70	1.128,32
11		4.285,00	5.545,66	1.260,66
12		4.336,19	5.732,74	1.396,55
13		4.389,98	5.926,12	1.536,14
14		4.499,73	6.126,03	1.626,30
15		4.612,22	6.332,68	1.720,45
16		4.727,53	6.546,30	1.818,77
17		4.845,72	6.767,12	1.921,41
18		4.966,86	6.995,40	2.028,54
19		5.091,03	7.231,38	2.140,35
20		5.218,31	7.475,31	2.257,01

planilhas-de-custo-de-producao/item/download/21220_fb78d6841a0ad2e320c97345fb56e1dd. Acesso em: 7 jun. 2019.

CONAB (Brasil). **Custos de produção agrícola**: a metodologia da Conab. Brasília, DF, 2010. Disponível em: http://www.conab.gov.br/conabweb/download/ safra/custos.pdf. Acesso em: 10 jul. 2016.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DE GOIÁS. **Estimativa de custo de produção**: milho transgênico. Goiânia, 2016. Disponível em: http://cdn.sistemafaeg.com.br/images/custo-de-producao/2016-agosto/estimativa_de_custo_de_producao_milho_trangenico_ago16.pdf. Acesso em: 10 jul. 2016.

INSTITUTO PARA O FORTALECIMENTO DA AGROPECUÁRIA DE GOIÁS - IFAG. **Estimativa de custo de produção de milho Transgênico**. 2019. Disponível em: http://ifag.org.br/arquivos/138/2019-04-Abril/1201/Estimativa-de-Custo-de-Producao-Milho-Transgenico-ABR19.pdf. Acesso em: 7 jun. 2019.

NANTES, J. F. D.; SCARPELLI, M. Gestão da produção rural no agronegócio. In: BATALHA, M. O. (org.). **Gestão agroindustrial**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2001. p. 556-584.

REZENDE, C. L.; ZYLBERSZTAJN, D. Uma análise da complexidade do gerenciamento rural. In: SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO FEA-USP, 4., 1999, São Paulo. **Anais** [...] São Paulo: Ed. da USP, 1999.

RIALTO, G. R. C.; ARARIPE, P. **Custo operacional de máquinas e implementos agrícola, você sabe calcular?** 5 ago. 2013. Disponível em: http://www.portalklff.com.br/publicacao/oldlink-1093. Acesso em: 11 ago. 2016.

RICHETTI, A. **Viabilidade econômica da cultura da soja na safra 2015/2016, em Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2015. 13 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado técnico, 202). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1021354/1/COT20152021.pdf. Acesso em: 11 fev. 2017.

RICHETTI, A.; FLUMIGNAN, D. L.; ALMEIDA, A. C. S. **Viabilidade econômica da soja irrigada na safra 2015/2016, na região Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2015. 7 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado técnico, 203). Disponível em: http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/130730/1/COT2015203.pdf. Acesso em: 11 fev. 2017.

SANTOS, G. J. dos; MARION, J. C.; SEGATTI, S. **Administração de custos na agropecuária**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 165 p.



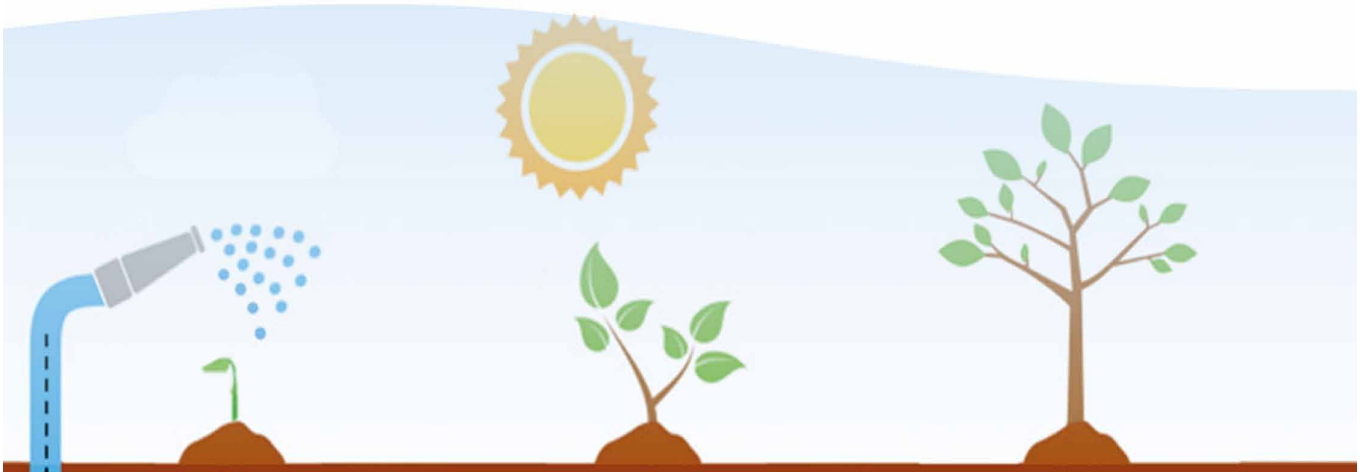
Embrapa

Não espere que a solução sempre caia do céu!

www.embrapa.br/e-campo

IrrigaFácil

Capacitação online da Embrapa
em uso e manejo da irrigação



FUNDAMENTOS

- Água na agricultura irrigada
- Água no solo: conceitos básicos
- Solos e classificação de terras para irrigação
- Dinâmica da água na planta
- Clima na irrigação

REQUERIMENTOS

- Requerimento de água de culturas
- Seleção do método de irrigação

APLICAÇÃO

- Desempenho de sistemas e projetos de irrigação
- Estratégias de manejo de irrigação
- Aplicação de fertilizantes e agroquímicos via água de irrigação
- Gestão e avaliação econômica de sistemas irrigados



Embrapa

Milho e Sorgo

Não espere que a solução sempre caia do céu, pois nem sempre a chuva cai quando você precisa e, quando cai, molha muitas vezes o solo sem eficiência! A "molhação" é muito diferente da irrigação, e somente o bico da botina não será suficiente para a medição e o manejo efetivo do teor de água do solo. Praticar apenas o manejo empírico da aplicação da lâmina de água e turno de rega poderá não traduzir na melhor relação custo-benefício para o sistema de produção agrícola.

Esta obra da Embrapa traz os fundamentos, os requerimentos e os aspectos práticos em manejo de irrigação, aprofundando conceitos técnicos e fornecendo ferramentas, métodos e videoaulas práticas de uso e manejo de irrigação. Tudo isso preparado por especialistas doutores da Embrapa juntamente com parceiros, com o principal objetivo de apoiar agentes de consultoria e assistência técnica, gestores de água, produtores rurais, operadores dos sistemas irrigados, academia e demais interessados em aumentar a eficiência do uso da água na agricultura irrigada.

Planejar o uso dos recursos naturais tem importância estratégica para o País e é por isso que mesclamos aqui os conceitos técnicos, os legais, a aplicação prática e a viabilidade econômica dos sistemas agrícolas irrigados, na passagem da água pelo contínuo solo-planta-atmosfera, transferindo conhecimentos, tecnologias e ativos que tragam maior sustentabilidade para os sistemas produtivos irrigados do País.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO

PÁTRIA AMADA BRASIL GOVERNO FEDERAL

ISBN 978-65-87380-25-4

9 786587 380254

CGPE 016848