

## 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 estágio 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 ( $ET_c$ ). A automação dessas medições com estações meteorológicas automáticas, em tempo real, facilita a obtenção da  $ET_c$  e, conseqüentemente, permite estabelecer estratégias de manejo de irrigação, determinar o volume de água necessário aos sistemas agrícolas, principalmente os irrigados, e dimensio-

nar 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 ( $ET_o$ ),  $ET_c$  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  $ET_c$ , permite uma análise espacial de como está distribuída a  $ET_c$  (Engman, 1993; Medina et al., 1998; Allen et al., 2002), com a possibilidade de geração de mapas temáticos de  $ET_c$  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  $ET_c$  em escalas local e regional. São descritas equações de estimativa de evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), 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  $ET_c$ .

## 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 su-

perfície 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 déficit 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).

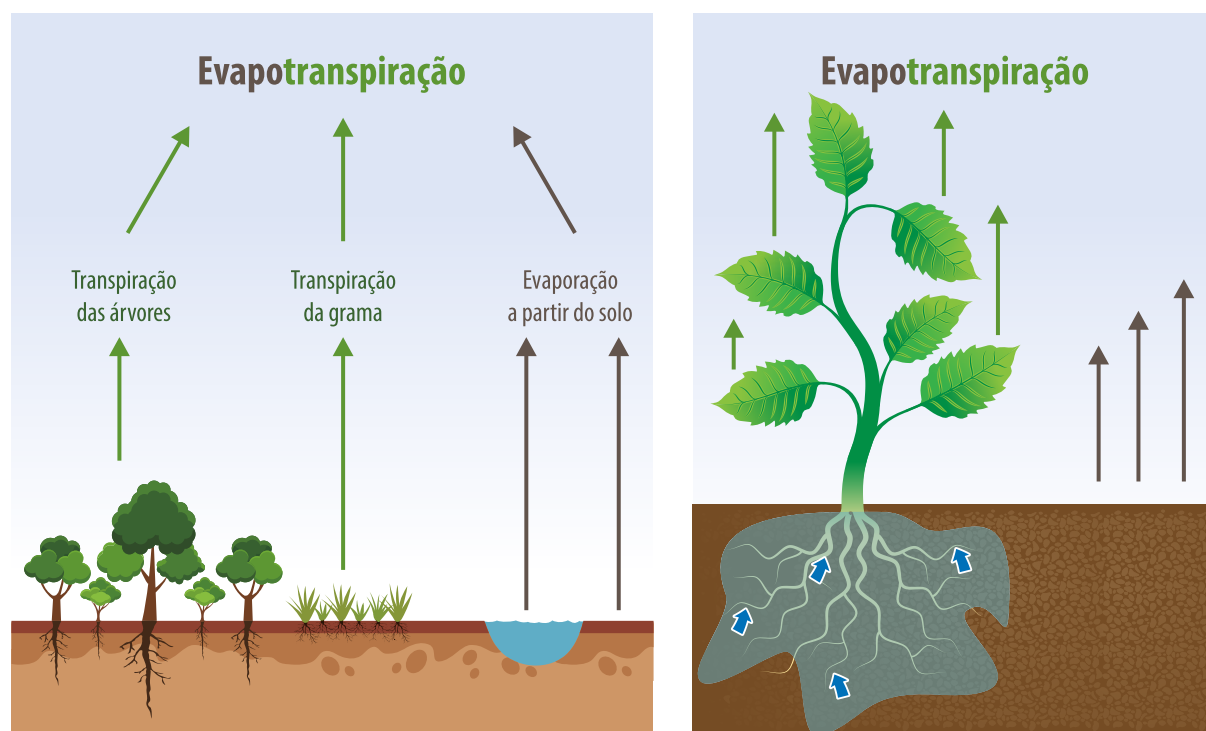
Para fins de manejo de irrigação e da maioria das aplicações, o conceito do processo de evapotranspiração é considerado unidimensional, particularmente em relação aos aspectos da evaporação e aos processos de trocas de energia, o que significa que todos os fluxos de vapor d'água são uniformes e verticais 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:

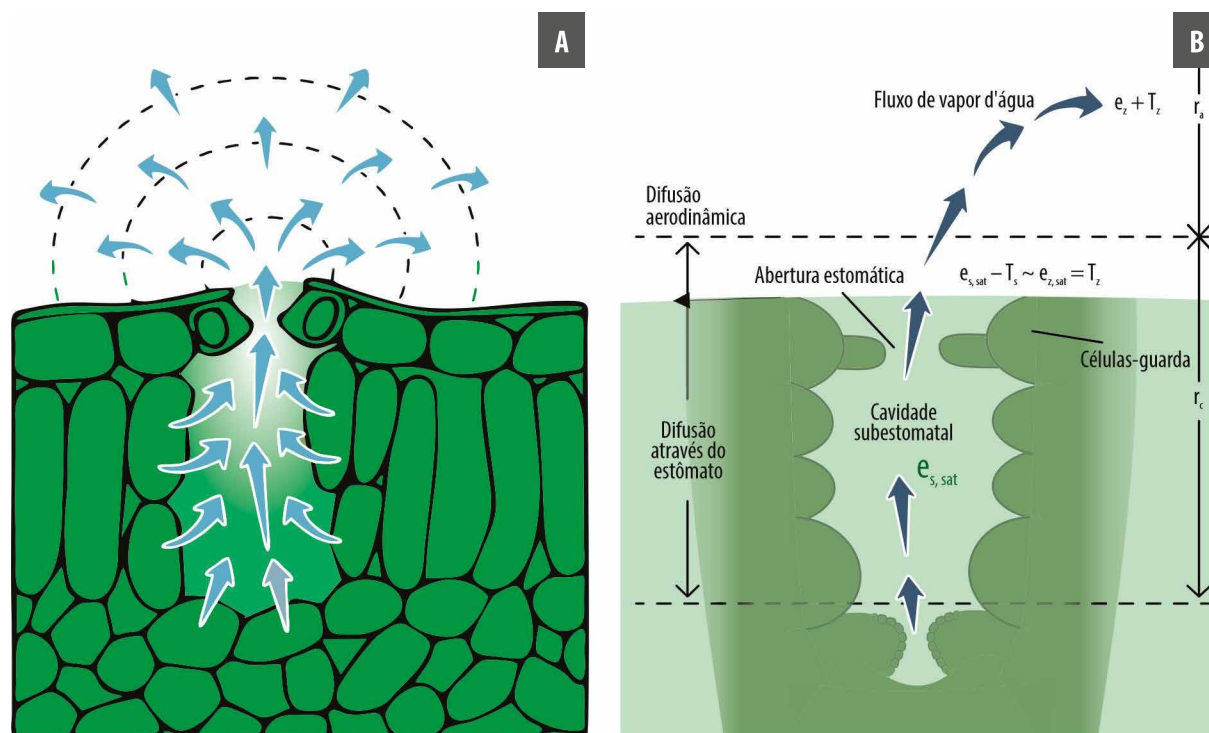
- **Fechamento estomatal** – Praticamente a totalidade da transpiração ocorre através dos estômatos por causa da relativa impermeabilidade da cutícula. Quase nenhuma transpiração ocorre quando os estômatos estão fechados. À medida que a abertura dos estômatos aumenta, uma maior quantidade de vapor d'água 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.

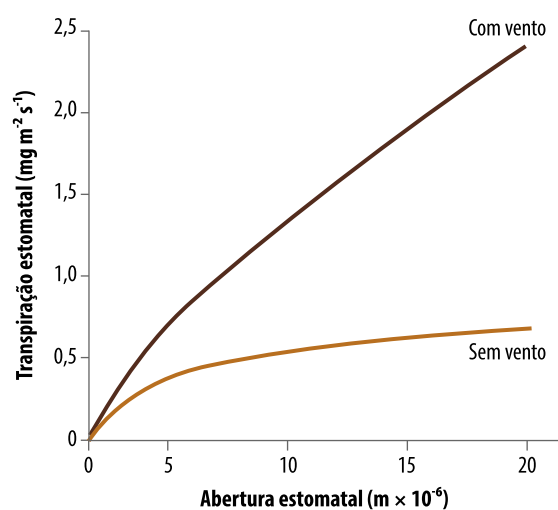




**Figura 4.** Difusão de vapor d'água através de uma abertura estomatal no exterior de uma folha, para duas condições: sem vento (sem turbulência), um gradiente de difusão de vapor d'água é gerado, reduzindo a taxa de transpiração (A); e com vento (com turbulência), parâmetros envolvidos no processo: pressão de vapor d'água saturada –  $e_{s, sat} \equiv e_{z, sat}$  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.

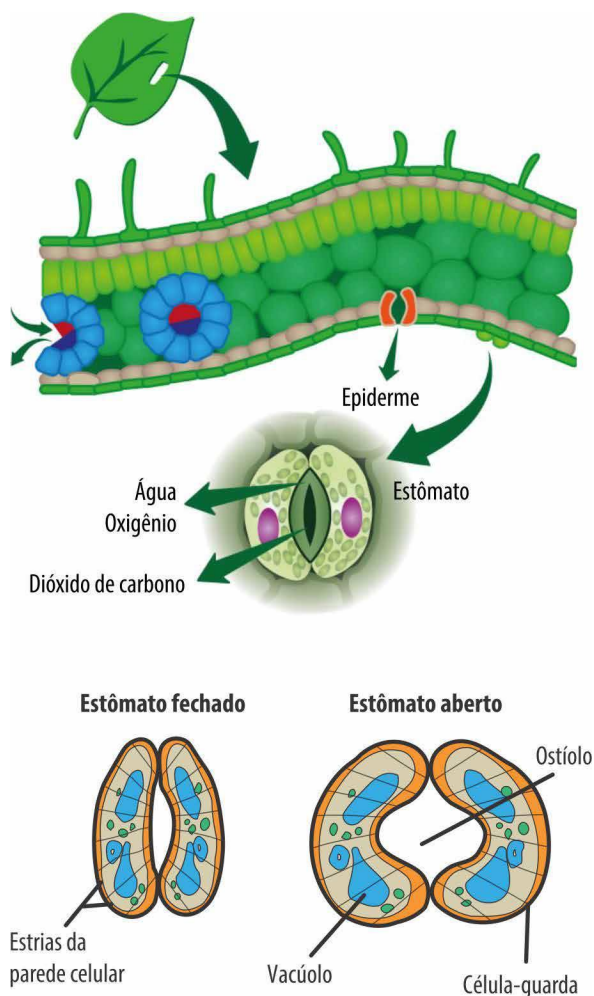


**Figura 5.** Efeito do vento sobre a transpiração estomática e abertura estomatal.

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).

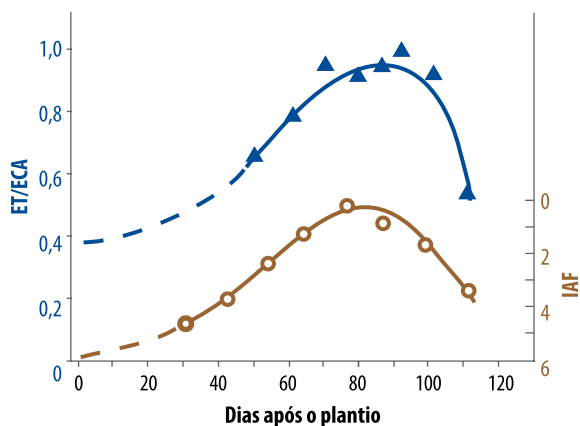


**Figura 6.** Tamanho, número, abertura e fechamento de estômatos nas folhas, por onde ocorrem os fluxos de vapor d'água ou as taxas de transpiração, afetados pelos genótipos, dinâmica da água nas plantas e ambiente.

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* eli-

mina 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).

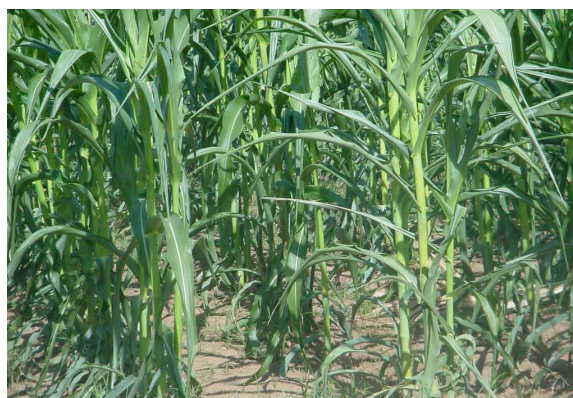


Foto: Reinaldo Lúcio Gomide

**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.

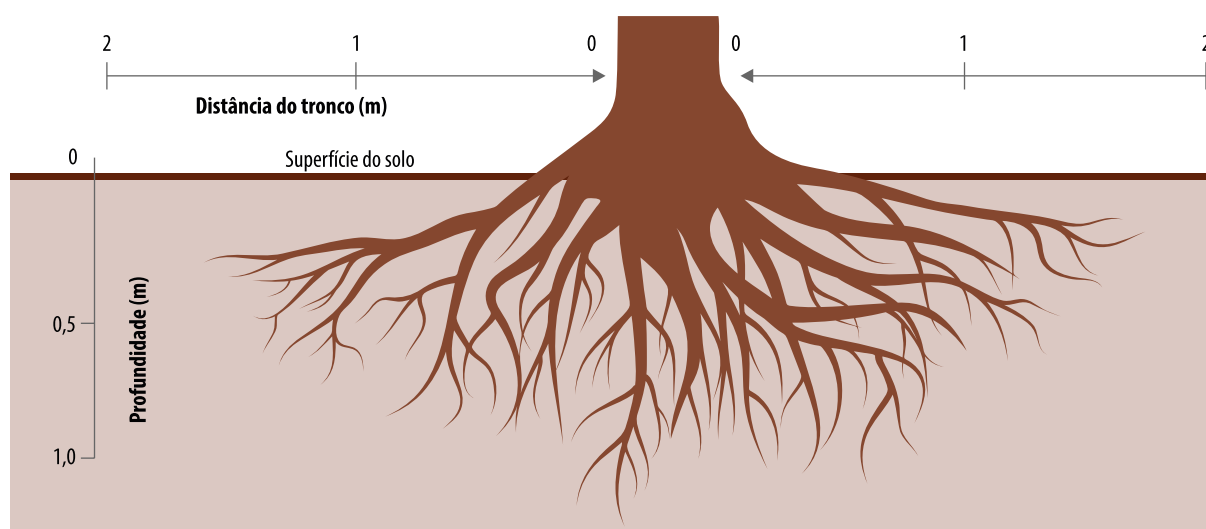
- **Profundidade e proliferação de raízes** – Este fator afeta diretamente a exploração de determinado volume de solo e, consequentemente, a extração do conteúdo de umidade no perfil do solo. Geralmente, sistemas radiculares mais profundos aumentam a extração de água de uma determinada unidade de volume 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 semen-

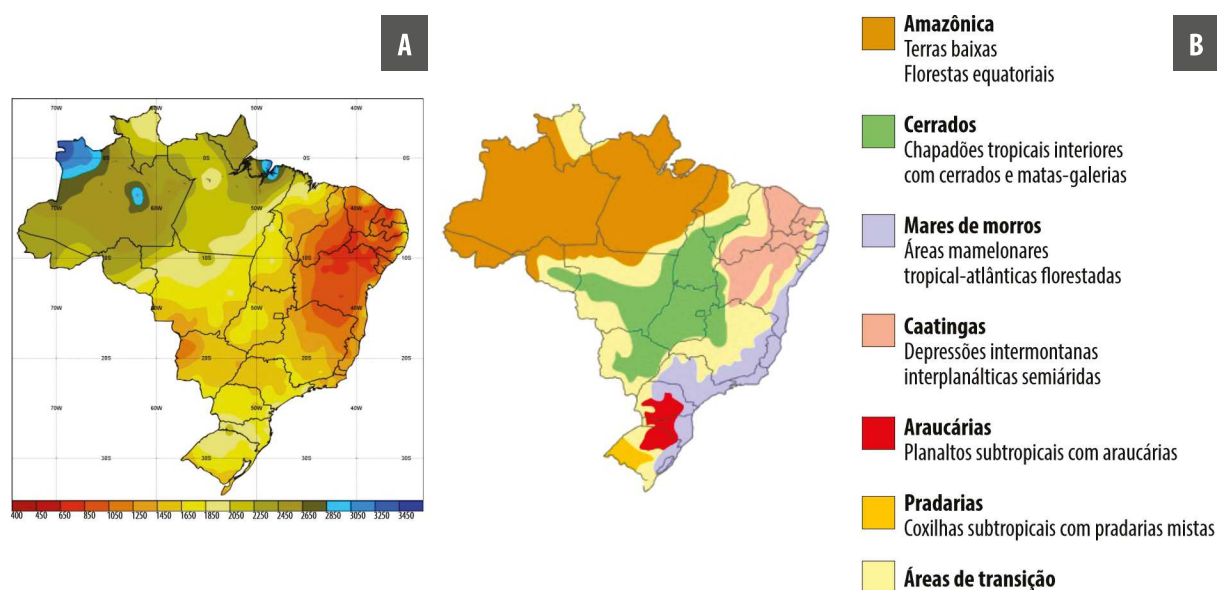
tes, deve-se dispor de irrigação, mesmo que essa aparentemente fique subutilizada durante parte do período chuvoso, lembrando ainda que, nessa região, as culturas de inverno necessitam ser irrigadas. Além do mais, algumas espécies, como as hortaliças, são sensíveis mesmo a pequenos deficits hídricos 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%.



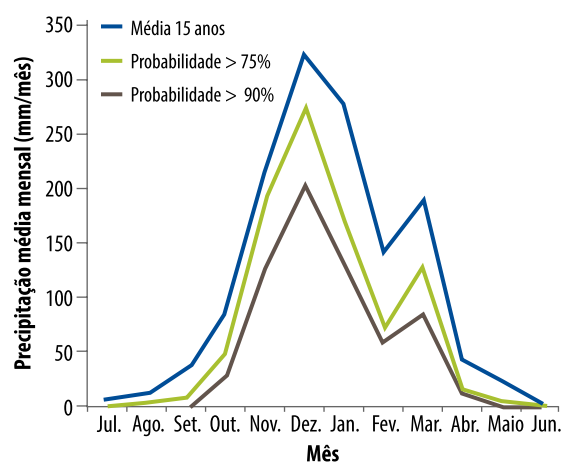
**Figura 9.** Profundidade e proliferação de raízes afetando diretamente a exploração e extração de água das plantas de uma determinada unidade de volume de solo, antes mesmo de atingimento do ponto de murcha permanente.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

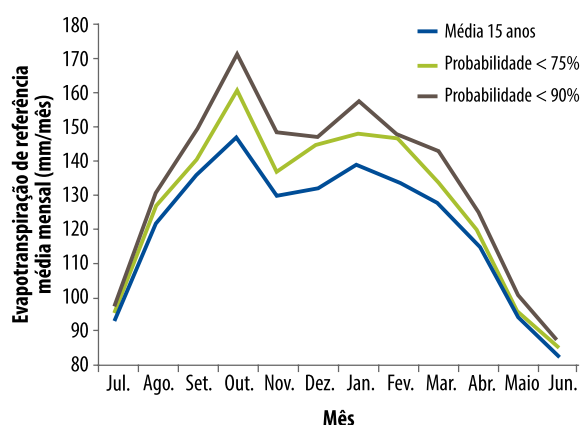


**Figura 10.** Normal climatológica do Brasil de 1981 a 2010 – precipitação acumulada anual (A); regiões do Brasil – interferência da quantidade e distribuição de chuvas nas irrigações e no requerimento de água de culturas (B).

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 ( $ET_0$ ) 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  $ET_0$  são menores que os valores associados a uma certa probabilidade de ocorrência.

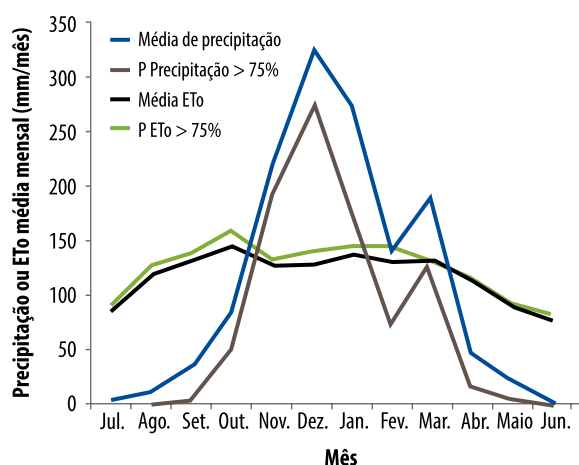
Quanto maior o valor econômico da cultura, maior deve ser a probabilidade e maiores serão os valores da  $ET_0$  e, conseqüentemente, maior deverá ser a capacidade do sistema de irrigação. Vale lembrar que a evapotranspiração de muitas culturas é maior que a  $ET_0$  nos períodos de pico de consumo. Os valores do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) devem ser multiplicados pelos valores de  $ET_0$  para obter a curva de  $ET_c$ . 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 ( $ET_c < ET_o$ , 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  $ET_o$ . 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 estágio 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:

$$P_n = (F_n - n + 1) / (N - n + 1) \quad (1)$$

em que  $P_n$  é a probabilidade de ocorrência de veranicos com duração de  $n$  dias;  $F_n$  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-

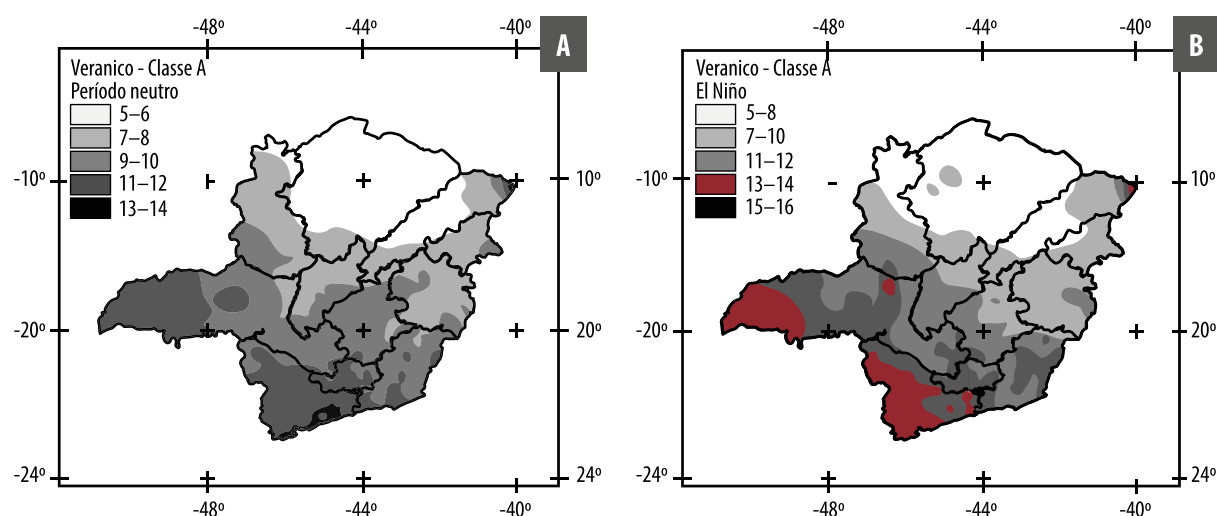
mático El Niño, na distribuição espacial no número de ocorrências de veranico, com duração de 3 a 6 dias nas séries de anos neutros (A) e de El Niño (B). Relacionou-se espacialmente o número médio de ocorrência de veranicos de classe A (Figura 14A e 14B), verificando que as situações mais notáveis são 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 evapotranspiração (*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

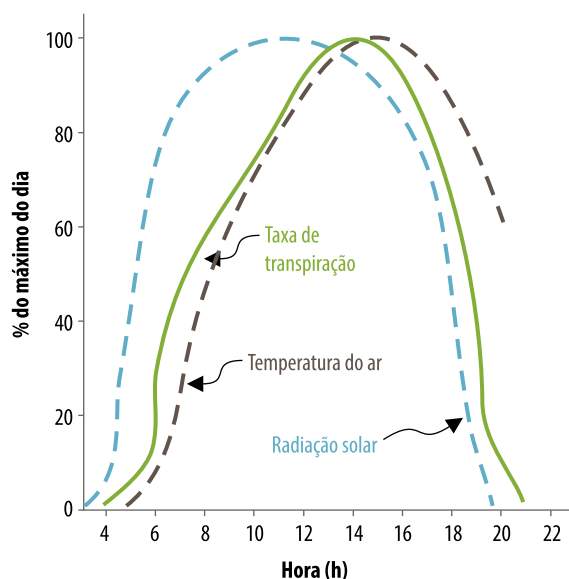
A Figura 15 ilustra a variação diária entre os componentes térmicos climáticos – radiação solar e temperatura do ar – e a taxa de transpi-



**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, conseqüentemente, queda de temperatura do ar.



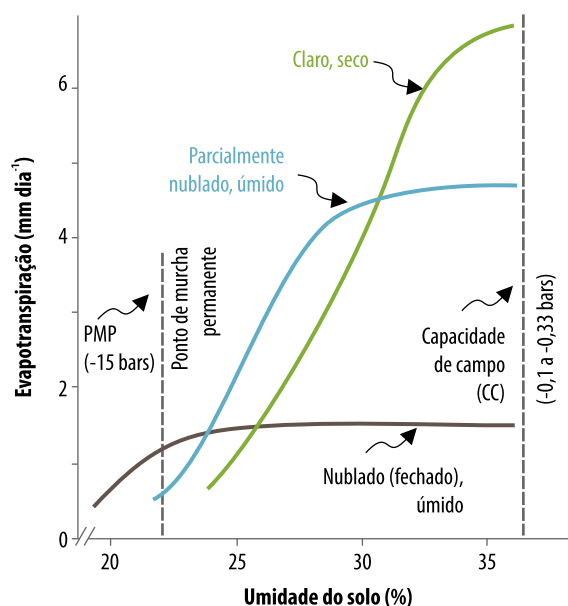
**Figura 15.** Variação diária entre os componentes térmicos climáticos – radiação solar e temperatura do ar – e a taxa de transpiração das plantas.

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  $ET_c$ , 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 me-

diada 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 déficit de pressão de vapor do ar) é favorável para uma maior demanda evaporativa da atmosfera e, conseqüentemente, uma maior necessidade hídrica das culturas. Essa situação é a que apresenta a maior variação positiva no incremento da  $ET_c$  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 ( $ET_c$ ) é um processo que envolve energia proveniente da radiação solar global ( $R_s$ ). Fracionando todos

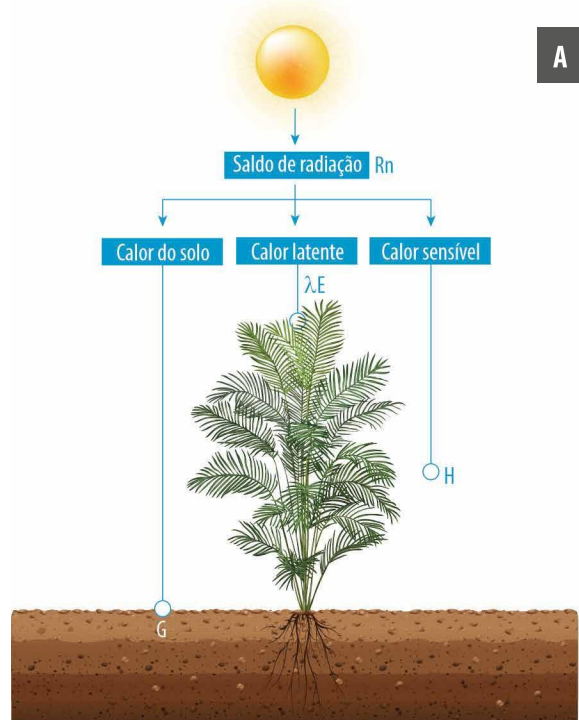


os fluxos de energia de ondas longas e curtas, que chegam e deixam a superfície coberta pela cultura, ou seja, efetuando o balanço de energia dessa superfície, tem-se a seguinte equação do balanço de energia:

$$R_n = G + H + \lambda E \quad (2)$$

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  $\lambda E$  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,  $\text{W m}^{-2}$  ou  $\text{MJ m}^{-2}$ . O termo  $\lambda E$  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.



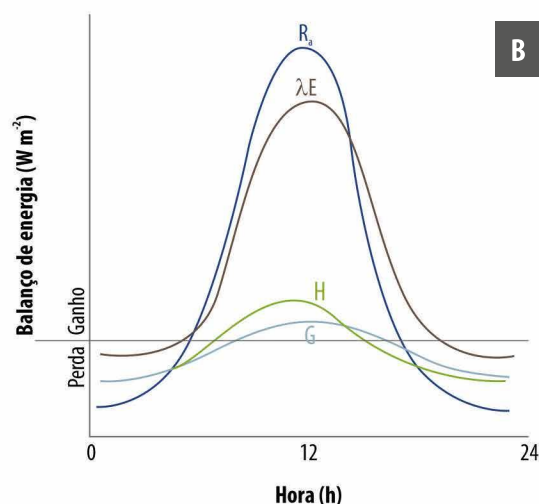
Para converter os valores da fração de energia  $\lambda E$  para valores equivalentes de evapotranspiração da cultura em unidades de  $\text{mm dia}^{-1}$ , unidade mais utilizada na agricultura irrigada, é necessário usar os seguintes fatores de conversão:

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1}$$

$$1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1} = 0,408 \text{ mm dia}^{-1}$$

$$1 \text{ W m}^{-2} = 0,0864 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1} = 0,03525 \text{ mm dia}^{-1}$$

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 fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ), 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 ( $\lambda E$ ), 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 ( $\lambda E$ ) ou  $ET$ ; consequentemente, os fluxos de energia  $H$  e  $G$  são menores.

## Evapotranspiração de referência

Uma revisão sobre a tendência de superestimativa da  $ET_0$ , pelo método Penman-FAO, tendo a grama como referência, é apresentada por Sadiyama (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. Sadiyama (1995) também fornece uma criteriosa análise dos conceitos e procedimentos metodológicos de cálculos da  $ET_0$ , 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  $ET_0$ , com base nos procedimentos para revisão do antigo boletim FAO-24, de acordo com Smith (1991).

A nova evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) 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  $70 \text{ s m}^{-1}$  e albedo de 0,23 (Allen et al.,

1998). Esse conceito de  $ET_0$  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  $ET_0$  para o caso dessa cultura hipotética de referência, atendendo tanto a definição original de evapotranspiração potencial de Penman quanto o atual conceito de  $ET_0$  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  $ET_0$ , envolvendo a interação entre o processo físico de perda de água, parâmetros fisiológicos e resistências do dossel da cultura e aerodinâmica.

A estimativa da  $ET_c$  é feita a partir da determinação da  $ET_0$  em um processo envolvendo duas etapas. A primeira etapa corresponde à própria determinação de  $ET_0$ , 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  $ET_0$  por um coeficiente de cultura ( $K_c$ ), que varia com o estágio 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  $ET_0$  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  $ET_o$ , 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  $ET_o$  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  $ET_o$ , 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:

$$ET_o = c[W R_n + (1 - W)0,27(1 + 0,01 U_2)(e_a - e_d)] \quad (3)$$

em que  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $c$  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 ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $U_2$  é a velocidade média do vento, medida a 2 m da superfície do solo (ou convertida para essa altura) ( $\text{km dia}^{-1}$ );  $e_a$  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:

$$\begin{aligned} c = & 0,892 - 0,0781 U_d + 0,00219 U_d R_s + \\ & + 0,000402 UR_{\text{máx}} R_s + \\ & + 0,000196 U_d/U_n U_d UR_{\text{máx}} + \\ & + 0,0000198 U_d/U_n U_d UR_{\text{máx}} R_s + \\ & + 0,00000236 U_d^2 UR_{\text{máx}} R_s - \\ & - 0,0000086 (U_d/U_n)^2 U_d UR_{\text{máx}} - \\ & - 0,0000000292 U_d/U_n U_d^2 UR_{\text{máx}}^2 R_s - \\ & - 0,0000161 UR_{\text{máx}} R_s^2 \end{aligned} \quad (4)$$

em que  $U_d$  é a velocidade média do vento durante o dia ( $\text{m s}^{-1}$ );  $U_n$  é a velocidade média do vento durante a noite ( $\text{m s}^{-1}$ );  $R_s$  é a radiação solar global à superfície ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $UR_{\text{máx}}$  é a umidade relativa máxima (%);  $U_d/U_n$  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  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\text{mbar } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água com a temperatura ( $\text{mbar } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

## Método de Blaney e Criddle

O método de Blaney e Criddle é mais simples, pois correlaciona  $ET_o$  apenas com dados de clima relacionados à temperatura do ar e à duração de brilho solar. A sua utilização é recomendada para determinação de  $ET_o$  para períodos superiores a 15 dias ou mensais. A equação possui o seguinte formato:

$$ET_o = a + b [p(0,46 T + 8,13)] \quad (6)$$

em que  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $a$  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 ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Os fatores de ajuste da FAO,  $a$  e  $b$ , foram definidos por Allen e Pruitt (1991):

$$a = 0,0043 UR_{\min} - n/N - 1,41 \quad (7)$$

$$b = 0,908 - 0,00483 UR_{\min} + 0,7949 n/N + 0,0768 [\ln(Ud + 1)]^2 - 0,0038 UR_{\min} n/N - 0,000433 UR_{\min} Ud + 0,281 \ln(Ud + 1) \ln(n/N + 1) - 0,00975 \ln(Ud + 1) [\ln(UR_{\min} + 1)]^2 \ln(n/N + 1) \quad (8)$$

em que  $n/N$  é a razão entre o número de horas de brilho solar atual e o máximo possível, adimensional; e  $UR_{\min}$  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:

$$ET_o = r (W R_s) \quad (9)$$

em que  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $W$  é o fator de ponderação que depende da temperatura e da altitude (já definidos anteriormente);  $R_s$  é a radiação solar global à superfície ( $\text{mm dia}^{-1}$ ); e  $r$  é o fator de ajuste proposto pela FAO, que foi definido por Frevert et al. (1983) como sendo:

$$r = 1,066 - 0,00128 UR_{\text{méd}} + 0,045 Ud - 0,0002 UR_{\text{méd}} Ud - 0,0000315 (UR_{\text{méd}})^2 - 0,001103 (Ud)^2 \quad (10)$$

em que  $UR_{\text{méd}}$  é a umidade relativa média do ar (%); e  $Ud$  é a velocidade média do vento durante o dia ( $\text{m s}^{-1}$ ).

## Hargreaves e Samani

O método de estimativa da  $ET_o$  proposto por Hargreaves e Samani (1985) é considerado empírico e requer uma menor quantidade de informações climatológicas, sendo indicado para estimativas de  $ET_o$  em períodos superiores a 7–10 dias, apresentando tendências de superestimativa dos valores de  $ET_o$  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:

$$ET_o = 0,0023 Q_o (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0,5} (T_{\text{méd}} + 17,8) \quad (11)$$

em que  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $Q_o$  é a radiação extraterrestre ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $T_{\text{máx}}$  é a temperatura do ar máxima ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{\text{mín}}$  é a temperatura do ar mínima ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{\text{méd}}$  é a temperatura do ar média diária ( $^{\circ}\text{C}$ ).

## 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:

$$ET_o = K_p \times EV \quad (12)$$



em que  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $K_p$  é o coeficiente de ajuste de tanque proposto pela FAO;  $EV$  é a evaporação da água medida no Tanque Classe A ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

Snyder (1992) desenvolveu uma equação, que foi adaptada por Albuquerque e Guimarães (2004), para permitir a interpolação dos valores tabelados de  $K_p$  (Doorenbos; Pruitt, 1977), na condição de tanque exposto com bordadura vegetada:

$$K_p = 0,482 + 0,024 \ln(R) - 0,02356 u_{10} + 0,0045 UR_{\min} \quad (13)$$

em que  $K_p$  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 ( $\text{m s}^{-1}$ );  $UR_{\min}$  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  $K_p$  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  $ET_o$  é mais preciso, recomendado como padrão pela FAO e pode fornecer cálculos mais confiáveis de  $ET_o$ , 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  $ET_o$ , baseada na cultura hipotética, para estimativas de 24 horas ou diárias, a seguinte equação combinada de Penman-Monteith foi proposta (Smith, 1991):

$$ET_o = [\Delta/(\Delta + \gamma^*)](R_n - G)(1/\lambda) + [\gamma/(\Delta + \gamma^*)][900/(T + 273)]U_2(e_s - e_a) \quad (14)$$

em que  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência da cultura hipotética ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $R_n$  é o saldo radiação à superfície da cultura ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ );  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ );  $T$  é a temperatura média diária do ar a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ );  $U_2$  é a velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ );  $(e_s - e_a)$  é o deficit de pressão de vapor do ar (KPa), em que  $e_s$  é a pressão de saturação de vapor do ar (KPa), e  $e_a$  é a pressão atual de vapor do ar (KPa);  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor do ar ( $\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $\lambda$  é o calor latente de evaporação da água ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ) ( $\lambda = 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$  para água a  $20 ^{\circ}\text{C}$ );  $\gamma^*$  é a constante psicrométrica modificada,

(KPa °C<sup>-1</sup>); e 900 é o fator de conversão para as unidades (KJ<sup>-1</sup> kg °K dia<sup>-1</sup>).

A constante psicrométrica modificada ( $\gamma^*$ ) é determinada pela equação:

$$\gamma^* = \gamma (1 + 0,34 U_2) \text{ e } \gamma = 0,000665 P \quad (15)$$

em que  $\gamma$  é a constante psicrométrica (KPa °C<sup>-1</sup>);  $P$  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

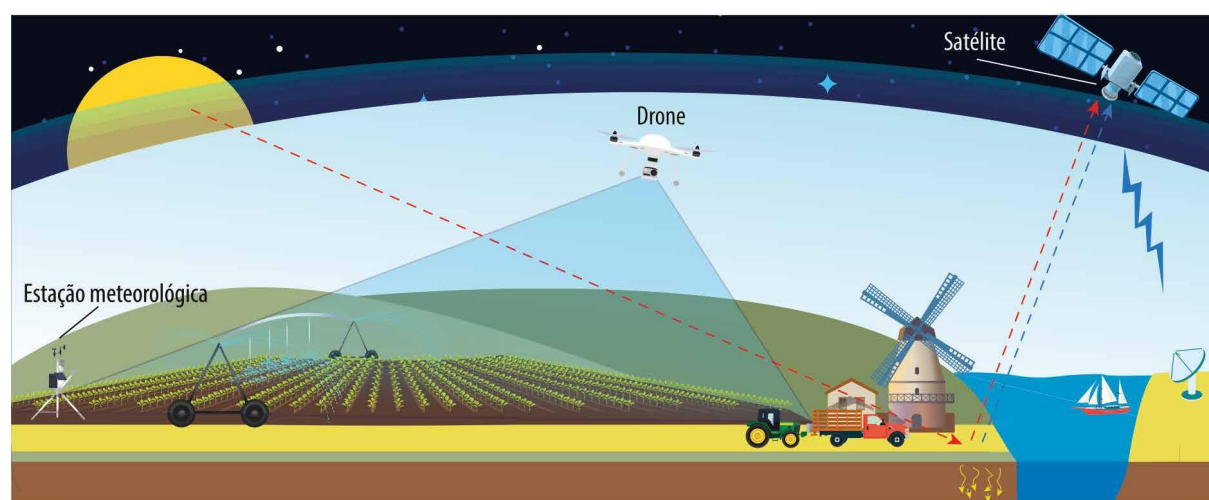
de insolação), para a determinação da  $ET_c$ , sem a necessidade de envolvimento do cálculo do balanço hídrico. E são bastante utilizadas tanto na estimação de parâmetros relacionados à temperatura e radiação da superfície coberta pela vegetação como em modelos biofísicos, como é o caso do uso do método 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, estágio 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,  $ET_c$  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  $ET_c$  e dos componentes do balanço de energia na região norte de Minas Gerais, abrangendo o perímetro irrigado de Grotuba, 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  $ET_c$ , 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  $15^{\circ}47'$  de latitude sul e  $43^{\circ}18'$  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. Fisionalmente, a região está incluída na transição dos domínios do Cerrado e da Caatinga.

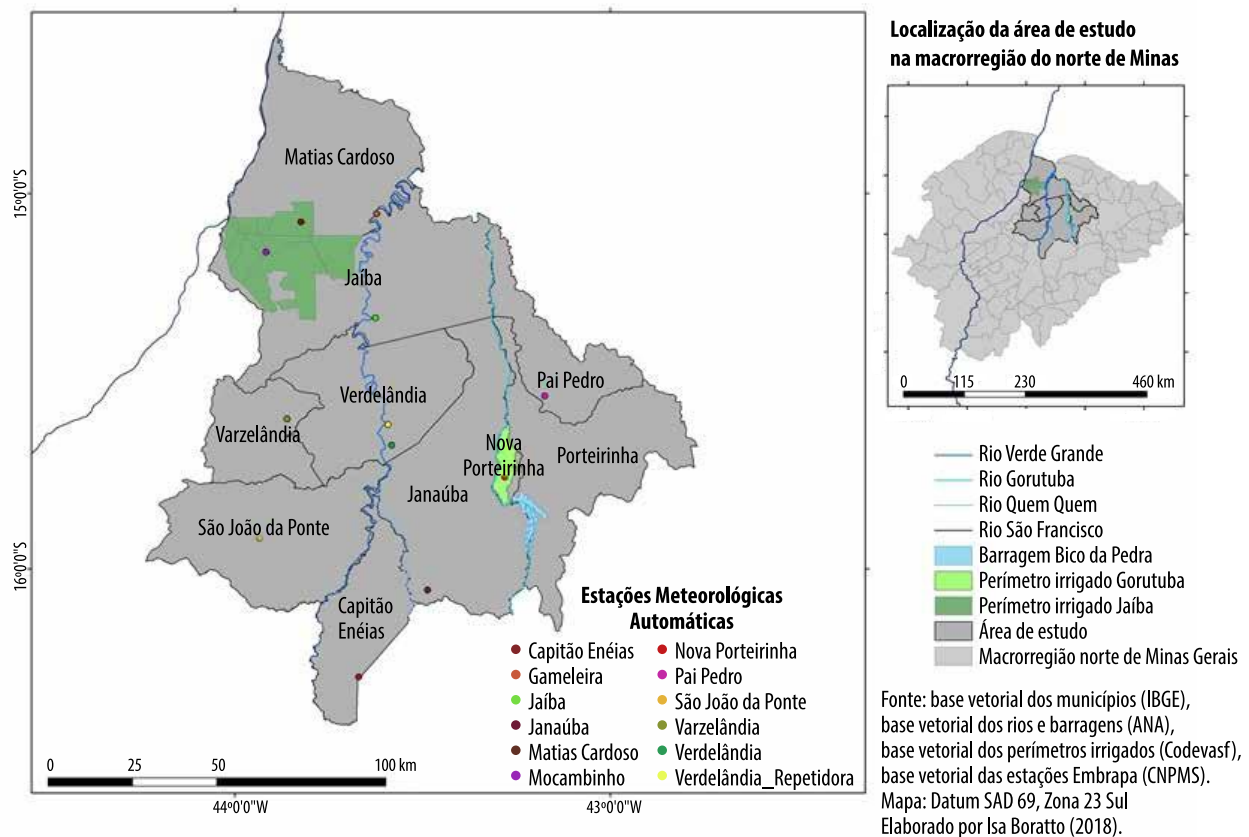
Utilizaram-se duas imagens de satélite do Mapador Temático Landsat-5 (Landsat 5 TM), que caracterizaram dois períodos distintos, um úmido (24/1/2011) e outro seco (17/8/2010), da região estudada, obtidas com o Instituto Nacio-

nal 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 climáticos 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 (*LAI*).

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 ( $L_{min}$  e  $L_{max}$ ) do satélite Landsat 5 TM, converteram-se os números digitais ( $DN$ ) de cada pixel em radiância espectral ( $L_{\lambda}$ , 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).

$$L_{\lambda} = [(L_{max} - L_{min})/255]DN + L_{min} \quad (16)$$

em que  $L_{\lambda}$  é a radiância espectral para banda  $\lambda$  ( $W m^{-2} sr^{-1} mm^{-1}$ );  $L_{max}$  e  $L_{min}$  são os coeficientes de calibração das respectivas radiâncias espectrais de cada banda  $\lambda$  ( $W m^{-2} sr^{-1} mm^{-1}$ ); 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  $L_{\text{máx}}$ ,  $L_{\text{mín}}$  e  $K$ .

| Descrição dos canais            | Comprimento de onda | $L_{\text{mín}}$ | $L_{\text{máx}}$ | $K$   |
|---------------------------------|---------------------|------------------|------------------|-------|
| 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 ( $L_\lambda$ ) por  $\pi$  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  $\lambda$ ;  $L_\lambda$  é a radiância espectral para banda  $\lambda$ , ( $\text{Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ );  $K$  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  $\rho_3$  e  $\rho_4$  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 biomass-

sa de cada pixel da imagem, computado pela seguinte equação empírica (Allen et al., 2002):

$$IAF = [\ln(0,69 - SAVI)/0,59]/0,91 \quad (21)$$

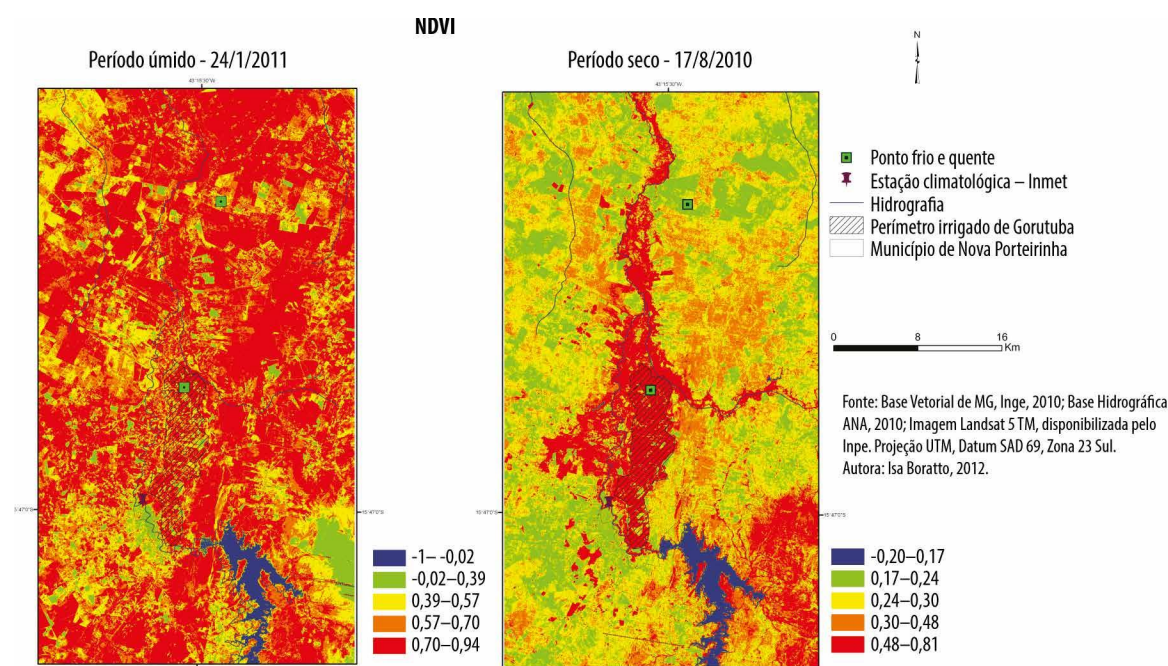
Quanto mais próximos de 1 são os valores de *NDVI*, mais densa e vigorosa é a vegetação; o valor 0 (zero) indica superfície não vegetada; enquanto os menores valores representam as áreas de vegetação estressada hidricamente, que são bem menos densas. Os valores negativos de *NDVI* (cor azul na Figura 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

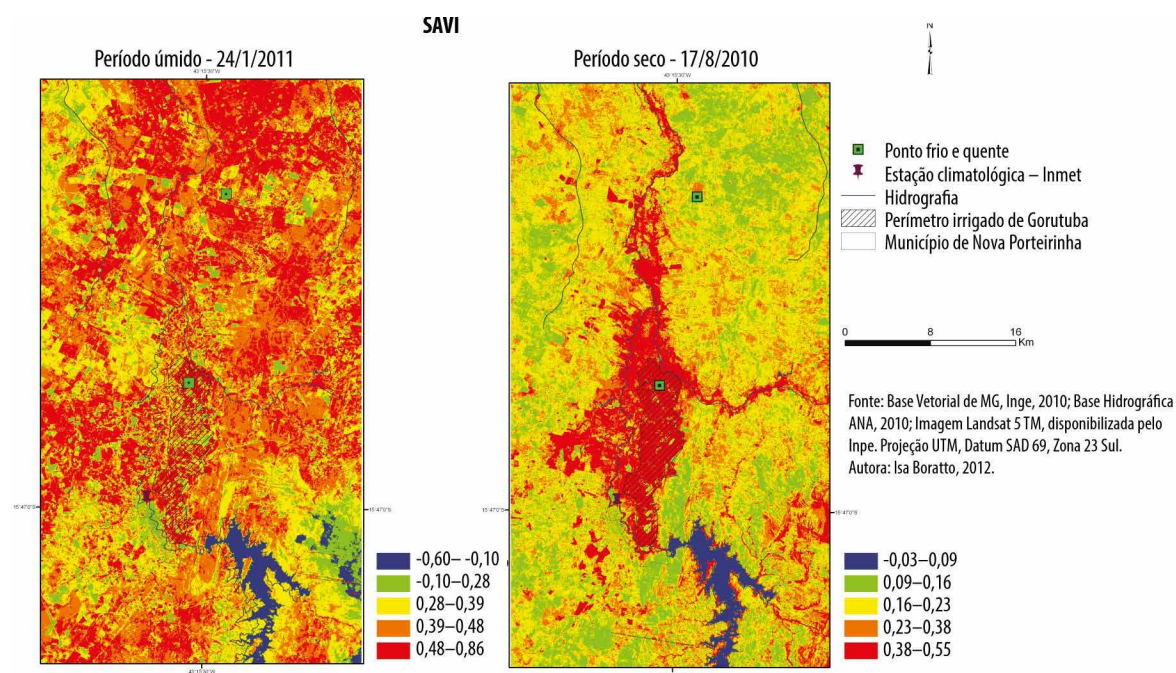
Os primeiros resultados de determinação da *ETc* (ou  $\lambda ET$ , em termos de energia) e dos componentes do balanço de energia, envolvendo a



**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.

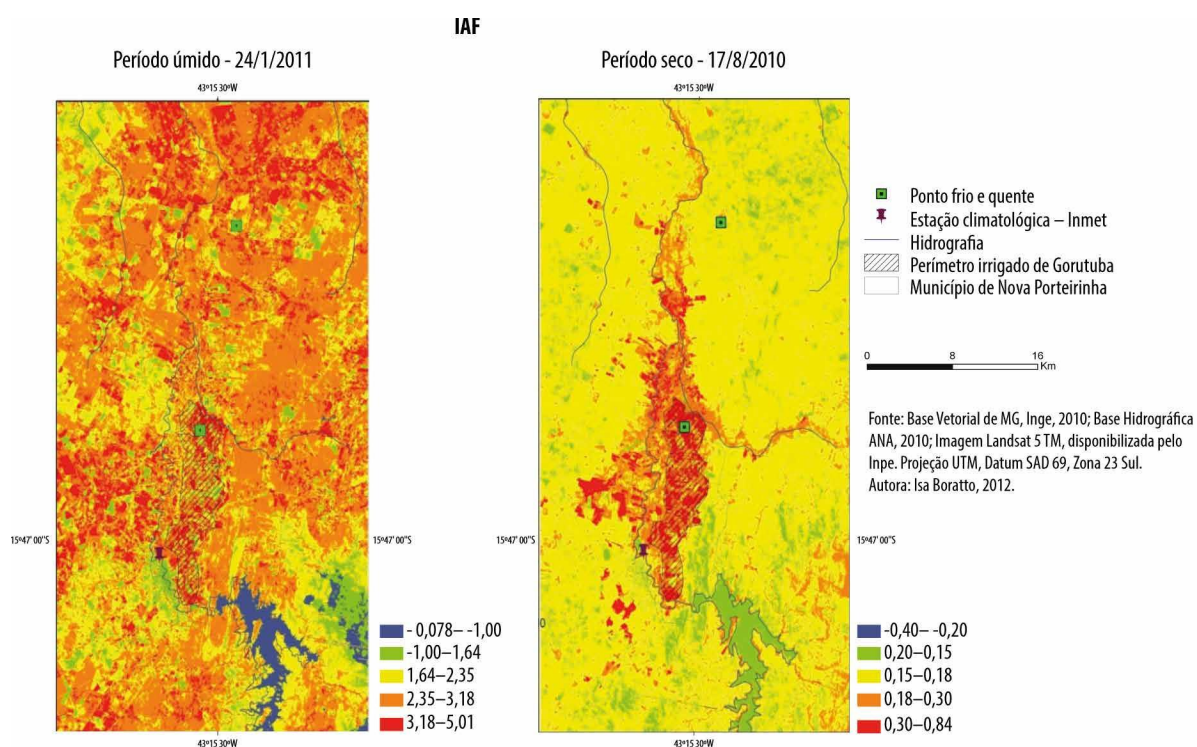
Fonte: Gomide e Boratto (2014).





**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.

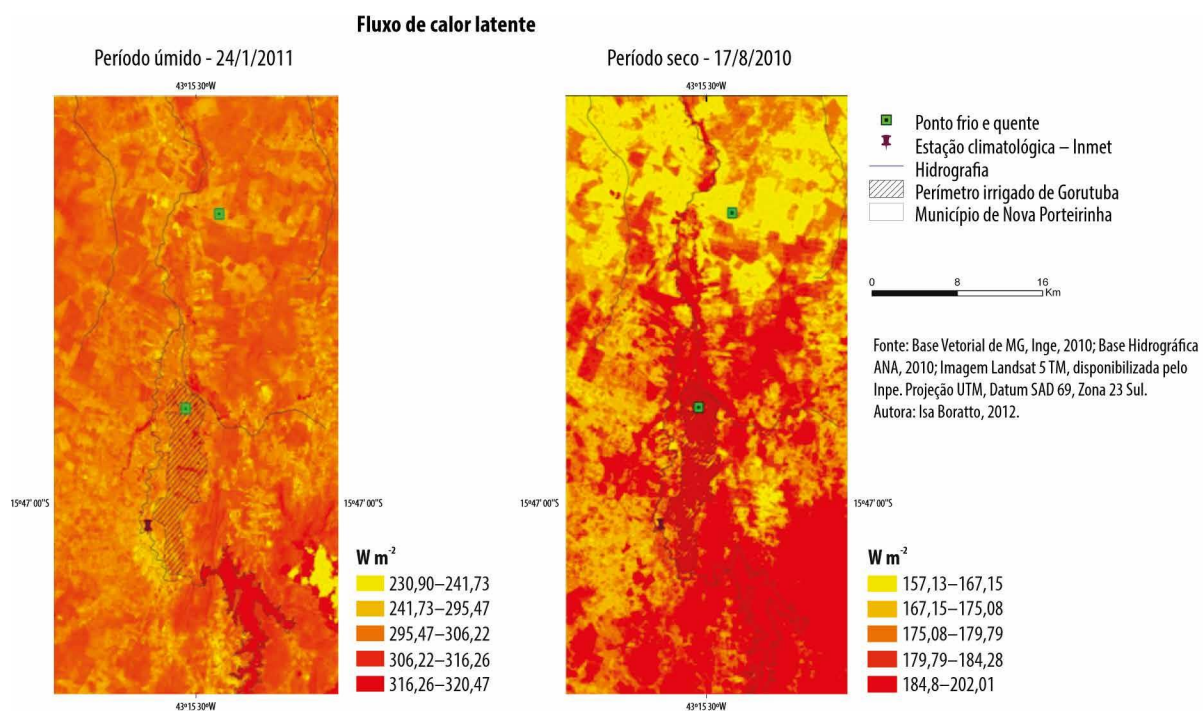
Fonte: Gomide e Boratto (2014).

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 ( $\lambda ET$ ) ou  $ET_c$ , 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; Borat-

to, 2014). Os resultados obtidos indicam que o período úmido apresentou maiores valores de  $\lambda ET$  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  $\lambda ET$  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  $\lambda ET$ , 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  $\lambda ET$  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 ( $\lambda ET$ ) 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 significativa, 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 ( $\alpha$ ), 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.
- BASTIAANSEN, 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.
- BASTIAANSEN, 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](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6).
- BOS, M. G.; VOS, J.; FEDDES, R. A. **CRICWAR 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](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](https://doi.org/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, n. 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](https://doi.org/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: Goddard 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.; EDMISTER, 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.

