

Capítulo 1: INTRODUÇÃO PARA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Este capítulo explica os conceitos e as diferenças entre evapotranspiração da cultura de referência (ET_o) e evapotranspiração da cultura sob condições padrão (ET_c) e vários manejo e condições ambientais (ET_c adj). Também examina os fatores que afetam a evapotranspiração, as unidades nas quais normalmente é expressa e a forma que pode ser determinada.

Processo de Evapotranspiração

A combinação de dois processos separados por um lado à água perdida da superfície do solo por evaporação e por outro lado à água perdida pela cultura através de transpiração é chamada de evapotranspiração (ET).

Evaporação

Evaporação é o processo por meio do qual a água líquida é convertida em vapor (vaporização) e removida da superfície evaporante (remoção de vapor). Água evapora de uma variedade de superfícies, como lagos, rios, pavimentos, solos e vegetação molhada.

É necessária energia para mudar o estado das moléculas de água de líquido para vapor. Radiação solar direta e, de uma forma menor, a temperatura do ar ambiente fornece esta energia. A força motriz para remover o vapor de água da superfície evaporante está na diferença entre a pressão do vapor de água na superfície evaporante e do ar circunvizinho. Como o processo de evaporação é contínuo, o ar circunvizinho é gradualmente saturado e o processo reduzirá a velocidade e poderia parar se o ar úmido não for transferido à atmosfera. A substituição do ar saturado por ar mais seco é grandemente depende da velocidade do vento. Conseqüentemente, radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento são parâmetros climatológicos para serem considerados quando avaliamos o processo de evaporação.

Onde a superfície evaporante é a superfície de solo, o grau de sombreamento do dossel da cultura e a quantidade de água disponível na superfície evaporante são outros fatores que afetam o processo de evaporação. As fontes de água para a superfície do solo são as chuvas freqüentes, irrigação e água do lençol freático transportado para camada superficial do solo. Onde o solo pode umedecer rapidamente a sua superfície para satisfazer a demanda de evaporação, a evaporação do solo somente é determinada pelas condições meteorológicas. Porém, onde o intervalo entre chuvas e irrigação é grande e a “habilidade” do solo para transmitir água a superfície é pequena, a umidade na camada superficial do solo diminui e a

superfície de solo seca. Sob estas circunstâncias de disponibilidade limitada de água mostra uma influência controlando a evaporação do solo. Na ausência de qualquer suprimento de água para a superfície do solo, diminui a evaporação rapidamente e pode cessar quase completamente dentro de alguns dias.

Transpiração

Transpiração consiste na vaporização da água líquida contida nos tecidos das plantas e a remoção do vapor à atmosfera. Predominantemente as culturas perdem a água pelos estômatos. Estes são aberturas pequenas na folha da planta pelo qual ocorre a passagem dos gases e de vapor de água (Figura 1). A água, junto com alguns nutrientes, é levada das raízes e é transportada pela planta. A vaporização acontece dentro da folha, isto é nos espaços intercelular, e a troca de vapor com a atmosfera é controlada pela abertura dos estômatos. Quase toda água levada para cima é perdida através de transpiração e só uma fração minúscula é usada dentro da planta.

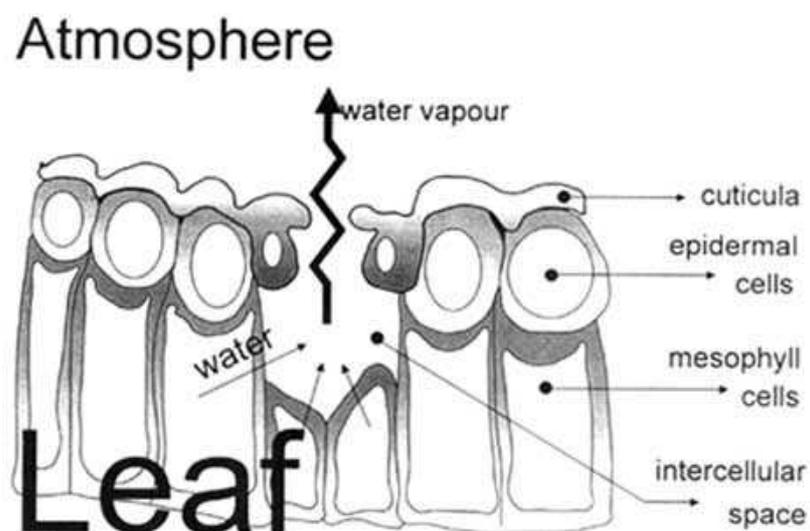


Figura 1. Representação esquemática de um estômato.

Transpiração, como evaporação direta, depende do suprimento de energia, gradiente de pressão do vapor e velocidade do vento. Conseqüentemente, deve ser consideradas radiação, temperatura do ar, umidade relativa do ar e a velocidade do vento quando avaliarmos a transpiração. O conteúdo de água do solo e a habilidade do solo para conduzir a água às raízes determinam a taxa de transpiração, influenciam também a água subterrânea e a salinidade da água do solo. A taxa de transpiração também é influenciada por características

da cultura, aspectos ambientais e práticas de cultivo. Tipos diferentes de plantas podem ter taxas de transpiração diferentes. Não só o tipo de cultura, mas também deveriam ser considerados o desenvolvimento da cultura, ambiente e manejo quando estamos avaliando a transpiração.

Evapotranspiração (ET)

Evaporação e transpiração acontecem simultaneamente e não existe nenhum modo prático de distinguir entre os dois processos. Aparte da disponibilidade de água na camada superficial do solo, a evaporação de um solo cultivado é principalmente determinada pela fração da radiação solar que alcança a superfície do solo. Esta fração diminui à medida que a cultura cresce e desenvolve e o dossel sombreia cada vez mais a área de solo. Quando a cultura é pequena, água é predominantemente perdido por evaporação do solo, mas uma vez que a cultura se desenvolve bem e completa a cobertura do solo, a transpiração se torna o processo principal. Na Figura 2 a evapotranspiração é dividida em evaporação e transpiração é relacionada em correspondência com a área foliar por unidade de superfície do solo. No plantio quase 100% da ET vem da evaporação, quanto o sombreamento da cultura se torna maior 90% da ET vem de transpiração.

Unidades

A taxa de evapotranspiração normalmente é expressa em milímetros (mm) por unidade de tempo. A taxa expressa um volume de água perdida por uma superfície plantada, isto é, em unidades de lâmina de água. A unidade de tempo pode ser uma hora, dia, década, mês ou até mesmo um período de crescimento inteiro (ciclo) ou ano. Como um hectare tem uma superfície de 10.000 m² e 1 mm é igual a 0.001 m, uma perda de 1 mm de água corresponde a uma perda de 10 m³ de água por hectare. Em outras palavras, 1 mm dia⁻¹ é equivalente a 10 m³ ha⁻¹ dia⁻¹.

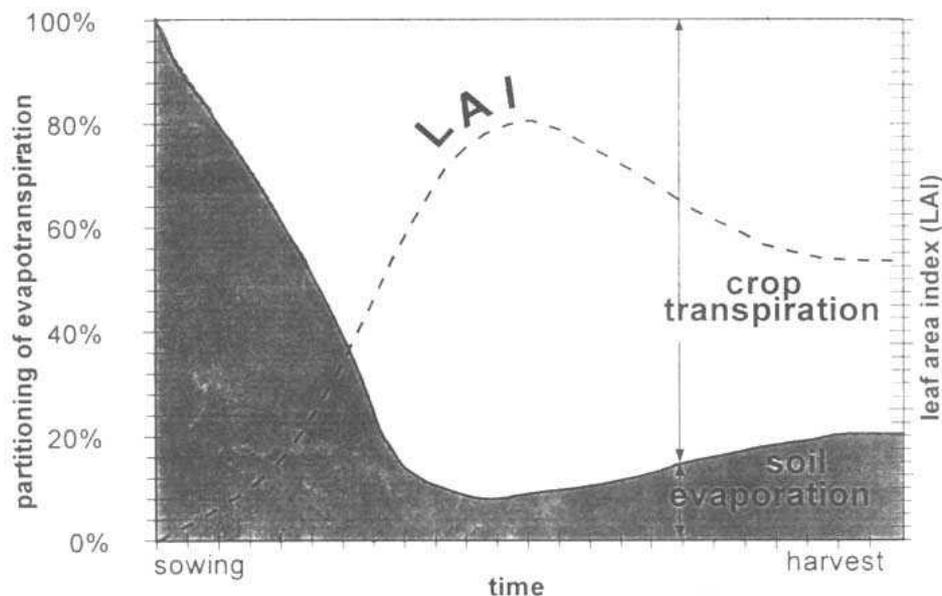


Figura 2. A divisão da evapotranspiração em evaporação e transpiração durante o período de crescimento para uma cultura anual no campo.

Lâminas d'água também podem ser expressas em termos de energia recebida por unidade de área. A energia se refere à energia ou calor necessários para vaporizar água livre. Esta energia, conhecida como o calor latente de vaporização (λ), é uma função da temperatura de água. Por exemplo, a 20°C, λ é aproximadamente 2.45 MJ kg⁻¹. Em outras palavras, são necessários 2.45 MJ para vaporizar 1 kg ou 0.001 m³ de água. Conseqüentemente, uma energia introduzida de 2.45 MJ por m² pode vaporizar 0.001 m ou 1 mm de água, e então 1 mm de água é equivalente a 2.45 MJ m⁻². A taxa de evapotranspiração expressada em unidades de MJ m⁻² dia⁻¹ é representada por λET , o fluxo de calor latente.

A Tabela 1 resume as unidades que expressavam a taxa de evapotranspiração e os fatores de conversão.

TABELA 1. Fatores de converção para evapotranspiração

	lâmina	Volume por unidade de área		energia por unidade de área *
	mm dia ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ dia ⁻¹	l s ⁻¹ ha ⁻¹	MJ m ⁻² dia ⁻¹
1 mm dia⁻¹	1	10	0.116	2.45
1 m³ ha⁻¹ dia⁻¹	0.1	1	0.012	0.245
1 l s⁻¹ ha⁻¹	8.640	86.40	1	21.17
1 MJ m⁻² dia⁻¹	0.408	4.082	0.047	1

* Para água com a densidade de 1000 kg m⁻³ e a 20 °C.

EXEMPLO 1. Evaporação convertendo de uma unidade para outra

Em um dia de verão, energia solar líquida recebida por um lago alcança 15 MJ por metro quadrado por dia. Se forem usados 80% da energia para vaporizar a água, qual a lâmina de evaporação?			
Para a Tabela 1:	$1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1} =$	0.408	mm dia ⁻¹
Então:	$0.8 \times 15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1} = 0.8 \times 15 \times 0.408 \text{ mm dia}^{-1} =$	4.9	mm dia ⁻¹
A taxa de evaporação poderia ser de 4.9 mm/dia			

Fatores que afetam evapotranspiração

Parâmetros meteorológicos, características da cultura, manejo e fatores ambientais são elementos que afetam a evaporação e transpiração. São relacionados e discutidos os conceitos de ET apresentados na Figura 3 na seção de conceitos de evapotranspiração.

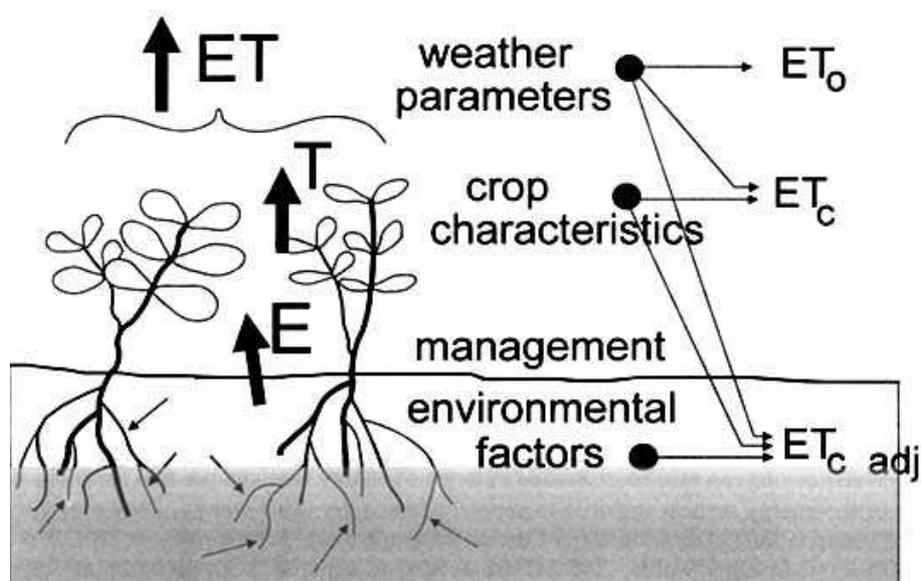


Figura 3. Fatores que afetam a evapotranspiração relacionados como referência para conceitos de ET.

Parâmetros Meteorológicos

Os principais parâmetros meteorológicos que afetam a evapotranspiração são radiação, temperatura e umidade do ar, e velocidade do vento. Foram desenvolvidos vários procedimentos para avaliar a taxa de evaporação destes parâmetros. O poder evaporante da atmosfera é expresso pela evapotranspiração da cultura de referência (ET_0). A

evapotranspiração da cultura de referência representa a evapotranspiração de uma superfície vegetada padrão.

A ETo é descrito em detalhes depois neste Capítulo e nos Capítulos 2 e 4.

Fatores da cultura

Deveriam ser considerados o tipo de cultura, variedade e fase de desenvolvimento quando avaliamos a evapotranspiração das culturas em grandes plantios, bem manejados. Diferenças em resistência para transpiração, altura da cultura, aspereza da cultura, reflexão, cobertura do solo e cultura que tem o sistema radicular bem desenvolvido, essas características resultam em ET diferente em tipos diferentes de culturas sob condições ambientais idênticas. Evapotranspiração da cultura sob condições padrão (ETc) se refere à demanda evaporante da cultura que tem o seu crescimento em grandes áreas em condição de ótima umidade do solo, manejo e condições ambientais excelente, e alcança alta produtividade sob determinadas condições climáticas.

Manejo e condições ambientais

Fatores como salinidade do solo, baixa fertilidade de solo, aplicação limitada de fertilizantes, a presença de horizontes no solo duros ou impenetráveis, a ausência do controle de doenças e pragas e manejo do solo pobre podem limitar o desenvolvimento da cultura e pode reduzir a evapotranspiração. Outros fatores a ser considerado quando avaliamos a ET são a cobertura do solo, densidade de plantas e o conteúdo de umidade do solo. O efeito do conteúdo de água do solo na ET é condicionado principalmente pela magnitude do déficit de água e do tipo de solo. Por outro lado, muita água resultará em saturação do solo que poderia danificar a raiz e a saturação inibindo a respiração da raiz.

Quando avaliamos a taxa de ET, deveria ser dada consideração adicional às práticas de manejo nas que agem os fatores climáticos e da cultura que afetam o processo de ET. Práticas de cultivo e o método de irrigação podem alterar o microclima, pode afetar as características de cultura ou pode afetar o molhamento do solo e da superfície da cultura. Um quebra-vento reduz velocidades do vento e diminuições na taxa de ET do campo diretamente além da barreira. O efeito pode ser significativo especialmente em condições de vento, quente e seco embora a evapotranspiração das árvores possa compensar qualquer redução no campo.

A evaporação do solo em um pomar jovem onde as árvores são amplamente espaçadas, pode ser reduzida usando microaspersão bem projetado ou sistema de irrigação localizada. Os gotejadores aplicam água diretamente no solo próxima as árvores, deixando entre as fileiras a superfície do solo seca, e limitando assim as perdas por evaporação. O uso de coberturas mortas, especialmente quando a cultura é pequena, é outro modo de reduzir evaporação do solo substancialmente. Antitranspirantes, como fechamento-estômatos, material de filme plástico de revestimento ou para refletir, reduz as perdas de água da cultura e conseqüentemente a taxa de transpiração.

Onde as condições de campo diferem das condições padrões, são exigidos fatores de correção para ajustar a ET_c . O ajuste reflete o efeito das condições ambientais e do manejo no campo na evapotranspiração da cultura.

Conceitos de Evapotranspiração

São feitas distinções (Figura 4) entre evapotranspiração da cultura de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura sob condições padrão (ET_c) e evapotranspiração da cultura sob condições não padrão (ET_c adj). ET_o é um parâmetro climático que expressa o poder de evaporação da atmosfera. ET_c se refere às condições excelentes no controle da evapotranspiração, em grandes áreas, bem irrigados que alcançam alta produtividade sob determinadas condições climáticas. Devido às condições de manejo da cultura aquém da ótima e as restrições ambientais que afetam o crescimento da cultura e limita a evapotranspiração, ET_c sob condições não padrão geralmente requer uma correção.

Evapotranspiração da cultura de referência (ET_o)

A taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, sem falta de água, é chamada de evapotranspiração da cultura de referência ou evapotranspiração de referência e é denotado como ET_o . A superfície de referência é uma cultura de grama hipotética com características específicas. O uso de outras denominações como ET potencial é desencorajado fortemente devido a ambigüidades nas definições.

O conceito do evapotranspiração de referência foi introduzido para estudar o poder evaporativo da atmosfera independentemente do tipo de cultura, desenvolvimento da cultura e práticas de manejo. Como a água está abundantemente disponível na superfície

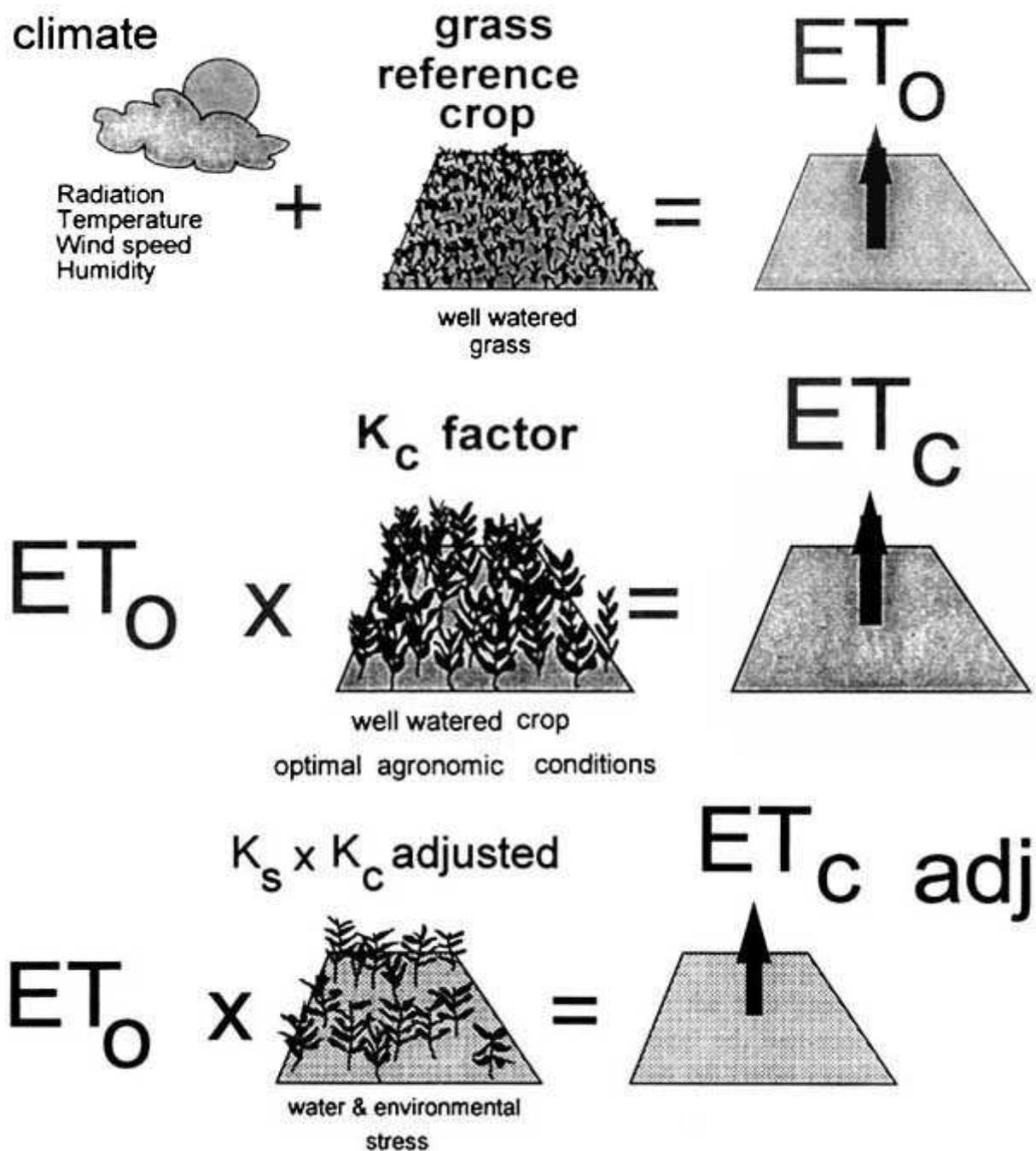


Figura 4. Evapotranspiração de referência (ET₀), evapotranspiração da cultura para condições padrão (ET_c) e condições não padrão (ET_c adj).

evapotranspirométrica de referência, fatores do solo não afetam ET. ET relativa para uma superfície específica promove uma referência para a qual ET de outras superfícies pode ser relacionada. É óbvio a necessidade em definir uma ET para cada cultura e estágio de crescimento. Valores de ET₀ medido ou calculado em diferentes localidades ou em estações diferentes são parecidos entre eles e se referem à ET da mesma superfície de referência.

Os únicos fatores que afetam ETo são os parâmetros climáticos. Por conseguinte, ETo é um parâmetro climático e pode ser calculado de dados climáticos. ETo expressa o poder evaporante da atmosfera em uma localidade específica e a época do ano e não considera as características da cultura e os fatores do solo. O método de Penman-Monteith FAO é recomendado como o método exclusivo para determinar ETo. O método foi selecionado porque aproxima a ETo da grama à localidade avaliada, tem base física, e explicitamente incorpora parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos. Além disso, foram desenvolvidos procedimentos para estimar parâmetros climáticos perdidos.

Valores característicos para ETo para diferentes regiões agro-climáticas são fornecidos na Tabela 2. Pretende-se que os usuários sem experiência se familiarizem com estes valores típicos, e não é recomendado para aplicação direta. O cálculo da evapotranspiração da cultura de referência é discutido na Parte A deste manual (Caixa 1).

TABELA 2. ETo, média para diferentes regiões agro-climáticas em mm/dia

Regiões		Temperatura média do ar (°C)		
		Frio ~10°C	Moderado 20°C	Quente > 30°C
Tropical e subtropical				
	- úmido e sub-úmido	2 - 3	3 - 5	5 - 7
	-árido e semi-árido	2 - 4	4 - 6	6 - 8
Região Temperada				
	- úmido e sub-úmido	1 - 2	2 - 4	4 - 7
	- árido e semi-árido	1 - 3	4 - 7	6 - 9

CAIXA 1. Capítulos relativos ao cálculo do evapotranspiração da cultura de referência (ETo)

PARTE A ----

Capítulo 2 - Equação de Penman-Monteith FAO:

Este capítulo apresenta ao usuário à necessidade para unificar um método para calcular ETo a partir de dados meteorológicos. O método de Penman-Monteith FAO é o recomendado como o método para determinar ETo. São descritos o método e a definição correspondente da superfície de referência.

Capítulo 3 - Dados Meteorológicos:

O método de Penman-Monteith FAO requer os parâmetros climáticos de radiação,

temperatura do ar, umidade do ar e dados de velocidade do vento. São apresentados procedimentos de cálculo para derivar parâmetros climáticos dos dados meteorológicos. São descritos procedimentos para calcular variáveis meteorológicas perdidas e que são necessárias para calcular ETo. Assim, permitindo estimar a ETo com o método de Penman-Monteith FAO sob todas as circunstâncias, até mesmo no caso de perder dados climáticos.

Capítulo 4 - Determinação de ETo:

O cálculo de ETo por meio da equação de Penman-Monteith FAO, com diferentes espaços de tempo, são descritos com parâmetros meteorológicos principais e com dados perdidos. A determinação de ETo utilizando evaporação de tanque também é apresentada.

CAIXA 2. Capítulos relativos ao cálculo de evapotranspiração da cultura sob condições padrão (ETc)

PARTE B ----

Capítulo 5 - Introdução para evapotranspiração da cultura:

Este capítulo apresenta ao usuário a aproximação “Kc ETo” para calcular evapotranspiração da cultura. Os efeitos das características que distinguem culturas do campo da cultura de referência à grama são integrados no coeficiente de cultura Kc. Uma distinção é feita entre dois métodos de cálculo, dependendo do propósito do cálculo, da precisão exigida, dos dados climáticos disponíveis e do espaço de tempo com que os cálculos têm que ser executados.

Capítulo 6 - ETc - Coeficiente de cultura único (Kc):

Este capítulo apresenta o primeiro método de cálculo para evapotranspiração da cultura por meio de que a diferença em evapotranspiração entre a cultura e a superfície de grama de referência é combinada em um único coeficiente de cultura (Kc).

Capítulo 7 - ETc - coeficiente de cultura duplo ($Kc = Kcb + Ke$):

Este capítulo apresenta o outro método de cálculo para evapotranspiração da cultura. Kc é dividido em dois coeficientes separados, um para transpiração da cultura (i.e., o coeficiente de cultura basal Kcb) e um para evaporação do solo (Ke).

Evapotranspiração da cultura sob condições padrão (ETc)

A evapotranspiração da cultura sob condições padrão, denotado como ETc, é a evapotranspiração da cultura livre de doença, bem-fertilizada, plantada em extensas áreas, sob condições de umidade do solo ótimas, e alcançando produção máxima sob determinadas condições climáticas.

A quantidade de água exigida para compensar a perda por evapotranspiração no campo cultivado é definida como exigência de água da cultura. Embora os valores para evapotranspiração da cultura e exigência de água da cultura são idênticos, a exigência de

água da cultura se refere à quantidade de água que precisa ser fornecida, enquanto que a evapotranspiração da cultura se refere à quantidade de água que está sendo perdida por evapotranspiração. A exigência de água de irrigação representa basicamente a diferença entre a exigência de água da cultura e precipitação efetiva. A exigência de água de irrigação também inclui água adicional para lixiviar os sais e para compensar a não uniformidade de aplicação de água. Cálculo da exigência de água de irrigação não é contemplado nesta publicação, mas será o tópico de um artigo futuro de Irrigação e Drenagem.

Podem ser calculados evapotranspiração da cultura de dados climáticos e integrando a resistência da cultura, albedo e fatores de resistência de ar diretamente na aproximação de Penman-Monteith. Como existe ainda uma falta considerável de informação para diferentes culturas, o método de Penman-Monteith é usado para estimar a taxa de evapotranspiração da cultura de referência padrão, i.e., E_{To} . Experimentalmente determinadas relações de E_{Tc}/E_{To} , chamados coeficientes de cultura (K_c), é usado para relacionar E_{Tc} com E_{To} ou seja $E_{Tc} = K_c E_{To}$.

Diferenças na anatomia da folha, características dos estômatos, propriedades aerodinâmicas e albedo causam a diferença entre a evapotranspiração da cultura para a evapotranspiração da cultura de referência sob as mesmas condições climáticas. Devido a variações nas características da cultura ao longo de sua estação de crescimento, ocorrem determinadas mudanças no K_c do plantio até a colheita. O cálculo da evapotranspiração da cultura sob condições padrão (E_{Tc}) é discutido na Parte B deste manual (Caixa 2).

Evapotranspiração da cultura sob condições não padrão (E_{Tc} adj)

A evapotranspiração da cultura sob condições não padrão (E_{Tc} adj) é a evapotranspiração das culturas crescidas sob condições ambientais e de manejo que difere das condições padrão. Quando as culturas são cultivadas em campos, a evapotranspiração real da cultura pode divergir da E_{Tc} devido a condições não ótimas como a presença de pragas e doenças, salinidade de solo, baixa fertilidade do solo, escassez de água ou saturação. Isto pode resultar em crescimento limitado da planta, baixa densidade e pode reduzir a evapotranspiração a taxas abaixo da E_{Tc} .

A evapotranspiração da cultura sob condições não padrão é calculado usando um coeficiente de estresse de água K_s e/ou com ajuste K_c para todos os tipos de outros estresses

e limitações ambientais na evapotranspiração da cultura. Os ajustes para E_{Tc} para estresse de água, manejo e ambientais são discutidos na Parte C deste manual (Caixa 3).

Determinando Evapotranspiração

Medida de ET

Evapotranspiração não é fácil medir. Dispositivos específicos e medidas precisas de vários parâmetros físicos ou o balanço hídrico do solo em lisímetros são exigidos para determinar a evapotranspiração. Os métodos são freqüentemente caros e exigentes em termos de precisão de medida e somente pode ser explorado completamente com pessoal de pesquisa bem treinado. Embora os métodos são impróprios para medidas rotineiras, eles permanecem importantes para a avaliação de estimativas de ET obtida por métodos mais indiretos.

CAIXA 3. Capítulos relativos ao cálculo de evapotranspiração da cultura sob condições não padrão (E_{Tc} adj)

PARTE C ----

Capítulo 8 - E_{Tc} sob condições de estresse da água do solo:

Este capítulo discute a redução na transpiração induzida por estresse da água do solo ou salinidade da água do solo. A evapotranspiração resultante será diferente da evapotranspiração da cultura sob condições padrão. A evapotranspiração é calculada usando um coeficiente de estresse de água, K_s , descrevendo o efeito do estresse da água no solo na transpiração da cultura.

Capítulo 9 - E_{Tc} para vegetação natural, não típica:

São discutidos procedimentos que podem ser usados para fazer ajustes ao K_c para responder por uma quantidade menor do que as condições de crescimento perfeitas ou características padrão. Os procedimentos também podem ser usados para determinar K_c para culturas agrícolas que não foram listadas nas Tabelas da Parte B.

Capítulo 10 - E_{Tc} sob várias práticas de manejo:

Este capítulo discute vários tipos de práticas de manejo que podem causar aos valores de K_c e E_{Tc} para divergir das condições padrão descrito na Parte B. Procedimentos de ajuste para K_c para responder por cobertura de superfície, restos culturais, pequenas áreas de vegetação e manejo que induz ao estresse.

Capítulo 11 - ETc durante períodos de não crescimento:

Este capítulo descreve procedimentos por estimar ETc durante períodos de não crescimento sob vários tipos de condições de superfície.

Balanco de energia e métodos micro-climatológico

Evaporação da água requer quantidades relativamente grandes de energia, na forma de calor sensível ou energia radiante. Então o processo de evapotranspiração é governado através de troca de energia à superfície da vegetação e está limitado pela quantidade de energia disponível. Por causa desta limitação, é possível estimar a taxa de evapotranspiração aplicando o princípio de conservação de energia. A energia que chega à superfície tem que ser igual à energia que deixa a superfície para o mesmo período de tempo.

Devem ser considerados todos os fluxos de energia quando for derivada uma equação de balanço de energia. A equação para uma superfície evaporante pode ser escrita como:

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (1)$$

onde R_n é a radiação líquida, H o calor sensível, G o fluxo de calor do solo e λET o fluxo de calor latente. Os vários termos da Equação (1) podem ser positivos ou negativos. R_n positivo fornece energia para a superfície e G positivo, λET e H removem energia da superfície (Figura 5).

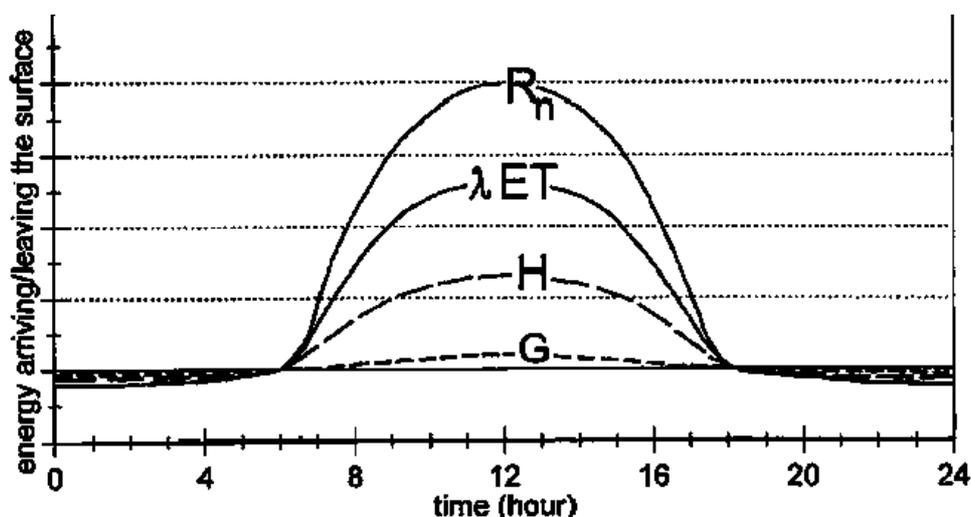


Figura 5. Apresentação esquemática da variação diária dos componentes do balanço de energia sobre uma superfície com umidade transpirando num dia sem nuvens.

Na Equação (1) somente são considerados os fluxos verticais e a taxa líquida à qual está sendo transferida energia horizontalmente, através de advecção, é ignorada. Então a

equação somente será aplicada a superfícies grandes e extensas de vegetação homogênea. A equação é restringida aos quatro componentes: R_n , λET , H e G . Outras condições de energia, como calor armazenado ou liberado pela planta, ou a energia utilizada em atividades metabólicas, não são consideradas.

Estas condições respondem por somente uma fração pequena da radiação líquida diária e podem ser consideradas desprezíveis quando comparadas com os outros quatro componentes.

O fluxo de calor latente (λET) representando a fração de evapotranspiração podem ser derivados da equação de Balanço de energia se todos os outros componentes são conhecidos. Radiação líquida (R_n) e fluxos de calor do solo (G) podem ser medidos ou podem ser estimados de parâmetros climáticos. Medida do calor sensível (H) é porém complexo e não pode ser obtido facilmente. H requer medida precisa de gradientes de temperatura sobre a superfície.

Outro método para calcular a evapotranspiração é o método de transferência de massa. Esta aproximação considera o movimento vertical de pacotes pequenos de ar (turbilhão) sobre uma superfície homogênea grande. O turbilhão transporta material (vapor de água) e energia (calor, momentum) da e para a superfície evaporante. Assumindo condições de estado fixo e que os coeficientes de transferência de turbilhão para vapor de água são proporcionais a esses para calor e momentum, a taxa de evapotranspiração pode ser computada dos gradientes verticais de temperatura de ar e vapor de água pela relação de Bowen. Outros métodos de medida diretos usam gradientes de velocidade do vento e vapor de água. Estes métodos e outros métodos como covariância de turbilhão, requer medida precisa de pressão de vapor, e temperatura do ar ou velocidade do vento a níveis diferentes sobre a superfície. Então, sua aplicação é restringida para situações de pesquisa principalmente.

Balanço de água no solo

Evapotranspiração também pode ser determinado medindo os vários componentes do Balanço de água no solo. O método consiste em avaliar o fluxo de água que entra e que sai da zona radicular da cultura em um dado período de tempo (Figura 6). Irrigação (I) e chuva (P) adicionam água para a zona radicular. Parte da I e P poderia ser perdida através do escoamento superficial (RO) e através de percolação profunda (DP) isso eventualmente irá recarregar o lençol freático. A água também poderia ser transportada para cima através da

ascensão capilar (CR) do lençol freático menos profundo para a zona radicular ou até mesmo transferida horizontalmente através do escoamento subsuperficial para dentro (SFin) ou para fora da zona radicular (SFout). Em muitas situações, porém, com grandes declividades, SFin e SFout são secundários e podem ser ignorados. A evaporação do solo e a transpiração da cultura retiram água da zona radicular. Se todos os fluxos diferentes de evapotranspiração (ET) podem ser avaliados, a evapotranspiração pode ser deduzida da mudança em conteúdo de água de solo (ΔSW) dentro do período de tempo considerado:

$$ET = I + P - RO - DP + CR \pm \Delta SF \pm \Delta SW \quad (2)$$

Alguns fluxos como escoamento subsuperficial, percolação profunda e ascensão capilar são difíceis de serem avaliados e não podem ser considerados em períodos de tempo pequenos. O método de Balanço de água no solo normalmente somente pode calcular a ET para períodos de tempo longos da ordem de uma semana ou períodos de dez dias.

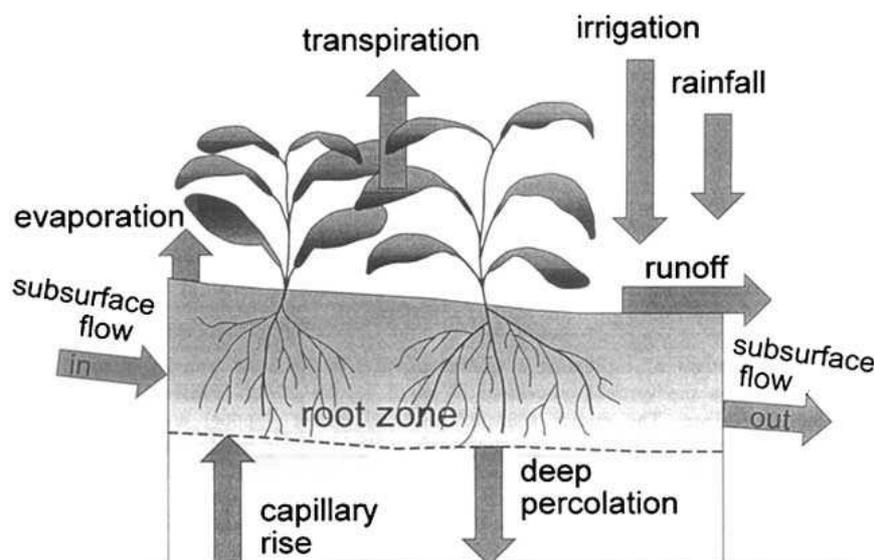


Figura 6. Balanço de água no solo na zona radicular.

Lisímetros

Isolando a zona radicular da cultura de seu ambiente e controlando os processos que são de difícil medida, os termos especiais na equação do balanço de água no solo podem ser determinados com maior precisão. Isto é feito em lisímetros onde a cultura se desenvolve em tanques isolado preenchido com solo desestruturado ou estruturado. O lisímetros de pesagem, onde a perda de água é diretamente medida pela mudança da massa, pode ser obtida a evapotranspiração com uma precisão de alguns centésimo de milímetro, e podem ser considerados períodos de tempo pequenos como uma hora. Nos lisímetros de percolação a

evapotranspiração para um determinado período de tempo é determinado deduzindo a água de drenagem, coletada ao fundo do lisímetro, da água total aplicada.

Uma exigência dos lisímetros é que a vegetação de dentro e da circunvizinhança do lisímetro tenha um emparelhado perfeito (mesma altura e índice de área de folha). Esta exigência não foi com atenção adotada historicamente numa maioria de estudos de lisímetro e resultou em erros severos e os dados não foram representativos de E_{Tc} e K_c .

Como lisímetros é difícil e caro construir e como a sua operação e manutenção requerem cuidados especiais, o uso deles é limitado a propósitos de pesquisa específica.

ET calculado de dados meteorológicos

Devido à dificuldade de obter medidas de campo precisas, ET é calculada comumente de dados meteorológicos. Um número grande de equações empíricas ou semi-empíricas foi desenvolvido para avaliar a evapotranspiração da cultura ou da cultura de referência a partir de dados meteorológicos. Alguns dos métodos são somente válidos sob condições climáticas e agronômicas específicas e não podem ser aplicados sob condições diferentes das quais eles foram desenvolvidos originalmente.

Numerosos investigadores têm analisado o desempenho dos vários métodos de cálculo para localizações diferentes. Como resultado de uma Consulta Especializada em maio de 1990, o método de Penman-Monteith FAO é recomendado agora como o método padrão para a definição e cálculo da evapotranspiração de referência, E_{To} . A ET para superfícies com cultura sob condições padrão é determinado através do coeficiente de cultura (K_c) este relaciona E_{Tc} com E_{To} . A ET de superfícies com cultura sob condições não padrão é ajustado por um coeficiente de estresse de água (K_s) e/ou modificando o coeficiente de cultura (K_c).

ET estimada por evaporação de tanque

Evaporação de uma superfície de água livre fornece um índice do efeito integrado de radiação, temperatura e umidade do ar e velocidade do vento na evapotranspiração. Porém, diferenças na superfície de água livre e da cultura produzem diferenças significantes na perda de água de nessas superfícies. O tanque demonstrou seu valor prático e foi de forma bem sucedida usado para estimar evapotranspiração de referência observando a perda de

evaporação de uma superfície de água e coeficientes empíricos aplicando relacionar evaporação de tanque para ETo. O procedimento é esboçado no Capítulo 3.

Parte A - Evapotranspiração de referência (ETo)

Parte A explica a relação entre evapotranspiração e a superfície de referência, denominada evapotranspiração da cultura de referência ou evapotranspiração de referência, denotados como ETo. A superfície de referência é uma grama hipotética como cultura de referência assumindo uma altura de 0.12 m, uma resistência de superfície fixa de 70 s m^{-1} e um albedo de 0.23. A superfície de referência se assemelha a uma superfície extensa de grama verde, sem restrições de água e altura uniforme, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo. A resistência de superfície fixa de 70 s m^{-1} implica numa superfície de solo moderadamente seca resultado de uma frequência de irrigação semanal.

ETo pode ser calculada de dados meteorológicos. Como resultado de uma Consulta de Especialista realizada em maio de 1990, o método da FAO Penman-Monteith foi recomendado como o único método padrão para a definição e estimativa da evapotranspiração de referência. O método de FAO Penman-Monteith requer os parâmetros meteorológicos de radiação, temperatura e umidade do ar e dados de velocidade do vento. Procedimentos de cálculo para estimar parâmetros climáticos de dados meteorológicos e estimar variáveis meteorológicas perdidas que são requeridas para calcular ETo é apresentado nesta Parte (Capítulo 3). Os procedimentos de cálculo nesta Publicação permitem estimação de ETo com o método de FAO Penman-Monteith sob todas as circunstâncias, até mesmo no caso de perder dados climáticos.

ETo também pode ser calculado de evaporação de tanque. Os tanques demonstraram o seu valor prático e foram utilizados com sucesso na estimativa da ETo observando a perda de água do tanque e usando coeficientes empíricos para relacionar evaporação do tanque com ETo. Porém, precauções especiais e manejo do tanque devem ser utilizados.

Capítulo 2 - Equação de FAO Penman-Monteith

Neste capítulo apresenta ao usuário a necessidade de unificar um método para estimar evapotranspiração de referência (ETo) de dados meteorológicos. O método de FAO Penman-

Monteith é recomendado como o único método para determinar evapotranspiração de referência (ET_o). São descritos o método, sua derivação, os dados meteorológicos exigidos e a definição correspondente da superfície de referência neste capítulo.

Método padrão para estimar ET_o

Um número grande de métodos empíricos foi desenvolvido durante os últimos 50 anos por numerosos cientistas e especialistas do mundo para calcular evapotranspiração de variáveis climáticas diferentes. As relações estavam freqüentemente sujeito a calibrações locais rigorosas e provaram ter limitado validade global. Testar a precisão dos métodos sob um conjunto novo de condições é laborioso, demorado e caro, e mesmo assim freqüentemente são necessários dados urgentes de evapotranspiração para projeto ou planejamento de irrigação. Para satisfazer esta necessidade, foram desenvolvidas diretrizes e foram publicadas no artigo Irrigação e Drenagem FAO N°. 24 “Exigências de água da cultura”. Para facilitar aos usuários com disponibilidade de dados diferente, foram apresentados quatro métodos para calcular a evapotranspiração da cultura de referência (ET_o): Blaney-Criddle, Radiação, Penman modificado e métodos de evaporação de tanque. Era considerado que o método de Penman modificado oferecia os melhores resultados com possível erro mínimo em relação a uma cultura de referência a grama em pleno desenvolvimento. Era esperado que o método do tanque desse estimativa aceitáveis e dependeria da localização do tanque. O método de radiação foi sugerido para áreas onde dados climáticos disponíveis incluíssem medidas de temperatura do ar e insolação, nebulosidade ou radiação, mas não medida de velocidade do vento e umidade do ar. Finalmente, a publicação propôs o uso do método de Blaney-Criddle para áreas onde dados climáticos disponíveis somente fossem de temperatura do ar.

Estes métodos climáticos para calcular ET_o eram todos calibrados para períodos de dez dias ou mensais, não para cálculos diários ou de hora em hora. O método de Blaney-Criddle foi recomendado para períodos de um mês ou mais tempo. Para o método do tanque foi sugerido que deveria ser feito cálculo para períodos de dez dias ou um tempo maior. Os usuários geralmente não respeitavam estas condições e freqüentemente os cálculos foram utilizados para uso diário.

Os avanços nas pesquisas e conseqüentemente estimativas mais precisa do uso de água da cultura revelaram falhas nas metodologias. Foram feitas numerosas análises por pesquisadores do desempenho dos quatro métodos para localizações diferentes. Embora os

resultados de tais análises pudessem ter sido influenciados pelo local ou condições de medida ou por desvios na coleção dos dados meteorológicos, ficou evidente que os métodos propostos não se comportam do mesmo modo em localizações diferentes ao redor do mundo. Divergências de estimativa de valores observados foi freqüentemente encontrado excedendo os valores estimados pelo novo método da FAO. O Penman modificado freqüentemente superestimava ETo, em até 20% para condições evaporativas baixas. O novo método FAO mostrou que as equações recomendadas tinham aderência variável à cultura de referência grama para evapotranspiração padrão.

Para avaliar o desempenho destes e outros procedimentos de estimação sob condições climatológicas diferentes, um estudo principal foi empreendido sob os patrocínios do Comitê em Exigências de Água de Irrigação da Sociedade americana de Engenheiros Civis (ASCE). A ASCE estudaram e analisaram o desempenho de 20 métodos diferentes e usam procedimentos detalhados para avaliar a validade dos métodos e comparou a um conjunto de dados de lisímetros cuidadosamente analisados de 11 localizações com condições climáticas variáveis. O estudo comprovou e mostrou o desempenho amplo e variado dos métodos sob condições climáticas diferentes. Em um estudo paralelo feito pela Comunidade Européia, um consórcio de instituto de pesquisa europeu foram avaliados o desempenho de vários métodos de estimativa da evapotranspiração usando dados de lisímetros em diferentes regiões na Europa.

Os estudos confirmam a superestimação do Penman modificado introduzido pelo artigo Irrigação e Drenagem FAO N^o 24, e o desempenho variável dos métodos diferentes que dependem da adaptação a condições locais. Os estudos comparativos podem ser resumidos como segue:

- Os métodos de Penman podem exigir uma calibração local da função do vento para alcançar resultados satisfatórios.
- Os métodos de radiação mostraram resultados bons em climas úmidos onde o termo aerodinâmico é relativamente pequeno, mas o desempenho em condições áridas é irregular e tende a subestimar a evapotranspiração.
- Métodos de temperatura permanecem empíricos e requerem calibração local para alcançar resultados satisfatórios. Uma possível exceção é o método de Hargreaves 1985 que mostrou ETo razoável resultando com uma validade global.
- Métodos de Tanque para estimar evapotranspiração refletem claramente a deficiência de estimar a evapotranspiração da cultura da evaporação de água livre. Os métodos são

suscetíveis às condições microclimáticas sob as quais os tanques estão operando e o rigor necessário da manutenção da estação. O desempenho prova ser irregular.

· O desempenho relativamente preciso e consistente da aproximação de Penman-Monteith em climas áridos e úmidos foi indicado pela ASCE e no estudo Europeu.

A análise do desempenho dos vários métodos de cálculo revela a necessidade por formular um método padrão para estimar a ETo . O método de FAO Penman-Monteith é recomendado como o método padrão exclusivo. É um método consistente para estimar ETo corretamente numa grande variedade de localização e climas e têm condições para aplicação em situações com pequenas quantidades de dados. O uso de artigo mais velho da FAO ou outra referência já não são recomendados como métodos para estimar ET.

Formulação da equação de Penman-Monteith

Equação de Penman-Monteith

Em 1948, Penman combinou o balanço de energia com o método de transferência de massa e derivou uma equação para estimar a evaporação de uma superfície de água livre de registros climatológicos padrão como insolação, temperatura, umidade e velocidade do vento. Este método foi denominado de combinado e foi desenvolvido mais adiante por muitos pesquisadores e foi estendido a superfícies com cultura introduzindo fatores de resistência.

A nomenclatura resistência diferencia entre resistência aerodinâmica e resistência de superfície (Figura 7). Os parâmetros de resistência de superfície são combinados freqüentemente em um parâmetro, a “espessura” parâmetro de resistência de superfície que opera em série com a resistência aerodinâmica. A resistência de superfície, r_s , descreve a resistência do fluxo de vapor através de abertura estomatal, área foliar total e superfície do solo. A resistência aerodinâmica, r_a , descreve a resistência acima da vegetação e envolve fricção do ar que flui em cima de superfícies vegetais. Embora o processo de troca em uma camada de vegetação é muito complexo para ser descrito completamente pelos dois fatores de resistência, boas correlações podem ser obtidas entre a taxa de evapotranspiração medida e calculada, especialmente para uma superfície de referência com grama uniforme.

O método de Penman-Monteith é formado da equação combinada:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (3)$$

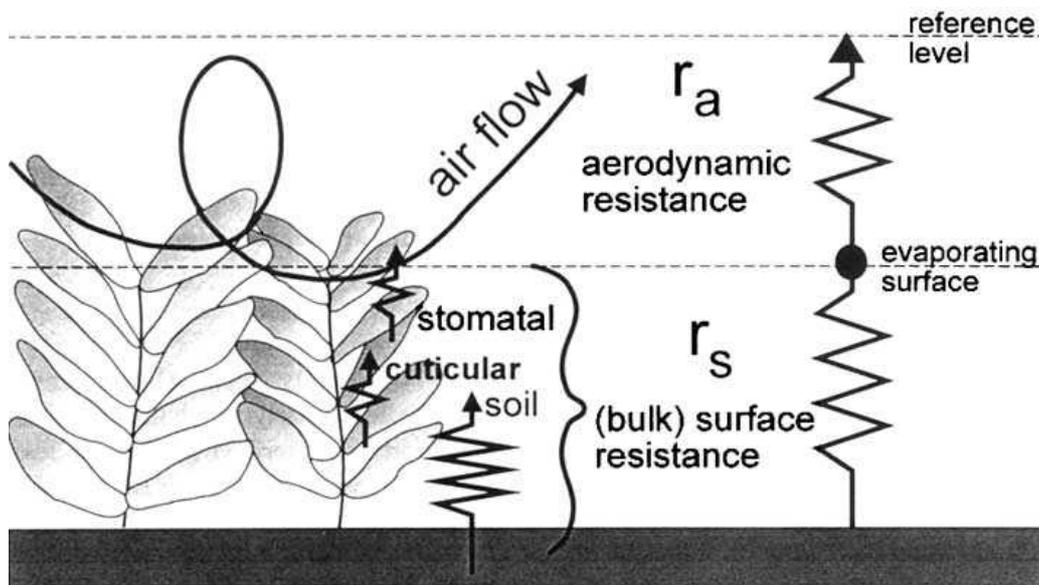


Figura 7. Representação simplificada das (espessura) resistências de superfície e aerodinâmicas para o fluxo de vapor de água.

onde R_n é a radiação líquida, G é o fluxo de calor do solo, $(e_s - e_a)$ representa o déficit de pressão do vapor no ar, ρ_a é a densidade média do ar a pressão constante, c_p é o calor específico do ar, Δ representa a declividade da curva da relação entre a pressão de saturação do vapor e a temperatura média do ar, γ é a constante de psicrométrica, e r_s e r_a são as (espessura) resistências de superfície e aerodinâmicas respectivamente. São definidos os parâmetros da equação no Capítulo 3.

O método Penman-Monteith como formulado acima inclui todos os parâmetros que governam a troca de energia e o correspondente fluxo de calor latente (evapotranspiração) para a vegetação uniforme e extensa. A maioria dos parâmetros é medida ou pode ser calculado prontamente de dados meteorológicos. A equação pode ser utilizada para o cálculo direto da evapotranspiração de qualquer cultura conforme as resistências de superfície e aerodinâmicas da cultura específica.

Resistência aerodinâmica (r_a)

A transferência de calor e vapor d'água da superfície evaporante para o ar em cima do dossel é determinada pela resistência aerodinâmica:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right]}{k^2 u_z} \quad (4)$$

onde

r_a = resistência aerodinâmica [$s\ m^{-1}$],

z_m = altura de medidas do vento [m],

z_h = altura de medidas de umidade [m],

d = plano zero, altura de deslocamento [m],

z_{om} = comprimento da rugosidade transferência de domínio do momentum [m],

z_{oh} = comprimento da rugosidade transferência de domínio de calor e vapor [m],

k = constante de von Karman, 0.41 [-],

u_z = velocidade do vento a altura z [$m\ s^{-1}$].

A equação é restrita para condições de estabilidade neutras, i.e., onde temperatura, pressão atmosférica, e distribuições da velocidade do vento seguem quase que em condições adiabáticas (nenhuma troca de calor). A aplicação da equação para períodos de tempo pequenos (de hora em hora ou menor) pode requerer a inclusão de correções para estabilidade. Porém, quando utilizada para estimar ETo a superfície de referência bem umedecida, o calor trocado é pequeno, e então a correção de estabilidade normalmente não é requerida.

Muitos estudos exploraram a natureza do regime do vento no dossel da planta. Zerar as alturas de deslocamento e comprimento de rugosidade tem que ser consideradas quando a superfície é coberta por vegetação. Os fatores dependem da altura e da arquitetura da cultura. Várias equações empíricas foram desenvolvidas para a estimativa de d , z_{om} e z_{oh} . A derivação da resistência aerodinâmica para a superfície de referência de grama é apresentada na Caixa 4.

Resistência (espessura) de superfície (r_s)

A resistência “espessura” da superfície descreve a resistência ao fluxo de vapor através da transpiração da cultura e evaporação da superfície do solo. Onde a vegetação não

cobre completamente o solo, o fator de resistência deveria incluir os efeitos da evaporação real da superfície do solo. Se a cultura não está transpirando a uma taxa potencial, a resistência também depende do status da água na vegetação. Uma aproximação aceitável para uma relação muito mais complexa da resistência de superfície para uma cobertura vegetal densa e cheia é:

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{ativo}} \quad (5)$$

onde

r_s (espessura) resistência da superfície [$s\ m^{-1}$],

r_l resistência dos estômatos da folha bem iluminada [$s\ m^{-1}$],

LAI_{ativo} índice de área foliar ativo (iluminado pelo sol) [m^2 (área de folha) m^{-2} (superfície de solo)].

CAIXA 4. A resistência aerodinâmica para a superfície de referência grama

Para um grande número de culturas o plano zero, altura de deslocamento, d [m], e o comprimento de rugosidade transferência de domínio de momentum, z_{om} [m], podem ser calculados a partir da altura da cultura h [m] pelas seguintes equações:

$$d = 2/3 h$$

$$z_{om} = 0.123 h$$

O comprimento de rugosidade transferência de domínio de calor e vapor, z_{oh} [m], pode ser aproximado por:

$$z_{oh} = 0.1 z_{om}$$

Assumindo uma altura da cultura constante de 0.12 m e uma altura unificada para medidas da velocidade do vento, temperatura e umidade a 2 m ($z_m = z_h = 2$ m), a resistência aerodinâmica r_a [$s\ m^{-1}$] para a superfície de referência de grama se torna (Eq. 4):

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{2 - 2/3(0.12)}{0.123(0.12)}\right] \ln\left[\frac{2 - 2/3(0.12)}{(0.1)0.123(0.12)}\right]}{(0.41)^2 u_2} = \frac{208}{u_2}$$

onde u_2 é a velocidade do vento [$m\ s^{-1}$] a 2 m de altura.

O Índice de Área foliar (IAF), um valor adimensional, é a área foliar (lado superior somente) por unidade de área do solo. É expresso como m^2 de área foliar por m^2 de área de solo. O IAF ativo é o índice da área foliar que ativamente contribui para o calor da superfície e a transferência do vapor d'água. Geralmente é a parte superior, iluminado pelo sol de um

denso dossel. O IAF estimado para várias culturas difere amplamente mas valores de 3-5 são comuns para muitas culturas maduras. Para uma determinada cultura, IAF ativo muda ao longo do ciclo e normalmente alcança seu máximo antes ou ao florescer (Figura 8). IAF depende da densidade de plantio e da variedade da cultura.

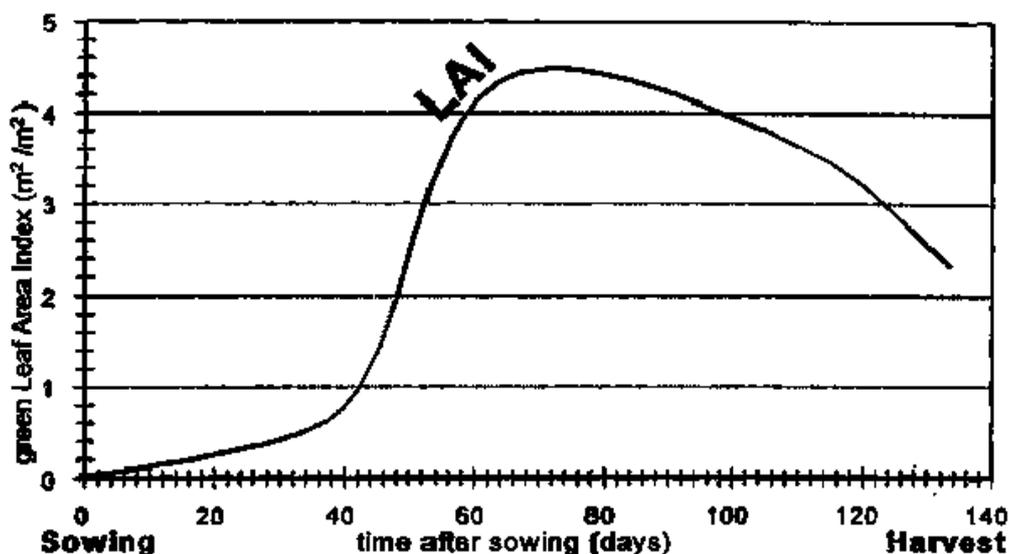


Figura 8. Apresentação típica da variação do Índice de Área foliar ativo (verde) num ciclo completo para uma cultura de milho

A espessura da resistência estomatal, r_1 , é a resistência média de uma folha individual. Esta resistência é específica da cultura e difere entre variedades e o manejo da cultura. Normalmente aumenta com a idade da cultura e começo do amadurecimento. Porém, existe uma falta de informação consolidada nas mudanças em r_1 com o passar do tempo para as diferentes culturas. A informação disponível na literatura em condutância estomatal ou resistência é orientada freqüentemente para fisiologia ou estudos de eco-fisiologia.

A resistência estomatal, r_1 , é influenciada pelo clima e pela disponibilidade de água. Porém, influências variam de uma cultura a outra e podem ser afetadas por variedades diferentes. A resistência aumenta quando a disponibilidade de água no solo limita a evapotranspiração da cultura. Alguns estudos indicam que a resistência estomatal é influenciada até certo ponto por intensidade de radiação, temperatura, e déficit de pressão do vapor. A derivação da resistência de superfície para a superfície de referência de grama é apresentada na Caixa 5.

CAIXA 5. A (espessura) resistência da superfície para uma cultura de referência de grama

A equação geral para IAF_{ativo} é:

$$IAF_{\text{ativo}} = 0.5 IAF$$

que leva em conta o fato que geralmente somente a metade superior da grama é cortada, a grama é densa contribuindo ativamente para o calor da superfície e transferência do vapor. Para grama cortada a equação geral para IAF é:

$$IAF = 24 h$$

onde h é a altura da cultura [m].

A resistência estomatal, r_i , de uma única folha tem um valor de cerca de 100 s m^{-1} sob a condição de umidade do solo ótima. Assumindo uma altura da cultura de 0.12 m, a resistência de superfície, r_s [s m^{-1}], para a superfície de referência de grama se torna (Eq. 5):

$$r_s = \frac{100}{0.5(24)(0.12)} \approx 70 \text{ s m}^{-1}$$

Superfície de referência

Para evitar a necessidade de definir um parâmetro exclusivo de evaporação para cada cultura e estágio de crescimento, foi introduzido o conceito de uma superfície de referência. A taxa de evapotranspiração das várias culturas é relacionado à taxa de evapotranspiração da superfície de referência (ET_o) por meio de coeficientes de cultura.

No passado, uma superfície de água livre foi proposta como uma superfície de referência. Porém, as diferenças na aerodinâmica, controle da vegetação e características de radiação apresenta uma forte recusa na relação entre ET e medidas de evaporação de água livre. Relacionado ET_o com uma cultura específica tem a vantagem de incorporar os processos biológicos e físicos envolvidos na ET de superfícies vegetada.

Grama, juntamente com alfafa, é uma cultura bastante estudada em relação as suas características aerodinâmicas e de superfície tem aceitação mundial como uma superfície de referência. Porque a resistência para difusão do vapor depende fortemente da altura da cultura, sombreamento do solo, condição do IAF e umidade do solo, deveriam ser bem definidas as características da cultura de referência e deveriam ser fixadas. Mudança na altura da cultura tem variações na rugosidade e IAF. Por conseguinte, a associação do dossel com as resistências aerodinâmicas variarão apreciavelmente com tempo. Além disso, estresse de água e o grau de sombreamento do solo têm um efeito nas resistências e também no albedo.

Para evitar problemas de calibração local que requereria tempo e estudos caros, foi admitidas uma referência com uma grama hipotética. Dificuldades com resultado de

referência de grama viva podem ocorrer pelo fato que a variedade de grama e morfologia podem afetar significativamente a taxa de evapotranspiração, especialmente durante uso de água máxima. Grandes diferenças podem existir entre época quente e fria e tipos de grama. Gramas de estação fria têm um mais baixo grau de controle estomatal e conseqüentemente taxas mais altas de evapotranspiração. Podem ser difícil de cultivar gramas de estação fria em alguns climas áridos, tropicais.

A Consulta de Especialista para a Revisão de Metodologias da FAO para Exigências de Água da Cultura aceitaram a definição não ambígua para a superfície de referência:

“Uma cultura de referência hipotética com uma altura assumida de 0.12 m, uma resistência de superfície fixa de 70 s m^{-1} e um albedo de 0.23”.

A superfície de referência se assemelha a uma superfície extensa de grama verde de altura uniforme, crescendo ativamente, cobrindo o solo completamente e com água adequada. As exigências que a superfície de grama deveria ser extenso e uniforme resulta da hipótese que todos os fluxos são unidimensional para cima.

O método de FAO Penman-Monteith é selecionado como o método pelo qual a evapotranspiração desta superfície de referência (E_{To}) é determinado de uma forma não ambígua, e como o método que consistentemente estima valores de E_{To} em todas as regiões e climas.

Equação de FAO Penman-Monteith

Equação

Foi feita uma consulta de peritos e pesquisadores organizados pela FAO em maio de 1990, em colaboração com a Comissão Internacional para Irrigação e Drenagem e com a Organização Meteorológica Mundial, para revisar e atualizar as metodologias e procedimentos propostas pela FAO nas exigências de água da cultura.

A equipe de peritos recomendou a adoção do método combinado de Penman-Monteith como novo padrão para estimar a evapotranspiração de referência e aconselhou os procedimentos para cálculo dos vários parâmetros. Definindo a cultura de referência como uma cultura hipotética com uma altura assumida de 0.12 m que têm uma resistência de

superfície de 70 s m^{-1} e um albedo de 0.23, se assemelhando à evaporação de uma superfície extensa de grama verde de altura uniforme, em crescimento ativo e com a umidade do solo adequada, foi desenvolvido o método de FAO Penman-Monteith. O método supera as desvantagens do método anterior de Penman FAO e fornece valores mais consistentes com o uso de água pela cultura real com dados mundial.

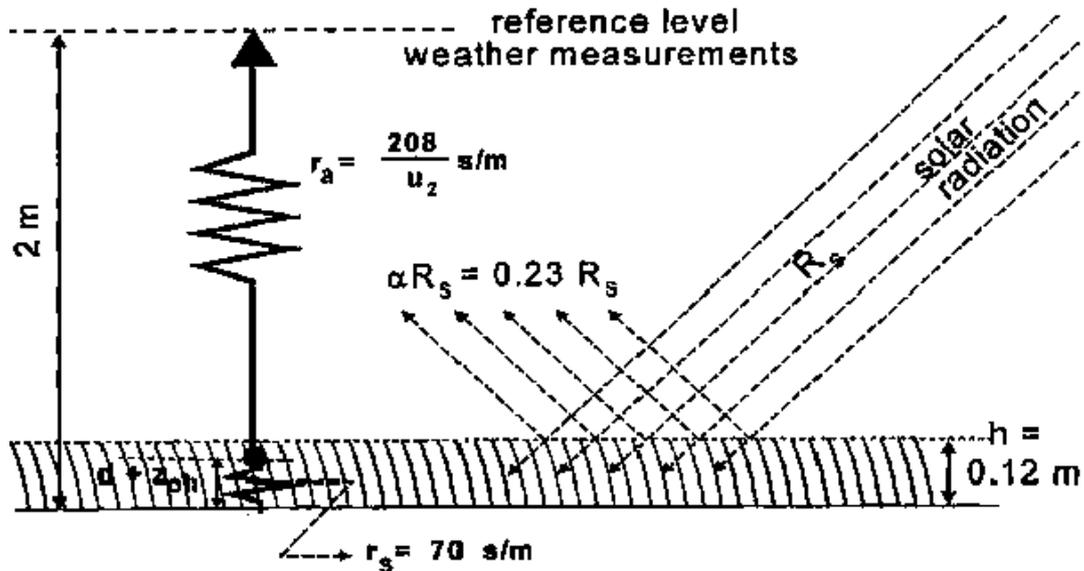


Figura 9. Características da cultura hipotética de referência

Da equação de Penman-Monteith original (Equação 3) e as equações de resistência aerodinâmica (Equação 4) e superfície (Equação 5), o método de FAO Penman-Monteith para calcular ET_o pode ser derivado (Caixa 6):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (6)$$

onde

- ET_o = evapotranspiração de referência [mm dia^{-1}],
- R_n = radiação líquida à superfície de cultura [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],
- G = densidade do fluxo de calor do solo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],
- T = temperatura do ar média diária a 2 m de altura [$^{\circ}\text{C}$],
- u_2 = velocidade do vento a 2 m de altura [m s^{-1}],
- e_s = pressão do vapor de saturação [kPa],
- e_a = pressão do vapor atual [kPa],
- $e_s - e_a$ = déficit de pressão do vapor de saturação [kPa],

Δ = declividade da curva de pressão do vapor [kPa °C⁻¹],

γ = constante psicrométrica [kPa °C⁻¹].

A evapotranspiração de referência, E_{To} , fornece um padrão no qual:

- evapotranspiração de períodos diferentes do ano ou de outras regiões podem ser comparados;
- podem ser relacionados evapotranspiração de outras culturas.

A equação usa registros climatológico padrão de radiação solar (insolação), temperatura do ar, umidade e velocidade do vento. Para assegurar a integridade das estimativas, as medidas dos parâmetros climáticos deveriam ser feitas a 2 m (ou converter àquela altura) sobre uma superfície extensa de grama verde, cobrindo o solo e sem falta de água.

Pode ser esperado que nenhuma equação de evapotranspiração baseada em dados meteorológicos estime evapotranspiração perfeitamente sob toda situação climática devido à simplificação na formulação e erros nas medidas dos dados. É provável que aquela precisão instrumental sob condições excelentes de manejos ambientais e biológicas mostrará para a equação FAO Penman-Monteith pode às vezes divergir de medidas verdadeiras de E_{To} grama. Porém, os Especialistas concordaram em usar a definição de referência hipotética da equação de FAO Penman-Monteith como a definição para E_{To} grama quando derivaram e expressaram os coeficientes de cultura.

É importante, quando comparar a equação de FAO Penman-Monteith para medidas de E_{To} , com a equação de Penman-Monteith completa (Equação 3) associadas às equações r_a e r_s (Equações 4 e 5) tem sido usada como resposta para variação na ET devido à variação na altura da grama. Variações na altura podem mudar IAF, d e z_{om} e conseqüentemente a medida e estimativa de E_{To} . Quando estiver avaliando os resultados, deve ser notado que o ambiente local e manejo, como frequência de irrigação, também afetam observações de E_{To} .

A equação FAO Penman-Monteith é em conclusão, uma representação simples dos fatores físicos e fisiológicos que governam o processo de evapotranspiração. Usando a definição de FAO Penman-Monteith para E_{To} , o usuário pode calcular coeficientes de cultura em locais de pesquisa relacionando a evapotranspiração da cultura medido (E_{Tc}) com o E_{To} calculado, i.e., $K_c = E_{Tc}/E_{To}$. Na aproximação do coeficiente de cultura, as diferenças nas resistências de superfície e aerodinâmica da cultura em relação à cultura hipotética de

referência são considerados integrados ao coeficiente de cultura. O fator Kc serve como uma agregação das diferenças físicas e fisiológicas entre as culturas e a cultura de referência.

Dados

Alem da localização, a equação de FAO Penman-Monteith requer temperatura do ar, umidade, radiação e dados de velocidade do vento diário, semanalmente, dez dias ou mensal. O cálculo de todos os dados requerido para calcular a evapotranspiração de referência é determinada no Capítulo 3. É importante verificar as unidades nas quais os dados de clima são informados. São apresentados fatores para converter unidades comuns para a unidade padrão no Anexo I.

Localização

Altitude (m) e latitude (norte ou sul) da localização deve ser especificado. Estes dados são necessários para ajustar alguns parâmetros meteorológicos para o local o valor médio da pressão atmosférica (função da elevação média local sobre o nível do mar) e estimar radiação extraterrestre (Ra) e, em alguns casos, horas de luz máxima do dia (N). Nos procedimentos de cálculo para Ra e N, a latitude é expressada em radianos (i.e., graus decimais x $\pi / 180$).

CAIXA 6. Derivação da equação de FAO Penman-Monteith para a cultura de referência grama hipotética

Com altura padronizada para medidas de velocidade do vento, temperatura e umidade a 2 m ($z_m = z_h = 2$ m) e a altura de cultura $h = 0.12$ m, as resistências aerodinâmicas e de superfície se tornam (Caixas 4 & 5):

$$\begin{aligned} r_a &= 208/u_2 \text{ s m}^{-1}, \text{ (com } u_2 \text{ velocidade do vento a 2 m de altura)} \\ r_s &= 70 \text{ s m}^{-1} \\ (1 + r_s/r_a) &= (1 + 0.34 u_2) \end{aligned}$$

Rn e G é energia disponível por unidade de área e expressa em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Converter as unidades de energia de radiação para equivalentes lâminas de água (mm) o calor latente de vaporização, λ é usado como um fator de conversão (Capítulo 1). A conversão dos valores de energia para equivalentes lâminas de água ou vice-versa é determinado por (Eq. 20):

$$\text{Radiation}[\text{mm day}^{-1}] \approx \frac{\text{Radition}[\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}]}{2.45} = 0.408 \text{Radiation}[\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}]$$

Substituindo c_p com uma reestruturação da Eq. 8:

$$c_p = \frac{\gamma \varepsilon \lambda}{P}$$

e considerando a lei de gás ideal para ρ_a :

$$\rho_a = \frac{P}{T_{Kv} R}$$

onde T_{Kv} a temperatura virtual, pode ser substituído por:

$$T_{Kv} = 1.01(T+273)$$

resulta em:

$$\frac{c_p \rho_a}{r_a} = \frac{\gamma \varepsilon \lambda}{1.01(T+273)R(208)} u_2 \quad [\text{MJ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ dia}^{-1}]$$

onde

- c_p = calor específico à pressão constante [$\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$],
- ρ_a = densidade média do ar à pressão constante [kg m^{-3}],
- r_a = resistência aerodinâmica [s m^{-1}],
- γ = constante psicrométrica [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$],
- ε = relação peso molecular de vapor de água/ar seco = 0.622,
- λ = calor latente de vaporização [MJ kg^{-1}],
- u_2 = velocidade do vento à 2 m [m s^{-1}],
- R = constante específica do gás = $0.287 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$,
- T = Temperatura do ar [$^\circ\text{C}$],
- P = pressão atmosférica [kPa],

$$= 86400 \frac{\gamma (0.622) \lambda}{1.01(T+273)(0.287)(208)} u_2 \quad [\text{MJ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ dia}^{-1}]$$

ou, quando dividido por λ ($\lambda = 2.45$),

$$\approx \gamma \frac{900}{T+273} u_2 \quad [\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ dia}^{-1}]$$

Um valor positivo é usado para o hemisfério do norte e um valor negativo para o hemisfério sul.

Temperatura

As temperaturas do ar (média) máxima e mínima diária em graus Centígrado ($^{\circ}\text{C}$) são necessárias. Onde somente temperaturas diárias médias estão disponíveis, os cálculos ainda podem ser executados mas alguma subestimação de E_{To} provavelmente acontecerá devido a não linearidade da relação entre pressão do vapor de saturação - temperatura (Figura 10). Usando a temperatura do ar médio em vez das temperaturas máxima e mínima do ar leva a um valor mais baixo da pressão do vapor de saturação e_s , e conseqüentemente a uma mais baixa diferença da pressão do vapor ($e_s - e_a$), e uma mais baixa estimativa de evapotranspiração de referência.

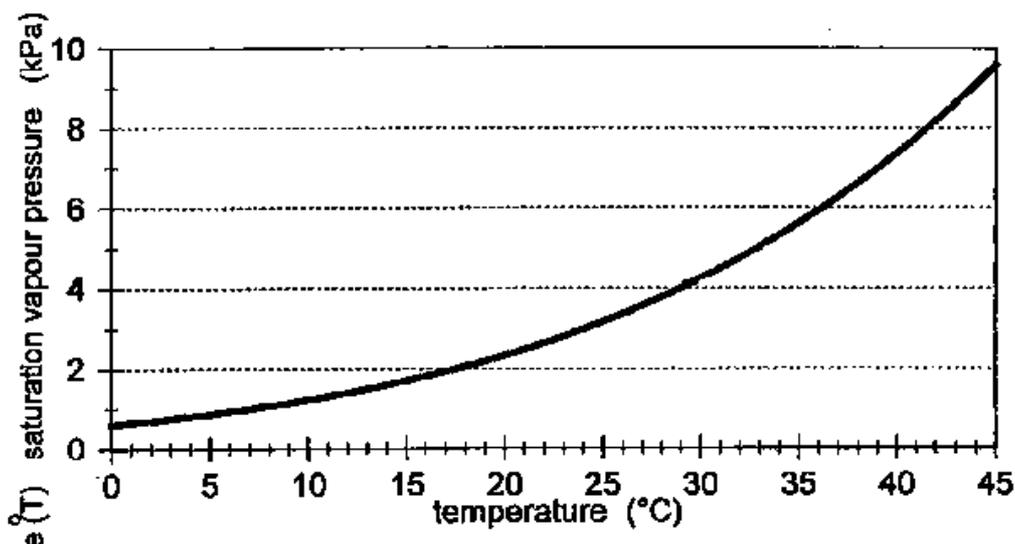


Figura 10. Pressão de vapor de saturação mostrada em função da temperatura: curva $e^{\circ}(T)$

Umidade Relativa do Ar

As pressões de vapor diárias atuais, e_a , em kilopascal (kPa) são requeridas. A pressão de vapor atual onde não estão disponíveis, pode ser derivado da umidade relativa do ar máxima e mínima (%), dados psicrométricos (termômetros de bulbo molhado e seco em $^{\circ}\text{C}$) ou temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$) de acordo com os procedimentos esboçados no Capítulo 3.

Radiação

A radiação diária líquida (média) expressa em megajoules por metro quadrado por dia ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) é requerido. Estes dados não estão comumente disponíveis mas pode ser derivado da radiação de onda curta (média) medidas com um piranômetro ou da duração

diária atual de insolação (média) (horas por dia) medido com um (Campbell-Stokes) registrador de insolação. Os procedimentos de cálculo são esboçados no Capítulo 3.

Velocidade do vento

A velocidade do vento diária (média) em metros por segundo (m s^{-1}) medida a 2 m de altura é requerido. É importante verificar a altura na qual velocidade de vento está sendo medida, como as velocidades do vento medidas a alturas diferentes sobre a superfície do solo. O procedimento de cálculo para ajustar velocidade de vento para a altura padrão de 2 m é apresentado no Capítulo 3.

Dados climáticos perdidos

Pode acontecer situação onde alguns dados de variáveis climáticas foram perdidos. Existe um procedimento alternativo para cálculo E_{To} , utilizando somente parâmetros meteorológicos limitados, essa situação deveria ser evitada. É recomendado o uso do método padrão de FAO Penman-Monteith para calcular a E_{To} com depois de solucionar o problema específico dos dados perdidos. Procedimentos para calcular com dados climáticos perdidos são fornecidos no Capítulo 3. Diferenças entre valores de E_{To} obtidos com a equação de FAO Penman-Monteith com, por um lado, com dados limitados fixo e, por outro lado, com dados completos fixo, é esperado que seja menor ou de magnitude semelhante para as diferenças que são o resultado do uso de uma equação de E_{To} alternativa.

Até mesmo onde contém dados somente de temperatura do ar máximo e mínimo ainda é possível obter estimativas razoáveis de dez dias ou mensal para E_{To} com a equação de FAO Penman-Monteith. Como esquematizado no Capítulo 3, podem ser derivados dados de radiação da diferença de temperatura do ar, ou, dados de velocidade do vento e de umidade, pode ser importado de uma estação climatológica perto do local. Também podem ser estimados dados de umidade relativa da temperatura do ar mínima diário. Depois de avaliar a validade do uso de dados de outra estação, estimativas de E_{To} podem ser calculadas para períodos de dez dias ou mensais.

Deveriam ser validados os procedimentos para calcular dados perdidos ao nível regional. Isto pode ser feito para estações climatológicas com conjunto de dados completo comparando E_{To} calculado com conjunto de dados limitados. A relação deve estar perto de um. Onde a relação diverge significativamente de um, a relação pode ser usada como um

fator de correção para estimativas feitas com o conjunto de dados limitado. Onde o erro padrão de estimativa excede 20% do ETo média, uma análise de sensibilidade deveria ser executada para determinar causas (e limites) para o método utilizado de importar os dados perdidos. Uma validação deveria ser completada para cada mês e variável, para o mês como também para as estimativas diárias.

Capítulo 3 - Dados Meteorológicos

Os métodos para calcular a evapotranspiração a partir de dados meteorológicos requerem vários parâmetros climatológicos e físicos. Alguns dos dados são medidos em estações meteorológicas. Outros parâmetros são relacionados a dados comumente medidos e podem ser determinados com ajuda de uma relação direta ou empírica. Neste capítulo discute-se a fonte, medida e o cálculo de todos os dados requerido para o cálculo da evapotranspiração de referência por meio do método de Penman-Monteith FAO. Exemplos diferentes ilustram os vários procedimentos de cálculo. Também são fornecidos procedimentos apropriados para calcular dados perdidos.

Dados meteorológicos podem ser expressos em várias unidades. Fatores de conversão entre várias unidades e S. I. de unidades padrão são fornecidos no Anexo 1. Parâmetros climáticos, calculados por meio das equações apresentadas neste capítulo são tabulados e são apresentados para condições meteorológicas diferentes no Anexo 2. Somente as relações padronizadas são apresentadas neste capítulo. Os fundamentos físicos e matemáticos de certas relações e mais informação sobre certos procedimentos são apresentados no Anexo 3. Nos Anexos 4, 5 e 6 são listados os procedimentos para a análise estatística, avaliação, correção e finalização de dados meteorológicos parciais ou perdidos.

Fatores meteorológicos que determinam ET

Os fatores meteorológicos que determinam a evapotranspiração são parâmetros climáticos que fornecem energia para vaporização e removem vapor de água da superfície evaporante. Os parâmetros meteorológicos principais para serem considerados são apresentados abaixo.

Radiação solar

O processo de evapotranspiração é determinado pela quantidade de energia disponível para vaporizar a água. Radiação solar é a maior fonte de energia e pode transformar grandes quantidades de água líquida em vapor. A quantidade potencial de radiação que pode chegar à superfície evaporante é determinada por sua localização e época do ano. Devido às diferenças na posição do sol, a radiação potencial é diferente nas várias latitudes e nas diferentes estações. A radiação solar real que chega a superfície evaporante depende do estado da atmosfera e a presença de nuvens que refletem e absorvem partes principais da radiação. Quando avaliamos o efeito de radiação solar na evapotranspiração, deveríamos também ter em mente que não é usada toda a energia disponível para vaporizar a água. Parte da energia solar é usada para aquecer a atmosfera e o perfil do solo.

Temperatura do Ar

A radiação solar absorvida pela atmosfera e o calor emitido pela terra aumentam a temperatura do ar. O calor sensível do ar circunvizinho transfere energia para a cultura e exerce como tal uma influência controlando na taxa de evapotranspiração. Em climas ensolarados, quentes a perda de água através da evapotranspiração é maior que em tempo nublado e fresco.

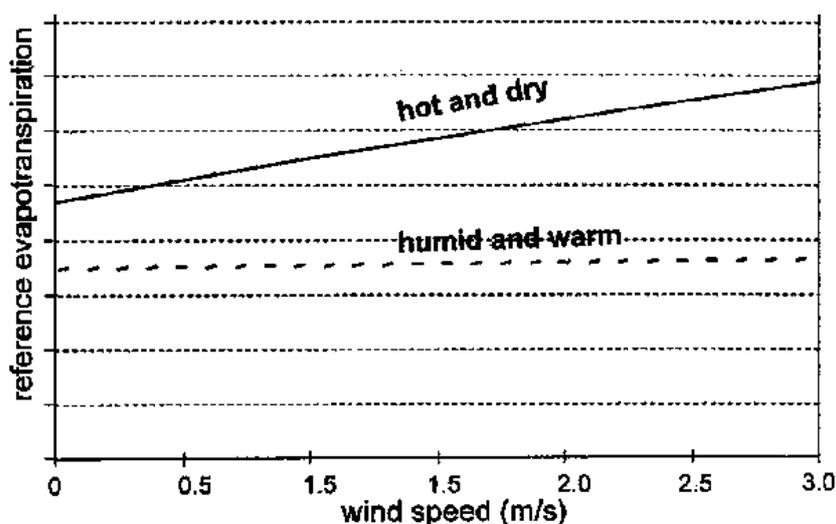


FIGURA 10. Ilustração do efeito da velocidade do vento na evapotranspiração nas condições do estado atmosférico quente-seco e úmido-quente.

Umidade do Ar

Enquanto o fornecimento de energia do sol e do ar circunvizinho é a força motriz principal para a vaporização da água, a diferença entre a pressão de vapor de água à superfície de evapotranspiração e no ar circunvizinho é o fator determinante para a remoção do vapor. Campos bem úmidos em regiões árida quente e seca consomem quantidades grandes de água devido à abundância de energia e a força de dessecar da atmosfera. Em regiões tropicais úmidas, apesar da alta energia disponível, a alta umidade do ar reduzirá a demanda da evapotranspiração. Em um tal ambiente, o ar já se encontra perto da saturação, de forma que menos água adicional pode ser armazenada e conseqüentemente a taxa de evapotranspiração é mais baixa do que em regiões áridas.

Velocidade do vento

O processo de remoção do vapor depende em grande parte do vento e turbulência do ar que transferem grandes quantidades de ar de cima da superfície evaporante. Quando a água é vaporizada, o ar fica gradualmente saturado sobre a superfície evaporante com vapor de água. Se este ar não é continuamente substituído por ar seco, a força motriz para remoção de vapor de água e a taxa de evapotranspiração diminuirão.

É ilustrado o efeito combinado dos fatores climáticos que afetam a evapotranspiração na Figura 10 para duas condições climáticas diferentes. A demanda de evapotranspiração é alta no clima seco e quente devido à baixa umidade do ar e a quantidade de energia disponível com a radiação solar direta e calor latente. Sob estas circunstâncias, pode ser armazenado muito vapor de água no ar enquanto o vento pode promover o transporte de ar com vapor d'água da camada sobre a superfície o que permite levar mais vapor de água para o ar. Por outro lado, sob condições climáticas úmidas, a alta umidade do ar e a presença de nuvens tornam a taxa de evapotranspiração mais baixa. O efeito do aumento da velocidade do vento na evapotranspiração para as duas condições climáticas diferentes é ilustrado pela declividade das curvas na Figura 10. O poder evaporante da atmosfera, tem maior efeito na ET e leva a uma maior declividade da curva. Para condições úmidas, o vento somente pode substituir o ar saturado com uma quantidade de ar próximo da saturação e pode remover energia de calor latente. Por conseguinte, a velocidade do vento afeta a taxa de evapotranspiração a uma menor extensão do que sob condições áridas onde variações

pequenas na velocidade do vento podem resultar em variações maiores na taxa de evapotranspiração.

Parâmetros atmosféricos

Várias equações estão disponíveis para expressar parâmetros climáticos. Pode ser avaliado o efeito dos parâmetros do estado atmosférico principais na evapotranspiração com ajuda destas equações. Algumas das equações requerem parâmetros que expressam uma característica específica da atmosfera. Antes de estudar os quatro parâmetros do estado atmosférico principais, serão discutidos alguns parâmetros atmosféricos.

Pressão atmosférica (P)

A pressão atmosférica, P, é a pressão exercida pelo peso da atmosfera na terra. Evaporação em altas altitudes é causada devido à baixa pressão atmosférica como está expressa na constante psicrométrica. Porém, o efeito é pequeno e nos procedimentos de cálculo, o valor médio para uma localização é suficiente. Uma simplificação da lei do gás ideal para uma temperatura de 20°C e uma atmosfera padrão pode ser empregado para calcular P:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (7)$$

onde

P = pressão atmosférica [kPa],

z = elevação sobre o nível de mar (altitude) [m],

Valor da pressão atmosférica em função da altitude é determinado no Anexo 2 (Tabela 2.1).

Calor latente de vaporização (λ)

O calor latente de vaporização, λ , expressa a energia exigida num processo para mudar uma unidade de massa de água de líquido para vapor à pressão e temperatura constante. O valor do calor latente varia em função da temperatura. A uma temperatura alta,

será necessário menos energia do que as temperaturas mais baixas. Como λ varia muito pouco na temperatura normal é adotado um único valor de 2.45 MJ kg^{-1} na simplificação da equação de Penman-Monteith FAO. Este é o calor latente para uma temperatura do ar em torno de 20°C .

Constante Psicrométrica (γ)

A constante psicrométrica, é determinada por:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (8)$$

onde

γ = constante psicrométrica [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$],

P = pressão atmosférica [kPa],

λ = calor latente de vaporização, $2.45 \text{ [MJ kg}^{-1}\text{]}$,

c_p = calor específico do ar à pressão constante, $1.013 \times 10^{-3} \text{ [MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$,

ϵ = relação peso molecular de vapor de água/ar seco = 0.622 .

O calor específico do ar é a quantidade de energia exigida para aumentar um grau da temperatura de uma unidade de massa de ar à pressão constante. Seu valor depende da composição do ar, i.e., sua umidade. Para condições atmosféricas médias o valor de $c_p = 1.013 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pode ser usado. Como uma pressão atmosférica média é usada para cada localização (Equação 7), a constante psicrométrica é mantida constante para cada localização. Valores para a constante psicrométrica em função da altitude é determinada no Anexo 2 (Tabela 2.2).

EXEMPLO 2. Determinação de parâmetros atmosféricos.

Determinação da pressão atmosférica e da constante psicrométrica para uma altitude de 1800 m.			
Com:	$z =$	1800	m
Pela Eq. 7:	$P = 101.3 [(293 - (0.0065) 1800)/293]^{5.26} =$	81.8	kPa
Pela Eq. 8:	$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} (81.8) =$	0.054	kPa $^\circ\text{C}^{-1}$
O valor médio da pressão atmosférica é 81.8 kPa. a constante psicrométrica, γ , é $0.054 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$.			

Temperatura do ar

A Agrometeorologia se preocupa com a temperatura do ar perto do nível do dossel da cultura. Em estações meteorológicas tradicional e automáticas a temperatura do ar é medida dentro de abrigos (filtros ou abrigos) segundo padrões da Organização Meteorológica Mundial (OMM) instalados a 2 m sobre o solo. Os abrigos são projetados para proteger os instrumentos da exposição direta devido aquecimento solar. A construção de persianas nos abrigos permite o movimento de ar livremente ao redor dos instrumentos. Temperatura do ar é medida com termômetros, termistor ou termopares montados no abrigo. Termômetros de mínimo e de máximo registram a temperatura do ar mínima e máxima num período de 24 h. Termopares registram a temperatura instantânea durante um dia ou semana. Estações meteorológicas eletrônicas registram freqüentemente a temperatura do ar a cada minuto e informam médias de hora em hora além de valores de máximo e de mínimo em 24 h.

Devido a não linearidade dos dados requeridos de umidade na equação de Penman-Monteith FAO, a pressão de vapor para um certo período deve ser estimada de uma média entre a temperatura do ar máximo e mínimo diário daquele período. A temperatura do ar máxima diária (T_{max}) e temperatura do ar mínima diária (T_{min}) são, respectivamente, a temperatura do ar máximo e de mínimo observadas durante o período de 24 h e começam à meia-noite. T_{max} e T_{min} para períodos mais longos como semanas, 10 dias ou meses são obtidos dividindo a soma dos valores diários respectivos pelo número de dias no período. A temperatura do ar diária média ($T_{média}$) somente é empregado na equação de Penman-Monteith FAO para calcular a declividade da curva de pressão de vapor saturado versus temperatura (Δ) e a influência da densidade do ar média (ρ_a) devido ao efeito das variações da temperatura no valor dos parâmetros climáticos são pequenos nestes casos. Para padronização, $T_{média}$ para períodos de 24 h é definido como a média das temperaturas máxima (T_{max}) e mínimas (T_{min}) diárias no lugar de temperatura média medidas de hora em hora.

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (9)$$

A temperatura é determinada em graus Centígrado ($^{\circ}C$) ou Fahrenheit ($^{\circ}F$). A Tabela de conversão é fornecida no Anexo 1. Em alguns procedimentos de cálculo, é requerida temperatura em Kelvin (K) que pode ser obtido somando 273.16 para a temperatura expressa

em graus Centígrado ($K = ^\circ C + 273.16$). As escalas Kelvin e Centígrado têm o mesmo intervalo de escala.

Umidade do ar

Conceitos

Pode ser expresso o conteúdo de água do ar de vários modos. Em agrometeorologia, pressão de vapor, temperatura do ponto de orvalho e umidade relativa são expressões comuns para indicar umidade do ar.

Pressão de vapor

Vapor de água é um gás e sua pressão contribui para a pressão atmosférica total. A quantidade de água que está no ar diretamente relacionada à pressão parcial exercida no ar pelo vapor de água e é então uma medida direta do conteúdo de água do ar.

No S. I. unidades padrão, não expressa pressão em centímetro de água, milímetro de mercúrio, bars, atmosfera, etc., mas em pascal (Pa). Fatores de conversão entre várias unidades e Pa são fornecidos no Anexo 1. Como um pascal se refere a uma força relativamente pequena (1 newton) aplicada em uma superfície relativamente grande (1 m^2), múltiplos da unidade básica são freqüentemente usados. Neste manual, é expressa pressão de vapor em kilopascal ($\text{kPa} = 1000 \text{ Pa}$).

Quando o ar está em contato com uma superfície de água evaporante, um equilíbrio é alcançado entre as moléculas de água escapando e retornando a superfície evaporante. É dito que o ar está saturado no momento, em que não pode armazenar nenhuma molécula de água a mais. A pressão correspondente é chamada de pressão de vapor saturado ($e^\circ(T)$). O número de moléculas de água que podem ser armazenadas no ar depende da temperatura (T). Quanto maior a temperatura do ar, maior a capacidade de armazenamento, maior a sua pressão de vapor saturado (Figura 11).

Como pode ser visto na Figura 11, a declividade da curva muda exponencialmente com a temperatura. Em baixas temperaturas, a declividade é pequena e somente varia ligeiramente com o aumento da temperatura. Nas temperaturas altas, a declividade é grande e pequena mudança na T resulta em grande mudança na declividade. A declividade da curva de

pressão de vapor saturado, Δ , é um parâmetro importante que descreve a vaporização e é requerido nas equações para calcular ETo a partir de dados climáticos.

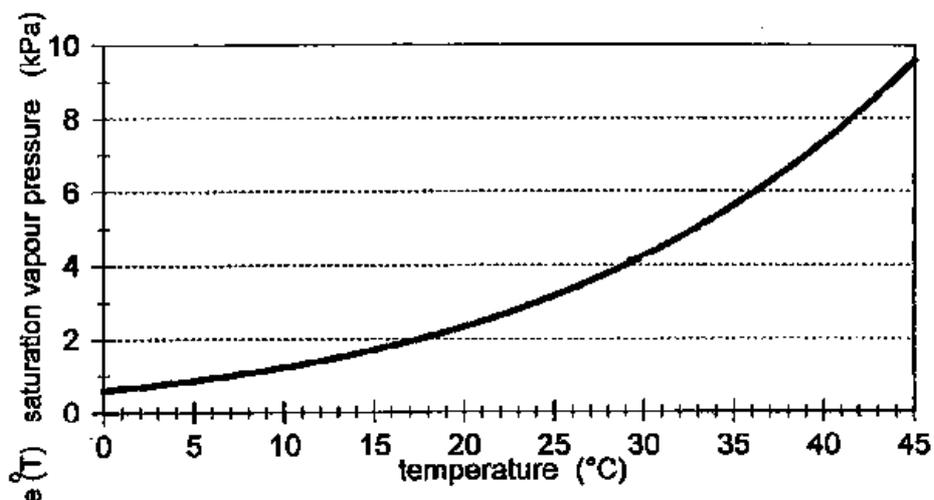


FIGURE 11. Curva da pressão de vapor saturado em função da temperatura: $e^{\circ}(T)$

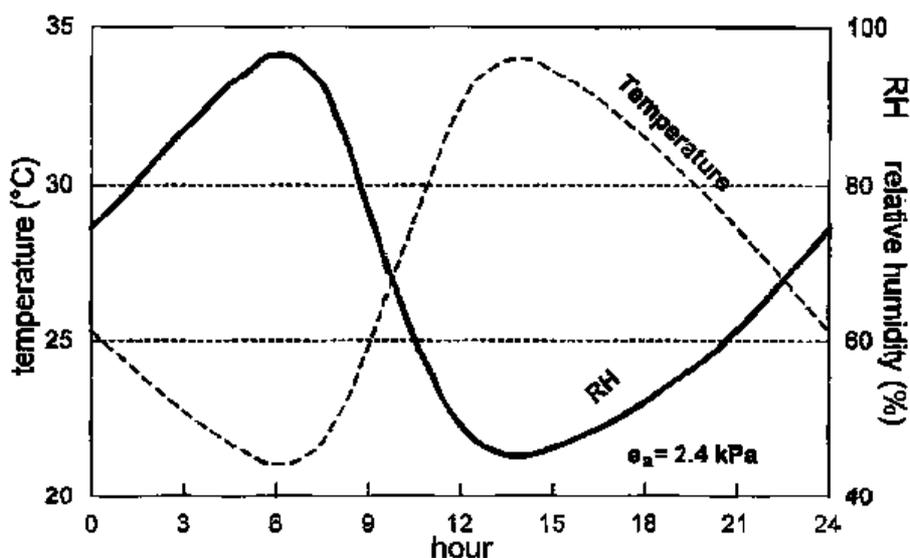


FIGURE 12. Variação da umidade relativa e da temperatura durante 24 horas para uma pressão de vapor atual constante de 2.4 kPa

A pressão de vapor atual (e_a) é a pressão exercida no ar pelo vapor d'água. Quando o ar não está saturado, a pressão de vapor atual será mais baixa que a pressão de vapor saturado. A diferença entre a saturação e a pressão de vapor atual é chamada de déficit de pressão de vapor ou déficit de saturação e é um indicador preciso da capacidade de evaporação atual do ar.

Temperatura do ponto de orvalho

A temperatura do ponto de orvalho é a temperatura na qual o ar precisa ser resfriado para tornar-se saturado. A pressão de vapor atual do ar é a pressão de vapor saturado na temperatura do ponto de orvalho. O poder evaporante do ar, é maior quanto maior a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho.

Umidade relativa

A umidade relativa (RH) expressa o grau de saturação do ar como uma relação da pressão de vapor atual (e_a) e na saturação ($e^{\circ}(T)$) à mesma temperatura (T):

$$RH = 100 \frac{e_a}{e^{\circ}(T)} \quad (10)$$

A umidade relativa é de fato a relação entre a quantidade de água atual no ar ambiente e a quantidade que poderia ter à mesma temperatura. É adimensional e é geralmente expresso em porcentagem. Embora a pressão de vapor atual poderia ser relativamente constante ao longo do dia, a umidade relativa flutua entre um máximo próximo ao amanhecer e um mínimo à tarde (Figura 12). A variação da umidade relativa é o resultado do fato de que a pressão de vapor saturado é determinada pela temperatura do ar. Com as mudanças de temperatura durante o dia, a umidade relativa também muda substancialmente.

Medida

Não é possível medir a pressão de vapor atual diretamente. A pressão de vapor é normalmente determinada pela umidade relativa ou pela temperatura do ponto de orvalho.

Umidade relativa é diretamente medida com higrômetros. A medida é baseada na natureza de algum material como por exemplo o cabelo que muda seu comprimento em resposta as mudanças na umidade do ar, ou usando uma capacitância, onde a capacidade elétrica muda com a RH. Pode ser medida a pressão de vapor indiretamente com psicrômetros que mede a diferença de temperatura entre dois termômetros, denominado termômetros de bulbo seco e molhado. O termômetro de bulbo seco mede a temperatura do ar. O termômetro de bulbo molhado é coberto com uma gaze constantemente saturado. A evaporação da água da gaze requer energia e abaixa a temperatura do termômetro. O ar seco, promove uma maior evaporação que resfria e abaixa a temperatura. A diferença entre as

temperaturas de bulbo seco e molhado é chamada à depressão do bulbo molhado e é uma medida da umidade do ar.

A temperatura do ponto de orvalho é medida com medidor de ponto de orvalho. O princípio básico de alguns tipos de instrumento é o resfriamento do ar ambiente até acontecer à formação do orvalho. A temperatura correspondente é a temperatura do ponto de orvalho.

A umidade relativa e dados de temperatura do ponto de orvalho são normalmente infestados por erros de medida. Medida de erro é comum para os instrumentos mais velho, higrotermográfico, ao mais modernos instrumentos eletrônicos. Estes instrumentos são descritos no Anexo 5. Deve-se ter grande cuidado na avaliação da precisão e integridade dos dados de RH e da temperatura do ponto de orvalho. O usuário é encorajado a comparar as temperaturas do ponto de orvalho com as temperaturas do ar diária mínima, como descritas ao término deste capítulo e no Anexo 5 e 6. Frequentemente, é melhor utilizar a temperatura do ponto de orvalho estimada da temperatura do ar diária mínima, em lugar de usar medidas de umidade relativas incertas. O usuário é encorajado utilizar bom senso nesta área.

Procedimentos de cálculo

Pressão de vapor saturado médio (e_s)

Como a pressão de vapor saturado é relacionada com a temperatura do ar, pode ser calculado da temperatura do ar. A relação que expressa é dada por:

$$e^{\circ}(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right] \quad (11)$$

onde

$e^{\circ}(T)$ = pressão de vapor saturado à temperatura do ar T [kPa],

T = temperatura do ar [°C],

exp [..] = 2.7183 (base do logaritmo natural) elevado ao expoente [..].

Valores de pressão de vapor saturado em função da temperatura do ar são determinados no Anexo 2 (Tabela 2.3). Devido a não linearidade da equação acima, a pressão de vapor saturado médio durante um dia, semana, década ou mês deveriam ser estimados como a média entre a pressão de vapor saturado da temperatura do ar média diária máxima e mínima para aquele período:

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{\max}) + e^\circ(T_{\min})}{2} \quad (12)$$

Usando temperatura do ar média em vez de temperatura mínima e máxima diária resulta em estimativas mais baixas para a pressão de vapor saturado média. O déficit de pressão de vapor correspondente (um parâmetro que expressa o poder evaporante da atmosfera) também será menor e o resultado será uma sub estimativa da evapotranspiração da cultura de referência. Então, a pressão de vapor saturado médio deveria ser calculada como a média entre a pressão de vapor saturado na temperatura do ar máxima e mínima diário.

EXEMPLO 3. Determinação da pressão de vapor saturado médio

A temperatura do ar máxima e mínima diária são respectivamente 24.5 e 15°C. Determine a pressão de vapor de saturação para aquele dia.			
Pela Eq. 11	$e^\circ(T_{\max}) = 0.6108 \exp[17.27(24.5)/(24.5 + 237.3)]$	3.075	kPa
Pela Eq. 11	$e^\circ(T_{\min}) = 0.6108 \exp[17.27(15)/(15 + 237.3)]$	1.705	kPa
Pela Eq. 12	$e_s = (3.075 + 1.705)/2$	2.39	kPa
	Note que para a temperatura 19.75°C (a qual é $T_{\text{média}}$). $e^\circ(T) =$	2.30	kPa
A pressão de vapor de saturação média é 2.39 kPa.			

Declividade da curva de pressão de vapor de saturação (Δ)

Para o cálculo da evapotranspiração, a declividade da relação entre a pressão de vapor saturado e temperatura do ar, é requerido. A declividade da curva (Figura 11) a uma determinada temperatura é determinada por.

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27 T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (13)$$

onde

Δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação a temperatura do ar T [kPa °C⁻¹],

T = temperatura do ar média [°C],

exp [...] = 2.7183 (base do logaritmo natural) elevado ao expoente [...].

Valores da declividade para diferentes temperaturas do ar são determinados no Anexo 2 (Tabela 2.4). Na equação de Penman-Monteith FAO onde Δ está no numerador e denominador, a declividade da curva de pressão de vapor é calculada utilizando a temperatura do ar média (Equação 9).

Pressão de vapor atual (e_a) derivada da temperatura do ponto de orvalho

Como a temperatura do ponto de orvalho é a temperatura na qual o ar precisa se encontrar para se tornar saturado, a pressão de vapor atual (e_a) é a pressão de vapor saturado à temperatura do ponto de orvalho (T_{dew}) [°C], ou:

$$e_a = e^{\circ}(T_{dew}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{dew}}{T_{dew} + 237.3} \right] \quad (14)$$

Pressão de vapor atual (e_a) derivada de dados psicrométricos

A pressão de vapor atual pode ser determinada da diferença entre as temperaturas dos termômetros de bulbo seco e molhado, denominado de depressão de bulbo molhado. A relação é expressa pela seguinte equação:

$$e_a = e^{\circ}(T_{wet}) - \gamma_{psy} (T_{dry} - T_{wet}) \quad (15)$$

onde

e_a = pressão de vapor atual [kPa],

$e^{\circ}(T_{wet})$ = pressão de vapor saturado a temperatura do bulbo molhado [kPa],

γ_{psy} = constante psicrométrica do instrumento [kPa °C⁻¹],

$T_{dry} - T_{wet}$ = depressão de bulbo molhado, onde T_{dry} é a temperatura de bulbo seco e T_{wet} é a temperatura de bulbo molhado [°C].

A constante psicrométrica do instrumento é determinada por:

$$\gamma_{psy} = a_{psy} P \quad (16)$$

onde a_{psy} é um coeficiente que depende do tipo de ventilação do termômetro de bulbo molhado [°C⁻¹], e P é a pressão atmosférica [kPa]. O coeficiente a_{psy} depende principalmente do desenho do psicrómetro e da taxa de ventilação ao redor do bulbo molhado. Os valores utilizados são os seguintes:

$a_{psy} = 0,000662$ para psicrómetro ventilado (tipo Asmann), com um fluxo de 5 m/s,

0,000800 para psicrómetro com ventilação natural (ao redor 1 m/s),
 0,001200 para psicrómetro não ventilado instalado em local fechado.

EXEMPLO 4. Determinação da pressão de vapor atual a partir de leitura psicrométrica

Determinar a pressão de vapor para a leitura do psicrómetro ventilado localizado a uma altitude de 1200 m. As temperaturas medidas para os termômetros de bulbo seco e úmido foram 25.6 °C e 19.5 °C respectivamente.			
Pela Eq. 7 (Tabela 2.1), at:	z=	1200	m
Então:	P=	87.9	kPa
Pela Eq. 11 (Tabela 2.3), for	T _{wet} =	19.5	°C
Então:	e°(T _{wet}) =	2.267	kPa
Psicrómetro Ventilado	a _{psy} =	0.000662	°C ⁻¹
Pela Eq. 15:	e _a = 2.267 - 0.000662 (87.9) (25.6 - 19.5) =	1.91	kPa
A pressão de vapor atual é 1.91 kPa.			

Pressão de vapor atual (e_a) estimada de dados de umidade relativa

A pressão de vapor atual também pode ser calculada da umidade relativa. Dependendo da disponibilidade dos dados de umidade, deve ser usada equação diferente.

- Para RH_{max} e RH_{min}:

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} + e^\circ(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100}}{2} \quad (17)$$

onde

e_a = pressão de vapor atual [kPa],

e°(T_{min}) = pressão de vapor saturado a temperatura mínima diária [kPa],

e°(T_{max}) = pressão de vapor saturado a temperatura máxima diária [kPa],

RH_{max} = umidade relativa máxima [%],

RH_{min} = umidade relativa mínima [%].

Para períodos de uma semana, dez dias ou um mês, RH_{max} e RH_{min} são obtidos dividindo a soma dos valores diários pelo número de dias naquele período.

- Para RH_{max}:

Quando o equipamento utilizado pode causar grandes erros no cálculo de RHmin, ou quando os dados da umidade relativa não são confiáveis ou causam dúvida, então se deve usar somente RHmax:

$$e_a = e^\circ(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} \quad (18)$$

- Para RHmean:

Na ausência de RHmax e RHmin, outra equação que pode ser usada para calcular e_a e a seguinte:

$$e_a = \frac{RH_{\text{mean}}}{100} \left[\frac{e^\circ(T_{\max}) + e^\circ(T_{\min})}{2} \right] \quad (19)$$

onde RHmean é a umidade relativa média, definida como a média entre RHmax e RHmin. Porém, Equação 19 é menos indicada do que as Equações 17 ou 18.

EXEMPLO 5. Determinação da pressão de vapor atual a partir de dados de umidade relativa

Dados temperatura do ar mínimo e máximo e o correspondente dados de umidade relativa:			
$T_{\min} = 18^\circ\text{C}$ e $RH_{\max} = 82\%$ $T_{\max} = 25^\circ\text{C}$ e $RH_{\min} = 54\%$			
Determine a pressão de vapor atual.			
Pela Eq. 11 (Tabela 2.3):	$T_{\min} =$	18	°C
Então:	$e^\circ(T_{\min}) =$	2.064	kPa
Pela Eq. 11 (Tabela 2.3):	$T_{\max} =$	25	°C
Então:	$e^\circ(T_{\max}) =$	3.168	kPa
Pela Eq. 17:	$e_a = [2.064 (82/100) + 3.168 (54/100)]/2 =$	1.70	kPa
Note que utilizando a Eq. 19:	$e_a =$	1.78	kPa

Déficit de pressão de vapor ($e_s - e_a$)

O déficit de pressão de vapor é a diferença entre a pressão de vapor de saturação (e_s) e a pressão de vapor atual (e_a) para um determinado período de tempo. Para períodos como uma semana, dez dias ou um mês e_s é estimada pela Equação 12 que usa a Tmax e Tmin

médias para o período considerado e similarmente a e_a é estimada com uso das equações 14 a 19 utilizando a médias para o período. Como declarado acima, utilizando-se a temperatura do ar média e não T_{max} e T_{min} na Equação 12 resulta em uma estimativa de e_s menor, levando assim a um valor do déficit de pressão de vapor menor e conseqüentemente uma sub estimativa da ETo (veja Caixa 7). Quando desejado, e_s e e_a para cálculo de períodos longos também podem ser calculados como médias de valores estimados durante cada dia do período.

EXEMPLO 6. Determinação do déficit de pressão de vapor

Determinar o déficit de pressão de vapor com os dados do exemplo anterior (Exemplo 5).			
Pelo Exemplo 5:	$e^\circ(T_{min}) =$	2.064	kPa
	$e^\circ(T_{max}) =$	3.168	kPa
	$e_a =$	1.70	kPa
	$e_s - e_a = (2.064 + 3.168)/2 - 1.70 =$	0.91	kPa
O déficit de pressão de vapor é 0.91 kPa.			

CAIXA 7. Cálculo do déficit de pressão de vapor ($e_s - e_a$)			
Pressão de vapor de saturação: e_s (Eq. 11 ou Tabela 2.3)			
T_{max}	°C	$e^\circ(T_{max}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{max}}{T_{max} + 237.3} \right]$	kPa
T_{min}	°C	$e^\circ(T_{min}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{min}}{T_{min} + 237.3} \right]$	kPa
Pressão de vapor de saturação $e_s = [e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})]/2$ Eq. 12			kPa
Pressão de vapor atual: e_a			
1. e_a estimada pela temperatura do ponto de orvalho (Eq. 14 ou Tabela 2.3)			
T_{dew}	°C	$e_a = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{dew}}{T_{dew} + 237.3} \right]$	kPa
ou 2. e_a estimada pela umidade relativa máxima e mínima			
RH_{max}	%	$e^\circ(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100}$	kPa

RH _{min}	%	$e^{\circ}(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100}$	kPa
$e_a = [e^{\circ}(T_{min}) RH_{max}/100 + e^{\circ}(T_{max}) RH_{min}/100]/2$ Eq. 17			kPa
ou 3. e_a estimada pela umidade relativa máxima (erro na RH_{min})			
RH _{max}	%	$e_a = e^{\circ}(T_{min}) RH_{max}/100$ Eq. 18	kPa
ou 4. e_a estima pela umidade relativa média (menos recomendado)			
RH _{mean}	%	$e_a = e_s (RH_{mean})/100$ Eq. 19	kPa
Déficit de pressão de vapor: (e_s - e_a)			kPa

Radiação

Conceitos

Radiação extraterrestre (Ra)

A radiação que chega numa superfície perpendicular aos raios do sol no topo da atmosfera da terra, chama-se a constante solar, é aproximadamente $0.082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$. A intensidade local de radiação, porém, é determinada pelo ângulo entre a direção dos raios do sol e a normal para a superfície da atmosfera. Este ângulo mudará durante o dia e será diferente a latitudes diferentes e em estações diferentes. A radiação solar recebida ao topo da atmosfera da terra em uma superfície horizontal é chamada de radiação extraterrestre (solar), Ra.

Se o sol está diretamente em cima, o ângulo de incidência é zero e a radiação extraterrestre é $0.0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Com a mudança das estações, posição do sol, duração do dia, portanto, Ra também muda. Radiação extraterrestre é assim uma função da latitude, data e hora do dia. Valores diários de Ra ao longo do ano para diferentes latitudes são plotadas na Figura 13.

Radiação Solar ou de onda curta (Rs)

Como a radiação penetra a atmosfera, parte da radiação é difundida, refletida ou absorvida pelos gases atmosféricos, nuvens e pó. A quantidade de radiação que chega a uma

superfície horizontal é conhecida como a radiação solar, R_s . O sol emite energia por meio de ondas eletromagnéticas caracterizadas por comprimentos de onda pequenas, razão porque a radiação solar é também chamada de radiação de onda curta.

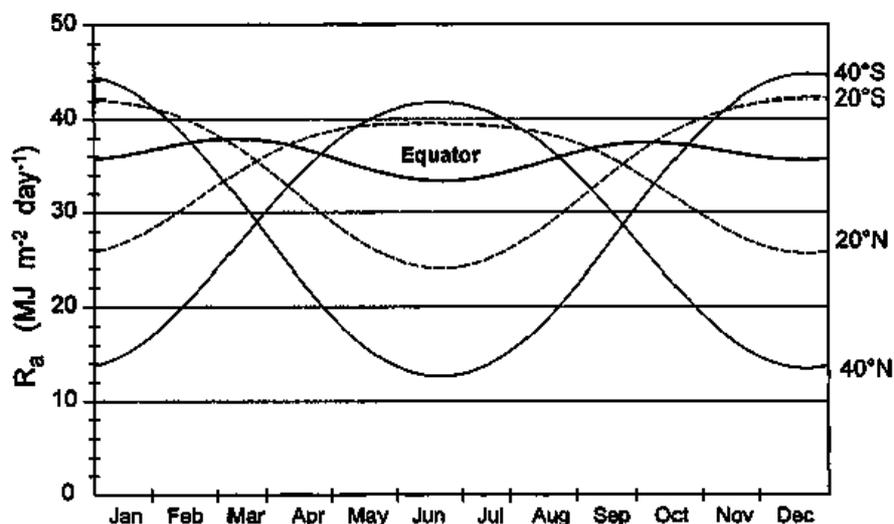


FIGURA 13. Variação anual da radiação extraterrestre (R_a) no equador, 20° e 40° norte e sul

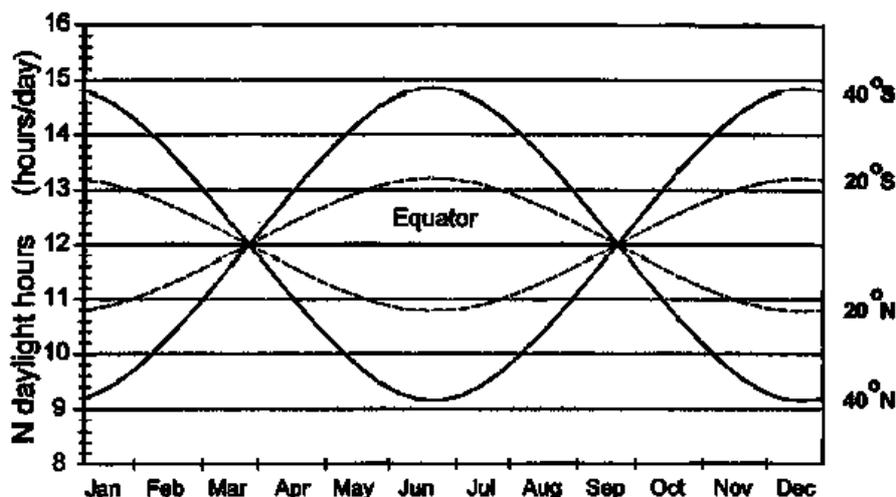


FIGURE 14. Variação anual das horas de luz diária (insolação - N) no equador, 20° e 40° norte e sul

Durante um dia sem nuvens, R_s é aproximadamente 75% da radiação extraterrestre. Num dia nublado, a radiação é difundida na atmosfera, mas até mesmo com uma cobertura de nuvem extremamente densa, aproximadamente 25% da radiação extraterrestre ainda podem chegar na superfície da Terra como radiação difusa do céu. Radiação solar também é conhecida como radiação global e significa que é o soma da radiação de onda curta direta do sol e radiação difusa do céu de todos os ângulos superior.

Radiação de onda curta relativa (R_s/R_{so})

A radiação de onda curta relativa é a relação entre radiação solar (R_s) e radiação solar para o céu claro (R_{so}). R_s é a radiação solar que de fato chega à superfície da Terra em um determinado período, enquanto R_{so} é a radiação solar que chegaria a mesma superfície durante o mesmo período mas sob a condição de céu claro (sem nuvens).

A radiação de onda curta relativa é uma forma de expressar a nebulosidade da atmosfera; com o céu mais nublado menor será a relação. A relação varia aproximadamente entre 0.33 (céu com nuvem densa) e 1 (céu claro). Na ausência de uma medida direta de R_n , a radiação de onda curta relativa é usada no cálculo da radiação líquida de onda longa.

Duração relativa da luz solar (n/N)

A duração relativa da luz solar é outra relação que expressa a nebulosidade da atmosfera. É a relação entre a duração real da luz solar, n , e a duração máxima possível da luz solar ou horas de luz do dia N . Na ausência de qualquer nuvem, a duração real da luz solar é igual às horas de luz do dia ($n = N$) e a relação é um, e por outro lado em dias nublados a relação pode ser zero. Na ausência de uma medida direta de R_s , a duração da luz solar relativa, n/N , frequentemente é utilizada para estimar a radiação solar da radiação extraterrestre.

A radiação extraterrestre igualmente a duração máxima da luz solar N depende da posição do sol e é conseqüentemente uma função da latitude e data. Valores diários de N ao longo do ano para latitudes diferentes são plotados na Figura 14.

Albedo (α) e radiação solar líquida (R_{ns})

Uma quantidade considerável da radiação solar que chega a superfície da terra é refletida. A fração, α , da radiação solar refletida pela superfície é conhecido como o albedo. O albedo é altamente variável para superfícies diferentes e para o ângulo de incidência ou declividade da superfície da terra. Pode ser tão grande quanto 0.95 para superfície com neve recém precipitada e tão pequeno quanto 0.05 para um solo nu molhado. Uma cobertura com vegetação verde tem um albedo em torno de 0.20-0.25. Para a cultura de referência grama verde, é assumido que tem um valor de 0.23.

A radiação solar líquida, R_{ns} , é a fração da radiação solar R_s que não é refletida pela superfície. Seu valor é $(1 - \alpha)R_s$.

Radiação de onda longa líquida (R_{nl})

A radiação solar absorvida pela terra é convertida em energia calorífica. Por vários processos, inclusive emissão de radiação, o solo perde esta energia. A terra tem uma temperatura muito mais baixa do que o sol, e emite energia radiativa com comprimentos de onda mais longa do que o sol. Então, a radiação terrestre é chamada de radiação de onda longa. A radiação de onda longa emitida (R_l , para cima) é absorvida pela atmosfera ou é perdida no espaço. A radiação de onda longa recebida pela atmosfera (R_l , abaixo) aumenta sua temperatura e, como uma consequência, a atmosfera irradia sua própria energia, como ilustrada na Figura 15. Parte da radiação de onda longa da atmosfera vem para a superfície da terra. Por conseguinte, a superfície da terra emite e recebe radiação de onda longa. A diferença entre a radiação de onda longa que chega e a que é emitida é chamada de radiação de onda longa líquida, R_{nl} . Como a radiação de onda longa emitida quase sempre é maior do que a radiação de onda longa que chega, R_{nl} representa uma perda de energia.

Radiação líquida (R_n)

A radiação líquida, R_n , é a diferença entre radiação que chega e a que sai dos comprimentos de onda curta e longa. É o balanço entre as energias absorvidas, refletidas e emitidas pela superfície do solo ou a diferença entre a radiação de onda curta líquida que chega (R_{ns}) e a radiação de onda longa líquida que sai (R_{nl}) (Figura 15). R_n normalmente é positivo durante o dia e negativo durante a noite. O valor diário total para R_n quase sempre é positivo para um período de 24 horas, excluindo as condições extremas de áreas de altas latitudes.

Fluxo de calor do solo (G)

Fazendo estimativas da evapotranspiração, todos os termos do balanço de energia (Equação 1) deveriam ser considerados. O fluxo de calor do solo, G , é a energia que é utilizada no aquecimento do solo. G é positivo quando o solo está aquecendo e negativo quando o solo está esfriando. Embora o fluxo de calor do solo seja pequeno quando comparado a R_n e pode frequentemente ser ignorado, teoricamente a quantidade de energia

ganha ou perda pelo solo neste processo deveria ser subtraído ou somado a R_n quando for calculada a evapotranspiração.

Unidades

A unidade padrão usada neste manual para expressar energia recebida por uma unidade de superfície na unidade de tempo é megajoules por metro quadrado por dia ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Em boletins meteorológicos podem ser utilizadas talvez outras unidades ou radiação pode ser expressa até mesmo em unidades diferentes do sistema internacional (S. I. padrão), como $\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

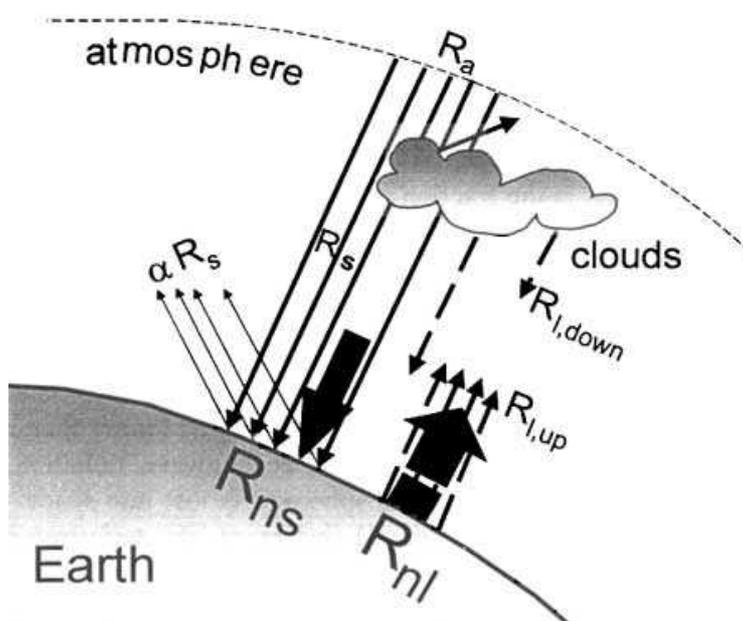


FIGURE 15. Vários componentes de radiação

Na equação de Penman-Monteith FAO (Equação 6), a radiação expressa em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ é convertida (Caixa 8) para evaporação equivalente em mm dia^{-1} usando um fator de conversão igual o inverso do calor latente de vaporização ($1/\lambda = 0.408$):

$$\text{evaporação equivalente } [\text{mm dia}^{-1}] = 0.408 \times \text{Radiação } [\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}] \quad (20)$$

CAIXA 8. Conversão de valores de energia para evaporação equivalente

A conversão para valores de energia para lâminas de água ou vice versa é dada por:

$$\text{Radiation}[\text{depth of water}] = \frac{\text{Radiation}[\text{energy/ surface}]}{\lambda \cdot \rho_w}$$

onde

λ = calor latente de vaporização [MJ kg^{-1}],
 ρ_w = densidade da água, i.e., 1000 kg m^{-3} ,
 [lâmina de água] é expresso em m,
 [energia / superfície] é expressa em MJ m^{-2} .

Usando um único valor de 2.45 MJ kg^{-1} para λ (olhe a seção de parâmetros atmosféricos e o Anexo 3) e multiplique a equação acima por 1000 para transformar em mm:

$$\text{Radiation}[\text{mm day}^{-1}] \approx \frac{\text{Radiation}[\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}]}{2.45} = 0.408 \times \text{Radiation}[\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}]$$

Unidades comumente utilizadas expressam a energia recebida por uma unidade de superfície na unidade de tempo, e são resumidos os fatores de conversão na Tabela 3.

TABELA 3. Fatores de conversão para radiação

	multiplicador para obter energia recebida em unidade de superfície por unidade de tempo				evaporação equivalente
	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$	$\text{J cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$	$\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$	W m^{-2}	mm dia^{-1}
1 $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$	1	100	23.9	11.6	0.408
1 $\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$	$4.1868 \cdot 10^{-2}$	4.1868	1	0.485	0.0171
1 W m^{-2}	0.0864	8,64	2.06	1	0.035
1 mm dia^{-1}	2.45	245	58.5	28.4	1

Medida

Radiação solar pode ser medida com piranômetros, radiômetros ou solarímetros. Os instrumentos contêm um sensor instalado em uma superfície horizontal que mede a intensidade da radiação solar total, i.e., radiação direta e difusa de condições nubladas. O sensor é protegido frequentemente e é mantido em uma atmosfera seca por uma cúpula de vidro que deveria ser limpa e enxugada regularmente.

Radiação de onda longa líquida e radiação de onda curta líquida podem ser medidas e registradas as diferenças em sensores instalados com as faces para cima e para baixo. Em um radiômetro líquido, as cúpulas de vidro são substituídas por cúpulas de polietileno que têm uma distancia de transmissão para radiação de onda curta e de onda longa.

Onde piranômetros não estão disponível, radiação solar normalmente é calculada da duração da luz solar. A duração real da luz solar, n , é medida com um Campbell-Stokes

registrator do raio de sol. Este instrumento registra períodos de raio de sol luminoso usando um globo de vidro que age como uma lente. Os raios de sol se concentram num ponto focal que queima um cartão especialmente tratado concentricamente montado com a esfera. O movimento do sol muda o ponto focal ao longo do dia e um rastro é queimado no cartão. Se o sol é obscurecido, o rastro é interrompido. As horas de raio de sol luminoso são indicadas pelas durações dos segmentos da linha queimada.

A quantidade de calor conduzido para o interior do solo, G , pode ser medida com sistemas de fluxo de calor de solo chapas e termopares ou termisters.

Procedimentos de cálculo

Radiação extraterrestre para períodos diários (R_a)

A radiação extraterrestre, R_a , durante cada dia do ano e para latitudes diferentes pode ser calculado da constante solar, da declinação solar e da época do ano por:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (21)$$

onde

R_a = radiação extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],

G_{sc} = constante solar = $0.0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$,

d_r = inverso da distância relativa terra-sol (Equação 23),

ω_s = ângulo horário de pôr-do-sol (Equação 25 ou 26) [rad],

φ = latitude [rad] (Equação 22),

δ = declinação solar (Equação 24) [rad].

R_a é expresso na equação acima em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. A evaporação equivalente correspondente em mm dia^{-1} é obtida multiplicando R_a por 0.408 (Equação 20). A latitude, φ , expressa em radianos é positivo para o hemisfério norte e negativo para o hemisfério sul (Exemplo 7). A conversão de graus decimais para radianos é determinada por:

$$[\text{Radians}] = \frac{\pi}{180} [\text{decimaldegrees}] \quad (22)$$

EXEMPLO 7. Conversão da latitude de graus e minutos para radianos

Expressar a latitude de Bangkok (Tailândia) de $13^\circ 44' \text{N}$ e Rio de Janeiro (Brasil) de $22^\circ 54' \text{S}$ em

radianos.		
Latitude	Bangkok (hemisfério norte)	Rio de Janeiro (hemisfério sul)
Graus e minutos	13°44'N	22°54'S
Grau Decimal	13 + 44/60=13.73	(-22) + (-54/60) = - 22.90
Radianos	($\pi /180$) 13.73 = + 0.240	($\pi /180$) (-22.90) = - 0.400
As latitudes de Bangkok e Rio de Janeiro são respectivamente + 0.240 e - 0.400 radianos.		

O inverso da distância relativa Terra-Sol, d_r , e a declinação solar, é determinado por:

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (23)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (24)$$

onde J é o número do dia do ano entre 1 (1 janeiro) e 365 ou 366 (31 dezembro). Valores para J para todos os dias do ano e uma equação por calcular J são apresentados no Anexo 2 (Tabela 2.5).

O ângulo horário de pôr-do-sol, ω_s , é determinado por:

$$\omega_s = \arccos [-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (25)$$

Como a função arccos não está disponível em todas as calculadoras, o ângulo horário de pôr-do-sol também pode ser estimado utilizando a função arctan:

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan\left[\frac{-\tan(\varphi) \tan(\delta)}{X^{0.5}}\right] \quad (26)$$

onde

$$X = 1 - [\tan(\varphi)]^2 [\tan(\delta)]^2 \quad (27)$$

e $X = 0.00001$ se $X \leq 0$

Valores para R_a para diferentes latitudes são dados no Anexo 2 (Tabela 2.6). Estes valores representam R_a no 15º dia de cada mês. Estes valores divergem dos valores que são calculados da média diária do mês por menos que 1% para todas as latitudes durante períodos não frios e são incluídos para simplicidade de cálculo. Estes valores divergem ligeiramente dos valores nas Tabelas de Smithsonian. Durante os meses de inverno em latitudes maior que 55º (N ou S), as equações para R_a tem validade limitada. Confirmação deveria ser feita às Tabelas de Smithsonian para avaliar possíveis divergências.

EXEMPLO 8. Determinação de radiação extraterrestre

Determinar a radiação extraterrestre (R_a) para 3 de Setembro e 20°S.			
Pela Eq. 22	20°S ou $\varphi = (\pi / 180) (-20) =$ (o valor é negativo por ser o hemisfério sul)	-0.35	rad
Pela Tabela 2.5:	O número do dia do ano, J =	246	dias
Pela Eq. 23	$d_r = 1 + 0.033 \cos(2\pi (246)/365) =$	0.985	rad
Pela Eq. 24	$\delta = 0.409 \sin(2\pi (246)/365 - 1.39) =$	0.120	rad
Pela Eq. 25:	$\omega_s = \arccos[-\tan(-0.35)\tan(0.120)] =$	1.527	rad
Então:	$\sin(\varphi)\sin(\delta) =$	-0.041	-
e:	$\cos(\varphi)\cos(\delta) =$	0.933	-
Pela Eq. 21	$R_a = 24(60)/\pi (0.0820)(0.985)[1.527(-0.041) + 0.933 \sin(1.527)] =$	32.2	MJ m ⁻² d ⁻¹
Pela Eq. 20	Expresso em evaporação equivalente = 0.408 (32.2) =	13.1	mm/dia
A radiação extraterrestre é 32.2 MJ m ⁻² dia ⁻¹ .			

Radiação extraterrestre para períodos de hora em hora ou menores (R_a)

Para períodos de hora em hora ou menores o ângulo solar no início e no fim do período deveria ser considerado quando calcular R_a :

$$R_a = \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1))] \quad (28)$$

onde

R_a = radiação extraterrestre por hora ou período menor [MJ m⁻² h⁻¹],

G_{sc} = constante solar = 0.0820 MJ m⁻² min⁻¹,

d_r = inverso da distância relativa Terra-Sol (Equação 23),

δ = declinação solar [rad] (Equação 24),

φ = latitude [rad] (Equação 22),

ω_1 = ângulo do tempo solar para o começo do período [rad] (Equação 29),

ω_2 = ângulo do tempo solar para o fim do período [rad] (Equação 30).

Os ângulos do tempo solar para o começo e o fim do período são determinados por:

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi t_1}{24} \quad (29)$$

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi t_1}{24} \quad (30)$$

onde

ω = ângulo do tempo solar para o ponto central do período de hora em hora ou menor [rad],

t_1 = duração do período de cálculo [hora]: i.e., 1 para período de hora em hora ou 0.5 para um período de 30 minutos.

O ângulo do tempo solar do ponto central do período é:

$$\omega = \frac{\pi}{12} [(t + 0.06667(L_z - L_m) + S_c) - 12] \quad (31)$$

onde

t = tempo de relógio padrão ao ponto central do período [hora]. Por exemplo para um período entre 14.00 e 15.00 horas, $t = 14.5$,

L_z = longitude do centro da zona de hora local [graus oeste de Greenwich]. Por exemplo, $L_z = 75, 90, 105$ e 120° para a Oriental, Central, Montanha Rochosa e Pacífico zonas de horas (os Estados Unidos) e $L_z = 0^\circ$ para o Greenwich, 330° para Cairo (Egito), e 255° para Bangkok (Tailândia),

L_m = longitude do local de medida [graus oeste de Greenwich],

S_c = correção sazonal para o tempo solar [hora].

Claro que, $\omega < \omega_s$ ou $\omega > \omega_s$ para a Equação 31 indica que o sol está abaixo do horizonte de forma que, por definição, R_a é zero.

A correção sazonal para o tempo solar é:

$$S_c = 0.1645 \sin(2b) - 0.1255 \cos(b) - 0.025 \sin(b) \quad (32)$$

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364} \quad (33)$$

onde J é o número do dia do ano.

Horas de luz máxima do dia (N)

As horas de luz máxima do dia, N , são determinadas por:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (34)$$

onde ω_s é o ângulo horário de pôr-do-sol em radianos dado pela Equação 25 ou 26. Valores médios para N (15° dia de cada mês) para diferentes latitudes são fornecidos no Anexo 2, Tabela 2.7.

EXEMPLO 9. Determinação de horas de luz do dia

Determinar as horas máximas da luz do dia (N) para 3 de Setembro a 20°S.			
Pela Exemplo 8:	$\omega_s = \arccos[-\tan(-0.35)\tan(0.120)] =$	1.527	rad
Pela Eq. 34:	$N = 24/\pi (1.527) =$	11.7	h
O número de horas máximas de luz do dia é 11.7 horas.			
CAIXA 9. Calcular a radiação extraterrestre (R_a) e horas máximas de luz do dia (N)			
Latitude			
Graus e minutos são + positivos para o hemisfério norte e - negativos para o hemisfério sul.			
Graus	<input type="text"/>	°	----->
Minutos	<input type="text"/>	'	-----/60----->
Graus decimal = Soma(graus + minutos/60)			°
$\varphi = \pi /180*[$ graus decimal $] Eq. 22$			rad
Dia do ano			
Dia	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Mês	<input type="text"/>	<input type="text"/>	J Tabela 2.5 (Anexo 2)
$d_r = 1 + 0.033 \cos(2\pi J/365) Eq. 23$			
$\delta = 0.409 \sin(2\pi J/365-1.39) Eq. 24$			rad
$\sin(\varphi)\sin(\delta)$			
$\cos(\varphi)\cos(\delta)$			
$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] Eq. 25$			rad
$(24(60)/\pi G_{sc}$			37.59 MJ m ² dia ⁻¹
Radiação Extraterrestre: R_a			
$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega_s)] Eq. 21$			MJ m ² dia ⁻¹

Horas máxima de luz do dia: N		
$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$ Eq. 34		horas/dia

Radiação solar (Rs)

Se a radiação solar, R_s , não é medida, pode ser calculado com a fórmula de Angström que relaciona radiação solar com radiação extraterrestre e duração relativa da luz do dia (razão de insolação n/N):

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (35)$$

onde

R_s radiação solar ou de onda curta [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],

n duração real da luz do dia [hora],

N duração máxima possível da luz do dia ou insolação máxima [hora],

n/N duração relativa de raio de sol [-],

R_a radiação extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],

a_s constante de regressão, expressando a fração de radiação extraterrestre que chega a terra em dias nublados ($n = 0$),

$a_s + b_s$ fração de radiação extraterrestre que chega a terra em dias claros ($n = N$).

R_s é expresso na equação acima em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. A evaporação equivalente correspondente em mm dia^{-1} é obtida multiplicando R_s por 0.408 (Equação 20). Dependendo das condições atmosféricas (umidade, pó) e declinação solar (latitude e mês), os coeficientes da equação de Angstrom a_s e b_s variarão. Onde nenhum dado de radiação solar atual está disponível e nenhuma calibração foi feita para melhorar os parâmetros a_s e b_s , os valores $a_s = 0.25$ e $b_s = 0.50$ são recomendados.

A radiação extraterrestre, R_a , e as horas máximas possíveis de luz do dia ou da duração de raio de sol, N , é determinada pela de Equações 21 e 34. Também são listados valores para R_a e N para diferentes latitudes no Anexo 2 (Tabelas 2.6 e 2.7). A duração real da luz do dia, n , é registrada no registrador de raio de sol Campbell-Stokes.

EXEMPLO 10. Determinação da radiação solar pela medida da duração de luz do sol

No Rio de Janeiro (Brasil) a latitude de 22°54'S, 220 horas de luz do sol foi registrado em Maio. Determinar a radiação solar.			
Pela Eq. 22:	latitude = 22°54'S = 22.90°S ou $\pi /180(-22.90) =$	-0.40	rad
Pela Tabela 2.5:	Para 15 de Maio, o dia do ano (J) =	135	--
Pela Eq. 21 ou Tabela 2.6:	$R_a =$	25.1	MJ m ⁻² dia ⁻¹
Pela Eq. 34 ou Tabela 2.7	$N =$	10.9	horas dia ⁻¹
	$n = 220 \text{ horas}/31 \text{ dias} =$	7.1	horas dia ⁻¹
Pela Eq. 35:	$R_s = [0.25 + 0.50 (7.1/10.9)] R_a = 0.58 R_a = 0.58 (25.1) =$	14.5	MJ m ⁻² dia ⁻¹
Pela Eq. 20:	expressa em evaporação equivalente = $0.408(14.5) =$	5.9	mm/dia
A radiação solar estimada é 14.5 MJ m ⁻² dia ⁻¹ .			

Radiação solar de céu claro (Rso)

O cálculo da radiação solar de céu claro, Rso, quando $n = N$, é necessário para estimar radiação de onda longa líquida.

- Para nível próximo do mar ou quando valores calibrados para a_s e b_s estão disponíveis:

$$R_{so} = (a_s + b_s)R_a \quad (36)$$

onde

R_{so} = radiação solar de céu claro [MJ m⁻² dia⁻¹],

$a_s + b_s$ = fração da radiação extraterrestre que chega a terra em dias de céu claro ($n = N$).

- Quando os valores calibrados para a_s e b_s não estão disponíveis:

$$R_{so} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5}z)R_a \quad (37)$$

onde

z = elevação da estação sobre o nível do mar [m].

Outras estimativas mais complexas para Rso que inclui céu nublado e efeito do vapor de água, serão discutidos no Anexo 3 (Equações 3.14 a 20).

Radiação de onda curta líquida ou solar líquida (Rns)

A radiação de onda curta líquida que é o resultado do balanço entre radiação solar que chega a superfície e a refletida é determinada por:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (38)$$

onde

R_{ns} = radiação de onda curta líquida ou solar líquida [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],

α = albedo ou coeficiente de reflexão do dossel que é 0.23 para a cultura de referência grama hipotética [adimensional],

R_s = radiação solar que chega a superfície [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$].

R_{ns} é expressa na equação acima em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Radiação de onda longa líquida (R_{nl})

A taxa de emissão de energia de onda longa é proporcional à temperatura absoluta da superfície elevada a quarta potência. Esta relação é expressa quantitativamente pela lei Stefan-Boltzmann. O fluxo de energia líquida que deixa a superfície da terra é, de qualquer forma, menos que aquela emitida e dada pela lei de Stefan-Boltzmann devido à absorção e radiação descendente do céu. Vapor d'água, nuvens, gás carbônico e pó são absorvedores e emissores da radiação de onda longa. As suas concentrações deveriam ser conhecidas quando for avaliar o fluxo de saída líquida. Como a umidade e a nebulosidade têm um papel importante, a lei de Stefan-Boltzmann é corrigida para estes dois fatores quando é calculado o fluxo de saída líquida da radiação de onda longa. É assumido assim que as concentrações dos absorvedores são constantes:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right] \left\{ 0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \right\} \quad (39)$$

onde

R_{nl} = radiação de onda longa líquida [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],

σ = constante de Stefan-Boltzmann [$4.903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],

T_{\max} , K = temperatura absoluta máxima durante o período de 24 h [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.16$],

T_{\min} , K = temperatura absoluta mínima durante o período de 24 h [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.16$],

e_a = pressão de vapor atual [kPa],

R_s/R_{so} = radiação relativa de onda curta (limite ≤ 1.0),

R_s = radiação solar medida ou calculada (Equação 35) [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],

R_{so} = radiação de céu claro calculada (Equação 36 ou 37) [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$].

Uma média da temperatura máxima do ar a quarta potência e a temperatura mínima do ar a quarta potência é comumente usada na equação de Stefan-Boltzmann para um tempo de 24 h. O termo $(0.34-0.14\sqrt{e_a})$ expressa a correção para umidade do ar, e será menor se a umidade aumentar. O efeito da nebulosidade é expresso por $(1.35 R_s/R_{so} - 0.35)$. O termo fica menor se a nebulosidade aumentar e conseqüentemente diminuições de R_s . Quanto menor o termo de correção, menor o fluxo de saída líquida da radiação de onda longa. Nota que o termo de R_s/R_{so} na Equação 39 deve ser limitado de forma que $R_s/R_{so} \leq 1.0$.

Onde medidas de entrada e de saída de radiação de onda longa e curta durante horas de períodos nublados e de insolação estão disponíveis, calibração dos coeficientes da Equação 39 pode ser efetivado.

No Anexo 2 (Tabela 2.8) estão listados valores para σT_K^4 para diferentes temperaturas do ar.

EXEMPLO 11. Determinação da radiação de onda longa líquida

No Rio de Janeiro (Brasil) a latitude de 22°54'S (= -22.70°), 220 horas de insolação, uma média mensal da temperatura do ar diária máxima e mínima de 25.1 e 19.1°C e uma pressão de vapor de 2.1 kPa foi registrado em Maio. Determinar a radiação de onda longa líquida.			
Pela Exemplo 10:	$R_s =$	14.5	MJ m ² dia ⁻¹
Pela Eq. 36:	$R_{so} = 0.75 R_a = 0.75 \cdot 25.1 =$	18.8	MJ m ² dia ⁻¹
Pela Tabela 2.8:	$\sigma =$	4.903 10 ⁻⁹	MJ K ⁻⁴ m ⁻² dia ⁻¹
Então:	$T_{max} = 25.1^\circ\text{C} =$	298.3	K
e:	$\sigma T_{max}^4 =$	38.8	MJ m ² dia ⁻¹
e:	$T_{min} = 19.1^\circ\text{C} =$	292.3	K
e:	$\sigma T_{min}^4 = 35.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	35.8	MJ m ² dia ⁻¹
e:	$e_a =$	2.1	kPa
e:	$0.34-0.14 \sqrt{e_a} =$	0.14	-
e:	$R_s/R_{so} = (14.5)/(18.8)$	0.77	-
-	$1.35(0.77) - 0.35 =$	0.69	-
Pela Eq. 39:	$R_{nl} = [(38.7 + 35.7)/2] (0.14) (0.69) =$	3.5	MJ m ² dia ⁻¹
Pela Eq. 20:	expressa em evaporação equivalente = $0.408 (3.5) =$	1.4	mm/dia

A radiação de onda longa líquida é $3.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Radiação líquida (R_n)

A radiação líquida (R_n) é a diferença entre a radiação de onda curta líquida (R_{ns}) e a radiação de onda longa líquida (R_{nl}):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (40)$$

EXEMPLO 12. Determinação da radiação líquida

Determinar a radiação líquida no Rio de Janeiro em Maio com os dados do exemplo anterior.			
Pela Exemplo 10:	$R_s =$	14.5	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
Pela Eq. 39:	$R_{ns} = (1 - 0.23) R_s =$	11.1	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
Pela Exemplo 11:	$R_{nl} =$	3.5	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
Pela Eq. 40:	$R_n = 11.1 - 3.5 =$	7.6	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
Pela Eq. 20:	expressa em evaporação equivalente = $0.408 (7.7) =$	3.1	mm/dia
A radiação líquida é $7.6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.			

CAIXA 10. Seqüência de cálculo para radiação líquida (R_n)

Latitude	°		
Dia		R_a (CAIXA 9 ou Tabela 2.6)	$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Mês		N (CAIXA 9 ou Tabela 2.7)	horas
N	horas	(na ausência de R_s) n/N	
Radiação solar líquida: R_{ns}			
Se n é medido no lugar de R_s :			
$R_s = (0.25 + 0.50 n/N) R_a$ Eq. 35			$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
$R_{so} = [0.75 + 2 (\text{Altitude})/100000] R_a$ Eq. 37			$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
$R_s/R_{so} (\leq 1.0)$			
$R_{ns} = 0.77 R_s$ Eq. 38			$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Radiação de onda longa líquida: R_{nl} com $\sigma = 4.903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $T_K = T[^\circ\text{C}] + 273.16$			

T_{\max}	°C	$T_{\max, K} = T_{\max} + 273.16$	K
T_{\min}	°C	$T_{\min, K} = T_{\min} + 273.16$	K
		$\sigma T_{\max, K^4} =$ (Tabela 2.8)	MJ m ⁻² d ⁻¹
		$\sigma T_{\min, K^4} =$ (Tabela 2.8)	MJ m ⁻² d ⁻¹
$(\sigma T_{\max, K^4} + \sigma T_{\min, K^4})/2$			MJ m ⁻² d ⁻¹
e_a	kPa	$(0.34 - 0.14\sqrt{e_a})$	
R_s/R_{s0}		$(1.35 R_s/R_{s0} - 0.35)$	
$R_{nl} = (\sigma T_{\max, K^4} + \sigma T_{\min, K^4})/2 (0.34 - 0.14\sqrt{e_a})(1.35 R_s/R_{s0} - 0.35)$ Eq. 39			MJ m ⁻² d ⁻¹
Radiação líquida: R_n			
$R_n = R_{ns} - R_{nl}$ Eq. 40			MJ m ⁻² d ⁻¹

Fluxo de calor de solo (G)

Modelos complexos estão disponíveis para descrever o fluxo de calor do solo. Porque o fluxo de calor do solo é pequeno quando comparado com R_n , particularmente quando a superfície é coberta por vegetação e o tempo de cálculo é de 24 horas ou maior, um procedimento de cálculo simples é apresentado aqui para intervalo de tempo longo, com base na idéia de que a temperatura do solo segue a temperatura do ar:

$$G = c_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z \quad (41)$$

onde

G = fluxo de calor do solo [MJ m⁻² dia⁻¹],

c_s = capacidade calorífica do solo [MJ m⁻³ °C⁻¹],

T_i = temperatura do ar no momento i [°C],

T_{i-1} = temperatura do ar no momento $i-1$ [°C],

Δt = duração do intervalo de tempo [dia],

Δz = profundidade efetiva do solo [m].

Como a temperatura do solo muda lentamente com a temperatura do ar, isto é, existe uma correlação entre as temperaturas, a temperatura média para um período diário ou maior

deve ser considerada quando for avaliado o fluxo de calor do solo, i.e., t deveria exceder um dia. A profundidade de penetração da onda de temperatura é determinada pela duração do intervalo de tempo. A profundidade efetiva do solo, z, é somente de 0.10-0.20 m para um intervalo de tempo de um ou alguns dias mas poderia ser 2 m ou mais para períodos mensais. A capacidade calorífica do solo está relacionada com a sua composição mineral e conteúdo de água.

- Para períodos de um dia e dez dias:

Como a magnitude do fluxo de calor do solo para o período de um dia ou dez dias sob uma superfície de referência grama é relativamente pequeno, pode ser ignorado e assim:

$$G_{\text{dia}} \approx 0 \quad (42)$$

- Para períodos mensais:

Quando assumimos uma capacidade calorífica do solo constante de $2.1 \text{ MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e uma profundidade do solo apropriada, a Equação 41 pode ser usada para estimar G para períodos mensais:

$$G_{\text{Mês}, i} = 0.07 (T_{\text{Mês}, i+1} - T_{\text{Mês}, i-1}) \quad (43)$$

ou, se $T_{\text{Mês}, i+1}$ são desconhecidos:

$$G_{\text{Mês}, i} = 0.14 (T_{\text{Mês}, i} - T_{\text{Mês}, i-1}) \quad (44)$$

onde

$T_{\text{Mês}, i}$ = temperatura média do ar do mês i [$^\circ\text{C}$],

$T_{\text{Mês}, i-1}$ = temperatura média do ar do mês anterior [$^\circ\text{C}$],

$T_{\text{Mês}, i+1}$ = temperatura média do ar de mês posterior [$^\circ\text{C}$].

- Para períodos de hora em hora ou menores:

Para cálculos de hora em hora (ou menor), G sob uma cobertura densa de grama não correlaciona bem com temperatura do ar. G de hora em hora pode ser aproximado para períodos durante a luz do dia como:

$$G_{\text{hr}} = 0.1 R_n \quad (45)$$

e durante períodos noturno como:

$$G_{\text{hr}} = 0.5 R_n \quad (46)$$

Quando o solo está aquecendo, o fluxo de calor do solo G é positivo. A quantidade de energia requerida para este processo vem de R_n quando estamos calculando evapotranspiração.

EXEMPLO 13. Determinação do fluxo de calor do solo para períodos mensais

Determinar o fluxo de calor do solo em Abril na Algiers (Argélia) onde o solo é aquecido. A temperatura média mensal para Março, Abril e Maio é 14.1, 16.1, e 18.8°C respectivamente.			
Pela Eq. 43	Para o mês de Abril: $G_{\text{mês}} = 0.07 (18.8 - 14.1) =$	0.33	MJ m ² dia ⁻¹
Pela Eq. 20	expressa em evaporação equivalente = $0.408(0.33) =$	0.13	mm/dia
O fluxo de calor do solo é 0.33 MJ m ² dia ⁻¹ .			

Velocidade do vento

Medida

O Vento é caracterizado por sua direção e velocidade. Direção do vento se refere à direção da qual o vento está soprando. Para o cálculo da evapotranspiração, a velocidade do vento é uma variável relevante. Como a velocidade do vento em uma determinada localização varia com o tempo, é necessário expressar isto como uma média em um determinado intervalo de tempo. Velocidade do vento é determinada em metros por segundo (m s⁻¹) ou quilômetros por dia (km dia⁻¹).

Velocidade do vento é medida com anemômetros. Os anemômetros comumente usados em estações meteorológicas são composto de copos ou hélices que são giradas pela força do vento. Contando o número de revoluções em um determinado período de tempo, é calculada a velocidade do vento médio em um intervalo de tempo.

Relação do perfil do vento

As velocidades do vento medidas a alturas diferentes sobre a superfície do solo são diferentes. A fricção da superfície tende a reduzir a velocidade vento que salta este. A velocidade do vento é menor na superfície e aumenta com a altura. Por isto são colocados anemômetros a uma altura escolhida padrão, i.e., 10 m em meteorologia e 2 ou 3 m em agrometeorologia. Para o cálculo da evapotranspiração, é necessária a velocidade do vento

medida a 2 m sobre a superfície. Para ajustar os dados de velocidade do vento obtidos de instrumentos colocados a elevações diferentes da altura padrão de 2m, um perfil logarítmico da velocidade do vento pode ser usado para medidas sobre uma superfície coberta de grama baixa:

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (47)$$

onde

u_2 = velocidade do vento a 2 m sobre a superfície do solo [$m s^{-1}$],

u_z = velocidade do vento medida a z m sobre superfície do solo [$m s^{-1}$],

z = altura de medida sobre superfície do solo [m].

Os fatores de conversão são determinados no Anexo 2 (Tabela 2.9) e são plotados na Figura 16.

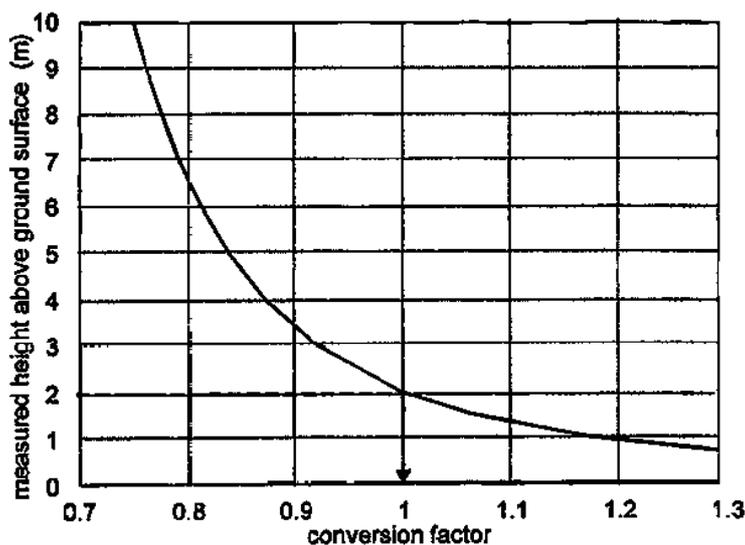


FIGURE 16. Fator de conversão para converter velocidade do vento medida a uma certa altura sobre o nível do solo para a velocidade do vento à altura padrão (2 m)

EXEMPLO 14. Dados de velocidade do vento ajustado para altura padrão

Determinar a velocidade do vento para a altura padrão de 2 m, para uma velocidade do vento de 3.2 m/s medida a 10 m da superfície do solo.			
Para:	$u_z =$	3.2	m/s
e:	$z =$	10	m
Então:	Fator de Conversão = $4.87/\ln(67.8(10) - 5.42) =$	0.75	-
Para Eq. 47:	$u_2 = 3.2(0.75) =$	2.4	m/s

A velocidade do vento a 2 m da superfície do solo é 2.4 m/s.

Aquisição dos dados climáticos

Estações Meteorológicas

São registrados dados meteorológicos em vários tipos de estações meteorológicas. Estações Agrometeorológicas são localizadas em áreas cultivadas onde são expostos instrumentos a condições atmosféricas semelhantes para esses e para as culturas circunvizinhas. Nestas estações, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e insolação são tipicamente medidas a 2 m sobre uma superfície extensa de grama ou cultura baixa. Local onde for necessária e possível, a cobertura da estação é irrigada. Diretrizes para a instalação e manutenção de estações agrometeorológicas são fornecidas na FAO Irrigação e Drenagem Artigo Nº. 27. Este manual também descreve os tipos diferentes de instrumentos, a sua instalação e confiabilidade.

Dados coletados em estações diferentes das estações agrometeorológicas requerem uma análise cuidadosa para a sua validade antes do seu uso. Por exemplo, em estações aeronáuticas, dados relevante para aviação são medidos. Como aeroportos são freqüentemente situadas próximas de condições urbanas, temperaturas podem ser mais elevadas que as encontradas em áreas agrícolas rurais. Velocidade do vento é comumente medida a 10 m de altura sobre a superfície do solo.

O serviço meteorológico nacional do país deveria ser contactado para informação sobre os dados climáticos coletados em vários tipos de estações meteorológicas. Serviços nacionais publicam boletins meteorológicos que fornecem dados climáticos processados das várias estações.

Os anexos listam procedimentos para a análise estatística, avaliação, correção e conclusão de dados meteorológicos parciais ou perdidos:

Anexo 4: Análise estatística de conjuntos de dados climáticos;

Anexo 5: Medição e avaliação da integridade de dados climáticos;

Anexo 6: Correção de dados meteorológicos obtidos em locais onde não é observada a referência para calcular ETo.

Bancos de dados agrometeorológicos mensais

Começou em 1984, a FAO publicou dados de agroclimáticos mensais médio de 2300 estações na FAO Planta Produção e Série de Proteção. Vários volumes existem:

No. 22: Volume 1: data for Africa, countries north of the equator (1984),

Volume 2: data for Africa, countries south of the equator (1984);

No. 24: Agroclimatic data for Latin America and the Caribbean (1985);

No. 25: Volume 1: Agroclimatic data for Asia (A-J) (1987),

Volume 2: Agroclimatic data for Asia (K-Z) (1987).

CLIMWAT para CROPWAT (FAO Irrigação e Drenagem Artigo N°. 46) contém dados mensais de 3262 estações climáticas contidas em cinco disquetes separados. As estações são agrupadas por país e continente. Médias mensais de temperaturas máxima e mínima, umidade relativa, velocidade do vento, horas de insolação, dados de radiação como também de chuva e ETo calculada pelo método de Penman-Monteith FAO é listado nos disquetes para condições médias em longo prazo.

FAOCLIM provê um usuário interface amigável em disco compacto para o banco de dados agroclimáticos do Grupo de Agrometeorologia da FAO. Os dados apresentados são uma extensão da FAO Planta Produção e Série de Proteção previamente publicada e o número de estações foi aumentada de 2300 para aproximadamente 19000, com uma cobertura mundial melhorada. Porém, valores para parâmetros meteorológicos principais não estão disponíveis para todas as estações. Muitos somente contêm temperatura do ar e precipitação.

Estes bancos de dados podem ser consultados em ordem verificar a consistência do banco de dados atual ou calcular dados dos parâmetros climáticos perdidos. Porém, eles somente deveriam ser usados para estudos preliminares como eles somente contêm dados médios mensais. FAOCLIM provê série meteorológica mensal para somente algumas estações. A informação nestes bancos de dados nunca deveria substituir dados atuais.

Outros bancos de dados eletrônicos para outras regiões do globo foram publicados pelo Instituto de Manejo de Água Internacional (IMAI). Estes bancos de dados incluem dados diário e mensal da temperatura do ar, precipitação e ETo estimado usando a equação de Hargreaves e ETo que é baseada nas diferenças entre temperatura máxima e mínima diária do ar.

Estimativas dos dados climáticos perdidos

A estimativa da evapotranspiração de referência, E_{To} , utilizando o método de Penman-Monteith que será desenvolvido no Capítulo 4. O cálculo requer dados médios diário, de dez dias ou mensal da temperatura do ar máxima e mínima (T_{max} e T_{min}), pressão de vapor atual (e_a), radiação líquida (R_n) e velocidade do vento medida a 2 m de altura (u_2). Se alguns dos dados meteorológicos exigidos foram perdidos ou não podem ser calculados, é recomendado que o usuário estime os dados climáticos perdido com um dos procedimentos abaixo e utilize o método de Penman-Monteith FAO para o cálculo de E_{To} . O uso de um procedimento de cálculo alternativo para E_{To} requer parâmetros meteorológicos limitados e é menos recomendado. Procedimentos para calcular dados perdidos de umidade, radiação e velocidade do vento são fornecidos nesta seção.

Cálculo de dados perdidos de umidade

Onde dados de umidade estão faltando ou são de qualidade questionável, uma estimativa da pressão de vapor atual, e_a , pode ser obtida assumindo que a temperatura do ponto de orvalho (T_{dew}) está próximo da temperatura do ar mínima diária (T_{min}). Esta T_{dew} é implicitamente assumido que ocorra ao nascer do sol, quando a temperatura do ar está perto da T_{min} e o ar está quase saturado com vapor de água e a umidade relativa é quase 100%. Se T_{min} é utilizado para substituir T_{dew} então:

$$e_a = e^{\circ}(T_{min}) = 0.611 \exp \left[\frac{17.27 T_{min}}{T_{min} + 237.3} \right] \quad (48)$$

A relação $T_{dew} \approx T_{min}$ é verdadeira para localizações onde a cultura que cobre a estação é bem irrigada. Porém, particularmente para regiões áridas, o ar poderia não ser saturado quando sua temperatura está em seu mínimo. Conseqüentemente, a T_{min} poderia ser maior do que a T_{dew} podem ser exigidas uma calibração adicional para calcular a temperatura do ponto de orvalho. Nestas situações, “ T_{min} ” da equação acima pode ser melhor aproximada subtraindo 2-3 °C da T_{min} . Procedimentos apropriados para a correção são fornecidos no Anexo 6. Em clima úmido e sub úmido, T_{min} e T_{dew} medidos de manhã cedo pode ser menor que T_{dew} medido durante o dia por causa da condensação do orvalho durante a noite. Depois de amanhecer, a evaporação do orvalho tornará o ar mais úmido aumentando assim o valor medido para T_{dew} durante o dia. Este fenômeno é demonstrado na

Figura 5.4 do Anexo 5. Porém, é prática padrão para o cálculo de E_{To} para o período de 24 horas usar T_{dew} medido ou calculado de manhã cedo.

A estimativa para e_a de T_{min} deveria ser conferida. Quando a estimação através da Equação 48 é validada para uma região, pode ser usada para estimativas diária de e_a .

Cálculo dos dados perdidos de radiação

Radiação líquida é medida por dispositivo que requer controle profissional é raramente instalado em estações agrometeorológicas. Na ausência de uma medida direta, radiação de onda longa e líquida pode ser estimadas de parâmetros meteorológicos comumente observados, i.e., radiação solar ou horas de raio de sol, temperatura do ar e pressão de vapor. Onde radiação solar não é medida, pode ser calculado utilizando a horas de insolação. Porém, onde dados de insolação diária (n) não são disponíveis, não podem ser estimados dados de radiação solar com os procedimentos de cálculo apresentados. Esta seção apresenta vários métodos para calcular dados de radiação solar como uma metodologia alternativa.

Dados de Radiação solar de uma estação meteorológica próxima

Este método confia no fato de que durante o mesmo mês e freqüentemente durante o mesmo dia, as variáveis que afetam a radiação solar, R_s , e a insolação, n , são semelhantes ao longo de uma determinada região. Isto implica: (i) o tamanho da região é pequena; (ii) a massa de ar que governa pancadas de chuva e o céu nublado são quase idênticas dentro de partes da região; e (iii) a fisiografia da região é quase homogêneo. Diferenças em rendimento deveriam ser desprezíveis como eles influenciam o movimento de massas de ar fortemente. Sob tal condição, podem ser usados dados de radiação observados em estações próxima.

Deve-se ter precaução quando aplicar este método para áreas montanhosas e litorais onde diferenciam em exposição e altitude poderia ser importantes ou onde chuva é variável devido a condições convectiva. Além disso, dados de uma estação localizada próxima mas situada do outro lado de uma montanha pode não ser transferível quando as condições de radiação reinantes forem diferentes. O usuário deveria observar condições climáticas nas localizações e deveria obter informação dos moradores locais em relação a diferenças gerais em tipo e cobertura de nuvem.

Onde à distância norte-sul para uma estação meteorológica dentro da mesma região homogênea exceder 50 km de forma que muda o valor de R_a , a medida de R_s deveria ser ajustada utilizando a relação entre a radiação solar e radiação extraterrestre, R_s/R_a :

$$R_s = \frac{R_{s,reg}}{R_{a,reg}} R_a \quad (49)$$

onde

$R_{s,reg}$ = radiação solar à localização regional [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],

$R_{a,reg}$ = radiação extraterrestre à localização regional [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$].

Sempre que a radiação solar for derivada dos dados de radiação de uma estação próxima, a radiação de onda longa líquida (Equação 39) e a radiação líquida (Equação 40) podem ser calculadas.

O método de estimação da Equação 49 é recomendado para cálculos mensais de ETo. Se o método for usado para estimativas diárias de ETo, uma análise mais cuidadosa dos dados meteorológicos nas estações meteorológicas que importando e exporta tem que ser executada para verificar se ambas as estações estão na mesma região climática homogênea e são próximas o bastante para experimentar condições semelhantes dentro do mesmo dia. A análise deveria incluir a comparação de dados meteorológicos diários de ambas as estações, particularmente temperatura do ar máxima e mínima e a umidade. De fato, são relacionadas nebulosidade semelhante e durações de raio de sol a semelhanças em temperatura e tendências de umidade.

Geralmente, cálculos diários de ETo com dados de radiação calculados são justificados quando utilizou como uma soma ou uma média em cima de um período de vários dias. Este é o caso para o cálculo da demanda de evapotranspiração média entre irrigações sucessivas ou quando planejando horários de irrigação. Sob estas condições, o erro relativo durante um dia contrabalança freqüentemente o erro durante outro dia do período calculando a média. Diariamente não deveriam ser utilizadas estimativas como estimativas verdadeiras de diário mas somente em médias em cima do período sob de consideração.

Dados de Radiação solar estimado de diferenças de temperatura do ar

A diferença entre a temperatura do ar máximo e mínimo está relacionada ao grau de cobertura de nuvem em uma localização. O céu claro condiciona o resultado em temperaturas altas durante o dia (T_{max}) porque a atmosfera é transparente à radiação solar e em baixas

temperaturas durante a noite (T_{\min}) porque a radiação de onda longa é menos absorvida pela atmosfera. Por outro lado, em condições nubladas, T_{\max} é relativamente menor porque uma parte significativa da radiação solar nunca chega a superfície do solo e é absorvido e refletido pelas nuvens. Semelhantemente, T_{\min} será relativamente mais alto devido a cobertura de nuvem como uma manta e diminuição da perda da radiação de onda longa líquida para o espaço. Então, a diferença entre a temperatura do ar máximo e mínimo ($T_{\max} - T_{\min}$) pode ser usado como um indicador da fração de radiação extraterrestre que chega a superfície do solo. Este princípio foi utilizado pelo Hargreaves e Samani para desenvolver estimativas de E_{To} que usa somente dados de temperatura do ar.

A fórmula de Hargreaves radiação, ajustada e validada para várias estações em uma variedade de condições climáticas, se torna:

$$R_s = k_{Rs} \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} R_a \quad (50)$$

onde

R_a = radiação extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$],

T_{\max} = temperatura máxima do ar [$^{\circ}\text{C}$],

T_{\min} = temperatura mínima do ar [$^{\circ}\text{C}$],

k_{Rs} = coeficiente de ajuste (0.16.. 0.19) [$^{\circ}\text{C}^{-0.5}$].

A raiz quadrada da diferença de temperatura é relacionamento próximo à existência diária da radiação solar em uma determinada localização. O coeficiente de ajuste k_{Rs} é empírico e difere para as regiões “interioranas” ou “litorâneas”:

- para localizações “interioranas”, aonde chegam massa dominantes e massas de ar não são influenciadas fortemente por uma grande massa de água, k_{Rs} 0.16;
- para localizações “litorâneas”, situadas ou adjacente à costa de uma grande massa de solo e onde as massas de ar são influenciadas por uma massa de água próxima, k_{Rs} 0.19.

A relação entre R_s/R_a e a diferença de temperatura são plotados na Figura 17 para localizações “interioranas” e “litorâneas”. A fração de radiação extraterrestre que chega a superfície do solo, R_s/R_a , é aproximadamente 0.25 em um dia nublado com cobertura de nuvem densa e de aproximadamente 0.75 em um dia sem nuvens com céu claro. R_s estimado pela Equação 50 deveria ser limitado a $\leq R_{so}$ de Equação 36 ou 37.

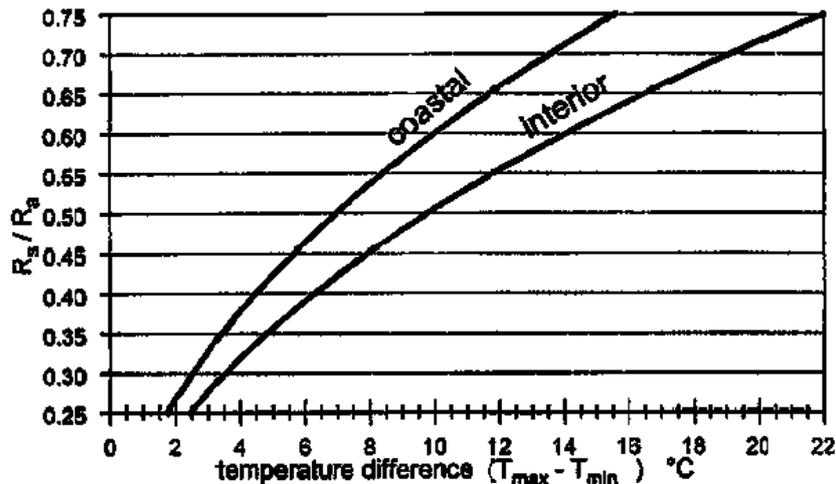


FIGURA 17. Relação entre a fração de radiação extraterrestre que chega a superfície do solo, R_s/R_a , e a diferença de temperatura do ar $T_{max} - T_{min}$ para as regiões do interior ($kR_s = 0.16$) e litoral ($kR_s = 0.19$)

O método da diferença de temperatura é recomendado para localizações onde não é apropriado importar dados de radiação de uma estação regional qualquer, porque não ocorrem condições de clima homogêneas, ou porque dados para a região estão faltando. Para condições de ilha, a metodologia da Equação 50 não é apropriada devido a reduzir os efeitos da massa de água circunvizinha.

Precaução é requerida quando são necessárias estimativas diárias de ETo. O conselho dado se aplica para a Equação 49. É recomendada para estimativas diárias de ETo com base em estimativa de R_s fossem somadas ou calculadas a média de um período de vários dias, como uma semana, década ou mês para reduzir erro de estimativa.

EXEMPLO 15. Determinação de radiação solar de dados de temperatura

Determinar a radiação solar para dados de temperatura de Junho em Lion (França) com a latitude de 45°43'N e de altitude 200 m. Em Julho, a temperatura máxima e mínima do ar média mensal são 26.6 e 14.8°C respectivamente.			
	latitude = 45°43' = +45.72 graus decimal =	0.80	radianos
Pela Table 2.5:	O dia do ano para 15 de Julho is	196	-
Pela Eq. 21 ou Anexo 2 (Tabela 2.6):	$R_a =$	40.6	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
Pela Eq. 50 (latitude igual):	$R_s = 0.16 [\sqrt{(26.6-14.8)}] R_a = 0.55 (40.6) =$	22.3	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
Pela Eq. 20 (latitude igual):	Evaporação equivalente = 0.408 (22.3) =	9.1	mm/dia
Em Julho, a estimativa radiação solar, R_s , é 22.3 $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$			

EXEMPLO 16. Determinação de radiação líquida na ausência de dados de radiação

Calcular a radiação líquida para Bangkok (13°44'N) utilizando T_{max} , e T_{min} . A estação está localizada no litoral a 2 m acima do nível do mar. Em Abril, as médias mensais da temperatura máxima diária, temperatura mínima diária e pressão de vapor diária são 34.8°C, 25.6°C e 2.85 kPa respectivamente.			
Para Latitude 13°44'N = + 13.73° graus decimal = - 0.24 radianos e para 15 de Abril, J = 105:			
Pela Eq. 21 or Tabela 2.6.	$R_a =$	38.1	MJ m ² dia ⁻¹
	(localização no litoral) $k_{Rs} =$	0.19	
	$(T_{max} - T_{min}) = (34.8 - 25.6) =$	9.2°C	°C
Pela Eq. 50:	$R_s = 0.19\sqrt{(9.2)R_a}$	21.9	MJ m ² dia ⁻¹
Pela Eq. 36:	$R_{s0} = 0.75 R_a$	28.5	MJ m ² dia ⁻¹
Pela Eq. 38:	$R_{ns} = 0.77R_s$	16.9	MJ m ² dia ⁻¹
	$\sigma =$	4.903 10 ⁻⁹	MJ K ⁴ m ⁻² dia ⁻¹
	$T_{max} =$	34.8	°C
	$\sigma T_{max,K^4} =$	44.1	MJ m ² dia ⁻¹
	T_{min}	25.6	°C
	$\sigma T_{min,K^4} =$	39.1	MJ m ² dia ⁻¹
	$(\sigma T_{max,K^4} + \sigma T_{min,K^4})/2 = (44.1 + 39.1)/2 =$	41.6	MJ m ² dia ⁻¹
Para:	$e_a = 2.85$ kPa	2.85	kPa
	$(0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) =$	0.10	-
Para:	$R_s/R_{s0} =$	0.77	-
Então:	$(1.35(R_s/R_{s0}) - 0.35) =$	0.69	-
Pela Eq. 39:	$R_{nl} = 41.6(0.10)0.69 =$	3.0	MJ m ² dia ⁻¹
Pela Eq. 40:	$R_n = (16.9 - 2.9) =$	13.9	MJ m ² dia ⁻¹
Pela Eq. 20:	Evaporação equivalente = 0.408 (13.9) =	5.7	mm/dia
A radiação líquida estimada é 13.9 MJ m ² dia ⁻¹ .			

Metodologia empírica para localizações em ilha

Para localizações em ilha, onde a massa de terra tem uma largura perpendicular para o litoral de 20 km ou menos, a massa de ar que influencia as condições atmosféricas é dominado pela massa de água adjacente de todas as direções. O método da temperatura não é apropriado para esta situação. Onde os dados de radiação de outra localização na ilha não estão disponíveis, uma primeira estimativa da média solar mensal pode ser obtida da relação empírica:

$$R_s = 0.7 R_a - b \quad (51)$$

onde

R_s = radiação solar [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],

R_a = radiação extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],

b = constante empírica, igual a $4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Esta relação é somente aplicável para baixas altitudes (de 0 a 100 m). A constante empírica representa o fato de que em ilhas algumas nuvens estão normalmente presentes e fazem assim para a radiação solar média de $4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ sob um céu quase claro ($0.7 R_a$). Ajuste local da constante empírica pode melhorar a estimativa.

O método é somente apropriado para cálculos mensais. A relação constante entre R_s e R_a não produz estimativas precisas para cálculo diário.

Dados de velocidade do vento perdidos

Dados de velocidade do vento de uma estação meteorológicas próxima

Dados de velocidade do vento importando de uma estação próxima, como para os dados de radiação, confia no fato que o fluxo de ar sobre uma região “homogênea” pode ter variações relativamente grandes durante o transcorrer de um dia mas variações pequenas quando se referindo a períodos mais longos ou o total durante o dia. Podem ser importados dados de uma estação próxima onde massas de ar são da mesma origem ou onde as mesmas frentes governam fluxos de ar na região e onde o alívio é semelhante. Quando importamos dados de velocidade do vento de outra estação, o clima regional, deveriam ser comparados tendências em variação de outros parâmetros meteorológicos e alívio. Ventos fortes são freqüentemente associados com baixa umidade relativa e ventos leves e médio com umidade relativa alta. Assim, tendências em variação da umidade relativa máximo e mínimo diária deveriam ser semelhantes em ambas as localizações. Em áreas montanhosas, não deveriam

ser importados necessariamente dados da estação mais próxima mas de estações próxima com elevação semelhante e exposição para os ventos dominantes. As estações unidas podem variar até mesmo de uma estação a outro e podem depender dos ventos dominantes.

Podem ser utilizados dados de velocidade do vento importados quando for feita estimativa mensal de evapotranspiração. Cálculos diários são justificados quando utilizamos uma soma ou a média em um período de vários dias, como uma semana ou década.

Estimativas empíricas de velocidade do vento mensal

Como a variação em média da velocidade do vento em um período mensal é relativamente pequeno e os valores flutuam ao redor da média, podem ser calculados valores mensais de velocidade do vento. A velocidade do vento “médio” estimativas podem ser selecionadas de informação disponível para o clima regional, mas deveria levar em conta mudanças sazonais. São sugeridos valores gerais na Tabela 4.

TABELA 4. Classes gerais de dados de velocidade do vento mensais

Descrição	Velocidade do vento média mensal a 2 m
Vento leve	... ≤ 1.0 m/s
Vento leve a moderado	1 - 3 m/s
Vento moderado a forte	3 - 5 m/s
Vento forte	... ≥ 5.0 m/s

Onde nenhum dado de velocidade do vento está disponível dentro da região, pode ser usado um valor de 2 m/s como uma estimativa temporária. Este e o valor médio de mais de 2000 estações meteorológicas ao redor do globo. Em geral, a velocidade do vento a 2 m, u_2 , deveria ser limitado aproximadamente a $u_2 \geq 0.5$ m/s quando utilizar na equação de ETo (Equação 6). Isto é necessário para dar satisfação aos efeitos de instabilidade da camada limite e a flutuação do ar promovendo troca de vapor à superfície quando ar está tranquilo. Este efeito acontece quando a velocidade do vento é pequena e flutuação do ar quente induz troca de ar à superfície. Limitando $u_2 \geq 0.5$ m/s na equação de ETo melhora a precisão de estimativa sob as condições de velocidade do vento muito baixa.

Exigências de dados mínimas

Esta seção mostrou como podem ser calculados os dados perdidos de radiação solar, pressão de vapor e velocidade do vento. Muitos dos procedimentos sugeridos confiam em dados medidos da temperatura máxima e mínima do ar. Infelizmente, não há nenhum modo seguro para calcular temperatura do ar quando este for perdido. Então é sugerida que dados de temperatura máxima e mínima do ar diária sejam a mínima exigência de dados necessários para aplicar o método de Penman-Monteith FAO.

Uma equação alternativa para estimar ETo quando os dados meteorológicos são perdidos

Quando dados de radiação solar, e/ou dados de umidade relativa e dados de velocidade do vento são perdidos, utilizando os procedimentos apresentados nesta seção deveriam ser calculados. Como uma alternativa, ETo pode ser calculado usando a equação de Hargreaves para ETo onde:

$$E_{To} = 0.0023(T_{\text{média}} + 17.8)(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5} R_a \quad (52)$$

onde todos os parâmetros foram definidos previamente. Unidades para ETo e Ra na Equação 52 são mm dia⁻¹. A Equação 52 deveria ser verificada em cada nova região comparando com as estimativas da equação de Penman-Monteith FAO (Equação 6) em estações meteorológicas onde radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa, e velocidade do vento são medidas. Se necessário, Equação 52 pode ser calibrada em uma base mensal ou anual determinando os coeficientes empíricos onde $E_{To} = a + b E_{To}$ Eq. 52, onde a “Eq. 52” se refere a ETo estimada usando a Equação 52. Os coeficientes a e b pode ser determinado através de análises de regressão ou ajuste visual. Em geral, calculando radiação solar, pressão de vapor e velocidade do vento como descrito nas Equações 48 a 51 e Tabela 4 e utilizando estas estimativas na Equação 6 (equação de Penman-Monteith FAO) fornecerá estimativas um pouco mais precisas quando comparado com ETo estimada utilizando a Equação 52 diretamente. Isto acontece devido à habilidade das equações de estimação para incorporar características climáticas gerais como velocidade do vento forte ou leve ou umidade relativa alta ou baixa na estimativa de ETo utilizando a Equação 6.

A Equação 52 tem uma tendência a subestimar sob condições de vento forte ($u_2 > 3$ m/s) e para superestimar sob condições de umidade relativa alta.

Capítulo 4 - Determinação de ETo

Este capítulo demonstra como a evapotranspiração da cultura de referência (ETo) é determinado de dados meteorológicos ou de evaporação de tanque.

O método de Penman-Monteith FAO é mantido como o método padrão exclusivo para a estimativa de ETo a partir de dados meteorológicos. O método foi introduzido no Capítulo 2, e as estimativas de todos os dados requeridos para o cálculo de ETo são discutidas no Capítulo 3. Este capítulo apresenta diretrizes para calcular ETo para período de tempo diferente e varia de horas a meses, e com perda de dados climáticos. O cálculo de ETo pode ser feito à mão com ajuda de uma folha de cálculo, ou utilizando um computador.

ETo também pode ser estimado pela evaporação de uma superfície de água livre. O procedimento para obter ETo de evaporação de tanque e os coeficientes para tipos diferentes de tanques é apresentado neste capítulo.

Equação de Penman-Monteith

Da equação de Penman-Monteith original e as equações de resistência aerodinâmica e do dossel, a equação de Penman-Monteith FAO foi derivada no Capítulo 2:

$$E_{T_o} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad (6)$$

onde

ETo = evapotranspiração de referência [mm dia⁻¹],

Rn = radiação líquida à superfície da cultura [MJ m⁻² dia⁻¹],

G = densidade do fluxo de calor do solo [MJ m⁻² dia⁻¹],

T = temperatura do ar a 2 m de altura [°C],

u₂ = velocidade de vento a 2 m de altura [m s⁻¹],

e_s = pressão de vapor de saturação [kPa],

e_a = pressão de vapor atual [kPa],

e_s - e_a = déficit de pressão de vapor de saturação [kPa],

Δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação versus temperatura [kPa °C⁻¹],

γ = constante psicrométrica [kPa °C⁻¹].

A equação de Penman-Monteith FAO determina a evapotranspiração da superfície de referência da grama hipotética e fornece um padrão para o qual a evapotranspiração em períodos diferentes do ano ou em outras regiões pode ser comparado com a evapotranspiração de outras culturas.

Procedimento de cálculo

Folha de cálculo

A ETo pode ser calculada por meio da folha de cálculo apresentada na Caixa 11. A folha de cálculo se refere a Tabelas no Anexo II para a determinação de alguns dos parâmetros climáticos. O procedimento de cálculo consiste nos seguintes passos:

1. derivação de alguns parâmetros climáticos: temperatura do ar diária máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}), altitude (z) e velocidade do vento média de 24 h (u_2).
2. cálculo do déficit de pressão do vapor d'água ($e_s - e_a$). A pressão do vapor de saturação (e_s) é derivado da T_{max} e T_{min} , enquanto a pressão de vapor atual (e_a) pode ser derivado da temperatura do ponto de orvalho (T_{dew}), da umidade relativa do ar máxima (RH_{max}) e mínima (RH_{min}), da máxima (RH_{max}), ou da umidade relativa média (RH_{mean}).
3. determinação da radiação líquida (R_n) como a diferença entre a radiação de onda curta líquida (R_{ns}) e a radiação de onda longa líquida (R_{nl}). Na folha de cálculo, o efeito do fluxo de calor do solo (G) é ignorado para cálculos diários porque a magnitude do fluxo neste caso é relativamente pequena. A radiação líquida, expressada em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$, é convertida a mm/dia (evaporação equivalente) na equação de Penman-Monteith FAO usando 0.408 como o fator de conversão dentro da equação.
4. ETo é obtido combinando os resultados dos passos anteriores.

Exemplos 17 e 20 são típicos utilizando a folha de cálculo.

Cálculos computadorizados

Cálculos da evapotranspiração da cultura de referência ETo são freqüentemente estimados. São apresentados os procedimentos de cálculo de todos os dados requeridos para o cálculo de ETo por meio da equação de Penman-Monteith FAO no Capítulo 3. Típicas seqüências nas quais os cálculos podem ser executados são determinadas nas folhas de cálculo. Os procedimentos apresentados nas Caixas: 7 (déficit de pressão do vapor), 9 (radiação extraterrestre e horas de luz do dia (insolação)), 10 (radiação líquida) e 11 (ETo) podem ser utilizados quando forem desenvolver uma planilha eletrônica ou programa de computador para calcular ETo .

Muitos pacotes de software já usam a equação de Penman-Monteith FAO para avaliar a evapotranspiração de referência. Como por exemplo, CROPWAT, o software da FAO para programar irrigação, é apresentado na Figura 18.

ETo calculada com diferentes espaços de tempo

A seleção do espaço de tempo com que a ETo é calculada depende do propósito do cálculo, da precisão requerida e do espaço de tempo dos dados climáticos disponíveis.

CAIXA 11. Folha de cálculo para ETo (Penman-Monteith FAO) utilizando a metodologia e tabelas do Anexo 2				
Parâmetros				
T_{max}	°C			
T_{min}	°C	$T_{mean} - (T_{max} + T_{min})/2$		°C
T_{mean}	°C	Δ (Tabela 2.4 do Anexo 2)		kPa/°C
Altitude	m	γ (Tabela 2.2 do Anexo 2)		kPa/°C
U_2	m/s	$(1 + 0.34 u_2)$		
$\Delta / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)]$				
$\gamma / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)]$				
$[900 / (T_{mean} + 273)] u_2$				
Déficit de pressão do vapor				
T_{max}	°C	$e^{\circ}(T_{max})$ (Tabela 2.3)		kPa

T_{\min}	°C	$e^{\circ}(T_{\min})$ (Tabela 2.3)	kPa
Pressão do vapor de saturação $e_s = [(e^{\circ}(T_{\max}) + e^{\circ}(T_{\min}))]/2$			kPa
e_a derivada da temperatura do ponto de orvalho:			
T_{dew}	°C	$e_a = e^{\circ}(T_{\text{dew}})$ (Tabela 2.3)	kPa
ou e_a derivada da umidade relativa máxima e mínima:			
RH_{\max}	%	$e^{\circ}(T_{\min}) RH_{\max}/100$	kPa
RH_{\min}	%	$e^{\circ}(T_{\max}) RH_{\min}/100$	kPa
e_a : (média)			kPa
ou e_a derivada da umidade relativa máxima: (recomendado se existir erros na RH_{\min})			
RH_{\max}	%	$e_a = e^{\circ}(T_{\min}) RH_{\max}/100$	kPa
ou e_a derivada da umidade relativa média: (menos recomendada devido a não linearidade)			
RH_{mean}	%	$e_a = e_s RH_{\text{mean}}/100$	kPa
Déficit de pressão do vapor ($e_s - e_a$)			kPa
Radiação			
Latitude	°		
Dia		R_a (Tabela 2.6)	$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
Mês		N (Tabela 2.7)	hours
N	horas	n/N	
Se não tem dados disponível de R_s : $R_s = (0.25 + 0.50 n/N) R_a$			$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
$R_{s0} = [0.75 + 2 (\text{Altitude})/100000] R_a$			$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
R_s/R_{s0}			
$R_{ns} = 0.77 R_s$			$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
T_{\max}		$\sigma T_{\max, K^4} =$ (Tabela 2.8)	$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
T_{\min}		$\sigma T_{\min, K^4} =$ (Tabela 2.8)	$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
$(\sigma T_{\max, K^4} + \sigma T_{\min, K^4})/2$			$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
e_a	KPa	$(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a})$	

R_s/R_{so}		$(1.35 R_s/R_{so} - 0.35)$		
$R_{nl} = (\sigma T_{max,K^4} + \sigma T_{min,K^4}) / 2 (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) (1.35 R_s/R_{so} - 0.35)$				
$R_n = R_{ns} - R_{nl}$				
T_{month}	°C	G_{dia} (assumir)	0	
$T_{month-1}$	°C	$G_{month} = 0.14 (T_{month} - T_{month-1})$		
$R_n - G$				MJ m ² d ⁻¹
$0.408 (R_n - G)$				mm/dia
Evapotranspiração da referência grama				
$\left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \right] [0.408(R_n - G)]$				mm/dia
$\left[\frac{\gamma}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \right] \left[\frac{900}{T + 273} \right] u_2 [(e_s - e_a)]$				mm/dia
$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$				mm/dia

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA MENSAL PENMAN MONTEITH							
Estação meteorológica: CABINDA				País: Angola			
Altitude: 20 m.				Coord.: -5.33		Sul	12.11 leste
Month	Tmin	Tmax	RH	Vento	Insolação	Radiação	ETo-PenMon
	°C	°C	%	km/dia	Horas	MJ/m ² /dia	mm/dia
Janeiro	22.8	29.6	81	78	4.0	15.7	3.4
Fevereiro	22.7	30.3	82	69	4.6	16.9	3.7
Março	23.0	30.6	80	78	5.1	17.4	3.8
Abril	23.0	30.2	82	69	5.0	16.4	3.5
Maio	22.0	28.6	84	69	3.8	13.5	2.9
Junho	19.2	26.5	81	69	3.3	12.2	2.6
Julho	17.6	25.1	78	78	3.2	12.3	2.6

Agosto	18.6	25.3	78	78	2.6	12.4	2.6
Setembro	20.5	26.5	78	104	2.0	12.4	2.8
Outubro	22.5	28.0	79	130	2.2	12.9	3.1
Novembro	23.0	28.7	80	104	3.2	14.4	3.3
Dezembro	23.0	29.1	82	95	3.8	15.2	3.4
Ano	21.5	28.2	80	85	3.6	14.3	3.1

FIGURE 18. ETo calculada por CROPWAT

CROPWAT7.0Arquivodeclima:C:\PROFP~1\CROPWAT\CROPWAT\CLI\CABINDA.PEN
03/07/98

Cálculo de ETo para dez dias ou mensal

Apesar da não linearidade na equação de Penman-Monteith e de alguns métodos de estimativas dos parâmetros do estado atmosférico, média de dez dias ou mensais dos parâmetros podem ser utilizados para calcular a evapotranspiração de referência para média de dez dias ou mensais. O valor da evapotranspiração de referência calculada com dados de média mensais realmente é bem parecido à média dos valores de ETo diária calculada com a média diária dos dados durante aquele mês.

Os dados meteorológicos consistem de:

- temperatura do ar: média diária de dez dias ou mensal máxima (Tmax) e mínima (Tmin).
- umidade relativa do ar: média diária de dez dias ou mensal da pressão do vapor atual (e_a) derivada de psicrômetro, temperatura do ponto de orvalho ou dados de umidade relativa.
- velocidade do vento: média diária de dez dias ou mensal de dados de velocidade do vento medidos a 2 m de altura (u_2).
- radiação: média diária de dez dias ou mensal de radiação líquida (R_n) calculada da média diária de dez dias ou mensal da medida de radiação de onda curta ou da duração real de horas diárias de luz solar (insolação) (n). A radiação extraterrestre (R_a) e horas de luz solar diária máxima (insolação máxima) (N) durante um dia específico do mês podem ser calculado usando as Equações 21 e 34 ou pode ser selecionado das Tabelas 2.5 e 2.6 no Anexo 2.

Quando o solo está esquentando (primavera) ou resfriando (outono), o fluxo de calor do solo (G) para períodos mensais pode se tornar significativo utilizando então R_n mensal médio. Nestes casos não pode ser ignorado G e seu valor deve ser determinado das

temperaturas de ar médias mensais do mês anterior e do próximo. O Capítulo 3 fornece o procedimento de cálculo (Equações 43 e 44).

EXEMPLO 17. Determinação de ETo com dados médios mensais

Dado a media mensal dos dados climáticos para o mês de abril para Bancoque (Tailândia) latitude de 13°44'N e altitude de 2 m:			
-	Média mensal diária da temperatura máxima (T_{max}) =	34.8	°C
-	Média mensal diária da temperatura mínima (T_{min}) =	25.6	°C
-	Média mensal diária da pressão de vapor (e_a) =	2.85	kPa
Medidos a 2 m	Média mensal diária da velocidade do vento (u_2) =	2	m/s
-	Média mensal da insolação real (n) =	8.5	h/dia
Para Abril	Média mensal da temperatura ($T_{mês, i}$) =	30.2	°C
Para Março	Média mensal de temperatura ($T_{mês, i-1}$) =	29.2	°C
Determinação de acordo com o delineamento da Caixa 11 (cálculo de ETo)			
Parâmetros			
-	$T_{mean} = [(T_{max} = 34.8) + (T_{min} = 25.6)]/2 =$	30.2	°C
Tabela 2.4 ou Eq.13:	$\Delta =$	0.246	kPa/°C
Tabela 2.1 e Tabela 2.2 ou Eq. 7 e Eq. 8:	Altitude =	2	m
	P=	101.3	kPa
	$\gamma =$	0.0674	kPa/°C
-	$(1 + 0.34 u_2) =$	1.68	-
-	$\Delta / [\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)] = 0.246 / [(0.246 + 0.0674 (1.68))] =$	0.685	-
-	$\gamma / [\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)] = 0.0667 / [0.246 + 0.0674 (1.68)] =$	0.188	-
-	$900 / (T_{mean} + 273) u_2 =$	5.94	-
Défice de pressão de vapor			
Tabela 2.3 ou	$T_{max} =$	34.8	°C
Eq. 11:	$e^\circ(T_{max}) =$	5.56	kPa
Tabela 2.3 ou	$T_{min} =$	25.6	°C

Eq. 11:	$e^{\circ}(T_{\min}) =$	3.28	kPa
-	$e_s = (5.56 + 3.28)/2 =$	4.42	kPa
Dado	$e_a =$	2.85	kPa
-	Défice de pressão de Vapor ($e_s - e_a$) = (4.42 - 2.85) =	1.57	kPa
Radiação (para o mês = Abril)			
Tabela 2.6 ou 2.5 ou Eq. 21:	J = (para 15 Abril)	105	-
	Latitude = $13^{\circ}44'N = (13 + 44/60) =$	13.73	$^{\circ}N$
	$R_a =$	38.06	$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$
N (Tabela 2.7 ou Eq. 34):	Insolação máxima N =	12.31	h
-	$n/N = (8.5/12.31) =$	0.69	-
-	$R_s = [0.25 + 0.50 (0.69)] 38.06 =$	22.65	$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$
-	$R_{so} = (0.75 + 2 (2)/100000) 38.06 =$	28.54	$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$
-	$R_s/R_{so} = (22.65/28.54) =$	0.79	-
-	$R_{ns} = 0.77 (22.65) =$	17.44	$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$
Tabela 2.8:	$T_{\max} =$	34.8	$^{\circ}C$
	$\sigma T_{\max, K^4} =$	44.10	$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$
Tabela 2.8:	$T_{\min} =$	25.6	$^{\circ}C$
	$\sigma T_{\min, K^4} =$	39.06	$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$
-	$(\sigma T_{\max, K^4} + \sigma T_{\min, K^4})/2 = (44.10 + 39.06)/2 =$	41.58	$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$
Para:	$e_a =$	2.85	kPa
Então:	$(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) =$	0.10	-
Para:	$R_s/R_{so} =$	0.79	-
Então:	$(1.35 R_s/R_{so} - 0.35) =$	0.72	-
-	$R_{nl} = 41.58 (0.10) 0.72 =$	3.11	$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$
-	$R_n = (17.44 - 3.11) =$	14.33	$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$
-	$G = 0.14 (30.2 - 29.2) =$	0.14	$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$

-	$(R_n - G) = (14.33 - 0.14) =$	14.19	MJ m ² d ⁻¹
-	$0.408 (R_n - G) =$	5.79	mm/dia
Evapotranspiração de referência grama			
-	$0.408 (R_n - G) \Delta / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)] =$		
-	$(5.79) 0.685 =$	3.97	mm/dia
-	$900 u_2 / (T + 273) (e_s - e_a) \gamma / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)] = 5.94(1.57)0.188 =$	1.75	mm/dia
-	$ET_o = (3.97 + 1.75) =$	5.72	mm/dia
A evapotranspiração de referência grama é 5.7 mm/dia.			

Cálculo de ETo diário

O Cálculo de ETo com a equação de Penman-Monteith para 24 h geralmente fornecerá resultados precisos. Os dados meteorológicos exigidos consistem de:

- temperatura do ar: temperatura do ar diária máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}).
- umidade relativa do ar: pressão do vapor atual média diária (e_a) obtida de psicrômetro, temperatura do ponto de orvalho ou dados de umidade relativa.
- velocidade de vento: calculada da média diária durante 24 horas da velocidade do vento medidas a 2 m de altura (u₂).
- radiação: radiação líquida (R_n) medida ou calculada da radiação solar e de onda longa ou da insolação real (n). A radiação extraterrestre (R_a) e insolação máxima (N) durante um dia específico do mês usando Equações 21 e 34. Como a magnitude do fluxo de calor do solo diário (G) sob a superfície de grama de referência é relativamente pequeno, pode ser ignorado para o período de 24 h.

EXEMPLO 18. Determinação de ETo com dados diários

Dado os dados meteorológicos medidos no dia 6 de julho em Uccle (Bruxelas, Bélgica) latitude de 50°48'N e 100 m de altitude:			
-	Temperatura do ar máxima (T _{max}) =	21.5	°C
-	Temperatura do ar mínima (T _{min}) =	12.3	°C
-	Umidade relativa do ar máxima (RH _{max}) =	84	%

-	Umidade relativa do ar mínima (RH_{\min}) =	63	%
-	Velocidade do vento medido a 10 m de altura =	10	km/h
-	Insolação real (n) =	9.25	h
Conversão para a velocidade do vento			
A 10 m de altura	Velocidade do vento = 10 km/h ou u_z =	2.78	m/s
Pela Eq. 47, com $z = 10$ m:	A altura padrão, $u_2 = 0.748 (2.78) =$	2,078	m/s
Parâmetros			
Pela Eq. 7, para:	altitude =	100	m
-	$P =$	100.1	kPa
-	$T_{\text{mean}} = (21.5 + 12.3)/2 =$	16.9	°C
Pela Eq. 13, para:	$T_{\text{mean}} =$	16.9	°C
	$\Delta =$	0.122	kPa/°C
Pela Eq. 8, para:	$P =$	100.1	kPa
	$\gamma =$	0.0666	kPa/°C
-	$(1 + 0.34 u_2) =$	1.71	-
-	$\Delta / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)] = 0.122 / [(0.122 + 0.0666 (1.71))] =$	0.518	-
-	$\gamma / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)] = 0.0666 / [0.122 + 0.0666 (1.71)] =$	0.282	-
-	$900 / (T_{\text{mean}} + 273) u_2 =$	6.450	-
Défice de pressão de vapor			
Pela Eq. 11, Para:	$T_{\text{max}} =$	21.5	°C
Então:	$e^\circ(T_{\text{max}}) =$	2.564	kPa
Pela Eq. 11, para:	$T_{\text{min}} =$	12.3	°C
Então:	$e^\circ(T_{\text{min}}) =$	1.431	kPa
-	$e_s = (2.564 + 1.431) =$	1.997	kPa
Dado a umidade relativa:	$RH_{\text{max}} =$	84	%
	$RH_{\text{min}} =$	63	%
Pela Eq. 17:	$e_a = [1.431 (0.84) + 2.564 (0.63)]/2 =$	1.409	kPa

-	Défice de pressão de vapor ($e_s - e_a$) = (1.997-1.409) =	0.589	kPa
Radiação			
Pela Tabela 2.5:	Mês 7, Dia = 6		
	J =	187	-
Pela Eq. 21:	Latitude = 50°48'N =	50.80	°N
	J =	187	-
	R_a =	41.09	MJ m ⁻² d ⁻¹
Pela Eq. 34:	Latitude = 50°48'N =	50.80	°N
	J =	187	-
	N = 16.1	16.1	h
	$n/N = 9.25/16.3 =$	0.57	-
Pela Eq. 35	$R_s = [0.25 + 0.50 (0.57)] 41.09$	22.07	MJ m ⁻² d ⁻¹
Pela Eq. 37	$R_{s0} = (0.75 + 2(100)/100000) 41.09 =$	30.90	MJ m ⁻² d ⁻¹
-	$R_s/R_{s0} =$	0.71	-
Pela Eq. 38	$R_{ns} = 0.77 (22.07) =$	17.00	MJ m ⁻² d ⁻¹
Para:	$T_{max} =$	21.5	°C
Então:	$T_{max, K} = 21.5 + 273.16 =$	294.7	K
	$\sigma T_{max, K}^4 =$	36.96	MJ m ⁻² dia ⁻¹
Para:	$T_{min} =$	12.3	°C
Então:	$T_{min, K} = 12.3 + 273.16 =$	285.5	K
	$\sigma T_{min, K}^4 =$	32.56	MJ m ⁻² d ⁻¹
	$(\sigma T_{max, K}^4 + \sigma T_{min, K}^4) / 2 = (36.96 + 32.56) / 2 =$	34.76	MJ m ⁻² d ⁻¹
-	$(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) =$	0.17	-
-	$(1.35(R_s/R_{s0}) - 0.35) =$	0.61	-
Pela Eq. 39	$R_{nl} = 34.76(0.17)0.61 =$	3.71	MJ m ⁻² d ⁻¹
Pela Eq. 40	$R_n = (17.00 - 3.71) =$	13.28	MJ m ⁻² d ⁻¹

Pela Eq. 42	$G =$	0	$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
-	$(R_n - G) = (13.28 - 0) =$	13.28	$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
-	$0.408 (R_n - G) =$	5.42	mm/dia
Evapotranspiração de referência grama			
-	$0.408 (R_n - G) \Delta / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)] =$	2.81	mm/dia
-	$900/(T+273) u_2 (e_s - e_a) \gamma / [\Delta + \gamma (1+0.34 u_2)] =$	1.07	mm/dia
-	$ET_o \text{ (Eq. 6)} = 2.81 + 1.07 = 3.88 \approx$	3.9	mm/dia
A evapotranspiração de referência é 3.9 mm/dia.			

Cálculo de ETo de hora em hora

Em áreas onde mudanças significativas na velocidade de vento, temperatura do ponto de orvalho ou nebulosidade acontecem durante o dia, cálculo da equação de ETo que usa espaços de tempo de hora em hora é geralmente melhor do que usando espaços de tempo de 24 h. Tais mudanças de tempo em 24 h podem causar variações no poder evaporativo do ar do ambiente durante partes do dia e podem introduzir erro nos cálculos. Porém, para a maioria das condições, aplicação da equação de Penman-Monteith FAO com dados de 24 h produz resultados precisos.

Com o advento de estações meteorológicas eletrônicas, automatizadas, são informados crescentemente dados de tempo para períodos de hora em hora ou menores. Então, em situações onde os cálculos são computadorizados, a equação de Penman-Monteith FAO pode ser aplicada em uma base de hora em hora com resultados bons. Quando utilizando a equação de Penman-Monteith FAO em uma escala de tempo de hora em hora ou menor, a equação e alguns dos procedimentos para calcular os dados meteorológicos deveriam ser ajustados para o espaço de tempo menor. A equação de Penman-Monteith FAO para espaços de tempo de hora em hora é:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^s(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (53)$$

onde

ET_o = evapotranspiração de referência [mm h^{-1}],

R_n = radiação líquida à superfície da grama [$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$] (Equação 40),

G = densidade do fluxo de solo calor [$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$] (Equações 45 e 46),

T_{hr} = significa temperatura do ar de hora em hora [$^{\circ}\text{C}$],

Δ = declividade da curva de pressão do vapor de saturação a T_{hr} [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] (Equação 13),

γ = constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] (Equação 8),

$e^{\circ}(T_{hr})$ = pressão do vapor de saturação a temperatura do ar T_{hr} [kPa] (Equação 11),

e_a = média da pressão do vapor atual de hora em hora [kPa] (Equação 54),

u_2 = cálculo da velocidade do vento média de hora em hora [m s^{-1}].

Medida da umidade relativa, a pressão do vapor atual é determinada como:

$$e_a = e^{\circ}(T_{hr}) \frac{RH_{hr}}{100} \quad (54)$$

onde

e_a = média da pressão de vapor atual de hora em hora [kPa],

$e^{\circ}(T_{hr})$ = pressão do vapor de saturação a temperatura de ar T_{hr} [kPa] (Equação 11),

RH_{hr} = média da umidade relativa de hora em hora [%].

A radiação líquida é a diferença entre a radiação de onda curta líquida (Rns) e a radiação de onda longa líquida (Rnl) no espaço de tempo de hora em hora. Conseqüentemente:

· Se Rns e Rnl precisam ser calculados, o valor de radiação extraterrestre (Ra) para o período de hora em hora (Equação 28) deveria ser usado.

· Na estimativa de Rnl por meio de Equação 39, $(\sigma T_{\max, K^4} + \sigma T_{\min, K^4})/2$ é substituído por $\sigma T_{hr, K^4}$ e a constante de Stefan-Boltzman se torna:

$$\sigma = (4.903/24) 10^{-9} = 2.043 10^{-10} \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}.$$

Desde que a relação R_s/R_{so} é usada para representar céu nublado, quando for calcular Rnl para períodos de hora em hora durante a noite, a relação que R_s/R_{so} pode ser fixado igual ao R_s/R_{so} calculado para um período de tempo que acontece 2-3 horas antes de pôr-do-sol, antes que o ângulo do sol fique pequeno. Isto geralmente servirá como uma aproximação boa de nebulosidade que acontece durante a noite subsequente. O período de hora em hora de 2 a 3 horas antes de pôr-do-sol pode ser identificado durante estimativa de Ra como o período

onde ω , calculado pela Equação 31, está entre $(\omega_s - 0.79) \leq \omega \leq (\omega_s - 0.52)$, onde ω_s é calculado pela Equação 25. Como uma alternativa mais aproximada, o usuário pode assumir $R_s/R_{so} = 0.4$ a 0.6 durante períodos noturnos em clima úmido e sub úmido e $R_s/R_{so} = 0.7$ a 0.8 em clima árido e semi-árido. Um valor de $R_s/R_{so} = 0.3$ presume o céu totalmente nublado.

O Fluxo de calor do solo é importante para cálculos de hora em hora. Equações 45 e 46 podem ser usadas para derivar G para os períodos de hora em hora.

Os dados meteorológicos exigidos consistem de:

- temperatura do ar: temperatura média de hora em hora (T_{hr}).
- umidade relativa do ar: umidade relativa do ar média de hora em hora (RH_{hr}).
- velocidade do vento: dados de velocidade de vento média de hora em hora medidos a 2 m de altura (u_2).
- Radiação: radiação de onda curta (R_s) ou radiação líquida (R_n) de hora em hora.

Por causa da necessidade de padronização, as constantes na Equação 53 presumem uma resistência de superfície constante (r_s) de 70 s/m durante todos os períodos. Esta resistência de constante pode causar alguma subestimação de E_{To} de hora em hora durante alguns períodos de dia quando r_s real podem ser um pouco abaixo. A resistência constante pode causar algum superestimação de E_{To} de hora em hora durante períodos quando r_s real podem ser um pouco maior. Porém, quando são somados os cálculos de E_{To} de hora em hora da Equação 53 para períodos de 24 horas para obter E_{To} equivalente de 24 h, as diferenças de hora em hora tendem a compensar um ao outro e os resultados são geralmente equivalente aos cálculos de E_{To} feitos em um dia (24 h). Estimativas precisas de E_{To} para períodos de hora em hora específicos podem requerer o uso de função de estabilidade aerodinâmica e funções por modificar o valor de r_s baseado em níveis de radiação, umidade e temperatura. Aplicação destas funções normalmente não é requerida quando cálculos de hora em hora serão somados a 24 h totais. Então, estas funções não são descritas aqui.

EXEMPLO 19. Determinação de E_{To} com dados de hora em hora

Dados médios de hora em hora entre 02.00 e 03.00 horas e 14.00 e 15.00 horas no dia 1 Outubro em N'Diaye (Senegal) a 16°13'N e 16°15'W e 8 m de altitude. Na ausência de calibração dos coeficientes, valores indicados para a_s e b_s (Eq. 35 fórmula de Angstrom) e para os coeficientes da radiação de onda longa líquida (Eq. 39) são usados.

Dados climáticos medidos		02.00-03.00 h	14.00-15.00h	Unidades
T _{hr} : temperatura média de hora em hora =		28	38	°C
RH _{hr} : umidade relativa média de hora em hora =		90	52	%
u ₂ : velocidade do vento médio de hora em hora =		1.9	3.3	m/s
R _s : radiação solar de ondas curtas =		-	2.450	MJ m ⁻² h ⁻¹
Parâmetros				
Pela Eq. 13	$\Delta =$	0.220	0.358	kPa °C ⁻¹
Pela Eq. 8	$\gamma =$	0.0673	0.0673	kPa °C ⁻¹
Défice de pressão de vapor				
Pela Eq. 11	$e^\circ(T) =$	3.780	6.625	kPa
Pela Eq. 54	$e_a =$	3.402	3.445	kPa
-	$e_s - e_a =$	0.378	3.180	kPa
Radiação extraterrestre		02.00-03.00 h	14.00-15.00h	Unidades
Pela Tabela 2.5				
Para 1deOutubro:	J = 274			-
Pela Eq. 22:	$\varphi = \pi / 180 (16.22) = 0.2830$			rad
Pela Eq. 23:	$d_r = 1.0001$			-
Pela Eq. 24:	$\delta = - 0.0753$			rad
Pela Eq. 33:	$b = 3.3315$			-
Pela Eq. 32:	$S_c = 0.1889$			h
-	$L_z = 15$			grau
-	$L_m = 16.25$			grau
-	t =	2.5	14.5	h
Pela Eq. 31:	$\omega =$	-2.46	0.682	rad
-	$t_1 =$	1	1	h
Pela Eq. 29:	$\omega_1 =$	-	0.5512	rad
Pela Eq. 30:	$\omega_2 =$	-	0.8130	rad

Pela Eq. 28:	$R_a =$	0	3.543	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
Radiação				
Dado	$R_s =$	0	2.450	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
Pela Eq. 37:	$R_{so} =$	0	2.658	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
Pela Eq. 38:	$R_{ns} =$	0	1.887	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
-	$\sigma T_K^4 =$	1.681	1.915	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
-	$(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) =$	0.082	0.080	-
-	$R_s/R_{so} =$	0.8 (assumed)	0.922	-
-	$(1.35 R_s/R_{so} - 0.35) =$	0.730	0.894	-
Pela Eq. 39:	$R_{nl} =$	0.100	0.137	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
Pela Eq. 40:	$R_n =$	-0.100	1.749	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
Pela Eq. 46, 45:	$G =$	-0.050	0.175	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
-	$(R_n - G) =$	-0.050	1.574	$\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$
-	$0.408(R_n - G) =$	-0.020	0.642	mm/h
Evapotranspiração de referência grama				
-	$0.408(R_n - G)$			
-	$\Delta / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)] =$	-0.01	0.46	mm/h
	$37 / (T + 273) u_2 (e_s - e_a)$			
Pela Eq. 53:	$\gamma / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)] =$	0.01	0.17	mm/h
	$ET_o =$	0.00	0.63	mm/h
A evapotranspiração de referência grama é 0.00 mm/h entre 02.00 e 03.00 horas e 0.63 mm/h entre 14.00 e 15.00 horas.				

Procedimentos de cálculo com dados perdidos

Os dados meteorológicos, exigidos para calcular ET_o por meio da equação de Penman-Monteith FAO, consistem em temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação. Onde alguns destes dados são perdidos ou não podem ser calculados, é recomendado que utilize uma estimativa dos dados climáticos perdidos com um dos

procedimentos apresentados no Capítulo 3 em que o método de Penman-Monteith FAO foi usado para o cálculo de ETo. O uso de um procedimento alternativo para calcular ETo, exigindo somente parâmetros meteorológicos limitados, é menos recomendado.

Exemplo 20 ilustra a estimação de ETo mensal com a equação de Penman-Monteith FAO para um conjunto de dados que contém somente temperatura do ar máximo e mínimo. Os procedimentos utilizados no Capítulo 3 para calcular dados perdidos de umidade relativa, radiação e de velocidade do vento deveriam ser validados comparando ETo calculado com dados completos da estação climatológica e com conjuntos de dados limitados na região.

EXEMPLO 20. Determinação de ETo com dados perdidos

Dado a média mensal diária máxima e mínima da temperatura do ar para Julho para a estação de Lion, França (45°43'N, altitude 200 m). Nenhum outro dado climático foi anotado.			
-	Média mensal diária da Temperatura máxima (T_{max}) =	26.6	°C
-	Média mensal diária da temperatura mínima (T_{min}) =	14.8	°C
Determinação de acordo com Caixa 11 (cálculo de ETo)			
Estimação da velocidade do vento: 2 m/s é usada como estimativa temporária. Devido à relativamente pequena altura da cultura de 0.12 m da cultura de referência e u_2 aparece no numerador e denominador da equação de Penman-Monteith FAO, ETo não é muito sensível para a amplitude de valores da velocidade do vento.			
Parâmetros:			
-	$T_{mean} = (26.6+14.8)/2 =$	20.7	°C
Pela Tabela 2.4 ou	$T_{mean} =$	20.7	°C
Eq. 13:	$\Delta =$	0.150	kPa/°C
Pela Tabela 2.2 ou	Altitude =	200	m
Eq. 8:	$\gamma =$	0.066	kPa/°C
-	$(1 + 0.34 u_2) = (1 + 0.34 (2)) =$	1.68	-
-	$\Delta / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)] = 0.150 / [(0.150 + 0.066(1.68)) =$	0.576	-
-	$\gamma / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)] = 0.0658 / [(0.150 + 0.066(1.68)) =$	0.252	-
-	$900 / (T_{mean} + 273) u_2 =$	6.13	-
Estimação dos dados de umidade:			

Assumindo (Eq. 48):	$T_{dew} \approx T_{min} =$	14.8	°C
Conseqüentemente (Eq. 14 ou Tabela 2.3) para:	$T_{dew} =$	14.8	°C
Então	$e_a =$	1.68	kPa
Pela Tabela 2.3 ou Eq. 11, para:	$T_{max} =$	26.6	°C
Então:	$e^\circ(T_{max}) =$	3.48	kPa
Pela Tabela 2.3 ou Eq. 11, para:	$T_{min} =$	14.8	°C
Então:	$e^\circ(T_{min}) =$	1.68	kPa
-	$e_s = (3.48+1.68)/2 =$	2.58	kPa
-	$(e_s - e_a) = (2.58-1.68) =$	0.90	kPa
Isto correspondeu com:			
-	$RH_{max} = 100e_a/e^\circ(T_{min}) =$	100	%
-	$RH_{min} = 100 e_a/e^\circ(T_{max}) = 100 (1.68/3.48) =$	48	%
-	$RH_{mean} = (RH_{max} + RH_{min})/2 =$	74	%
Estimação dos dados de radiação:			
R_s pode ser derivado pela diferença entre T_{max} e T_{min} :			
Pela Eq. 50	$R_s = 0.16 \sqrt{(26.6-14.8)} R_a$	-	MJ m ⁻² d ⁻¹
-	$R_s = 0.55 R_a$	-	MJ m ⁻² d ⁻¹
Tabela 2.6 ou Eq. 21, para:	Para Dia 15, Mês = Julho, J =	196	-
	Latitude = 45°43'N =	45.72	°N
-	$R_s = 0.55 R_a = 0.55 (40.55) =$	22.29	MJ m ⁻² d ⁻¹
-	$R_{so} = (0.75 + 2 (200)/100000) 40.55 =$	30.58	MJ m ⁻² d ⁻¹
-	$R_s/R_{so} =$	0.73	-
-	$R_{ns} = 0.77 (22.29) =$	17.16	MJ m ⁻² d ⁻¹
Tabela 2.8, para:	$T_{max} = 26.6^\circ\text{C}$	26.6	°C
	$T_{max, K} = 26.6+273.16 =$	299.76	K
Então:	$\sigma T_{max, K}^4$	39.59	MJ m ⁻² d ⁻¹
Tabela 2.8, para:	$T_{min} = 14.8^\circ\text{C}$	14.8	°C

	$T_{\min, K} = 14.8 + 273.16$	287.96	K
Então:	$\sigma T_{\min, K^4}$	33.71	MJ m ⁻² d ⁻¹
-	$(\sigma T_{\max, K^4} + \sigma T_{\min, K^4}) / 2 = (39.59 + 33.71) / 2 =$	36.65	MJ m ⁻² d ⁻¹
Para:	$e_a =$	1.68	kPa
Então:	$(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) =$	0.16	-
Para:	$R_s / R_{s0} =$	0.73	-
Então:	$(1.35 R_s / R_{s0} - 0.35) =$	0.63	-
-	$R_{nl} = 36.65 (0.16) 0.63 =$	3.68	MJ m ⁻² d ⁻¹
-	$R_n = (17.16 - 3.68) =$	13.48	MJ m ⁻² d ⁻¹
Assume:	$G =$	0	MJ m ⁻² d ⁻¹
-	$(R_n - G) = (13.48 - 0) =$	13.48	MJ m ⁻² d ⁻¹
-	$0.408 (R_n - G) =$	5.50	mm/dia
Evapotranspiração de referência grama:			
-	$0.408 (R_n - G) \Delta / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)] =$	3.17	mm/dia
-	$900 / (T + 273) u_2 (e_s - e_a) \gamma / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)] =$	1.39	mm/dia
-	$ET_o = (3.17 + 1.39) =$	4.56	mm/dia
A estimativa da evapotranspiração de referência grama é 4.6 mm/dia. Se no lugar de 2 m/s, a velocidade do vento é estimada como 1 ou 3 m/s, ET _o seria 7% inferior (4.2 mm/dia) ou 6% maior (4.8 mm/dia) respectivamente. Em comparação, a equação de Hargreaves (Equation 52) estimou ET _o = 5.0 mm/dia			

Método de evaporação do tanque

Evaporação de tanque

A taxa de evaporação de tanques cheios de água é obtida facilmente. Na ausência de chuva, a quantidade de água que evaporou durante um período (mm/dia) corresponde com a diminuição em profundidade de água naquele período. Tanques fornecem uma medida do efeito integrado de radiação, vento, temperatura e umidade na evaporação de uma superfície de água livre. Embora o tanque responda de uma forma semelhante aos mesmos fatores

climáticos que afetam transpiração da cultura, vários fatores produzem diferenças significantes na perda de água de uma superfície de água e de uma superfície com cultura. Reflexão da radiação solar da água no tanque raso pode ser diferente dos assumidos 23% para a superfície de referência de grama. Armazenamento de calor dentro do tanque pode ser apreciável e pode causar evaporação significativa durante a noite enquanto que na maioria das culturas somente evapotranspira durante o dia. Também existem diferenças em turbulência, temperatura e umidade do ar imediatamente sobre as respectivas superfícies. Transferência de calor em volta do tanque acontece e afeta o balanço de energia.

Apesar da diferença entre evaporação do tanque e a evapotranspiração de superfícies com culturas, o uso de tanques para estimar E_{To} para períodos de 10 dias ou mais tempo pode ser utilizado. A evaporação de tanque é relacionada a evapotranspiração de referência por um coeficiente de tanque derivado empiricamente:

$$E_{To} = K_p E_{pan} \quad (55)$$

onde

E_{To} = evapotranspiração de referência [mm/dia],

K_p = coeficiente de tanque [-],

E_{pan} = evaporação de tanque [mm/dia].

Coeficiente de tanque (K_p)

Tipos de tanque e ambiente

Tipos diferentes de tanques existem. As descrições dos tanques Classe A e Colorado estão nas Caixas 12 e 13. Como a cor, tamanho, e posição do tanque tem grande influência na medida da evaporação d'água do tanque, os coeficientes de tanque são específicos.

A seleção do coeficiente de tanque apropriado, não deve ser somente pelo tipo de tanque, mas também a cobertura do solo na estação, e condições ambientais como o vento e umidade, devem ser conferidos. A localização e o ambiente do tanque também influencia os resultados. Portanto onde o tanque é colocado, se está localizado em alqueive ou em áreas com cultura. São considerados dois casos: Caso A onde o tanque é localizado em uma pequena área verde (grama) e cercado por solo de alqueive (arado); e Caso B onde o tanque é localizado em solo de alqueive e cercado por uma cultura verde (Figura 19).

Coeficientes de tanque

Os coeficientes de tanque serão diferentes dependendo do seu tipo, tamanho, estado e do sentido do vento da zona de separação (influência). Quanto maior a zona de influência contrária ao sentido do vento, maior o movimento de ar sob o tanque em equilíbrio com a área de influência. O equilíbrio do ar com uma grande área de influência, o ar contém mais vapor de água e menos calor no caso A do que no caso B. Coeficientes de tanque para o tanque Classe A e para o tanque Colorado para diferentes coberturas de solo, área de influência e condições climáticas são apresentados nas Tabelas 5 e 6. São apresentadas equações de regressão derivadas das tabelas na Tabela 7. Onde dados medidos de outros tipos de tanques enterrados são avaliados, os dados precisariam primeiramente ser relacionados para o tanque Colorado enterrado ou para a equação de Penman-Monteith FAO para desenvolver K_p . Relações entre evaporação para tanques enterrados e para o tanque Colorado para condições climáticas diferentes e ambientes de tanque são dados na Tabela 8.

Onde dados são perdidos, a velocidade de vento pode ser estimada adotando um valor global de $u_2 = 2 \text{ m s}^{-1}$ ou como indicado na Tabela 4 (página 63). $RH_{\text{médio}}$ pode ser aproximado de temperatura de ar como $RH_{\text{médio}} = 50 e^{\circ(T_{\text{min}})}/e^{\circ(T_{\text{max}})} + 50$.

Ajustes

Sob algumas condições não consideradas para as Tabelas, os coeficientes K_p apresentados podem precisar de algum ajuste. Este é o caso em áreas sem cultivo agrícola, ou onde os tanques estão cercados por culturas altas. Não mantendo o padrão de cor do tanque ou instalando telas podem afetar as leituras no tanque e requererão algum ajuste do coeficiente de tanque.



FIGURA 19. Dois casos de localização de tanque de evaporação e o seu ambiente

Em áreas sem cultivo agrícola e áreas extensas de solos nus (grande área de influência, Caso B), sob condições de deserto ou de semideserto, os valores tabelados para K_p para áreas áridas, com muito vento pode precisar ser reduzido em até 20%; para áreas com níveis moderados de vento, temperatura e umidade relativa, os valores tabelados podem precisar ser reduzidos de 5-10%; nenhum ou de pequena redução em K_p é necessária em condições úmidas e frias.

Quando os tanques são colocados em uma área pequena cercada mas rodeadas de culturas altas, por exemplo milho com 2.5 m de altura, o coeficiente de tanque tabelado necessita de aumento da ordem de até 30% para climas secos e vento forte, será necessário um aumento de 5-10% para condições de clima úmido e vento leve.

A pintura dos tanques pode afetar a evaporação d'água. Os coeficientes de tanque apresentados se aplicam a tanques galvanizados ou pintados com alumínio anualmente e para

tanques de aço sem manchas. Pequena diferença na Epan acontecerá onde o interior e o exterior do tanque é pintado de branco. Um aumento na Epan de até 10% pode acontecer quando eles são pintados de preto. O material do qual o tanque é feito pode responder por variações de somente alguns por cento.

O nível no qual a água é mantida no tanque é importante; erros resultantes podem chegar em até 15% quando o nível da água no tanque Classe A desce 10 cm abaixo do padrão aceito que é entre 5 e 7.5 cm debaixo da borda. Telas montadas sob os tanques reduzirão a Epan por até 10%. Numa tentativa de evitar que tanques sejam usados por pássaros para beber água, podem ser colocados tanques cheios d'água perto do tanque Classe A; os pássaros podem preferir usar a tanque completamente cheio. Os tanques de evaporação deveriam ser colocados em um local grande, seguro, cercado com tela para impedir entrada de animais para beber água. A turvação da água no tanque normalmente não afeta Epan por mais que 5%. Geralmente a variação na Epan não é constante com o tempo por causa do envelhecimento, deterioração e pintura nova.

TABELA 5. Coeficientes de tanque (Kp) para o tanque Classe A para diferente localização e ambiente do tanque e níveis diferentes de umidade relativa média e velocidade de vento (FAO Irrigação e Drenagem Artigo N°. 24)

Tanque Classe A	Caso A: tanque instalado em área com grama baixa				Caso B: Tanque instalado em área de alqueive de sequeiro			
	RH média →	baixo < 40	médio 40 - 70	alto > 70		baixo < 40	médio 40 - 70	alto > 70
Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Distância a barlavento da cobertura verde(m)				Distância a barlavento do alqueive de sequeiro (m)			
Fraco	1	.55	.65	.75	1	.7	.8	.85
< 2	10	.65	.75	.85	10	.6	.7	.8
	100	.7	.8	.85	100	.55	.65	.75
	1000	.75	.85	.85	1000	.5	.6	.7
Moderado	1	.5	.6	.65	1	.65	.75	.8
2-5	10	.6	.7	.75	10	.55	.65	.7
	100	.65	.75	.8	100	.5	.6	.65
	1000	.7	.8	.8	1000	.45	.55	.6

Forte	1	.45	.5	.6	1	.6	.65	.7
5-8	10	.55	.6	.65	10	.5	.55	.65
	100	.6	.65	.7	100	.45	.5	.6
	1000	.65	.7	.75	1000	.4	.45	.55
Muito forte	1	.4	.45	.5	1	.5	.6	.65
> 8	10	.45	.55	.6	10	.45	.5	.55
	100	.5	.6	.65	100	.4	.45	.5
	1000	.55	.6	.65	1000	.35	.4	.45

TABELA 7. Coeficiente de tanque (K_p): equação de regressão derivada da Tabela 5

Tanque Classe A com influência da cultura verde	$K_p = 0.108 - 0.0286 u_2 + 0.0422 \ln(\text{FET}) + 0.1434 \ln(\text{RH}_{\text{mean}}) - 0.000631 [\ln(\text{FET})]^2 \ln(\text{RH}_{\text{mean}})$
Tanque Classe A com influência de alqueive	$K_p = 0.61 + 0.00341 \text{RH}_{\text{mean}} - 0.000162 u_2 \text{RH}_{\text{mean}} - 0.00000959 u_2 \text{FET} + 0.00327 u_2 \ln(\text{FET}) - 0.00289 u_2 \ln(86.4 u_2) - 0.0106 \ln(86.4 u_2) \ln(\text{FET}) + 0.00063 [\ln(\text{FET})]^2 \ln(86.4 u_2)$
Coeficientes parâmetros	K_p coeficiente de tanque [] u_2 velocidade média diária a 2 m de altura (m s^{-1}) RH_{mean} umidade relativa média diária [%] = $(\text{RH}_{\text{max}} + \text{RH}_{\text{min}})/2$ FET influência, ou distância do tipo de superfície identificada (grama ou cultura agrícola verde baixa para o caso A, cultura seca ou solo nu para o caso B evaporação do tanque contrário ao sentido do vento)
Alcance das variáveis	$1 \text{ m} \leq \text{FET} \leq 1000 \text{ m}$ (estes limites devem ser observados) $30\% \leq \text{RH}_{\text{mean}} \leq 84\%$ $1 \text{ m s}^{-1} \leq u_2 \leq 8 \text{ m s}^{-1}$

Recomendações

Sobre as considerações e ajustes indicados no uso de Tabelas ou as equações correspondentes pode não ser suficiente considerar todos os fatores ambientais locais que influenciam K_p e aquele ajuste local pode ser necessário. Fazer assim, uma calibração apropriada da Epan versus ETo calculada com o método de Penman-Monteith FAO é recomendado.

É recomendado que o tanque seja instalado dentro de uma área com cultura verde pequena com um tamanho de pelo menos 15 por 15 m. O tanque não deveria ser instalado no

centro mas a uma distância de pelo menos 10 m da extremidade da cultura verde na direção contrária ao sentido do vento predominante.

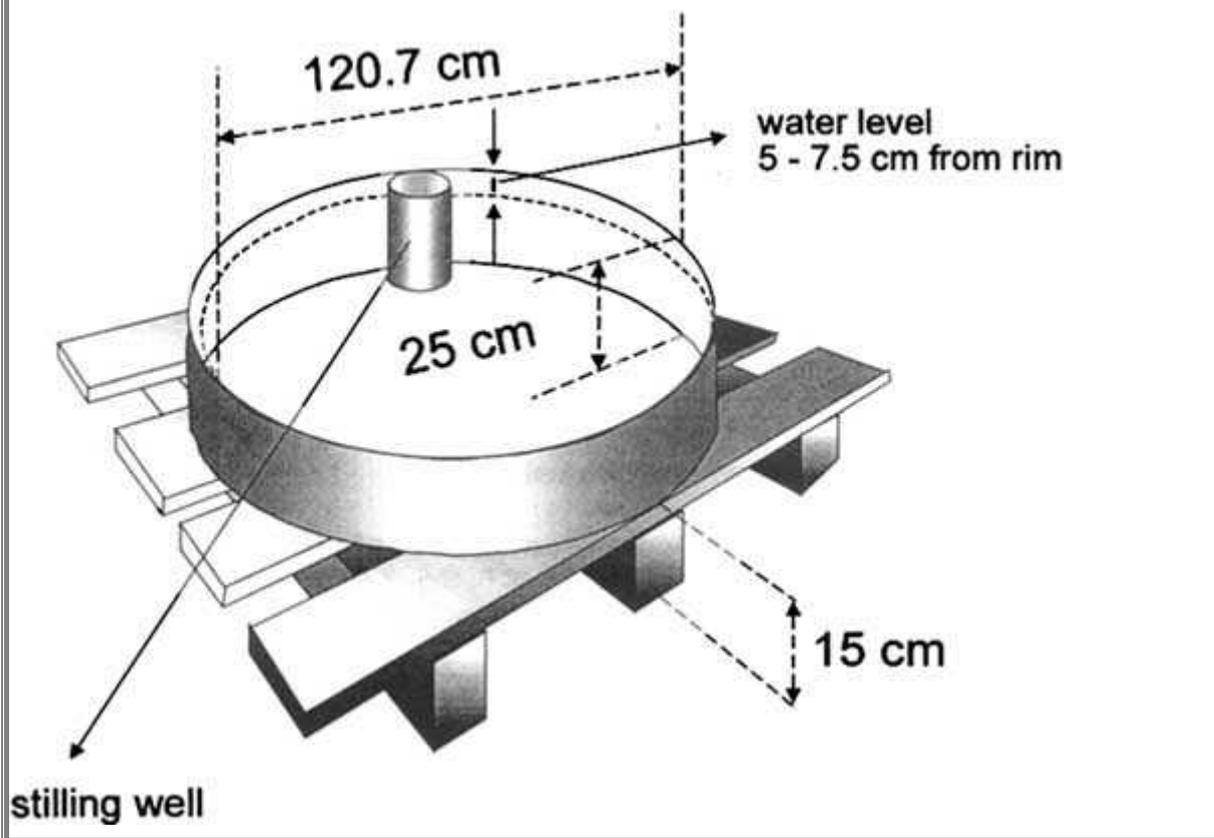
Quando observações de velocidade do vento e umidade relativa, requerida para a estimativa de K_p , não estão disponíveis no local, estimativas das variáveis de clima de uma estação perto do local têm que ser utilizadas. É recomendado então que estes parâmetros fossem calculados pela média do período de estimativa da E_{pan} , e E_{pan} seja a média para o mesmo período.

A Equação 1 na Tabela 7 calcula $K_p = 0.83$ para os dados do Exemplo 21 como mostrado no Exemplo 22.

EXEMPLO 21. Determinação de ET_o utilizando tabelas de tanque de evaporação

<p>Dado os dados de evaporação diária durante a primeira semana de julho para um tanque Classe A instalado em uma área verde cercado por pequenas culturas irrigadas: 8.2, 7.5, 7.6, 6.8, 7.6, 8.9 e 8.5 mm/dia. Naquele período a velocidade do vento média foi de 1.9 m/s e a umidade relativa média diária foi 73%. Determine a evapotranspiração de referência média para 7 dias.</p>			
<p>Tanque instalado numa superfície gramada: Caso A</p>			
Tanque rodeado por cultura irrigada:	$influência_{max} =$	1000	m
Velocidade do vento é Fraco:	$u <$	2	m/s
Umidade relativa é Alta:	$RH_{mean} >$	70	%
Pela Tabela 5 (para as condições acima):	$K_p =$	0.85	-
-	$E_{pan} = (8.2 + 7.5 + 7.6 + 6.8 + 7.6 + 8.9 + 8.5)/7 =$	7.9	mm/dia
Pela Eq. 55:	$ET_o = 0.85 (7.9) =$	6.7	mm/dia
<p>A evapotranspiração da cultura de referência para a média de 7 dias é 6.7 mm/dia</p>			
<p>CAIXA 12. Descrição do Tanque Classe A</p> <p>O tanque de evaporação Classe A é circular, 120.7 cm de diâmetro e 25 cm de profundidade. Ele é feito de ferro galvanizado (calibre 22) ou metal (0.8 mm). O tanque é montado sob uma plataforma de madeira de 15 cm sobre o nível do solo. O solo deve ficar 5 cm abaixo do fundo do tanque. O tanque deve estar em nível. Deve estar cheio de água a 5 cm abaixo da borda, e o nível de água não é permitido abaixar mais do que 7.5 cm abaixo da borda. A água deve ser regularmente renovada, no mínimo semanalmente, para eliminar turbidez extrema. O tanque, se galvanizado, é pintado anualmente na cor alumínio. Tela sobre o tanque não é um requerimento padrão e preferencialmente não deveria ser utilizado. Tanque deveria ser protegido por cercas altas para animais não beber a sua água.</p> <p>O terreno preferencialmente deve ser gramado, 20 por 20 m, aberto por todos os lados para permitir livre circulação do ar. É preferível que seja localizado no centro da área ou o lado maior com cultura na direção dos ventos predominantes.</p>			

A leitura no tanque deve ser feita diariamente nas primeiras horas da manhã ao mesmo tempo em que precipitação é medida. Medidas são feitas no poço tranqüilizador situado dentro do tanque perto da borda. O poço tranqüilizador é de metal cilíndrico de aproximadamente 10 cm de diâmetro e 20 cm de profundidade com um pequeno buraco no fundo.



EXEMPLO 22. Determinação de ET_o para evaporação de tanque utilizando equação

Dado a média de 7 dias medida de evaporação do Exemplo 21, estimativa de ET_o para os dois tipos de influência das condições ambientais da Tabela 7. Assumindo uma área de influência de 1000 m para ambos casos de influência (cultura verde e seco).

	$F_{etch} =$		1000	m
	$u_2 =$		1.9	m/s
	$RH_{mean} =$		73	%
Tanque Classe A com influência da cultura verde	$K_p = 0.108 - 0.0286 u_2 + 0.0422 \ln(FET) + 0.1434 \ln(RH_{mean}) - 0.000631 [\ln(FET)]^2 \ln(RH_{mean})$	$K_p = 0.108 - 0.0286 (1.9) + 0.0422 \ln(1000) + 0.1434 \ln(73) - 0.000631 [\ln(1000)]^2 \ln(73)$	0.83	-
	$E_{pan} =$		7.9	mm/dia
	$ET_o =$	$ET_o = 0.83 (7.9)$	6.6	mm/dia

Tanque Classe A com influência de alqueive	$K_p = 0.61 + 0.00341 RH_{mean} - 0.000162 u_2 RH_{mean} - 0.00000959 u_2 FET + 0.00327 u_2 \ln(FET) - 0.00289 u_2 \ln(86.4 u_2) - 0.0106 \ln(86.4 u_2) \ln(FET) + 0.00063 [\ln(FET)]^2 \ln(86.4 u_2)$	$K_p = 0.61 + 0.00341 (73) - 0.000162 (1.9) (73) - 0.00000959 (1.9)(1000) + 0.00327 (1.9) \ln(1000) - 0.00289 (1.9) \ln(86.4(1.9)) - 0.0106 \ln(86.4(1.9)) \ln(1000) + 0.00063 [\ln(1000)]^2 \ln(86.4(1.9))$	0.61	-
	$E_{pan} =$		7.9	mm/dia
	$ET_o =$	$ET_o = 0.61 (7.9)$	4.8	mm/dia
A evapotranspiração da cultura de referência média para 7 dias para duas condições de influência é 6.6 e 4.8 mm/dia				

Parte B - Evapotranspiração da Cultura sob condições padrão

Esta parte examina evapotranspiração da cultura sob condições padrão (ETc). Esta é a evapotranspiração das culturas livres de doenças e pragas, desenvolvidas em extensos campos, sob condições de umidade e fertilidade do solo ótima e obtendo máxima produção sob determinadas condições climáticas.

Os efeitos de várias condições climáticas na evapotranspiração estão incorporados na ETo (Parte A). Os efeitos das características que distinguem a cultura da superfície de referência (grama) da cultura sob condições padrão são integrados no coeficiente de cultura. ETc é determinado multiplicando ETo pelo coeficiente de cultura.

Coefficientes de cultura típicos, procedimentos de cálculo para ajustar os coeficientes de cultura e cálculo de ETc são apresentados nesta parte. São esboçadas duas aproximações de cálculo: coeficiente de cultura único e duplo. Na aproximação do coeficiente de cultura único, a diferença na evapotranspiração entre a cultura e a grama de referência é combinada em um único coeficiente. Na aproximação do coeficiente de cultura duplo, o coeficiente de cultura é dividido em dois fatores que descrevem as diferenças entre evaporação e transpiração separadamente entre a cultura e superfície de referência.

Será discutido no Capítulo 5 e resumido na Tabela 10, uma aproximação do coeficiente de cultura único é usado para a maioria das aplicações relacionadas ao planejamento, projeto, e manejo da irrigação. A aproximação do coeficiente de cultura duplo é necessário nos cálculos onde é necessário detalhar estimativas de evaporação da água do

solo, como por exemplo na programação de irrigação em tempo real, modelagem da qualidade de água, e em pesquisa.

Capítulo 5 - Introdução para evapotranspiração da cultura (ET_c)

Este capítulo descreve a aproximação do coeficiente de cultura para calcular a evapotranspiração da cultura sob condições padrão (ET_c). As condições padrão se referem a culturas desenvolvidas em campos extensos em condições agronômicas e de umidade do solo excelente. A evapotranspiração da cultura difere distintamente da evapotranspiração da cultura de referência (ET_o), isto é, a cobertura do solo, as propriedades do dossel e a resistência aerodinâmica da cultura são diferentes da grama. Os efeitos das características da cultura que diferem da grama são integrados no coeficiente de cultura (K_c). O coeficiente de cultura é utilizado na aproximação, isto é, evapotranspiração da cultura é calculado multiplicando ET_o por K_c.

Diferenças na evaporação e transpiração entre os campos com cultura e a superfície de grama de referência pode ser integrada em um único coeficiente de cultura (K_c) ou separados em dois coeficientes: um coeficiente de cultura basal (K_{cb}) e um coeficiente de evaporação do solo (K_e), i.e., $K_c = K_{cb} + K_e$. A aproximação selecionada depende do propósito do cálculo, da precisão requerida e dos dados disponíveis.

Procedimentos de cálculo

Cálculo direto

A taxa de evapotranspiração de uma superfície cultivada pode ser medida diretamente pela transferência de massa ou pelo método de balanço energia. Também pode ser derivado de estudos de balanço de água do solo determinados em campos cultivados ou uso de lisímetros.

Evapotranspiração da cultura também podem ser obtidos de dados meteorológicos e da cultura por meio da equação de Penman-Monteith (Eq. 3). Ajustando o albedo e a resistências aerodinâmica da superfície do dossel para as características vegetativas da cultura específica, a taxa de evapotranspiração pode ser calculada diretamente. O albedo e resistências são, porém, difícil de serem calculadas com precisão porque eles podem variar

continuamente durante o período com a mudança das condições climáticas, como o desenvolvimento da cultura, e com a umidade da superfície do solo. A resistência do dossel será influenciada mais adiante pela disponibilidade de água do solo, e aumenta fortemente se a cultura está sujeita ao déficit de umidade.

Como ainda é considerável a falta de informação consolidada das resistências aerodinâmicas e do dossel para as várias superfícies cultivadas, o método de Penman-Monteith FAO somente é utilizado neste manual para calcular E_{To} , a evapotranspiração de uma superfície de grama hipotética com a altura, albedo e resistência de superfície da cultura fixadas, e o solo sem restrição d'água.

Aproximação do coeficiente de cultura

Na aproximação do coeficiente de cultura a evapotranspiração da cultura, E_{Tc} , é calculada multiplicando a evapotranspiração da cultura de referência, E_{To} , por um coeficiente de cultura, K_c :

$$E_{Tc} = K_c E_{To} \quad (56)$$

onde

E_{Tc} = evapotranspiração da cultura [mm d^{-1}],

K_c = coeficiente de cultura [adimensional],

E_{To} = evapotranspiração da cultura de referência [mm d^{-1}].

A maioria dos efeitos das várias condições climáticas está incorporado na estimativa de E_{To} . Então, como E_{To} representa um índice de demanda climática, K_c varia predominantemente com as características específicas da cultura e somente para um resíduo do clima. Isto habilita a transferência de valores padrão para K_c entre localizações e entre climas. Esta foi à razão primária para a aceitação global e utilização da aproximação do coeficiente de cultura e os coeficientes (K_c) desenvolvidos em estudos passados.

A E_{To} é definida e calculada usando a equação de Penman-Monteith FAO (Capítulo 4). O coeficiente de cultura, K_c , é basicamente a relação entre a evapotranspiração da cultura E_{Tc} e a referência E_{To} , e representa uma integração dos efeitos de quatro características principais que distinguem a cultura da cultura de referência grama. Estas características são:

- Altura da cultura - A altura da cultura influencia o termo de resistência aerodinâmico, r_a , da equação de Penman-Monteith FAO e a transferência turbulenta do vapor da cultura na atmosfera. A r_a aparece duas vezes na fórmula completa da equação de Penman-Monteith FAO.

- Albedo (refletância) da superfície cultura-solo - O albedo é afetado pela fração de solo coberta pela vegetação e pela umidade da superfície do solo. O albedo das superfícies cultura-solo influencia a radiação líquida da superfície, R_n que é a fonte primária da troca de energia para o processo de evaporação.
- Resistência do dossel - A resistência da cultura para transferência de vapor é afetada pela área foliar (número de estômatos), idade, condição da folha, e o grau de controle dos estômatos. A resistência do dossel influencia a resistência de superfície, r_s .
- Evaporação do solo, especialmente do solo exposto.

A umidade da superfície do solo e a fração de solo coberto pela vegetação influencia na resistência de superfície, r_s . Solo umedecido seguidamente, a taxa de transferência de vapor do solo é alta, especialmente para culturas que têm cobertura do solo incompleta. A combinação da resistência de superfície do dossel e o solo determinam a (volume) resistência de superfície, r_s . O termo resistência de superfície na equação de Penman-Monteith representa a resistência ao fluxo de vapor dentro da folhagem da planta e da superfície do solo.

O K_c na Equação 56 estima ET_c sob condições padrão. ET_c representa o nível superior da evapotranspiração da cultura e representa condições onde nenhuma limitação é colocada no crescimento da cultura ou na evapotranspiração devido à limitação d'água, densidade da cultura, doenças, erva daninha, pragas ou salinidade. A ET_c estimada pelo K_c é ajustado se necessário às condições não padrão, $ET_{c_{adj}}$ onde qualquer condição ou característica ambiental conhecida esta causando um impacto ou limitando a ET_c . Fatores para corrigir ET_c para $ET_{c_{adj}}$ são descritos na parte C.

Fatores que determinam o coeficiente de cultura

O coeficiente de cultura integra o efeito das características que distinguem uma cultura de campo típica da cultura de referência grama, que tem um aspecto constante (altura uniforme) e uma cobertura do solo completa. Por conseguinte, culturas diferentes terão coeficientes (K_c) diferentes. As características variáveis da cultura durante os estádios de desenvolvimento também afetam o coeficiente K_c . Finalmente, como a evaporação é uma parte integrada da evapotranspiração da cultura, condições que afetam a evaporação do solo também terão um efeito no K_c .

Tipo de cultura

Devido às diferenças no albedo, altura da cultura, propriedades aerodinâmicas, folha e propriedades dos estômatos, a evapotranspiração das culturas no clímax, sem estresse hídrico difere da E_{To} .

Devido ao pequeno espaçamento entre plantas (dossel fechado), maior altura e aspereza do dossel de muitas culturas agrícola causam um aumento nos coeficientes (K_c) que são maiores que 1. O fator K_c é frequentemente 5-10% mais alto que a referência (onde $K_c = 1.0$), e até mesmo 15-20% maior para algumas culturas altas como milho, sorgo ou cana de açúcar (Figura 20). Valores típicos para o coeficiente (K_c) para culturas no clímax (pleno desenvolvimento - K_c meio) são listados na Tabela 12.

Culturas como abacaxi que fecham os estômatos durante o dia têm coeficientes de cultura muito pequenos. Na maioria das espécies, porém, os estômatos abrem com o aumento da irradiação. Além da resposta dos estômatos para ambiente, a posição e número dos estômatos e a resistência da cutícula para transferência de vapor determina a perda de água da cultura. Espécie com estômatos somente do lado de baixo da folha e/ou resistências da folha grande terão valores de K_c relativamente menores. Este é o caso para árvores de fruta cítricas decíduas. Controle da transpiração e espaçamento das árvores, com a condição de somente 70% da cobertura do solo para árvores adultas, e pode causar no K_c dessas árvores, se cultivadas sem uma cultura de cobertura do solo, ser menor do que um (Figura 20).

Clima

Os valores de K_c da Tabela 12 são valores típicos esperados para K_c médio sob uma condição climática padrão que é definida como um clima sub-úmido com insolação média umidade relativa mínima (RH_{min}) $\approx 45\%$ e tendo velocidade do vento de calmo para moderado aproximadamente 2 m/s.

Variações do vento alteram a resistência aerodinâmica das culturas e conseqüentemente os seus coeficientes K_c , especialmente para essas culturas que são relativamente mais altas do que a referência grama hipotética. O efeito da diferença em propriedades aerodinâmicas entre a superfície de referência de grama e culturas agrícolas não é somente a cultura específica. Varia também com as condições climáticas e altura da cultura. Porque as propriedades aerodinâmicas são maiores para muitas culturas agrícolas quando comparada à referência grama, a relação entre E_{Tc} e E_{To} (i.e., K_c) para muitas culturas

aumenta como o aumento da velocidade do vento e com a diminuição da umidade relativa. Climas mais áridos e condições de maior velocidade do vento terão valores mais altos de K_c . Climas mais úmidos e condições de mais baixa velocidade do vento terão mais baixos valores de K_c .

O impacto relativo do clima no K_c para culturas com desenvolvimento completo (clímax) é ilustrado na Figura 21. Os valores superiores representam condição climática extremamente árida e vento forte, enquanto os valores mais baixos são válidos para condições de clima muito úmido e vento moderado. As amplitudes esperadas no K_c devido ao clima e as mudanças nas condições climáticas, são muito pequenas para culturas baixas mas são grandes para culturas altas. Diretrizes para o ajuste do K_c para as condições climáticas em função da altura da cultura são determinadas no Capítulo 6.

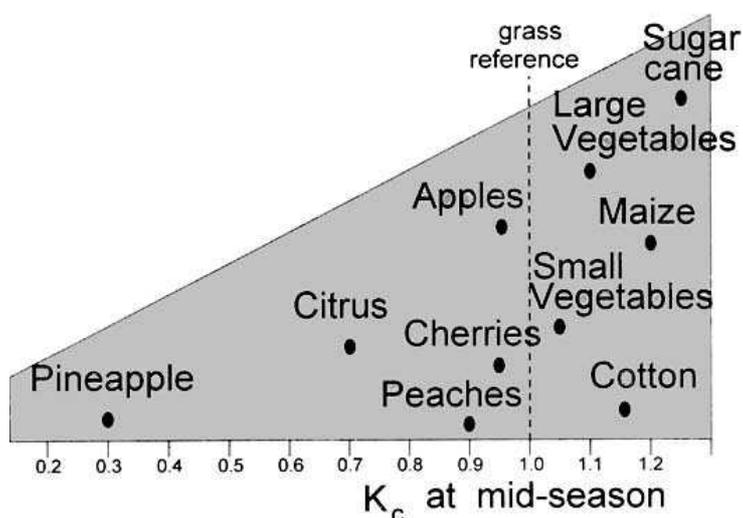


FIGURE 20. $K_{c\text{médio}}$ típico para diferentes tipos de culturas com desenvolvimento completo

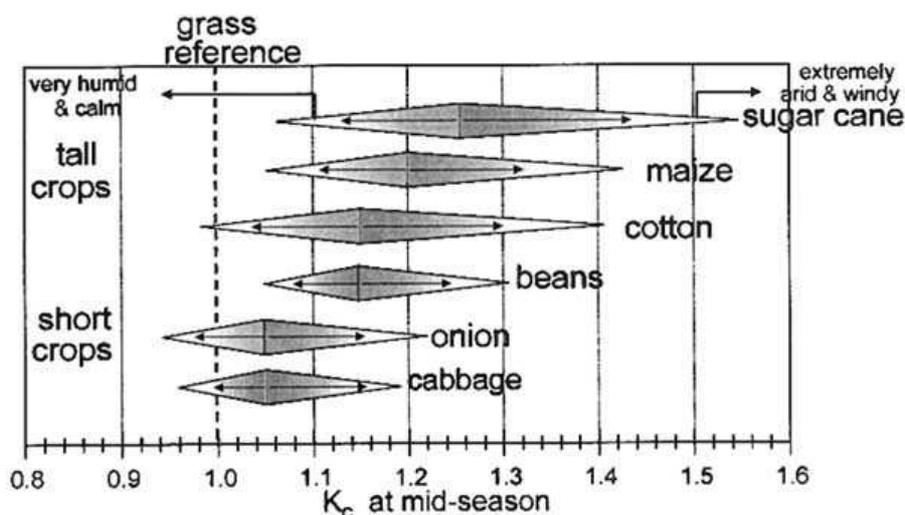


FIGURA 21. Alcances extremos (amplitude) esperados no K_c em função do clima e mudança climática para culturas com desenvolvimento completo.

Sob condições úmidas e de vento calmo, o K_c se torna menos dependente das diferenças entre os componentes aerodinâmicos de ET_c e ET_o e os valores de K_c , para “cobertura completa” do solo pelas culturas agrícolas, não ultrapassam a unidade por mais que aproximadamente 0.05. Isto porque a cobertura completa do solo pelas culturas agrícolas e a cultura de referência grama aparada (0.12 m de altura) ambas absorvem quase o máximo da radiação de onda curta que é a fonte de energia principal para a evaporação sob condições úmidas e de ventos fracos. Geralmente, os albedos, α , são semelhantes para cobertura completa do solo das culturas agrícolas, inclusive a cultura de referência. Devido ao déficit de pressão do vapor ($e_s - e_a$) ser pequeno sob condições úmidas, diferenças na ET causadas pela diferenças na resistência aerodinâmica, r_a , entre a cultura agrícola e a cultura de referência também é pequeno, especialmente com a velocidade do vento moderado.

Sob condições áridas, o efeito de diferenças em r_a entre a cultura agrícola e a cultura de referência grama na ET_c se torne mais pronunciado porque o termo ($e_s - e_a$) pode ser relativamente grande. As magnitudes maiores do ($e_s - e_a$) aumenta as diferenças no termo aerodinâmico no numerador da equação de Penman-Monteith (Equação 3) para a cultura e a cultura de referência. Conseqüentemente, o K_c será maior sob condições áridas quando a cultura agrícola tiver maior área foliar e aspereza devido à altura do que a cultura de referência grama.

Porque o termo $1/r_a$ no numerador da equação de Penman-Monteith (Equação 3) é multiplicado pelo déficit de pressão do vapor ($e_s - e_a$), a ET das culturas altas aumenta proporcionalmente mais em relação a ET_o do que a ET de culturas pequenas quando umidade relativa é baixa. O K_c para culturas altas, por exemplo aquela de 2 a 3 m de altura, pode ser até 30% superior em clima árido e vento forte quando comparado com clima úmido e vento fraco. O aumento no K_c é devido à influência da aspereza aerodinâmica maior da cultura alta em relação à grama no transporte de vapor da água da superfície.

Evaporação do Solo

A diferença da evaporação do solo e transpiração da cultura entre a cultura agrícola e a cultura de referência aparece integrada dentro do coeficiente de cultura. O coeficiente K_c para cobertura completa do solo pela cultura reflete principalmente diferenças na transpiração, já que a contribuição da evaporação do solo é relativamente pequena. Depois da

chuva ou irrigação, o efeito da evaporação é predominante quando a cultura é pequena e pouca sombra proporciona no solo. Para tais condições de baixa cobertura, o coeficiente K_c é em grande parte determinado pela frequência com que a superfície do solo é umedecida. Onde o solo está umedecido em maioria parte do tempo pela irrigação ou chuva, a evaporação da superfície do solo será considerável e o K_c pode exceder a 1. Por outro lado, onde a superfície do solo está seca, a evaporação é restringida e o K_c será pequeno e pode ser inferior até mesmo a 0.1 (Figura 22).

A diferença na evaporação do solo entre a cultura agrícola e a cultura de referência pode ser prevista mais precisamente usando um coeficiente de cultura duplo.

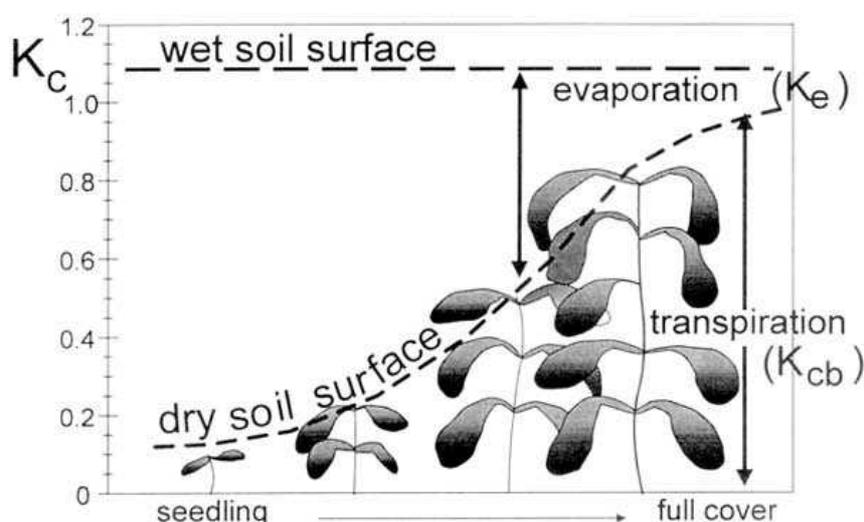


FIGURA 22. O efeito da evaporação no K_c . A linha horizontal representa K_c quando a superfície de solo é mantida úmida continuamente. A linha em curva corresponde ao K_c quando a superfície de solo é mantida seca mas a cultura recebe água suficiente para manter a transpiração plena.

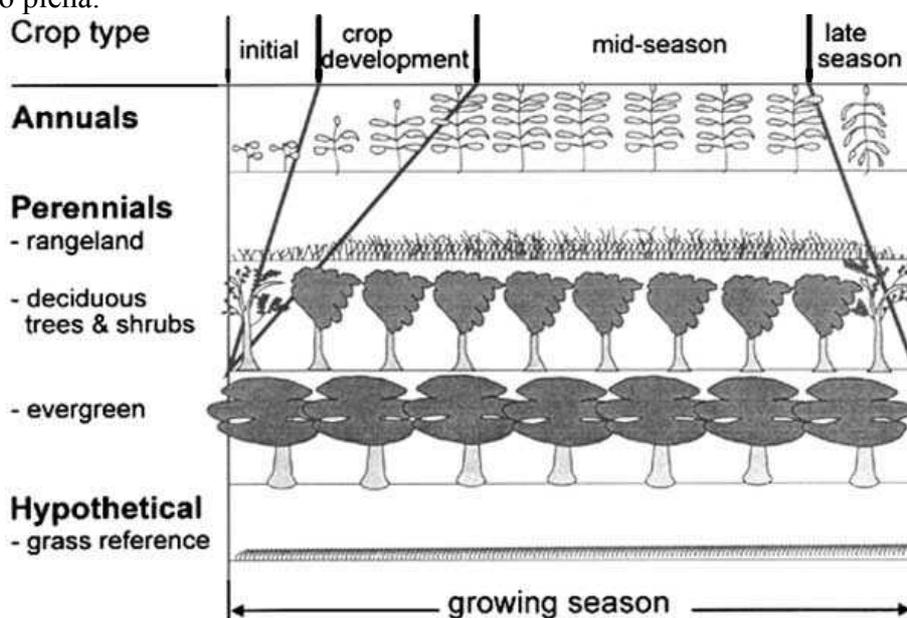


FIGURA 23. Estádios de crescimento da cultura para tipos diferentes de culturas

Estádios de crescimento da cultura

Quando a cultura desenvolve ocorre mudança na cobertura do solo, altura da cultura e na área foliar. Devido às diferenças na evapotranspiração durante os estádios de crescimento, o K_c para uma determinada cultura será diferente para cada estágio de crescimento. O período de crescimento pode ser dividido em quatro estádios de crescimento distintos: inicial, desenvolvimento, intermediário e final. A Figure 23 ilustra a seqüência geral e a duração destes estádios para tipos diferentes de culturas.

Estádio inicial

O estágio inicial começa no plantio até aproximadamente 10% da cobertura vegetal. A duração do período inicial é altamente dependente na cultura, variedade, data de plantio e do clima. O fim do período inicial é determinado quando aproximadamente 10% da superfície do solo são cobertos pela cultura. Para culturas perenes, a data de plantio é substituída pela data “greenup”, i.e., a data quando acontece a iniciação de folhas novas.

Durante o período inicial, a área foliar é pequena, e a evapotranspiração é predominantemente na forma de evaporação do solo. Então, o K_c durante o período inicial ($K_{c_{ini}}$) é alto quando o solo é molhado por irrigação ou chuva e baixo quando a superfície do solo está seca. A duração do tempo para a superfície do solo secar é determinado pelo intervalo entre irrigações, poder de evaporação da atmosfera (ET_o) e o valor da lâmina de irrigação. Estimativas gerais para $K_{c_{ini}}$ sendo uma função da frequência de irrigação e do poder evaporante da atmosfera (ET_o) são determinadas na Tabela 9. Os dados assumem um solo de textura média. O procedimento para calcular $K_{c_{ini}}$ é apresentado no Capítulo 6.

TABELA 9. Valores aproximados para $K_{c_{ini}}$ para lâmina de irrigação média (10-40 mm) e um solo de textura média

Intervalo de irrigação	Poder evaporante da atmosfera (ET_o)			
	Baixo mm/dia	1-3 Moderado mm/dia	3-5 Alto mm/dia	5-7 Muito alto > 7 mm/dia

Menos que uma semana	1.2-0.8	1.1-0.6	1.0-0.4	0.9-0.3
Semanalmente	0.8	0.6	0.4	0.3
Mais que uma semana	0.7 - 0.4	0.4 - 0.2*	0.3 - 0.2*	0.2*- 0.1*

Os valores foram derivados das Figuras 29 e 30

(*) Note que os intervalos de irrigação podem ser muito grandes para sustentar transpiração plena para algumas culturas anuais jovens.

Estádio de crescimento

O estágio de crescimento ocorre de 10% da cobertura do solo a cobertura completa efetiva. Cobertura completa efetiva para muitas culturas acontece à iniciação do florescimento. Para culturas em fila onde comumente nas filas as folhas se unem como feijões, beterraba açucareira, batatas e milho, coberturas efetivas podem ser definidas no tempo quando algumas folhas das plantas em filas adjacentes começam a se misturar de forma que o sombreamento do solo se torna quase completo, ou quando as plantas alcançam a cobertura efetiva e nenhum entrelaçamento das folhas acontecer. Para algumas culturas, especialmente essas mais altas que 0.5 m, a fração média da superfície do solo coberta pela vegetação (f_c) no começo da cobertura completa efetiva é aproximadamente 0.7-0.8. Frações do solo iluminado pelo sol e sombreada pelas folhas não mudam significativamente com o crescimento adicional da cultura além de $f_c \approx 0.7$ a 0.8. Isto é compreendido que a cultura ou planta podem continuar crescendo em altura e área foliar depois do tempo de cobertura completa efetiva. Porque é difícil determinar visualmente quando uma vegetação densa no inverno e cereais na primavera e algumas gramas alcançam cobertura completa efetiva, a mais facilmente descoberta fase de diferenciação (florescimento) é geralmente usada para estes tipos de culturas.

Para gramas densas, cobertura completa efetiva pode acontecer a aproximadamente 0.10-0.15 m de altura. Para grama de porte pequeno (solo seco), a altura da grama pode aproximar 0.3-0.5 m antes da cobertura completa efetiva é alcançado. Forragens densamente plantadas como alfafa e trevo alcance da cobertura completa efetiva a aproximadamente 0.3-0.4 m.

Outro modo para determinar a ocorrência de cobertura completa efetiva é quando o índice de área foliar (IAF) é igual a três. IAF é definido como a área total média de folhas (um lado) por unidade de área da superfície do solo.

Como a cultura se desenvolve e vai sombreando cada vez mais o solo, a evaporação se torna mais restringida e a transpiração se torna o processo principal gradualmente. Durante o estágio de crescimento, o valor de K_c corresponde a quantidades de cobertura do solo e crescimento da planta. Tipicamente, se a superfície de solo está seca, $K_c = 0.5$ correspondem aproximadamente 25-40% da superfície do solo coberto pela vegetação devido a dois efeitos, sombreamento e devido ao micro transporte de calor sensível do solo na vegetação. Um $K_c = 0.7$ corresponde freqüentemente em aproximadamente 40-60% cobertura do solo. Estes valores variam muito e dependem da cultura, freqüência de irrigação e se a cultura usa mais água que a cultura de referência na cobertura completa do solo (por exemplo, dependendo da sua arquitetura do dossel e altura da cultura em relação à grama cortada).

Estádio intermediário

O Estádio intermediário ocorre da cobertura completa efetiva ao começo da maturação. O começo da maturação é indicado freqüentemente pelo começo do envelhecimento, amarelecimento ou senescência das folhas, queda da folha, ou o douramento da fruta de acordo com o grau que a evapotranspiração da cultura é reduzida em relação à referência E_{To} . O estágio intermediário é o estágio mais longo para permanentes e para muitos anuais, mas podem ser relativamente pequenos para olerícolas que são colhidas frescas para a vegetação verde.

No estágio intermediário o K_c alcança seu valor máximo. O valor para K_c ($K_{c_{meio}}$) é relativamente constante para a maioria das vegetações e condições culturais. Divergência do $K_{c_{meio}}$ do valor de referência “1” é devido principalmente à diferença na altura e na resistência da superfície entre a cultura de referência grama e a cultura agrícola e condição climática.

Estádio final

O estágio final ocorre desde o começo da maturação até a colheita ou senescência completa. O cálculo para K_c e E_{Tc} é estimado para terminar quando a cultura é colhida, seca totalmente naturalmente, alcançar a senescência completa, ou acontecer queda das folhas.

Para alguma vegetação perene em climas frios, as culturas podem crescer em torno de um ano de forma que a data de terminação pode ser igual à data de “plantio”.

O valor de K_c ao término do estágio final ($K_{c_{final}}$) reflete a cultura e as práticas de manejo da água. O $K_{c_{final}}$ é de valor alto se a cultura frequentemente é irrigada e é colhida fresca. Se para a cultura é necessário a senescência e a secagem no campo antes da colheita, o valor do $K_{c_{final}}$ será pequeno. Senescência é normalmente associado com condutância estomatal menos eficiente das superfícies foliares devido aos efeitos de envelhecimento, causando assim uma redução no K_c .

Na Figura 24 ilustra a variação no K_c para culturas diferentes influenciado por fatores climático e de crescimento.

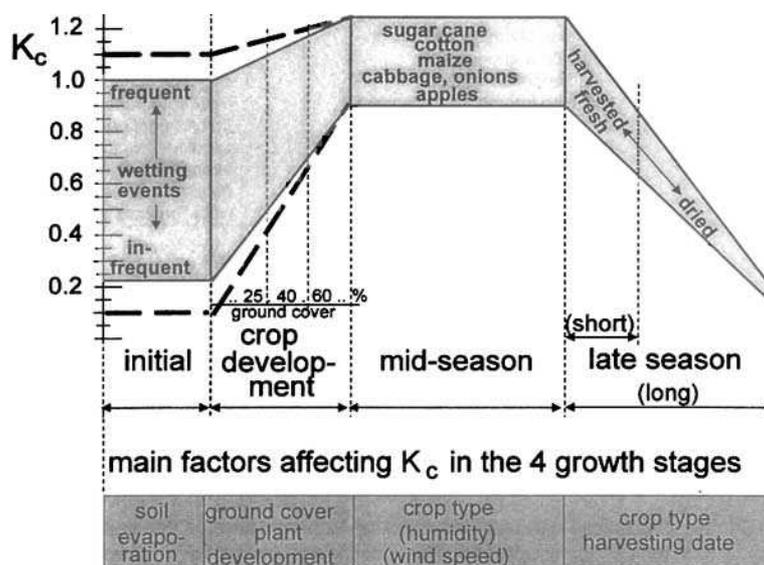


FIGURA 24. Alcances típicos esperados no K_c para os quatro estádios de crescimento

Evapotranspiração da cultura (E_{tc})

A evapotranspiração da cultura (E_{tc}) é calculada multiplicando E_{To} por K_c , um coeficiente que expressa a diferença entre a evapotranspiração de uma cultura e da superfície de referência grama. A diferença pode ser combinada em um único coeficiente, ou pode ser divididas em dois fatores que descrevem as diferenças separadamente, a evaporação e a transpiração entre as duas superfícies. A escolha da aproximação depende do propósito do cálculo, da precisão requerida, dos dados climáticos disponíveis e o espaço de tempo com que os cálculos são executados. A Tabela 10 apresenta o critério de seleção geral.

TABELA 10. Critério de seleção geral para coeficiente de cultura aproximado único e duplo

	Coeficiente de cultura único K_c	Coeficiente de cultura duplo $K_{cb} + K_e$
--	--	---

Objetivo do cálculo	- planejamento de irrigação e projeto - manejo de irrigação - planejamento básico de irrigação - planejamento de irrigação no tempo real para aplicação de água não freqüente (irrigação por aspersão e superfície)	- pesquisa - planejamento de irrigação no tempo real - planejamento de irrigação para aplicação de água em alta freqüência (microirrigação e irrigação por aspersão automático) - irrigação suplementar - estudo detalhado do solo e balanço hidrológico da água
Espaço de tempo	diário, 10 dias, mensal (dados e cálculo)	diariamente (dados e cálculo)
Método Solução	Calculadora de bolso, Computador	Computador

Aproximações de coeficiente de cultura único e duplo

Aproximação do coeficiente de cultura único (K_c)

Na aproximação do coeficiente de cultura único, é combinado o efeito de transpiração da cultura e evaporação do solo em um único coeficiente K_c . O coeficiente integra diferenças na evaporação do solo e na taxa de transpiração da cultura entre a cultura e a superfície de referência grama. Como a evaporação do solo pode flutuar diariamente como resultado de chuva ou irrigação, o coeficiente de cultura único expressa somente o tempo médio (vários-dias) do efeito da evapotranspiração da cultura.

Como o coeficiente de cultura único (K_c) calcula a média da evaporação do solo e transpiração, a aproximação é usada para estimar ET_c semanalmente ou períodos de tempo mais longos, embora possa fazer cálculo diário. O K_c único é usado no planejamento, estudos e projetos de sistema de irrigação onde os cálculos médios dos efeitos da superfície do solo úmido são aceitáveis e pertinentes. Este é o caso dos sistemas de irrigação por superfície e dos sistemas de irrigação onde o intervalo de tempo entre irrigação sucessiva é de vários dias, freqüentemente dez dias ou mais. Para o manejo de irrigação desses sistemas, o tempo médio do K_c único é válido.

Aproximação do coeficiente de cultura duplo ($K_{cb} + K_e$)

Na aproximação do coeficiente de cultura duplo, os efeitos da transpiração da cultura e evaporação do solo são determinados separadamente. Dois coeficientes são usados: o coeficiente de cultura basal (K_{cb}) que descreve a transpiração da planta, e o coeficiente de

evaporação de água do solo (K_e) que descreve a evaporação da superfície do solo. O coeficiente K_c único é substituído por:

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (57)$$

onde

K_{cb} = coeficiente de cultura basal,

K_e = coeficiente de evaporação da água da superfície do solo.

O coeficiente de cultura basal, K_{cb} , é definido como a relação entre E_{Tc} e E_{To} quando a camada da superfície do solo está seca mas o conteúdo médio de água do solo na zona radicular é adequado para sustentar a transpiração da planta completamente. O K_{cb} representa a linha base do K_c potencial na ausência dos efeitos adicionais de molhamento da superfície do solo por irrigação ou chuva. O coeficiente de evaporação do solo, K_e , descreve o componente de evaporação da superfície de solo. Se a superfície do solo é umedecida por chuva ou irrigação, K_e pode ser grande. Porém, a soma de K_{cb} e K_e nunca pode exceder um valor máximo, $K_{c_{max}}$, determinado pela energia disponível para evapotranspiração à superfície do solo. Quando a superfície do solo fica mais seca, K_e fica menor e pode zerar quando nenhuma água permanece para evaporação. A estimação de K_e requer um cálculo do balanço de água diária para o cálculo do conteúdo de água do solo que permanece na camada superficial do solo.

A aproximação do coeficiente duplo requer cálculos mais numéricos que o procedimento que usa o coeficiente K_c único. O procedimento duplo é melhor para programar irrigação em tempo real, para cálculo de balanço de água no solo, e para estudos de pesquisa onde efetuam variações diárias na umidade da superfície do solo e os impactos resultantes na E_{Tc} diária, da água no perfil do solo, e fluxos de percolação profunda são importantes. Este é o caso para irrigação de alta frequência com sistemas de microirrigação ou sistemas de movimento laterais como pivô central e sistemas lineares.

Curva do coeficiente de cultura

Depois da escolha da aproximação de cálculo, determinam-se as durações dos estádios de crescimento da cultura e os coeficientes de cultura correspondentes, e uma curva de coeficiente da cultura pode ser construída. A curva representa as mudanças no coeficiente da cultura durante a estação de crescimento. A forma da curva representa as mudanças, na

vegetação e na cobertura do solo durante o crescimento e maturação da planta, que afetam a relação entre ET_c e ET_o . O coeficiente K_c , e conseqüentemente ET_c , pode ser derivado da curva para qualquer período dentro da estação de crescimento.

Coeficiente de cultura único

A curva generalizada do coeficiente de cultura é mostrada na Figura 25. Logo após o plantio das culturas anuais ou logo após a iniciação de folhas novas para culturas permanentes, o valor do K_c é pequeno, freqüentemente menor que 0.4. O K_c começa a aumentar do valor do K_c inicial, $K_{c_{ini}}$, no começo do crescimento da planta o K_c cresce rapidamente e alcança um valor máximo, $K_{c_{meio}}$, no tempo máximo ou próximo do crescimento da planta máximo. Durante o estágio final, quando as folhas começam a envelhecer e senescer devido a práticas culturais ou naturalmente, o K_c começa a diminuir até que alcança o mais baixo valor ao término do período final de crescimento $K_{c_{fim}}$.

Coeficiente de cultura duplo

A curva do K_c único da Figura 25 incorpora as médias dos efeitos de umedecimento do solo no coeficiente K_c . O valor para o $K_{c_{meio}}$ é relativamente constante para a maioria das condições culturais e de crescimento. Porém, os valores para $K_{c_{ini}}$ e $K_{c_{fim}}$ podem variar consideravelmente diariamente e dependem da freqüência de umedecimento da superfície do solo por irrigação e/ou chuva. A aproximação do coeficiente de cultura duplo calcula os aumentos reais no K_c durante cada dia em função do crescimento da planta e da umidade da superfície do solo.

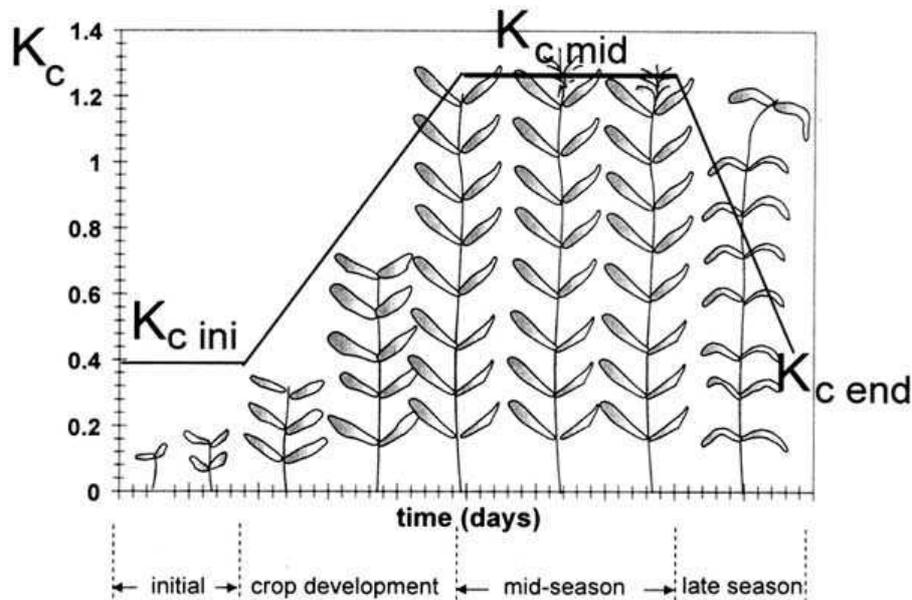


FIGURE 25. Curva do coeficiente da cultura generalizada para a aproximação do coeficiente de cultura único.

Como o coeficiente K_c único inclui efeitos médios calculados da evaporação do solo, o coeficiente de cultura basal, K_{cb} que descreve somente transpiração da planta, está situado abaixo o valor de K_c (Figura 26). A maior diferença entre K_c e K_{cb} encontra-se no estágio de crescimento inicial onde a evapotranspiração está predominantemente na forma de evaporação do solo e a transpiração da cultura ainda é pequena. devido ao dossel da cultura estar fechado ou o sombreamento feito pela cultura ser grande durante o estágio intermediário, a evaporação do solo em baixo do dossel tem menos efeito na evapotranspiração de cultura e o valor do K_{cb} no estágio intermediário, será quase igual a K_c . Dependendo da cobertura do solo, o coeficiente de cultura basal durante o estágio intermediário pode ser somente 0.05-0.10 abaixo do valor de K_c . Dependendo da frequência com que a cultura é irrigada durante o estágio final, K_{cb} será semelhante (se raramente irrigar) ou menor que o valor de K_c .

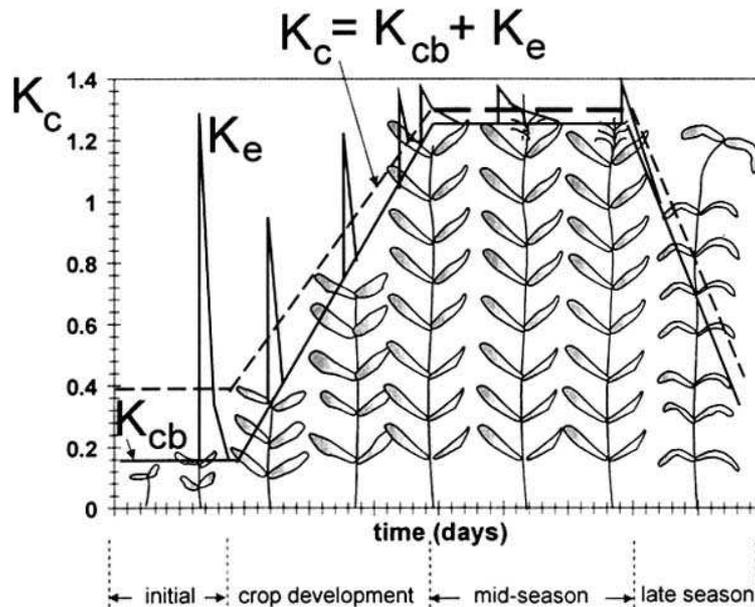


FIGURA 26. Curva do coeficiente de cultura mostrando o basal K_{cb} (linha grossa), evaporação do solo K_e (linha fina) e o único correspondente $K_c = K_{cb} + K_e$ (linha pontilhada).

A Figura 26 apresenta a curva típica para o K_{cb} , K_e e K_c . A curva K_{cb} na figura representa o K_c mínimo para condições de água do solo adequada e superfície do solo seca. O K_e “picos” na figura represente aumento na evaporação quando a chuva ou irrigação umedece a superfície do solo e aumenta temporariamente a E_{Tc} . Esta evaporação do solo quando molhado, “picos”, vão diminuindo como o secamento da camada superficial do solo. Os picos geralmente alcançam um valor máximo de 1.0-1.2 e dependem do clima, da magnitude da lâmina de irrigação e da porção da superfície do solo umedecido.

Somando, os valores de K_{cb} e K_e representam o coeficiente de cultura único, K_c . A curva do K_c total, mostrado como a linha pontilhada na Figura 26, ilustra o efeito médio $K_{cb} + K_e$ com o passar do tempo e é mostrado como uma curva “endireitada”. Essa curva endireitada é que representa o procedimento de cálculo para o K_c único. A curva do K_c está situada sobre a curva do K_{cb} , com diferenças potenciais grandes durante o estágio inicial e de crescimento e depende da frequência de irrigação.

Quadro de fluxo dos cálculos

São desenvolvidos os procedimentos de cálculo requeridos para as aproximações de coeficiente de cultura nos capítulos seguintes. No Capítulo 6, um coeficiente de cultura único é usado para calcular E_{Tc} . A aproximação que utiliza dois coeficientes que descrevem os

efeitos da cultura (transpiração) e do solo (evaporação) separadamente são apresentados no Capítulo 7. A Figura 27 apresenta os procedimentos de cálculo gerais.

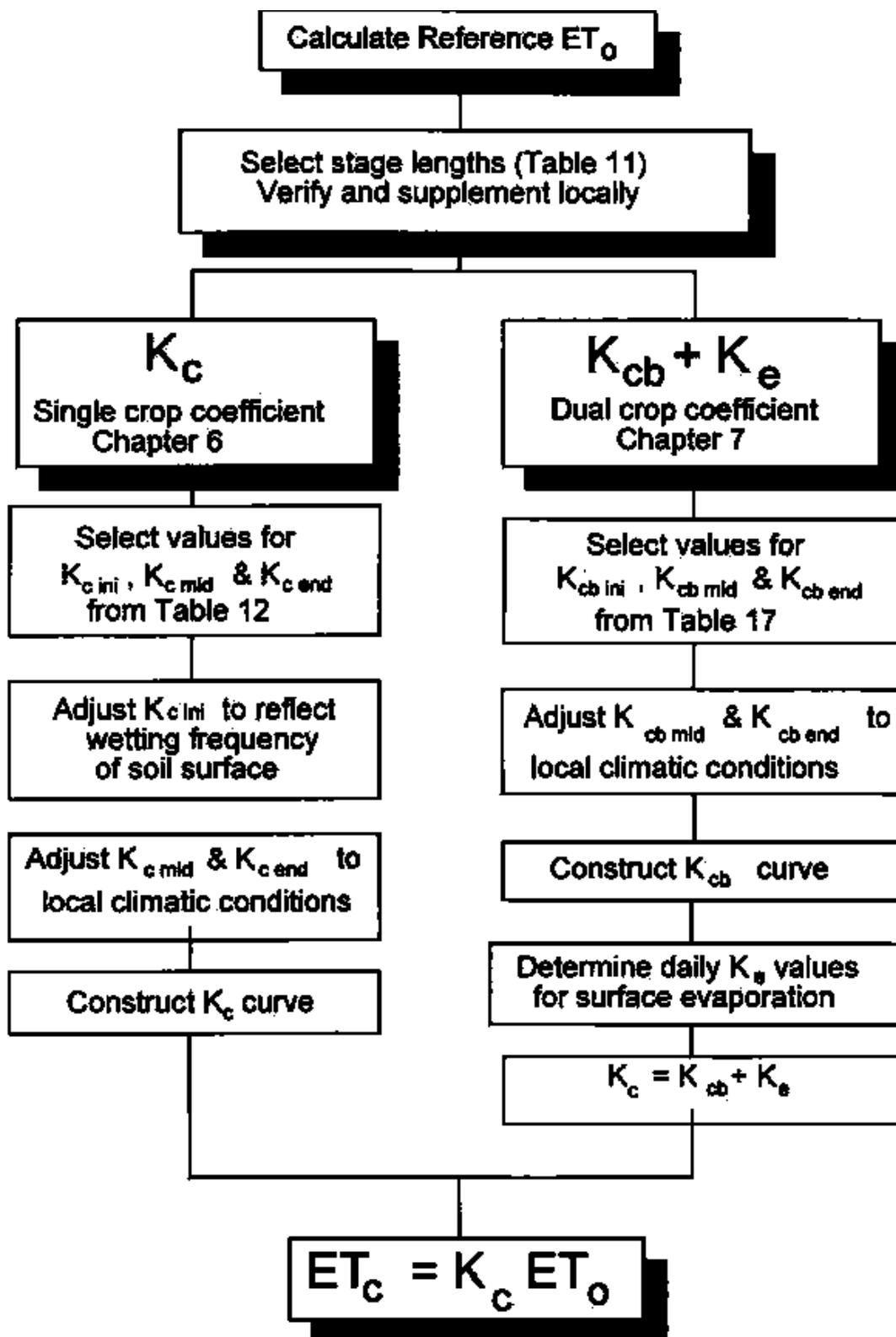


FIGURA 27. Procedimento geral para calcular ETc

Capítulo 6 - ETc - Coeficiente de cultura único (Kc)

Este capítulo trata do cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc) sob condições padrão. Nenhuma limitação é colocada no crescimento e desenvolvimento da cultura ou na evapotranspiração pela umidade e salinidade do solo, densidade da cultura, pragas e doenças, infestação de erva daninha ou baixa fertilidade do solo. A ETc é determinada pela aproximação do coeficiente de cultura pelo motivo de que o efeito das várias condições climáticas está incorporado na ETo e as características da cultura no coeficiente Kc:

$$ETc = Kc ETo \quad (58)$$

O efeito da transpiração da cultura e evaporação do solo é integrado em um único coeficiente de cultura. O coeficiente Kc incorpora características da cultura e efeitos médios da evaporação do solo. Para o planejamento e manejo da irrigação normal, com a finalidade do desenvolvimento do programa de irrigação básico, e para a maioria do estudo do balanço hidrológico de água, os coeficientes de cultura médios são relevantes e mais convenientes do que o Kc estimado diariamente que utiliza um coeficiente separado da cultura e do solo (Capítulo 7). Somente quando valores para Kc são necessários diariamente para culturas em áreas específicas e para anos específicos, deve ser considerado um coeficiente para transpiração e outro de evaporação (Kcb + Ke).

O procedimento de cálculo para evapotranspiração da cultura, ETc, consiste de:

1. identificar os estádios de crescimento da cultura, determina as suas durações, e selecionar os coeficientes Kc correspondentes;
2. ajustar os coeficientes Kc selecionados para a frequência de irrigação ou condições climáticas durante os estádios;
3. construir a curva do coeficiente de cultura (permitindo ao usuário determinar o valor de Kc em qualquer momento durante o ciclo da cultura); e
4. calcular ETc como o produto de ETo e Kc.

Duração dos estádios de crescimento

A FAO Irrigação e Drenagem artigo N°.24 fornece as durações gerais para quatro estádios de crescimento distinto e o período de crescimento total para vários tipos de climas e localizações. Estas informações foram complementadas com outras fontes e foram resumidas na Tabela 11.

Em algumas situações, o tempo de emergência da vegetação e o tempo de cobertura completa efetiva podem ser estimados usando equações de regressão com base em graus dias cumulativas ou através de modelos de crescimento de planta mais sofisticados. Deveriam ser verificados estes tipos de modelos ou deveriam ser validados para o local em estudo ou para uma variedade de cultura específica que usa observações locais.

TABELA 11. Durações dos estádios* de desenvolvimento da cultura para várias datas de plantio e regiões climáticas (dias)

Cultura	Inicial (L _{ini})	Des. (L _{des})	Int. (L _{int})	Final (L _{final})	Total	Data de Plantio	Região
a. Small VegeTabelas							
Brócolos	35	45	40	15	135	Sept	Calif. Desert, USA
Repolho	40	60	50	15	165	Sept	Calif. Desert, USA
Cenoura	20	30	50/30	20	100	Oct/Jan	Arid climate
	30	40	60	20	150	Feb/Mar	Mediterranean
	30	50	90	30	200	Oct	Calif. Desert, USA
Couve-flor	35	50	40	15	140	Sept	Calif. Desert, USA
Aipo	25	40	95	20	180	Oct	(Semi) Arid
	25	40	45	15	125	April	Mediterranean
	30	55	105	20	210	Jan	(Semi) Arid
Crucíferas (couves ¹)	20	30	20	10	80	April	Mediterranean
	25	35	25	10	95	February	Mediterranean
	30	35	90	40	195	Oct/Nov	Mediterranean
Alface	20	30	15	10	75	April	Mediterranean
	30	40	25	10	105	Nov/Jan	Mediterranean
	25	35	30	10	100	Oct/Nov	Arid Region
	35	50	45	10	140	Feb	Mediterranean
Cebola (seca)	15	25	70	40	150	April	Mediterranean
	20	35	110	45	210	Oct; Jan.	Arid Region; Calif.
Cebola (verde)	25	30	10	5	70	April/May	Mediterranean

	20	45	20	10	95	October	Arid Region
	30	55	55	40	180	March	Calif., USA
Cebola (semente)	20	45	165	45	275	Sept	Calif. Desert, USA
Espinafre	20	20	15/25	5	60/70	Apr; Sep/Oct	Mediterranean
	20	30	40	10	100	November	Arid Region
Rabanete	5	10	15	5	35	Mar/Apr	Medit.; Europe
	10	10	15	5	40	Winter	Arid Region
b. VegeTabelas - Solanum Family (<i>Solanaceae</i>)							
Egg plant	30	40	40	20	130\1	October	Arid Region
	30	45	40	25	40	May/June	Mediterranean
Sweet peppers (bell)	25/30	35	40	20	125	April/June	Europe and Medit.
	30	40	110	30	210	October	Arid Region
Tomate	30	40	40	25	135	January	Arid Region
	35	40	50	30	155	Apr/May	Calif., USA
	25	40	60	30	155	Jan	Calif. Desert, USA
	35	45	70	30	180	Oct/Nov	Arid Region
	30	40	45	30	145	April/May	Mediterranean
c. VegeTabelas - Cucumber Family (<i>Cucurbitaceae</i>)							
Cantaloupe	30	45	35	10	120	Jan	Calif., USA
	10	60	25	25	120	Aug	Calif., USA
Pepino	20	30	40	15	105	June/Aug	Arid Region
	25	35	50	20	130	Nov; Feb	Arid Region
Abóbora, Winter squash	20	30	30	20	100	Mar, Aug	Mediterranean
	25	35	35	25	120	June	Europe
Squash, Abobrinha	25	35	25	15	100	Apr; Dec.	Medit.; Arid Reg.
	20	30	25	15	90	May/June	Medit.; Europe
Melão doce	25	35	40	20	120	May	Mediterranean

	30	30	50	30	140	March	Calif., USA
	15	40	65	15	135	Aug	Calif. Desert, USA
	30	45	65	20	160	Dec/Jan	Arid Region
Melão d'água	20	30	30	30	110	April	Italy
	10	20	20	30	80	Mat/Aug	Near East (desert)
d. Roots and Tubers							
Beterraba, Tabela	15	25	20	10	70	Apr/May	Mediterranean
	25	30	25	10	90	Feb/Mar	Mediterranean & Arid
Mandioca: 1 ano	20	40	90	60	210	Rainy	Tropical regions
2 anos	150	40	110	60	360	season	
Batata	25	30	30/45	30	115/130	Jan/Nov	(Semi) Arid Climate
	25	30	45	30	130	May	Continental Climate
	30	35	50	30	145	April	Europe
	45	30	70	20	165	Apr/May	Idaho, USA
	30	35	50	25	140	Dec	Calif. Desert, USA
Batata doce	20	30	60	40	150	April	Mediterranean
	15	30	50	30	125	Rainy seas.	Tropical regions
Beterraba açucareira	30	45	90	15	180	March	Calif., USA
	25	30	90	10	155	June	Calif., USA
	25	65	100	65	255	Sept	Calif. Desert, USA
	50	40	50	40	180	April	Idaho, USA
	25	35	50	50	160	May	Mediterranean
	45	75	80	30	230	November	Mediterranean
	35	60	70	40	205	November	Arid Regions
e. Legumes (Leguminosae)							
Feijão (verde)	20	30	30	10	90	Feb/Mar	Calif., Mediterranean
	15	25	25	10	75	Aug/Sep	Calif., Egypt, Lebanon

Feijão (seco)	20	30	40	20	110	May/June	Continental Climates	
	15	25	35	20	95	June	Pakistan, Calif.	
	25	25	30	20	100	June	Idaho, USA	
Feijão Faba, Feijão broad	15	25	35	15	90	May	Europe	
	20	30	35	15	100	Mar/Apr	Mediterranean	
	- seco	90	45	40	60	235	Nov	Europe
	- verde	90	45	40	0	175	Nov	Europe
Green gram, cowpeas	20	30	30	20	110	March	Mediterranean	
Amendoim	25	35	45	25	130	Dry	West Africa	
	35	35	35	35	140	season	High Latitudes	
	35	45	35	25	140	May May/June	Mediterranean	
Lentilha	20	30	60	40	150	April	Europe	
	25	35	70	40	170	Oct/Nov	Arid Region	
Ervilha	15	25	35	15	90	May	Europe	
	20	30	35	15	100	Mar/Apr	Mediterranean	
	35	25	30	20	110	April	Idaho, USA	
Soja	15	15	40	15	85	Dec	Tropics	
	20	30/35	60	25	140	May	Central USA	
	20	25	75	30	150	June	Japan	
f. Perennial VegeTabelas (with winter dormência and initially bare or mulched soil)								
Alcachofra	40	40	250	30	360	Apr (1 st yr)	California	
	20	25	250	30	325	May (2 nd yr)	(cut in May)	
Aspargos	50	30	100	50	230	Feb	Warm Winter	
	90	30	200	45	365	Feb	Mediterranean	
g. Fibre Crops								
Algodão	30	50	60	55	195	Mar-May	Egypt; Pakistan; Calif.	
	45	90	45	45	225	Mar	Calif. Desert, USA	

	30	50	60	55	195	Sept	Yemen
	30	50	55	45	180	April	Texas
Flax	25	35	50	40	150	April	Europe
	30	40	100	50	220	October	Arizona
h. Oil Crops							
Castor beans	25	40	65	50	180	March	(Semi) Arid Climates
	20	40	50	25	135	Nov.	Indonesia
Safflower	20	35	45	25	125	April	California, USA
	25	35	55	30	145	Mar	High Latitudes
	35	55	60	40	190	Oct/Nov	Arid Region
Sesame	20	30	40	20	100	June	China
Sunflower	25	35	45	25	130	April/May	Medit.; California
i. Cereals							
Barley/Oats/Wheat	15	25	50	30	120	November	Central India
	20	25	60	30	135	March/Apr	35-45 °L
	15	30	65	40	150	July	East Africa
	40	30	40	20	130	Apr	
	40	60	60	40	200	Nov	
	20	50	60	30	160	Dec	Calif. Desert, USA
Winter Wheat	20 ²	60 ²	70	30	180	December	Calif., USA
	30	140	40	30	240	November	Mediterranean
	160	75	75	25	335	October	Idaho, USA
Grains (small)	20	30	60	40	150	April	Mediterranean
	25	35	65	40	165	Oct/Nov	Pakistan; Arid Reg.
Milho (grão)	30	50	60	40	180	April	East Africa (alt.)
	25	40	45	30	140	Dec/Jan	Arid Climate
	20	35	40	30	125	June	Nigeria (humid)

	20	35	40	30	125	October	India (dry, cool)
	30	40	50	30	150	April	Spain (spr, sum.); Calif.
	30	40	50	50	170	April	Idaho, USA
Milho (doce)	20	20	30	10	80	March	Philippines
	20	25	25	10	80	May/June	Mediterranean
	20	30	50/30	10	90	Oct/Dec	Arid Climate
	30	30	30	103	110	April	Idaho, USA
	20	40	70	10	140	Jan	Calif. Desert, USA
Millet	15	25	40	25	105	June	Pakistan
	20	30	55	35	140	April	Central USA
Sorgo	20	35	40	30	130	May/June	USA, Pakis., Med.
	20	35	45	30	140	Mar/April	Arid Region
Arroz	30	30	60	30	150	Dec; May	Tropics; Mediterranean
	30	30.	80	40	180	May	Tropics
j. Forages							
Alfalfa, total season ⁴	10	30	var.	var.	var.		last -4°C in spring until first -4°C in fall
Alfalfa ⁴ 1 st cutting cycle	10	20	20	10	60	Jan Apr (last - 4°C)	Calif., USA.
	10	30	25	10	75		Idaho, USA.
Alfalfa ⁴ , other cutting cycles	5	10	10	5	30	Mar	Calif., USA.
	5	20	10	10	45	Jun	Idaho, USA.
Bermuda for seed	10	25	35	35	105	March	Calif. Desert, USA
Bermuda for hay (several cuttings)	10	15	75	35	135	---	Calif. Desert, USA
Grass Pasture ⁴	10	20	--	--	--		7 days before last -4°C in spring until 7 days after first -4°C in fall
Sudan, 1 st cutting cycle	25	25	15	10	75	Apr	Calif. Desert, USA
Sudan, other cutting cycles	3	15	12	7	37	June	Calif. Desert, USA

k. Sugar Cane							
Sugarcane, virgin	35	60	190	120	405		Low Latitudes
	50	70	220	140	480		Tropics
	75	105	330	210	720		Hawaii, USA
Sugarcane, ratoon	25	70	135	50	280		Low Latitudes
	30	50	180	60	320		Tropics
	35	105	210	70	420		Hawaii, USA
l. Tropical Fruits and Trees							
Banana, 1 st yr	120	90	120	60	390	Mar	Mediterranean
Banana, 2 nd yr	120	60	180	5	365	Feb	Mediterranean
Pineapple	60	120	600	10	790		Hawaii, USA
m. Grapes and Berries							
Uva	20	40	120	60	240	April	Low Latitudes
	20	50	75	60	205	Mar	Calif., USA
	20	50	90	20	180	May	High Latitudes
	30	60	40	80	210	April	Mid Latitudes (wine)
Hops	25	40	80	10	155	April	Idaho, USA
n. Fruit Trees							
Citrus	60	90	120	95	365	Jan	Mediterranean
Deciduous Orchard	20	70	90	30	210	March	High Latitudes
	20	70	120	60	270	March	Low Latitudes
	30	50	130	30	240	March	Calif., USA
Olives	30	90	60	90	2705	March	Mediterranean
Pistachios	20	60	30	40	150	Feb	Mediterranean
Walnuts	20	10	130	30	190	April	Utah, USA
o. Wetlands - Temperate Climate							
Wetlands (Cattails, Bulrush)	10	30	80	20	140	May	Utah, USA; killing frost

	180	60	90	35	365	November	Florida, USA
Wetlands (short veg.)	180	60	90	35	365	November	frost-free climate

* Durações dos estádios de desenvolvimento da cultura fornecidas nesta Tabela são indicativas de condições gerais, mas pode variar substancialmente de região a região, com clima e condições de plantio, e com a variedade da cultura. O usuário é encorajado obter informação local apropriada.

¹Crucifers incluem repolho, couve-flor, brócolos, e brotos de Brussel. O alcance largo em durações de estações está devido a varietal e diferenças de espécie.

²estes períodos para trigo de inverno prolongarão em climas congelados de acordo com dias que têm zero potencial de crescimento e dormência de trigo. Sob de condições gerais e na ausência de dados locais, se caia e planta de trigo de inverno pode ser presumido para acontecer em climas temperados do norte quando a 10-day média de funcionamento de diário ar temperatura diminuições médias para 17° C ou 1 de dezembro, qualquer que vem primeiro. Plantando de trigo primaveral podem ser presumidos para acontecer quando a 10-day média de funcionamento de diário ar temperatura aumentos ms para 5° C. Fonte que planta de milho-grão pode ser presumida para acontecer quando a 10-day média de funcionamento de diário ar temperatura aumentos ms para 13° C.

³a final estação para doce milho será aproximadamente 35 dias se o grão é permitido amadurecer e secar.

⁴em climas que têm congelações mortais, podem ser calculadas estações crescentes para alfafa e grama como:

alfafa: último -4° C em primavera até primeiro -4° C em outono (Everson, D. O., M. Faubion e D. E. Amos 1978. Temperaturas " geladas e estações crescentes em Idaho ". Univ. Idaho Agric. Exp. estacione boletim 494. 18 pág.)

grama: 7 dias antes de último -4° C em primavera e 7 dias depois de último -4° C em outono (Kruse E. G. e Haise, H. R. 1974. Uso de " água por gramas nativas em altitude alta prados " de Colorado. USDA Agric. Res. Conserte, Região Ocidental relatório ARS-W-6-1974. 60 páginas)

⁵azeitona sobe em árvore ganhe folhas novas em março. Veja nota de rodapé 24 de Tabela

¹²para informação adicional onde o Kc continua fora do " período " crescente.

Fonte primária: FAO Irrigação e Drenagem artigo N°. 24 (Doorenbos e Pruitt, 1977), Tabela 22.

As durações dos períodos inicial e de desenvolvimento podem ser relativamente pequenas para árvores decíduas e arbustos que podem desenvolver folhas novas pela primavera a taxas relativamente rápidas (Figura 23).

A taxa na qual a cobertura da vegetação se desenvolve e o tempo ao qual atinge cobertura completa efetiva é geralmente afetado pelas condições climáticas através da temperatura do ar média diária em particular. Então, a duração do tempo entre o plantio e a cobertura completa efetiva variará com o clima, latitude, altitude e data de plantio. Também variará com o cultivar (variedade da cultura). Geralmente, uma vez alcançada a cobertura completa efetiva para um dossel da cultura, a taxa de desenvolvimento fisiológica adicional (florescimento, desenvolvimento da semente, amadurecimento, e senescência) é mais dependente do genótipo da planta e menos dependente do clima. Como um exemplo, a Figura 28 apresenta a variação em duração do período de crescimento para um cultivar de arroz para uma região e para várias datas de plantio.

O fim do estágio intermediário e o começo do estágio final estão normalmente marcados pela senescência das folhas e começa freqüentemente com as folhas mais baixas das plantas. A duração do estágio final pode ser relativamente pequena (menos de 10 dias) para vegetação morta por frio (por exemplo, milho em altas altitudes nas latitudes $> 40^{\circ}\text{N}$) ou para culturas que são colhidas frescas (por exemplo, beterraba e legumes pequenos).

Temperaturas altas podem acelerar o amadurecimento e a senescência das culturas. Temperatura do ar alta ($> 35^{\circ}\text{C}$) por longo período de tempo pode causar dormência em algumas culturas como a grama. Se estiverem juntas temperaturas do ar severamente altas com estresse de umidade, a dormência da grama pode ser permanente para o resto da estação de crescimento. Estresse de umidade ou outro estresse ambiental normalmente acelerarão a taxa de maturação da cultura e podem encurtar o estágio intermediário e final do período de crescimento.

Os valores da Tabela 11 somente são úteis como um guia geral e para propósitos de comparação. As durações listadas dos estádios de crescimento são durações médias para as regiões e períodos especificados e se pretende que somente sirva como exemplos. Deveriam ser usadas observações locais dos estádios de desenvolvimento da planta específica, sempre que possível, incorporar efeitos de variedade da planta, clima e práticas culturais. Informação local pode ser obtida entrevistando os fazendeiros, produtores, agentes de extensão rural e pesquisadores locais, centro de pesquisas locais, ou controle remoto. Quando for determinada a duração dos estádios a partir de observações locais, as diretrizes e descrições visuais podem ser úteis.

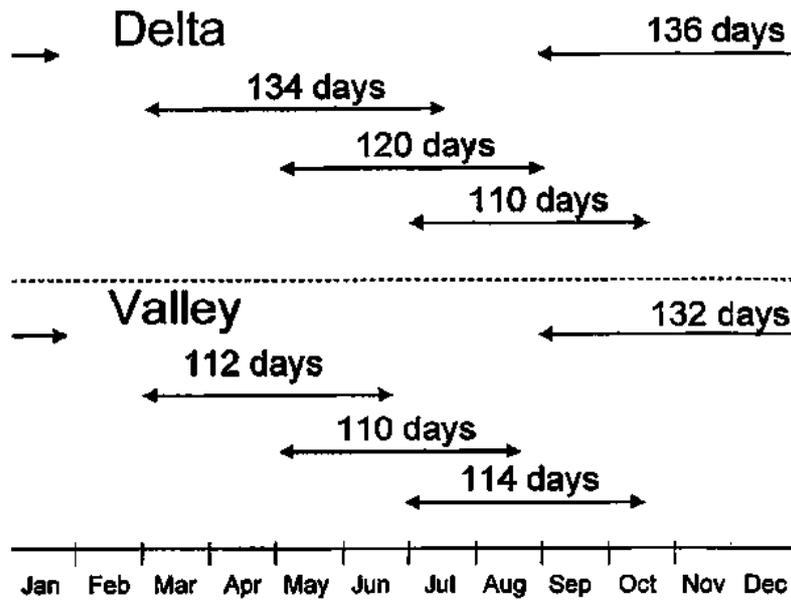


FIGURA 28. Variação na duração do período de crescimento do arroz (cultivar: Jaya) semeado durante vários meses do ano a localizações diferentes ao longo do Rio Senegal (África)

Coeficientes de cultura

Mudanças na vegetação e na cobertura do solo significam que o coeficiente de cultura K_c varia durante o período de crescimento. São representadas as tendências no K_c durante o período crescimento na curva do coeficiente de cultura. São necessários somente três valores de K_c para descrever e construir a curva do coeficiente de cultura: durante o estágio inicial ($K_{c_{ini}}$), o estágio de intermediário ($K_{c_{meio}}$) e ao término do estágio final ($K_{c_{fim}}$).

Valores de K_c tabelados

A Tabela 12 listas valores típicos para $K_{c_{ini}}$, $K_{c_{meio}}$ e $K_{c_{fim}}$ para várias culturas agrícolas. Os coeficientes apresentados são organizados por grupo de culturas (i.e., legumes pequenos, legumes, cereais, etc.) para ajudar na localização da cultura na Tabela e ajudar na comparação de culturas dentro do mesmo grupo. Existe semelhança normalmente íntima nos coeficientes entre os membros do mesmo grupo de cultura, como a altura da planta, área foliar, cobertura do solo e manejo da água normalmente são semelhantes.

Os coeficientes na Tabela 12 integram os efeitos de transpiração e evaporação num espaço de tempo. Os efeitos da integração representam num espaço de tempo médio e de uma frequência de umedecimento médio para uma cultura “padrão” sob condições de crescimento

típico em um ambiente irrigado. Os valores para o K_c durante o estágio inicial e de desenvolvimento da cultura estão sujeitos aos efeitos de grandes variações devido à frequência de umedecimento e então sempre deveriam ser feitos refinamentos para o valor a ser usado para o $K_{c_{ini}}$. Para umedecimento frequente com por exemplo irrigações por aspersão de alta frequência ou chuva, podem aumentar os valores para o $K_{c_{ini}}$ substancialmente.

TABELA 12. Coeficientes de cultura único (tempo-médio), K_c , e alturas da planta máxima média para condições não estressada, culturas bem manejadas em climas sub úmido ($RH_{min} \approx 45\%$, $u_2 \approx 2$ m/s) para uso com a ETo Penman-Monteith FAO.

Cultura	$K_{c_{ini}}^1$	$K_{c_{mid}}$	$K_{c_{end}}$	Altura máxima da planta (h) (m)
a. Small VegeTabelas	0.7	1.05	0.95	
Broccoli		1.05	0.95	0.3
Brussel Sprouts		1.05	0.95	0.4
Cabbage		1.05	0.95	0.4
Carrots		1.05	0.95	0.3
Cauliflower		1.05	0.95	0.4
Celery		1.05	1.00	0.6
Garlic		1.00	0.70	0.3
Lettuce		1.00	0.95	0.3
Onions				
- dry		1.05	0.75	0.4
- green		1.00	1.00	0.3
- seed		1.05	0.80	0.5
Spinach		1.00	0.95	0.3
Radish		0.90	0.85	0.3
b. VegeTabelas - Solanum Family (<i>Solanaceae</i>)	0.6	1.15	0.80	
Egg Plant		1.05	0.90	0.8
Sweet Peppers (bell)		1.05 ²	0.90	0.7
Tomato		1.15 ²	0.70-	0.6

			0.90	
c. VegeTabelas - Cucumber Family (Cucurbitaceae)	0.5	1.00	0.80	
Cantaloupe	0.5	0.85	0.60	0.3
Cucumber				
- Fresh Market	0.6	1.00 ²	0.75	0.3
- Machine harvest	0.5	1.00	0.90	0.3
Pumpkin, Winter Squash		1.00	0.80	0.4
Squash, Zucchini		0.95	0.75	0.3
Sweet Melons		1.05	0.75	0.4
Watermelon	0.4	1.00	0.75	0.4
d. Roots and Tubers	0.5	1.10	0.95	
Beets, Tabela		1.05	0.95	0.4
Cassava				
- year 1	0.3	0.80 ³	0.30	1.0
- year 2	0.3	1.10	0.50	1.5
Parsnip	0.5	1.05	0.95	0.4
Potato		1.15	0.75 ⁴	0.6
Sweet Potato		1.15	0.65	0.4
Turnip (and Rutabaga)		1.10	0.95	0.6
Sugar Beet	0.35	1.20	0.70 ⁵	0.5
e. Legumes (Leguminosae)	0.4	1.15	0.55	
Beans, green	0.5	1.05 ²	0.90	0.4
Beans, dry and Pulses	0.4	1.15 ²	0.35	0.4
Chick pea		1.00	0.35	0.4
Fababean (broad bean)				
- Fresh	0.5	1.15 ²	1.10	0.8
- Dry/Seed	0.5	1.15 ²	0.30	0.8

Grabanzo	0.4	1.15	0.35	0.8
Green Gram and Cowpeas		1.05	0.60-0.35 ⁶	0.4
Groundnut (Peanut)		1.15	0.60	0.4
Lentil		1.10	0.30	0.5
Peas				
- Fresh	0.5	1.15 ²	1.10	0.5
- Dry/Seed		1.15	0.30	0.5
Soybeans		1.15	0.50	0.5-1.0
f. Perennial VegeTabelas (with winter dormancy and initially bare or mulched soil)	0.5	1.00	0.80	
Artichokes	0.5	1.00	0.95	0.7
Asparagus	0.5	0.95 ⁷	0.30	0.2-0.8
Mint	0.60	1.15	1.10	0.6-0.8
Strawberries	0.40	0.85	0.75	0.2
g. Fibre Crops	0.35			
Cotton		1.15-1.20	0.70-0.50	1.2-1.5
Flax		1.10	0.25	1.2
Sisal ⁸		0.4-0.7	0.4-0.7	1.5
h. Oil Crops	0.35	1.15	0.35	
Castorbean (<i>Ricinus</i>)		1.15	0.55	0.3
Rapeseed, Canola		1.0-1.15 ⁹	0.35	0.6
Safflower		1.0-1.15 ⁹	0.25	0.8
Sesame		1.10	0.25	1.0
Sunflower		1.0-1.15 ⁹	0.35	2.0
i. Cereals	0.3	1.15	0.4	
Barley		1.15	0.25	1

Oats		1.15	0.25	1
Spring Wheat		1.15	0.25-0.4 ¹⁰	1
Winter Wheat				
- with frozen soils	0.4	1.15	0.25-0.4 ¹⁰	1
- with non-frozen soils	0.7	1.15	0.25-0.4 ¹⁰	
Maize, Field (grain) (<i>field corn</i>)		1.20	0.60-0.35 ¹¹	2
Maize, Sweet (<i>sweet corn</i>)		1.15	1.05 ¹²	1.5
Millet		1.00	0.30	1.5
Sorghum				
- grain		1.00-1.10	0.55	1-2
- sweet		1.20	1.05	2-4
Rice	1.05	1.20	0.90-0.60	1
j. Forages				
Alfalfa Hay				
- averaged cutting effects	0.40	0.95 ¹³	0.90	0.7
- individuplo cutting periods	0.40 ¹⁴	1.20 ¹⁴	1.15 ¹⁴	0.7
- for seed	0.40	0.50	0.50	0.7
Bermuda hay				
- averaged cutting effects	0.55	1.00 ¹³	0.85	0.35
- Spring crop for seed	0.35	0.90	0.65	0.4
Clover hay, Berseem				
- averaged cutting effects	0.40	0.90 ¹³	0.85	0.6
- individuplo cutting periods	0.40 ¹⁴	1.15 ¹⁴	1.10 ¹⁴	0.6
Rye Grass hay				
- averaged cutting effects	0.95	1.05	1.00	0.3

Sudan Grass hay (annual)					
	- averaged cutting effects	0.50	0.90 ¹⁴	0.85	1.2
	- individuplo cutting periods	0.50 ¹⁴	1.15 ¹⁴	1.10 ¹⁴	1.2
Grazing Pasture					
	- Rotated Grazing	0.40	0.85-1.05	0.85	0.15-0.30
	- Extensive Grazing	0.30	0.75	0.75	0.10
Turf grass					
	- cool season ¹⁵	0.90	0.95	0.95	0.10
	- warm season ¹⁵	0.80	0.85	0.85	0.10
k. Sugar Cane		0.40	1.25	0.75	3
I. Tropical Fruits and Trees					
Banana					
	- 1 st year	0.50	1.10	1.00	3
	- 2 nd year	1.00	1.20	1.10	4
Cacao		1.00	1.05	1.05	3
Coffee					
	- bare ground cover	0.90	0.95	0.95	2-3
	- with weeds	1.05	1.10	1.10	2-3
Date Palms		0.90	0.95	0.95	8
Palm Trees		0.95	1.00	1.00	8
Pineapple ¹⁶					
	- bare soil	0.50	0.30	0.30	0.6-1.2
	- with grass cover	0.50	0.50	0.50	0.6-1.2
Rubber Trees		0.95	1.00	1.00	10
Tea					
	- non-shaded	0.95	1.00	1.00	1.5
	- shaded ¹⁷	1.10	1.15	1.15	2

m. Grapes and Berries					
Berries (bushes)		0.30	1.05	0.50	1.5
Grapes					
	- Tabela or Raisin	0.30	0.85	0.45	2
	- Wine	0.30	0.70	0.45	1.5-2
Hops		0.3	1.05	0.85	5
n. Fruit Trees					
Almonds, no ground cover		0.40	0.90	0.65 ¹⁸	5
Apples, Cherries, Pears ¹⁹					
	- no ground cover, killing frost	0.45	0.95	0.70 ¹⁸	4
	- no ground cover, no frosts	0.60	0.95	0.75 ¹⁸	4
	- active ground cover, killing frost	0.50	1.20	0.95 ¹⁸	4
	- active ground cover, no frosts	0.80	1.20	0.85 ¹⁸	4
Apricots, Peaches, Stone Fruit ^{19, 20}					
	- no ground cover, killing frost	0.45	0.90	0.65 ¹⁸	3
	- no ground cover, no frosts	0.55	0.90	0.65 ¹⁸	3
	- active ground cover, killing frost	0.50	1.15	0.90 ¹⁸	3
	- active ground cover, no frosts	0.80	1.15	0.85 ¹⁸	3
Avocado, no ground cover		0.60	0.85	0.75	3
Citrus, no ground cover ²¹					
	- 70% canopy	0.70	0.65	0.70	4
	- 50% canopy	0.65	0.60	0.65	3
	- 20% canopy	0.50	0.45	0.55	2
Citrus, with active ground cover or weeds ²²					
	- 70% canopy	0.75	0.70	0.75	4
	- 50% canopy	0.80	0.80	0.80	3
	- 20% canopy	0.85	0.85	0.85	2

Conifer Trees ²³	1.00	1.00	1.00	10
Kiwi	0.40	1.05	1.05	3
Olives (40 to 60% ground coverage by canopy) ²⁴	0.65	0.70	0.70	3-5
Pistachios, no ground cover	0.40	1.10	0.45	3-5
Walnut Orchard ¹⁹	0.50	1.10	0.6518	4-5
o. Wetlands - temperate climate				
Cattails, Bulrushes, killing frost	0.30	1.20	0.30	2
Cattails, Bulrushes, no frost	0.60	1.20	0.60	2
Short Veg., no frost	1.05	1.10	1.10	0.3
Reed Swamp, standing water	1.00	1.20	1.00	1-3
Reed Swamp, moist soil	0.90	1.20	0.70	1-3
p. Special				
Open Water, < 2 m depth or in subhumid climates or tropics		1.05	1.05	
Open Water, > 5 m depth, clear of turbidity, temperate climate		0.6525	1.2525	

¹Estes são valores gerais para o Kc_{ini} sob o manejo de irrigação típico e solo úmido. Para umedecimento freqüente como por exemplo irrigação por aspersão de alta freqüência ou chuva diária, podem aumentar substancialmente estes valores que podem aproximar de 1.0 a 1.2. O Kc_{ini} é uma função do intervalo de molhamento da superfície do solo e da taxa de evaporação potencial durante o estágio inicial e de desenvolvimento e é estimado com maior precisão utilizando as Figuras 29 e 30, ou a Equação 7-3 no Anexo 7, ou usando o duplo $Kc_{bini} + Kc_e$.

²Feijões, Ervilhas, Legumes, Tomates, Pimentas e Pepinos às vezes são cultivados em espaldeiras que alcançam 1.5 a 2 metros em altura. Em tais casos, valores de Kc necessitam ser aumentados. Para feijões verdes, pimentas e pepinos, podem ser levados a 1.15, e para tomates, feijões secos e ervilhas, 1.20. Sob estas condições h também deveria ser aumentado.

³O valor de Kc intermediário para mandioca assume uma condição de não estresse durante ou seguindo a estação chuvosa. O Kc_{fim} conta de valores para dormência durante a estação seca.

⁴O Kc_{fim} valor por batatas é aproximadamente 0.40 para batatas de estação longas com matança de vinha.

⁵este Kc_{fim} valor é para nenhuma irrigação durante o último mês da estação crescente. O Kc_{fim} valor por besolobas de açúcar é mais alto, até 1.0, quando irrigação ou chuva significante acontece durante o último mês.

⁶o primeiro fim de Kc é para colhido fresco. O segundo valor é para colheu seque.

⁷o Kc para aspargo normalmente permanece a ini de Kc durante cultura das lanças, devido a cobertura de solo escassa. O Kc que valor meio é para regrowth seguinte de vegetação de planta terminação seguinte de cultura de lanças.

⁸Kc para sisal depende da densidade plantando e manejo de água (por exemplo, tensão de umidade intencional).

⁹os mais baixos valores são para culturas de rainfed que têm populações de planta menos densas.

¹⁰o valor mais alto é para culturas mão-colhidas.

¹¹o primeiro Kc fim valor está para cultura em umidade de grão alta. O segundo Kc fim valor busca para cultura campo completo que seca do grão (para aproximadamente 18% umidade, base de massa molhada).

¹²se colheu fresco para consumo humano. Uso que Kc fim para milho de campo se o doce milho é permitido amadurecer e secar no campo.

¹³este Kc coeficiente meio para culturas de feno é um Kc comum global coeficiente meio antes do que calcula a média Kc para ambos e cortes seguintes. É aplicado ao período que segue o primeiro período de desenvolvimento até o começo do último final período de estação da estação crescente.

¹⁴estes coeficientes de Kc para culturas de feno representam corte seguinte imediatamente; a cobertura cheia; e imediatamente antes de cortar, respectivamente. A estação crescente é descrita como uma série de períodos cortantes individuais (Figura 35).

¹⁵variedades de grama de estação frescas incluem postos densos de bluegrass, ryegrass, e fescue. Variedades de estação mornas incluem grama de bermuda e St. grama de Augustine. Os 0.95 valores para grama de estação fresca representam um 0.06 a 0.08 m que ceifam altura sob de condições de relva gerais. Onde manejo de água cuidadosa é praticada e crescimento rápido não é requerido, Kc para relva pode ser reduzido por 0.10.

¹⁶a planta de abacaxi tem muito baixo transpiração porque fecha seu stomates durante o dia e os abre durante a noite. Então, a maioria de Etc de abacaxi evaporação é da solo. O Kc meio <ini de Kc desde Kc meio acontece durante cobertura de solo cheia de forma que evaporação de solo é menos. Valores dados assumem que 50% da superfície de solo são cobertos através de mulch de plástico preto e aquela irrigação está através de irrigador. Para irrigação de goteira em baixo do mulch de plástico, Kc determinado pode ser reduzido por 0.10.

¹⁷incluem as exigências de água das árvores de sombra.

¹⁸este Kc fim valores representam Kc anterior folhear gota. Depois de gota de folha, Kc fim " 0.20 para solo nua, seca ou cobertura de solo morta e Kc termine " 0.50 a 0.80 para ativamente cobertura de solo crescente (consulte Capítulo 11).

¹⁹se referem a Eq. 94, 97 ou 98 e notas de rodapé 21 e 22 por calcular Kc para postos imaturos.

²⁰categoria de fruta de pedra aplica a pêssegos, albricoques, peras, ameixas e pecans.

²¹estes valores de Kc podem ser calculados de Eq. 98 para min de Kc = 0.15 e Kc cheio = 0.75, 0.70 e 0.75 para a inicial, estação meio e fim de períodos de estação, e eff de fc = fc onde fc = fração de solo coberta por dossel de árvore (por exemplo, o sol é presumido para estar diretamente em cima). Os valores listados correspondem com esses em Doorenbos e Pruitt (1977) e com mais finais medidas. O valor de midseason é mais baixo que inicial e terminando valores devido aos efeitos de fechamento de stomatal durante períodos de cume ET. Para úmido e climas de subhumid onde não há menos stomatal controlam por cítrico, valores para ini de Kc, Kc meio, e fim de Kc pode ser aumentado por 0.1 - 0.2, Rogers et al seguinte. (1983).

²²estes valores de Kc podem ser calculados como $Kc = fc_{ngc} \text{ de } Kc + (1 - fc) Kc_{cobrem}$ onde ngc de Kc é o Kc de cítrico sem cobertura de solo ativa (calculou como em nota de rodapé 21), cobertura de Kc é o Kc, para a cobertura de solo ativa (0.95), e fc é definido em nota de rodapé 21. Os valores listados correspondem com esses em Doorenbos e Pruitt (1977) e com mais finais medidas. Alternativamente, Kc para cítrico com cobertura de solo ativa pode ser calculado diretamente de Eq. 98 fixando min de Kc = cobertura de Kc. Para úmido e climas de subhumid onde não há menos stomatal controlam por cítrico, valores para ini de Kc, Kc meio, e fim de Kc pode ser aumentado por 0.1 - 0.2, Rogers et al seguinte. (1983).

Para cobertura de solo non-ativa ou só moderadamente ativa (ativo indica cobertura de solo verde e crescente com LAI > aproximadamente 2 a 3), Kc deveria ser weighted entre Kc para nenhuma cobertura de solo e Kc para cobertura de solo ativa, com o pesagem baseado no "greenness" e área foliar aproximada da cobertura de solo.

²³conferem exibição que stomatal significativo controlam devido a resistência aerodinâmica reduzida. O Kc, pode reduzir facilmente sob dos valores apresentados, que representam condições bem-molhadas para florestas grandes.

²⁴estes coeficientes representam aproximadamente 40 a 60% cobertura de solo. Se refira a Eq. 98 e notas de rodapé 21 e 22 por calcular Kc para postos imaturos. Na Espanha, Pastor e Orgaz (1994) achou o seguinte mensal Kc para pomares de azeitona que têm 60% cobertura de solo: 0.50, 0.50, 0.65, 0.60, 0.55, 0.50, 0.45, 0.45, 0.55, 0.60, 0.65, 0.50 por meses janeiro por dezembro. Estes coeficientes podem ser invocados usando ini de Kc = 0.65, Kc meio = 0.45, e Kc fim = 0.65, com durações de estágio = 30, 90, 60 e 90 dias, respectivamente para inicial, desenvolvimento, midseason e finais períodos de estação, e usando Kc durante o inverno ("fora estação") em dezembro para fevereiro = 0.50.

²⁵este Kc é para água funda em latitudes temperadas onde temperatura grande muda no corpo de água aconteça durante o ano, e inicial e evaporação de período de cume é baixa como energia de radiação é absorvido no corpo de água fundo. Durante queda e períodos de inverno (Kc fim), calor é lançado do corpo de água que aumenta a evaporação sobre isso para grama. Então, Kc meio corresponde ao período quando o corpo de água está ganhando energia térmica e Kc fim quando lançando energia térmica. Este Kc deveria ser usado com precaução.

Fontes primárias:

Kc_{ini}: Doorenbos e Kassam (1979)

$K_{c_{meio}}$ e $K_{c_{fim}}$: Doorenbos e Pruitt (1977); Pruitt (1986); Wright (1981, 1982). Snyder et al., (1989)

Os valores para $K_{c_{meio}}$ e $K_{c_{fim}}$ na Tabela 12 são para condições de um clima sub úmido com a umidade relativa mínima média diária (RHmin) de cerca de 45% e com velocidades do vento moderado em torno de 2 m/s. Para condições mais úmidas ou áridas, ou para condições de vento mais acentuado, os coeficientes K_c para os estádios intermediário e final deveriam ser modificados como descrito neste capítulo.

Os valores para K_c na Tabela 12 são valores para culturas sem estresse cultivadas em condições excelentes de manejo de água e agrônômico e alcançando uma produtividade máxima (condições padrão). Onde a densidade, altura ou área foliar são menores que as alcançadas sob tais condições, o valor para o $K_{c_{meio}}$ e $K_{c_{fim}}$, para a maioria das culturas, precisará ser modificado (Parte C, Capítulos 8, 9 e 10).

Coeficiente de cultura para o estágio inicial ($K_{c_{ini}}$)

Procedimento de cálculo

Os valores para o $K_{c_{ini}}$ na Tabela 12 são somente aproximações e somente deveriam ser usados por calcular ET_c durante estudos preliminares ou planejamento. Para vários grupos de cultura somente um valor para o $K_{c_{ini}}$ é apresentado e é considerado que seja representativo do grupo inteiro para um manejo de água de uma irrigação padrão. Estimativas mais precisas de $K_{c_{ini}}$ podem ser obtidas considerando:

Intervalo entre umedecimento do solo

A evapotranspiração durante o estágio inicial para culturas anuais é predominantemente na forma de evaporação. Então, estimativas precisas para $K_{c_{ini}}$ deveriam considerar a frequência com que a superfície do solo é molhada durante o período inicial. Onde o solo é frequentemente molhado por irrigação ou chuva, a evaporação da superfície do solo pode ser considerável e o $K_{c_{ini}}$ será grande. Por outro lado, onde a superfície do solo está seca, a evaporação é restringida e o $K_{c_{ini}}$ será pequeno (Tabela 9).

Poder evaporante da atmosfera

O valor do $K_{c_{ini}}$ é afetado pelo poder evaporante da atmosfera, i.e., E_{To} . Quanto mais alto o poder de evaporação da atmosfera, mais rápido o solo secará entre as aplicações de água e um pequeno tempo médio do K_c existirá para qualquer período particular.

Magnitude da lâmina de molhamento

Como a quantidade de água disponível na camada superficial do solo para evaporação e conseqüentemente o tempo para a superfície do solo secar é uma função da magnitude da lâmina de molhamento, o $K_{c_{ini}}$ serão menores para lâminas menores do que para grandes lâminas.

Dependendo do intervalo de tempo entre eventos de molhamento, da magnitude do evento de molhamento, e do poder de evaporação da atmosfera, o $K_{c_{ini}}$ podem variar entre 0.1 e 1.15. Um procedimento numérico para calcular $K_{c_{ini}}$ está no Anexo 7.

Intervalo entre eventos de molhamento

Em geral, o intervalo de tempo médio entre eventos de molhamento é calculado contando toda a chuva e eventos de irrigação que acontecem durante o período inicial que é maior que alguns milímetros. Podem ser contados eventos de molhamento que acontecem em dias adjacentes como um evento. O intervalo de molhamento médio é calculado dividindo a duração do período inicial pelo número de eventos.

Onde somente valores mensais de chuva estão disponíveis sem qualquer informação sobre o número de dias chuvosos, o número de eventos dentro do mês pode ser calculado dividindo a lâmina de chuva mensal pela lâmina de um evento de chuva típico. A lâmina típica, se existe, pode variar amplamente de clima para clima, região para região e de estação para estação. A Tabela 13 apresenta uma informação média sobre o valor aproximado de lâminas de chuva. Depois de decidir que chuva é típica para a região e estação do ano, o número de dias chuvosos e o intervalo de molhamento médio pode ser calculado.

TABELA 13. Classificação de lâminas de chuva

Chuva	Lâmina
Muito leve (garoa)	≤ 3 mm

Leve (chuva leve)	5 mm
Média (chuva)	≥ 10 mm
Pesada (pancada de chuva)	≥ 40 mm

Onde a chuva é insuficiente, a irrigação é necessária para manter a umidade para a cultura. Até mesma onde a irrigação ainda não é desenvolvido, o intervalo médio entre as irrigações futuras deveria ser calculado para obter a frequência exigida de molhamento necessário para manter a cultura livre de estresse. O intervalo pode ser tão pequeno quanto de alguns dias para legumes pequenos, mas até uma semana ou mais muito tempo para cereais que dependem das condições climáticas. Onde nenhuma estimativa do intervalo pode ser feita, o usuário pode consultar aos valores para $K_{c_{ini}}$ da Tabela 12.

EXEMPLO 23. Estimativa do intervalo entre eventos molhamento

Estimativa, para a média mensal dos dados de chuva, o intervalo entre chuva durante a estação chuvosa para uma estação e um clima temperado (Paris, França: 50 mm/mês), clima seco (Gafsa, Tunísia: 20 mm/mês) e clima tropical (Calcutá, Índia: 300 mm/mês).				
Estação	Chuva mensal (mm/mês)	Chuva típica (mm)	Número de dias chuvoso	Intervalo entre chuva
Paris	50	3	17	~ 2 dias
Gafsa	20	5	4	Semanalmente
Calcutá	300	20	15	~ 2 dias

Determinação do $K_{c_{ini}}$

O coeficiente de cultura para o estágio de crescimento inicial pode ser derivado das Figuras 29 e 30 que fornece estimativas para $K_{c_{ini}}$ como uma função do intervalo médio entre eventos de molhamento, o poder de evaporação E_{To} , e o valor do evento de molhando.

Eventos de molhamento leve (lâminas de infiltração de 10 mm ou menos): chuva e sistemas de irrigação de alta frequência (micro irrigação e pivô central)

A Figura 29 é utilizada para todos os tipos de solo quando o evento de molhamento é leve. Quando o molhando durante o período inicial somente é através da chuva, o usuário normalmente usará a Figura 29 para determinar $K_{c_{ini}}$. A figura também pode ser usada

quando a irrigação utiliza sistemas de alta frequência como micro irrigação e pivô central e aplicações leves de cerca de 10 mm ou menos.

EXEMPLO 24. Determinação gráfica do $K_{c\text{ini}}$

Um solo siltoso com turno de rega de dois dias durante o estágio inicial irrigado com o sistema pivô central. A lâmina média aplicada pelo pivô é de aproximadamente de 12 mm por irrigação a ET_o média para o estágio é de 4 mm/dia. Estime a evapotranspiração durante o estágio inicial.			
Pela Fig. 29 utilizando a curva do intervalo de 2-dias:	$K_{c\text{ini}} =$	0.85	-
	$ET_c = K_c ET_o = 0.85 (4.0) =$	3.4	mm/dia
A evapotranspiração da cultura média durante o estágio inicial é 3.4 mm/dia			

Eventos de molhando pesados (lâminas de infiltração de 40 mm ou mais): irrigação por superfície e irrigação por aspersão

A Figure 30 é usado para eventos de molhando pesados quando lâminas de infiltração são maiores que 40 mm, para essa magnitude de irrigação utilizamos irrigação por superfície ou aspersão. Logo após uma irrigação pesada, a quantidade de água disponível na camada superficial do solo para evaporação é considerável, e o tempo necessário para a superfície do solo secar pode aumentar significativamente. Por conseguinte, o fator K_c médio é maior que para eventos de irrigação leve. Como o tempo para a superfície do solo secar, com exceção do poder de evaporação do ar e a frequência de irrigação, e também determinada pela capacidade de armazenamento de água da camada superficial do solo, uma distinção é feita entre tipos de solo.

A Figura 30a é usada para solos de textura grossa e a Figura 30b é usado para solos de textura fina e média. Os solos de textura grossa incluem areias e areia argilosa. Solos de textura média incluem arenoso siltoso, siltoso, argilo siltoso e solos de textura de argiloso. Solos de textura fina incluem barro argilo siltoso, barro siltoso e solos de textura de barro.

Eventos de molhamento médio (lâminas de infiltração entre 10 e 40 mm):

Onde as lâminas de infiltração médias estão entre 10 e 40 mm, o valor do $K_{c\text{ini}}$ pode ser estimado pelas Figuras 29 e 30:

$$K_{c\text{ini}} = K_{c\text{in(Fig29)}} + \frac{(I - 10)}{(40 - 10)} [K_{c\text{in(Fig30)}} - K_{c\text{in(Fig29)}}] \tag{59}$$

onde

$K_{c_{ini}}$ (Fig.29) = valor de $K_{c_{ini}}$ da Figura 29,

$K_{c_{ini}}$ (Fig.30) = valor de $K_{c_{ini}}$ da Figura 30,

I = lâmina de infiltração média [mm].

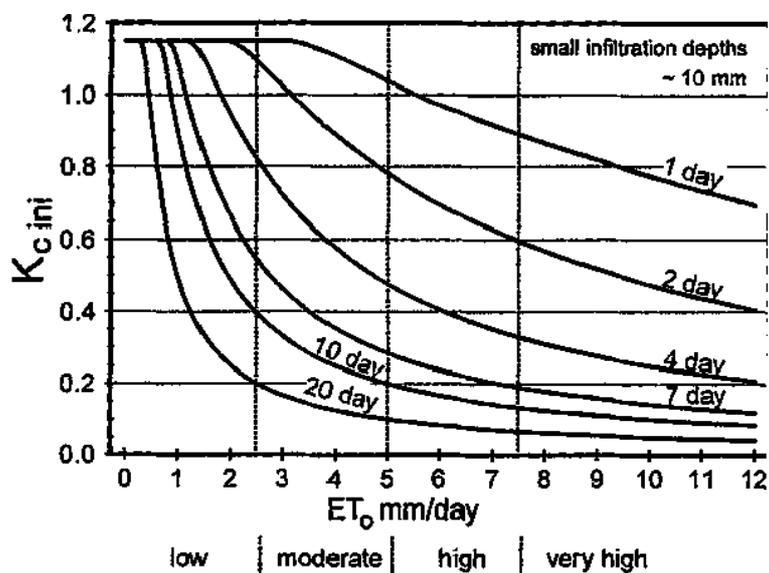


FIGURA 29. $K_{c_{ini}}$ médio relacionado ao nível de ET_0 e ao intervalo entre irrigações e/ou chuva significativa durante o estágio de crescimento inicial para todos os tipos de solo e lâminas de leves a médias (3-10 mm por evento)

Os valores 10 e 40 na Equação 59 são as lâminas médias de infiltração (milímetros) na qual as Figuras 29 e 30 são baseadas.

EXEMPLO 25. Interpolação entre eventos de irrigação leve e pesado

Cultivo de vegetais pequenos em área seca com solo de textura grossa com aplicação de água duas vezes por semana de 20 mm por meio do sistema de irrigação por aspersão. A ET_0 média durante o estágio inicial é de 5 mm/dia. Estime a evapotranspiração durante esse estágio.			
Para:	$7/2 =$	3.5	Intervalo em dia
	$ET_0 = 5$ e um solo de textura grossa	5	mm/dia
Pela Fig. 29:	$K_{c_{ini}}$ (Fig. 29) \approx	0.55	-
Pela Fig. 30. a:	$K_{c_{ini}}$ (Fig. 30a) \approx	0.7	-
Para:	I =	20	mm
Pela Eq. 59:	$K_{c_{ini}} = 0.55 + [(20 - 10)/(40 - 10)] (0.7 - 0.55)$ $= 0.55 + 0.33(0.15) =$	0.60	
Pela Eq. 58:	$ET_c = 0.60 (5) =$	3.0	mm/dia
A evapotranspiração da cultura média durante o estágio inicial de crescimento para os vegetais pequenos é 3.0 mm/dia.			

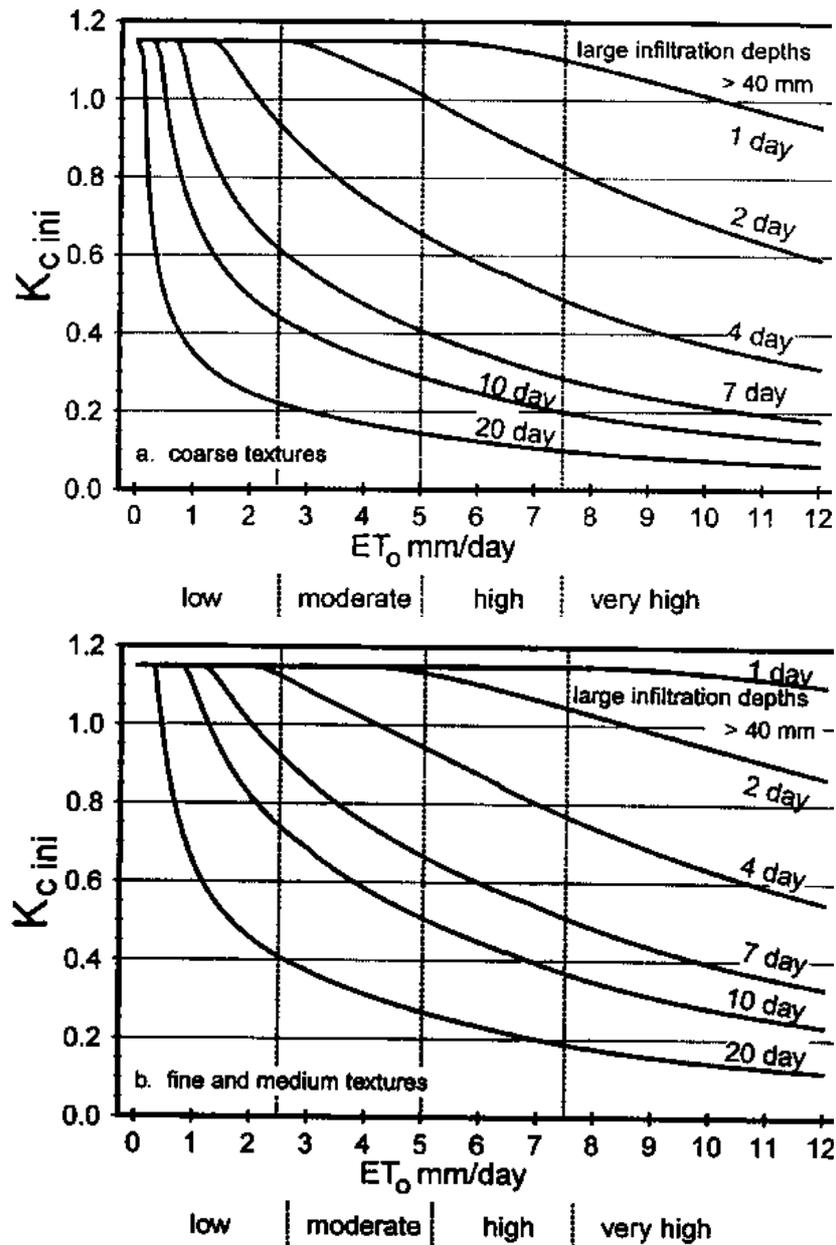


FIGURA 30. $K_{c\text{ini}}$ médio em relação ao nível de ET_o e com intervalo entre irrigações grandes com lâmina maior ou igual a 40 mm, durante o estágio de crescimento inicial para solos de textura grossa (a) e média e fina (b).

Ajuste para molhamento parcial através da irrigação

Muitos tipos de sistemas de irrigação molham somente uma fração da superfície do solo. Por exemplo, para um sistema de irrigação por gotejamento, a fração umedecida da superfície do solo, f_w , pode ser somente 0.4. Para sistemas de irrigação de sulco, a fração do umedecida de superfície pode variar de 0.3 a 0.8. valores Médios para a fração do umedecida de superfície de solo por irrigação ou precipitação são determinados em Tabela 20. Quando

só uma fração da superfície de solo é umedecida, o valor para i_n de K_c obtido de Tabela 12 ou de Figuras 29 ou 30 deveriam ser multiplicados pela fração do umedecida de superfície para ajustar pelo molhar parcial:

$$I_n \text{ de } K_c = f_w \text{ ini de } K_c \text{ (Aba, Figo) (60)}$$

onde

f_w = a fração de apareceu umedecida por irrigação ou chuva [0 - 1],

I_n de K_c (Figo de Aba) = o valor para i_n de K_c de Tabela 12 ou Figura 29 ou 30.

Além, selecionando qual figura para usar (i.e., Figure 29 ou 30), a média infiltrou lâmina, expressou em milímetros em cima do campo inteiro apareça, deveria ser dividido através de f_w para representar a verdadeira lâmina infiltrada de água para a parte da superfície que é umedecida (Figura 31):

$$(61)$$

onde

I_w = lâmina de irrigação para a parte da superfície que é umedecida [mm],

f_w = fração de umedecida de superfície através de irrigação,

E_u = a lâmina de irrigação para o campo [mm].

Quando irrigação de parte da superfície de solo e precipitação em cima da superfície de solo inteira ambos acontecem durante o período inicial, f_w deveriam representar a média de f_w para cada tipo de molhar, weighted de acordo com a lâmina de infiltração total recebida por cada tipo.

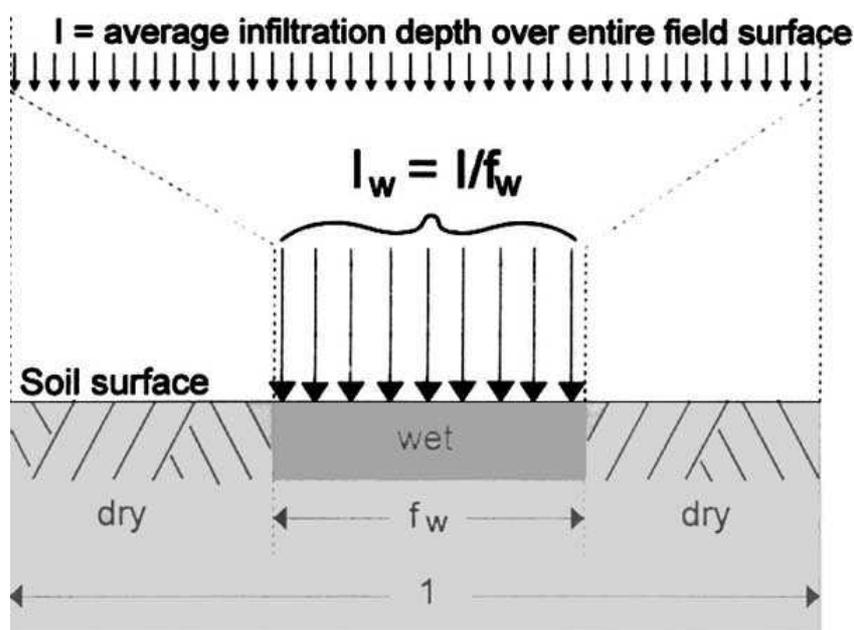


FIGURA 31. Umedecimento parcial da irrigação

EXEMPLO 26. Determinação de K_c ini de Kc por molhar parcial da superfície de solo

Determine the evapotranspiration of the crop in Example 24 if it had been irrigated using a trickle system every two days (with 12 mm each application expressed as an equivalent depth over the field area), and where the average fraction of surface wet was 0.4, and where little or no precipitation occurred during the initial period.			
The average depth of infiltration per event in the umedecida fraction of the surface:			
Pela Eq. 61;	$I_w = I/f_w = 12 \text{ mm}/0.4 =$	30	mm
Therefore, one can interpolate between Fig. 29 representing light wetting events (~10 mm per event) and Fig. 30.b representing medium textured soil and large wetting events (~40 mm per event).			
For:	$ET_o = 4 \text{ mm/day}$	4	mm/day
and:	a 2 day wetting interval:	-	-
Fig. 29 produces:	$K_{c \text{ ini}} = 0.85$	0.85	-
Fig. 30.b produces	$K_{c \text{ ini}} = 1.15$	1.15	-
Pela Eq. 59:	$K_{c \text{ ini}} = 0.85 + [(30-10)/(40-10)] (1.15 - 0.85) =$	1.05	-
Because the fraction of soil surface umedecida by the trickle system is 0.4, the actual $K_{c \text{ ini}}$ for the trickle irrigation is calculated as:			
Pela Eq. 60:	$K_{c \text{ ini}} = f_w K_{c \text{ ini Fig}} = 0.4 (1.05) =$	0.42	-
	This value (0.42) represents the $K_{c \text{ ini}}$ as applied over the entire field area.		
-	$ET_c = K_{c \text{ ini}} ET_o = 0.42(4) =$	1.7	mm/day
The average crop evapotranspiration during the initial growth stage for this trickle irrigated crop is 1.7 mm/day.			

$K_{c \text{ ini}}$ de para árvores e arbustos

$K_{c \text{ ini}}$ de para árvores e arbustos deveriam refletir a condição de solo antes para folhear emergência ou iniciação no caso de árvores decíduas ou arbustos, e o solo condiciona durante o dormência ou baixo período ativo para árvores perenes e arbustos. O $K_{c \text{ ini}}$ de Kc depende da quantia de grama ou cobertura de erva daninha, frequência de solo molhando, densidade de árvore e densidade de mulch. Para um pomar decíduo em climas congelamento-livres, o $K_{c \text{ ini}}$ de Kc podem ser tão altos quanto 0.8 ou 0.9, onde grama fundamentou que cobertura existe, e tão baixo quanto 0.3 ou 0.4 quando a superfície de solo é mantida nu e molhar é infrequente. O $K_{c \text{ ini}}$ de Kc para um pomar perene (não tendo nenhuma gota de folha combinada) com um

período dormente menos variação tem de K_c meio, como exemplificou para cítrico em Tabela 12, notas de rodapé 21 e 22. Para 50% dossel ou menos, o ini de K_c também reflete condições de cobertura de solo (solo nua, mulch ou grama ativa ou cobertura de erva daninha).

Ini de K_c para arroz de paddy

Para arroz que cresce em campos de paddy com uma lâmina de água de 0.10-0.20 m, o Etc durante a estágio inicial principalmente consiste em evaporação da água parada. O ini de K_c em Tabela 12 é 1.05 para um clima sub-úmido com calma moderar velocidades de vento. O ini de K_c deveriam ser ajustados para o clima local como indicou em Tabela 14.

TABELA 14. Ini de K_c para arroz para várias condições climáticas

Humidity	Wind speed		
	light	moderate	strong
arid - semi-arid	1.10	1.15	1.20
sub-humid - humid	1.05	1.10	1.15
very humid	1.00	1.05	1.10

Coefficiente de cultura para o estágio intermediário ($K_{c_{meio}}$)

Ilustração do efeito climático

Valores típicos para o coeficiente de cultura para o estágio de crescimento intermediário, $K_{c_{meio}}$, são fornecidos pela Tabela 12 para várias culturas.

Como foi discutido no Capítulo 5, o efeito da diferença nas propriedades aerodinâmicas entre a superfície de referência grama e as culturas agrícolas não são somente específico da cultura mas também varia com as condições climáticas e altura da planta (Figura 21). Em climas mais áridos e condições de maior velocidades do vento terão valores mais altos do $K_{c_{meio}}$. Em climas mais úmidos e condições de velocidade do vento mais baixa terão valores mais baixos de $K_{c_{meio}}$.

O impacto relativo do clima no $K_{c_{meio}}$ é ilustrado na Figura 32 onde são mostradas os ajustes para os valores da Tabela 12 para vários tipos de climas, velocidades do vento médio diário e várias alturas de planta. Como um exemplo, a variação esperada para o $K_{c_{meio}}$ para o tomate em resposta para condições climáticas regionais é apresentado na Caixa 14.

Determinação do $K_{c_{meio}}$

Para ajuste específico em climas onde RH_{min} difere de 45% ou onde u_2 são maiores ou menores que 2.0 m/s, os valores de $K_{c_{meio}}$ da Tabela 12 são assim ajustados:

$$K_{c_{mid}} = K_{c_{mid}(Tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (62)$$

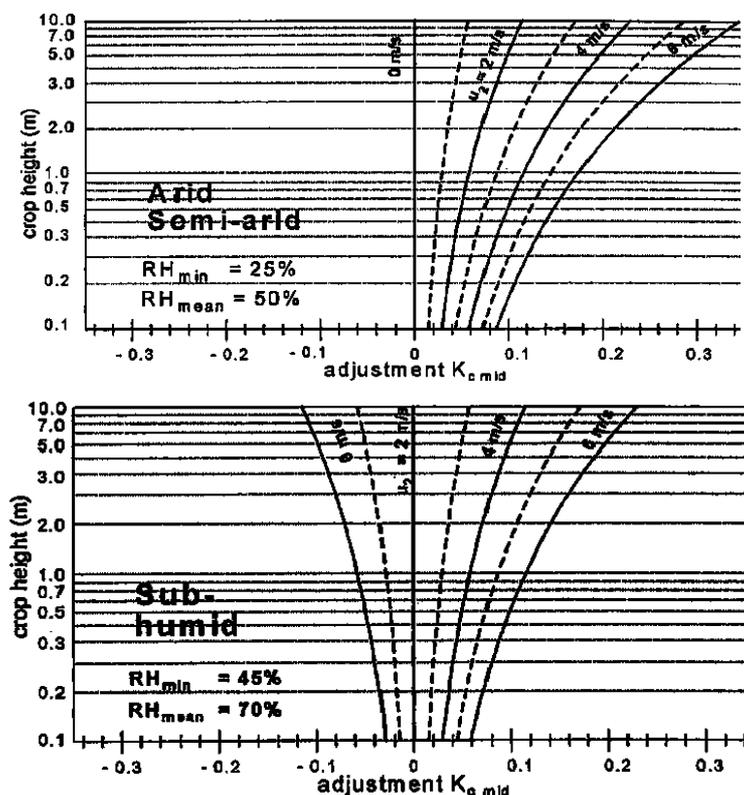
onde

$K_{c_{meio}}(Tab)$ valor para $K_{c_{meio}}$ tirado da Tabela 12,

u_2 valor médio para velocidade do vento diário a 2 m de altura, determinado sobre grama durante o estágio intermediário [$m s^{-1}$], para $1 m s^{-1} \leq u_2 \leq 6 m s^{-1}$,

RH_{min} valor médio diário mínimo da umidade relativa durante o estágio intermediário [%], para $20\% \leq RH_{min} \leq 80\%$,

h altura da planta média durante o estágio intermediário [m] para $0.1 m < h < 10 m$.



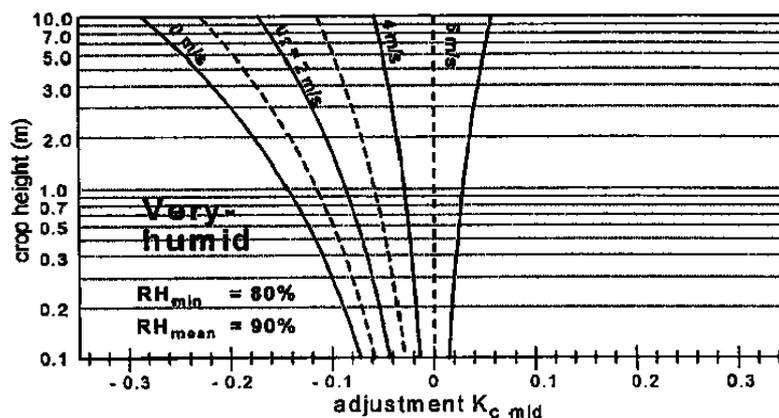


FIGURA 32. Ajuste (aditivo) para os valores de $K_{c_{meio}}$ da Tabela 12 para altura da cultura (h), velocidade do vento médio diário (u_2) e umidade relativa diferentes das condições médias estabelecidas.

Os valores de $K_{c_{meio}}$ determinados com as equações 62 e 65 são ajustes médios para os estádios intermediário e final. Os valores dos parâmetros u_2 e RH_{min} devem ser as médias para estes períodos (veja exemplo, Anexo 8). Os limites expressos para parâmetros u_2 , RH_{min} e h devem ser observados.

CAIXA 14. Demonstração do efeito do clima no $K_{c_{mid}}$ para cultura de trigo crescendo sob condição de campo	
Pela Tabela 12 para trigo: $K_{c_{mid}} = 1.15$ e $h = 1.0$ m	
Para condição semi-árido e árido	
- para vento forte (4 m/s)	$K_{c_{mid}} = 1.15 + 0.10 = 1.25$
- para vento moderado (2 m/s)	$K_{c_{mid}} = 1.15 + 0.05 = 1.20$
- para vento calmo (1 m/s)	$K_{c_{mid}} = 1.15 + 0.02 = 1.17$
Para condição sub úmida	
- para vento forte (4 m/s)	$K_{c_{mid}} = 1.15 + 0.05 = 1.20$
- para vento moderado (2 m/s)	$K_{c_{mid}} = 1.15 + 0.00 = 1.15$
- para vento calmo (1 m/s)	$K_{c_{mid}} = 1.15 - 0.05 = 1.12$
Para condição úmida e muito úmida	
- para vento forte (4 m/s)	$K_{c_{mid}} = 1.15 - 0.05 = 1.10$
- para vento moderado (2 m/s)	$K_{c_{mid}} = 1.15 - 0.10 = 1.05$
- para vento calmo (1 m/s)	$K_{c_{mid}} = 1.15 - 0.15 = 1.02$

Dependendo da aridez do clima e condição do vento, o coeficiente de cultura para o trigo durante o estágio intermediário varia de 1.02 (clima úmido e vento calmo) a 1.25 (clima árido e vento forte).

Onde o usuário não tem acesso a uma calculadora com função exponencial, a solução de $(h/3)^{0.3}$ da expressão pode ser aproximada como $[(h/3)^{0.5}]^{0.5}$ onde a raiz quadrada é usada.

A RH_{min} é utilizada no lugar da RH_{média} porque é mais fácil aproximar RH_{min} da T_{max} onde dados de umidade relativa são indisponíveis. Além disso, sob condição normal onde T_{min} aproxima T_{dew} (i.e., RH_{max} ≈ 100%), o déficit de pressão de vapor ($e_s - e_a$), com e_s da Equação 12 e e_a da Equação 17, se torna $[(100 - RH_{min})/200] e^{\circ}(T_{max})$, onde $e^{\circ}(T_{max})$ é pressão de vapor de saturação a temperatura do ar diária máxima. Isto indica que a RH_{min} melhora e reflete o impacto do déficit de pressão de vapor no K_c do que a RH_{média}.

A RH_{min} é calculada em base diária ou média mensal como:

$$RH_{min} = \frac{e^{\circ}(T_{dew})}{e^{\circ}(T_{max})} 100 \quad (63)$$

onde T_{dew} é temperatura do ponto de orvalho média e T_{max} é a temperatura do ar diária máxima média durante o estágio intermediário. Onde temperatura do ponto de orvalho ou outros dados higrométricos não estão disponíveis ou são de qualidade questionável, a RH_{min} pode ser calculada substituindo a temperatura do ar média diária mínima, T_{min}, para T_{dew}¹. Então:

$$RH_{min} = \frac{e^{\circ}(T_{min})}{e^{\circ}(T_{max})} 100 \quad (64)$$

¹no caso de climas áridos e semi-áridos, T_{min} na equação (64) deveria ser ajustado como indicado no Anexo 6 (equação 6-6) subtraindo 2°C do valor médio de T_{min} aproximando melhorar para T_{dew}.

Os valores para u_2 e RH_{min} somente precisam ser aproximado para o estágio intermediário. Isto porque a Equação 62 não é fortemente sensível a estes valores, mudança de 1 m/s na u_2 e 10% na RH_{min} para uma cultura alta de 3 m ocorre uma variação no K_{c_{meio}} de 0.04. Medidas, cálculo, e estimacão dos dados perdidos de vento e da umidade está no Capítulo 3. Velocidade do Vento medido a uma altura diferente de 2 m deve ser ajustada para refletir valores de velocidade do vento a 2 m sobre a grama que é utilizada na Equação 47. Onde nenhum dado de u_2 ou RH_{min} está disponível, a classificação geral da velocidade do vento e dados de umidade fornecidos nas Tabelas 15 e 16 podem ser usados.

TABELA 15. Estimativas empíricas de dados de velocidade do vento mensais

Descrição	Velocidade do vento médio mensal a 2 m
Vento leve	... ≤ 1.0 m/s
Vento leve a moderado	2.0 m/s
Vento moderado a forte	4.0 m/s
Vento forte	... ≥ 5.0 m/s
Condição geral global	2 m/s

TABELA 16. Valores típicos para RH_{min} comparados com RH_{média} para classificações climáticas gerais

Classificação climática	RH _{min} (%)	RH _{média} (%)
Árida	20	45
Semi-árida	30	55
Sub úmida	45	70
Úmida	70	85
Muito úmida	80	90

A equação 62 é válida para alturas médias de planta até 10 m. Para alturas de planta menor que 0.1 m, a vegetação se comportará aerodinamicamente semelhante à referência da grama e a eq. 62 não deveria ser aplicada. Valores que servem de exemplo para h estão listados na Tabela 12 para várias culturas. Porém, a altura média da planta variará muito com a variedade da cultura e com as práticas culturais. Então, aonde for possível, h deveria ser obtido de observações de campo. Porém, a presença do expoente 0.3 na Equação 62 torna esta equação relativamente insensível para pequenos erros no valor usado de h. Geralmente, é usado um único valor para h para representar o estágio intermediário.

Ajuste para frequência de molhamento

O $K_{c_{meio}}$ é menos afetado pela frequência de molhamento que o $K_{c_{ini}}$, como a vegetação durante este estágio geralmente está próximo à cobertura completa do solo faz com que os efeitos de evaporação da superfície do solo seja menor no K_c . Para irrigação frequente

das culturas (frequência maior que 3 dias) e onde o $K_{c_{meio}}$ da Tabela 12 é menor que 1.0, o valor pode ser substituído por aproximadamente 1.1-1.3 para responder pelos efeitos combinados de solo continuamente molhado, evaporação devido à interceptação da cultura (irrigação por aspersão) e aspereza da vegetação, especialmente onde o sistema de irrigação umedece uma fração importante da superfície do solo ($f_w > 0.3$).

EXEMPLO 27. Determinação de $K_{c_{meio}}$

Calcule o $K_{c_{meio}}$ para o milho próximo de Taipei, Taiwan e próximo de Mocha, Iêmen. A velocidade do vento diária média (u_2) durante o estágio intermediário em Taipei é aproximadamente 1.3 m/s e a umidade relativa mínima média (RH_{min}) durante este estágio é 75%. A u_2 média durante o estágio intermediário próximo de Mocha é 4.6 m/s e a RH_{min} média durante este estágio é 44%.

Pela Tabela 12, o valor para $K_{c_{meio}}$ é 1.20 para o milho. O valor para h pela Tabela 12 é 2 m. Usando a Eq. 62

Para Taipei (clima úmido):

$$K_{c_{mid}} = 1.20 + [0.04(1.3 - 2) - 0.004(75 - 45)] \left(\frac{2}{3}\right)^{0.3} = 1.07$$

Para Mocha (clima árido):

$$K_{c_{mid}} = 1.20 + [0.04(4.6 - 2) - 0.004(44 - 45)] \left(\frac{2}{3}\right)^{0.3} = 1.30$$

O coeficiente de cultura médio estimado durante o estágio intermediário para Taipei é 1.07 e para Mocha é 1.30.

Coeficiente de cultura para o estágio final ($K_{c_{final}}$)

Valores típicos para o coeficiente de cultura ao final do ciclo da cultura, $K_{c_{final}}$, são fornecidos na Tabela 12 para várias culturas agrícolas. O valor dado para o $K_{c_{final}}$ reflete a influência da cultura, manejo de água e práticas culturais particular para essas culturas. Se a cultura é frequentemente irrigada até ser colhida fresca, a camada superficial do solo permanece úmida e o valor do $K_{c_{final}}$ será relativamente alto. Por outro lado, culturas que recebem irrigação menos frequente ou nenhuma irrigação no estágio final e senescem e secam no campo. Por conseguinte, a superfície do solo e a vegetação estarão secas e o valor para o $K_{c_{final}}$ será relativamente pequeno (Figura 33).

Em locais onde são conhecidos o manejo d'água e o momento das práticas culturais os valores típicos apresentados na Tabela 12 podem divergir, então o usuário deveria fazer

alguns ajustes aos valores para o $K_{c\text{final}}$. A orientação para o ajuste dos valores de K_c devida à frequência de irrigação é fornecido no Capítulo 7. Para colheita antecipada, o usuário pode construir uma curva de K_c utilizando o $K_{c\text{final}}$ valor fornecido na Tabela 12 e uma duração do estágio final típico para uma data de colheita normal; mas pode então antecipar a aplicação da curva construída, que corresponderá à data da colheita antecipada.

Os valores do $K_{c\text{final}}$ na Tabela 12 são valores típicos esperados para $K_{c\text{final}}$ médio sob as condições climáticas padrão. Climas mais áridos e condições da velocidade do vento maior terão valores mais altos para o $K_{c\text{final}}$. Climas mais úmidos e condições de mais baixa velocidade do vento terão mais baixos valores para o $K_{c\text{final}}$. Para ajuste específico em climas onde RH_{min} difere de 45% ou onde a u_2 são maiores ou menores que 2.0 m/s, a Equação 65 pode ser usada:

$$K_{c\text{end}} = K_{c\text{end(Tab)}} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (65)$$

onde

$K_{c\text{final(Tab)}}$ valor para $K_{c\text{final}}$ fornecido da Tabela 12,

u_2 valor médio para velocidade do vento diário medido a 2 m de altura sobre a grama durante a última fase do estágio de crescimento [m s^{-1}], para $1 \text{ m s}^{-1} \leq u_2 \leq 6 \text{ m s}^{-1}$,

RH_{min} valor da umidade relativa mínima diária média durante a última fase do estágio de crescimento [%], para $20\% \leq RH_{\text{min}} \leq 80\%$,

h altura da planta média durante a última fase do estágio de crescimento [m], para $0.1 \text{ m} \leq h \leq 10 \text{ m}$.

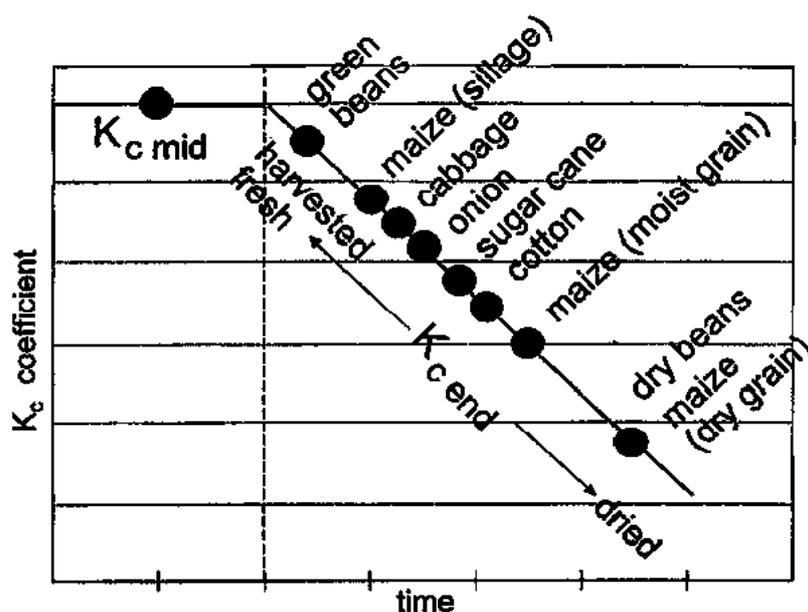


FIGURA 33. Valores esperados para o $K_{c\text{final}}$

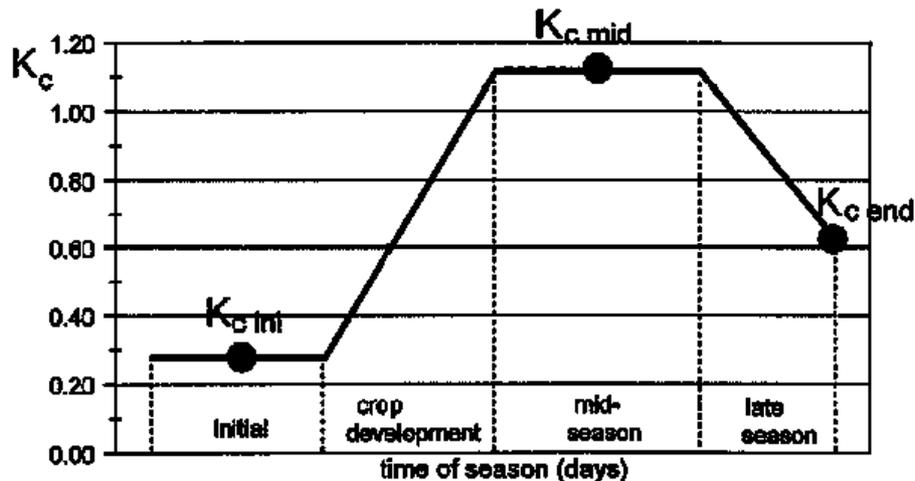


FIGURA 34. Curva de coeficiente da cultura

A Equação 65 é somente aplicada quando os valores tabelados para o $K_{c\text{final}}$ for maior que 0.45. A equação reduz o $K_{c\text{final}}$ com o aumento da RH_{min} . Esta redução no $K_{c\text{final}}$ é característica das culturas que são colhidas “verdes” ou antes de morrer completamente e secar (i.e., $K_{c\text{final}} \geq 0.45$).

Nenhum ajuste é feito quando o $K_{c\text{final}} (T_{\text{ab}}) < 0.45$ (i.e., $K_{c\text{final}} = K_{c\text{final}} (T_{\text{ba}})$). Quando são permitidas as culturas que senesçam e sequeem no campo (como comprovado pelo $K_{c\text{final}} < 0.45$), u_2 e RH_{min} têm menos efeito no $K_{c\text{final}}$ e nenhum ajuste é necessário. De fato, o $K_{c\text{final}}$ pode diminuir com a RH_{min} decrescente para culturas que estão maduras e secas na hora da colheita, como umidade relativa mais baixa acelera o processo de secamento.

Construção da curva de Kc

Culturas anuais

São necessários somente três valores de Kc para descrever e construir a curva de Kc. A curva como por exemplo àquela mostrada na Figura 34 que é construída utilizando os seguintes passos:

1. divida o período de crescimento em quatro estádios de crescimento gerais que descrevem a fenologia da cultura ou desenvolvimento (estádio inicial, de desenvolvimento, intermediário, e final), determine as durações dos estádios de crescimento, e identifique os três valores de Kc que correspondem ao $K_{c\text{ini}}$, $K_{c\text{meio}}$ e $K_{c\text{final}}$ na Tabela 12.

2. ajuste os valores de K_c para a frequência de molhamento e/ou condições climáticas dos estádios de crescimento como delineado na seção anterior.
3. construa uma curva conectando segmentos de linha reta para cada um dos quatro estádios de crescimento. Linhas horizontais são tiradas para $K_{c_{ini}}$ no estádio inicial e para o $K_{c_{meio}}$ no estádio intermediário. Linhas diagonais são tiradas do $K_{c_{ini}}$ para $K_{c_{meio}}$ dentro do curso do estádio de desenvolvimento da cultura e do $K_{c_{meio}}$ ao $K_{c_{final}}$ dentro do curso do estádio final.

K_c encurva para culturas de forragem

São colhidas muitas culturas crescidas para forragem ou feno vários tempos durante a estação crescente. Cada cultura final essencialmente um 'sub' estação crescente e K_c associado encurvam e iniciam um novo 'sub' estação crescente e curva de K_c associada. O K_c resultante encurvam para a estação crescente inteira é a agregação de uma série de curvas de K_c associada com cada sub-ciclo. Figure 35 presentes uma curva de K_c para a estação crescente inteira construída para alfafa crescida para feno em Idaho meridional.

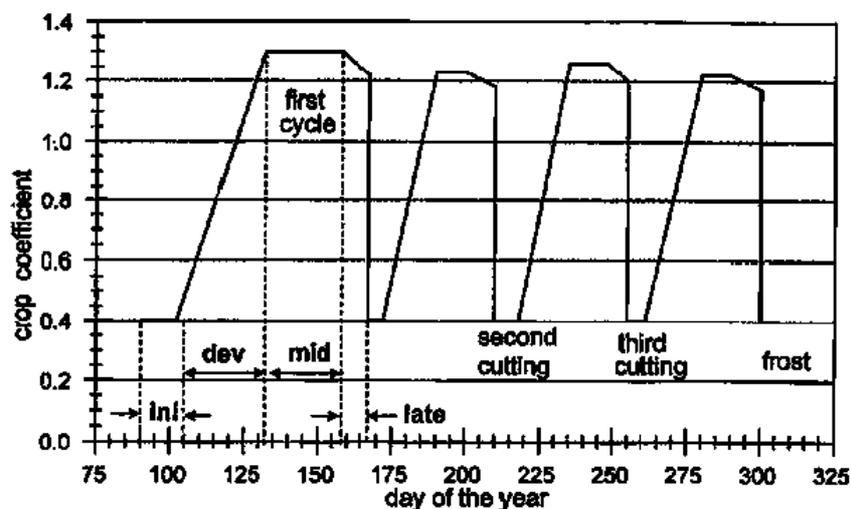


FIGURA 35. Curva construída para K_c para feno de alfafa em Idaho meridional, os Estados Unidos que usam valores de Tabelas 11 e 12 e ajustou usando Equações 62 e 65 (dados de Wright, 1990)

No clima de Idaho meridional, greenup (iniciação de folha) começa pela primavera em aproximadamente dia 90 do ano. A cultura normalmente é colhida (corte) para feno três ou quatro vezes durante a estação crescente. Então, Figure 35 mostra quatro sub-ciclos de K_c ou ciclos cortantes: sub-ciclo 1 segue greenup pela primavera e os três sub-ciclos de K_c

adicionais seguem cortes. Cortes criam uma superfície de solo com menos de 10% cobertura de vegetação. Ciclo 1 cortante é mais longo em duração que ciclos 2, 3 e 4 devido a mais baixo ar e temperaturas de solo durante este período que reduz taxas de crescimento de cultura. Foram levadas as durações durante ciclo 1 cortante da primeira entrada para alfafa ("1º ciclo " cortante) em Tabela 11 para Idaho, os Estados Unidos (10/30/25/10). As durações durante ciclos 2 cortantes, foram levados 3 e 4 da entrada para alfafa em Tabela 11 para "períodos " cortantes individuais para Idaho, os Estados Unidos (5/20/10/10). Estas durações estavam baseado em observações. No clima de Idaho meridional, congelações final a estação crescente algum dia pelo outono, normalmente ao redor de dia 280-290 do ano (cedo para meio-outubro).

As magnitudes dos valores de K_c durante os períodos de meio-estação de cada ciclo cortante mostrados em Figura 35 variam de ciclo a ciclo devido aos efeitos de ajustar os valores por K_c meio e K_c final para cada período de ciclo cortante que usa Equações 62 e 65. Aplicando estas duas equações de ajuste, os u_2 e valores de RH_{min} médias eram para a meio-estação e recentes estádios de estação dentro de cada ciclo cortante. K_{cb} basal encurva semelhante para Figurar 35 pode ser construído para forragem ou culturas de feno, procedimentos seguintes apresentaram em Capítulo 7.

K_c meio quando efetua de períodos cortantes individuais é calculado a média

Debaixo de algumas condições, o usuário pode desejar calcular a média os efeitos de cortes para uma cultura de forragem em cima do curso da estação crescente. Quando são calculados a média efeitos cortantes, então só um único valor para K_c meio e um único K_c encurvam precisa de ser empregado para a estação crescente inteira. Quando este é o caso, uma " curva de K_c normal " é construída como em Figura 25, onde só um período de midseason é mostrado para a cultura de forragem. O K_c meio para este período de midseason de total têm que calcular a média os efeitos de cortes ocasionais ou colhendo. O valor que é usado para K_c meio é então uma média da curva de K_c para o período de tempo começando ao primeiro conseguimento de cobertura cheia e finalndo no começo do recente período de estação final próximo dormancy ou congelação. O valor usado para K_c meio debaixo destas condições calculadas a média só pode ser aproximadamente 80% do valor de K_c que representa cobertura de solo cheia. Estes calcularam a média, cheio-estação K_c que são listados valores meio em Tabela 12. Por exemplo, para feno de alfafa, os calcularam a média,

cheio-estação K_c meio é 1.05, considerando que, o K_c meio para um período cortante individual é 1.20.

Árvores de fruta

Valores para o coeficiente de cultura durante a meio-estação e final ultimamente estádios de estação são definidas em Tabela 12. Como mencionou antes, os valores de K_c listados são valores típicos por condições climáticas padrão e precisa de ser ajustado usando Equações 62 e 65 onde RH_{min} ou u_2 diferem. Como as estádios de estação meio e recentes de árvores decíduas é bastante longo, o ajuste específico de K_c para RH_{min} e u_2 deveria levar em conta as condições climáticas variadas ao longo da estação. Então, são requeridos freqüentemente vários ajustes de K_c se a cobertura de estações meio e recente várias estações climáticas, por exemplo, fonte, verão e outono ou estações molhadas e secas. O ini de K_c e K_c final para non perene árvores dormentes e arbustos não são freqüentemente diferentes, onde condições climáticas não variam muito, como acontece em climas tropicais. Debaixo destas condições, podem não ser requeridos ajustes sazonais para clima então desde variações em E_{Tc} dependa principalmente de variações em E_{To} .

Calculando E_{Tc}

Da curva de coeficiente da cultura o K_c pode ser estimado, para qualquer período durante o período de crescimento da cultura, graficamente ou numericamente definido. Uma vez que os valores de K_c foram determinados, a evapotranspiração da cultura, E_{Tc} , pode ser calculada multiplicando os valores de K_c pelos valores de E_{To} correspondentes.

Determinação gráfica do K_c

Semanalmente, dez dias ou mensais os valores para o K_c são necessários quando os cálculos de E_{Tc} são feitos em base semanal, dez dias ou mensais. Um procedimento geral é construir a curva do K_c , feita a curva com as durações das semanas, década ou mensal, e derivar graficamente da curva o K_c estimado para o período considerado (Figura 36). Assumindo que todas as décadas têm uma duração de 10 dias facilita a derivação de K_c e introduz pequeno erro no cálculo de E_{Tc} .

A curva do K_c construída na Caixa 15 foi utilizada para construir a curva na Figura 36. Esta curva foi feita com as durações de dez dias (décadas). O K_c estimado de 0.15, 1.19 e 0.35 e as durações dos estádios de crescimento foram iguais a 25, 25, 30 e 20 dias. A cultura foi plantada no começo da última década de maio e foi colhida em 100 dias depois do final de agosto.

Durante todas as décadas os valores de K_c podem ser derivados diretamente da curva. É considerado que o valor ao meio da década é o K_c médio desse período de 10 dias. Só a segunda década de junho onde o K_c estimado muda abruptamente, requer algum cálculo.

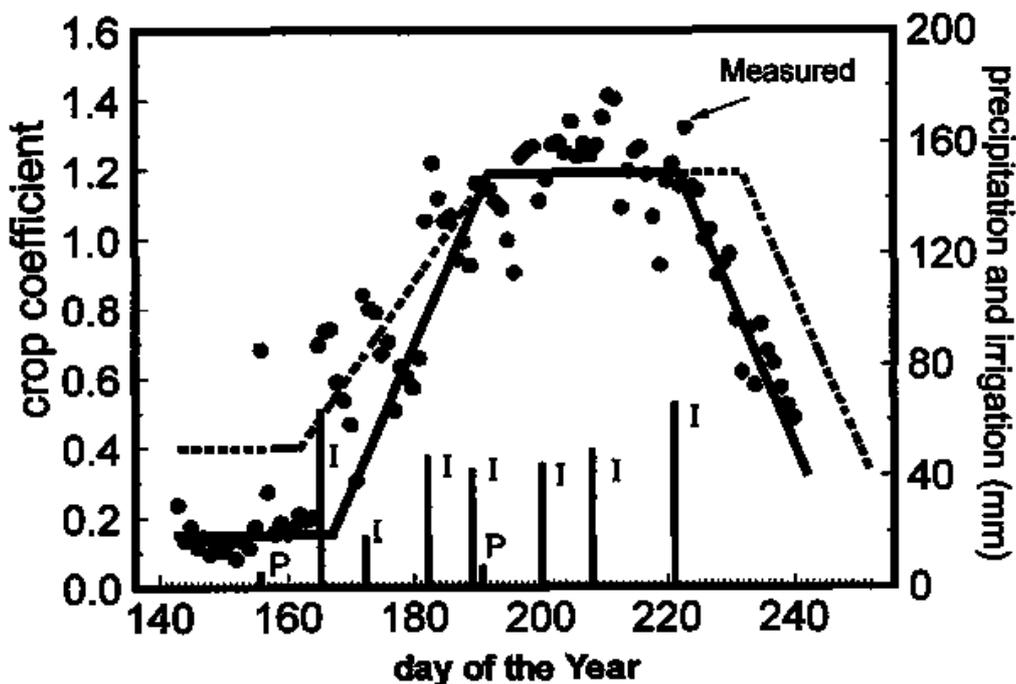
CAIXA 15. Estudo de caso da cultura do feijão em Kimberly, Idaho, nos Estados Unidos (coeficiente de cultura único)

Um exemplo de aplicação da utilização do K_c sob condição média de solo úmido é apresentado para a cultura do feijão plantado em 23 de maio de 1974 em Kimberly, Idaho, nos Estados Unidos (latitude = 42.4°N). A duração dos estádios inicial, desenvolvimento, intermediário e final são fornecidos pela Tabela 11 para o clima continental como 20, 30, 40 e 20 dias (a duração dos estádios listados para o sul de Idaho não foi usada no exemplo para poder demonstrar somente aproximadamente a precisão dos valores fornecidos na Tabela 11 onde valores específicos para a localização não foram encontrados). Valores iniciais para $K_{c_{ini}}$, $K_{c_{meio}}$ e $K_{c_{final}}$ são selecionados pela Tabela 12 como 0.4, 1.15, e 0.35.

Durante os estádios intermediário e final a RH_{min} e u_2 média para ambos foram 30% e 2.2 m/s. A altura máxima sugerida na Tabela 12 para o feijão é 0.4 m. Então, $K_{c_{meio}}$ é ajustado usando a Eq. 62:

$$K_{c_{mid}} = 1.15 + [0.04(2.2 - 2) - 0.004(30 - 45)] \left(\frac{0.4}{3} \right)^{0.3} = 1.19$$

Como o $K_{c_{final}} = 0.35$ é menor que 0.45, não é feito ajustamento para o $K_{c_{final}}$. O valor para o $K_{c_{meio}}$ não é significativamente diferente daquele fornecido pela Tabela 12 com $u_2 \approx 2$ m/s, a RH_{min} é 15% mais baixa do que 45% representada na Tabela 12, e a altura do feijão é relativamente pequena. A curva inicial do K_c para o feijão em Idaho pode ser desenhada, como inicial, planejamento como objetivo, como mostra o gráfico (linha pontilhada), onde $K_{c_{ini}}$, $K_{c_{meio}}$ e $K_{c_{final}}$ são 0.4, 1.19 e 0.35 e a duração dos quatro estádios de crescimento 20, 30, 40 e 20 dias. Note que o $K_{c_{ini}} = 0.4$ fornecido pela Tabela 12 serviu somente como um valor inicial, estimativa aproximada para $K_{c_{ini}}$.



Construção da curva K_c usando valores das Tabelas 11 e 12 diretamente (linha pontilhada) e modificada usando $K_{c_{ini}}$ da Fig. 29 e $L_{ini} = 25$, $L_{dev} = 25$, $L_{mid} = 30$, e $L_{late} = 20$ dias (linha cheia) para feijão seco em Kimberly, Idaho. Também mostra medida diária do K_c (lisímetro por Wright, 1990).

$K_{c_{ini}}$ pode ser estimado mais precisamente utilizando a aproximação descrita neste capítulo. ET_o durante o período inicial em Kimberly (final de Maio – início de Junho, 1974) média 5.3 mm/dia, e o intervalo entre umedecimento durante o período inicial foi de aproximadamente 14 dias (ocorreram 2 chuvas de 5 mm em média). Então, com os eventos foram leves (< 10 mm cada), a Fig. 29 é usada. A textura do solo em Kimberly, Idaho é pouco siltoso. Pela Fig. 29, $K_{c_{ini}}$ para o intervalo de umedecimento de 14 dias e $ET_o = 5.3$ mm/dia é aproximadamente 0.15. Este valor é substancialmente menos que o valor geral 0.4 sugerido pela Tabela 12, é necessário enfatizar a necessidade de utilização de dados locais, como precipitação real e irrigação dados que determinaram o $K_{c_{ini}}$.

Comparação da construção de curvas com medidas

Porque dados da ET_c para a cultura do feijão seco em Kimberly, Idaho foram medidos utilizando a precisão do sistema de lisímetro de balança durante 1974 por Wright (1990), o K_c real medido quando comparado com a curva construída de K_c , onde o K_c real foi calculado pela divisão entre a ET_c medida pelo lisímetro diariamente e ET_o estimado utilizando a equação de Penman-Monteith FAO.

Como ilustrado no gráfico, a duração do estágio intermediário fornecida pela Tabela 11 para o geral, superestimou a verdadeira duração do estágio intermediário para o clima continental para o feijão seco no sul de Idaho, com uma média de aproximadamente 30 dias contra os 40 dias sugeridos pela Tabela 11. Isto ilustra a importância do uso da observação local de 30 dias para a duração do estágio intermediário contra o valor geral da Tabela 11.

E finalmente, a melhor estimativa da curva K_c para o feijão seco no sul de Idaho é plotado (a curva mais baixa do gráfico) usando valores de K_c de 0.15, 1.19, e 0.35 e as durações dos estágios de crescimento de observações reais de 25, 25, 30 e 20 dias. Note o impacto do erro na estimação da duração do estágio intermediário na área sob a curva K_c . Este suporte é necessário da observação local das datas e duração dos estágios de crescimento da cultura.

O valor calculado para $K_{c_{meio}}$ (1.19) mostra-se ter subestimado o valor medido do K_c durante

o estágio intermediário em Kimberly. Alguns destes efeitos foram devido ao efeitos do incrementos da evaporação da água do solo devido a quatro irrigações durante o estágio intermediário em 1974 aumentando assim efetivamente o K_c . Isto é ilustrado na Caixa 16, onde a aproximação dupla $K_{cb} + K_e$ é introduzida e demonstrada para este exemplo.

O valor 0.15 calculado para $K_{c_{ini}}$ utilizando a Fig. 29 concorda quase com o valor medido de K_c durante o estágio inicial. Medidas de K_c durante o período de desenvolvimento excede a curva de K_c final durante dias sucessivos ou eventos de umedecimento. A variação diária no lisímetro na medida do K_c é normal e é causado pela variação do estado atmosférico, direção do vento, erros na estimativa de R_n e ET_o , e alguns erros aleatórios nas medidas do lisímetro e do estado atmosférico.

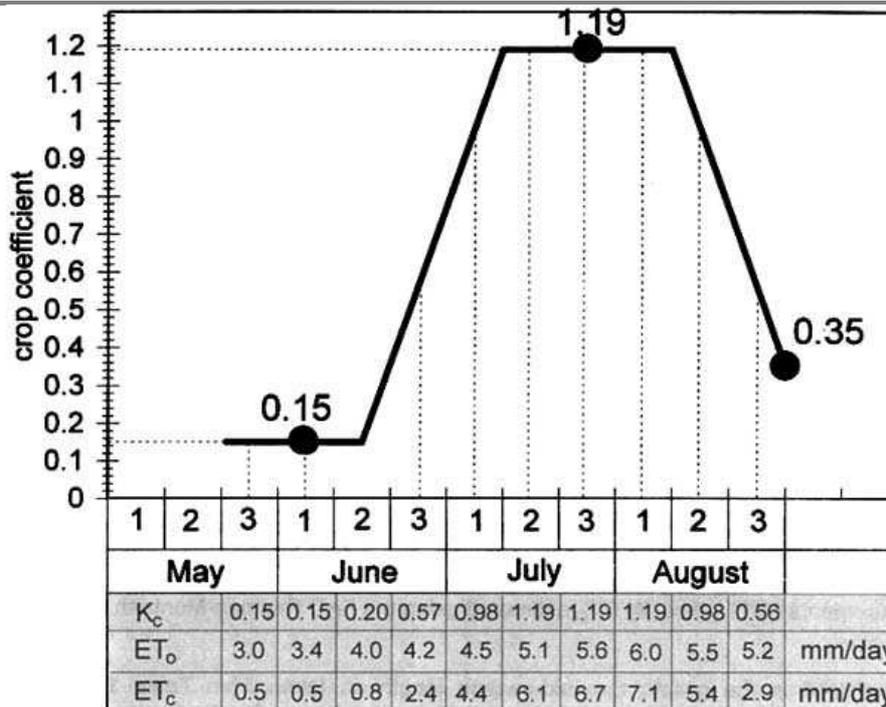


FIGURA 36. Curva do K_c em dez dias para valores de K_c e ET_c derivado do gráfico para o exemplo da cultura de feijão seco (Caixa 15)

primeiro cinco dias daquela década, $K_c = 0.15$, enquanto durante a segunda parte da década K_c varia de 0.15 a 0.36 ao término de dia 10. O K_c durante aquela década é por conseguinte: $5/10 (0.15) + 5/10(0.15+0.36)/2 = 0.20$.

Definição numérica de K_c

O coeficiente K_c para qualquer período da estação de crescimento pode ser estimado porque considerando que durante o estágio inicial e intermediário o K_c é constante e igual ao valor de K_c do estágio de crescimento sob consideração. Durante os estádios de desenvolvimento e final da cultura, o K_c varia linearmente entre o K_c do final do estágio

anterior ($K_{c_{prev}}$) e o K_c no começo do próximo estágio ($K_{c_{next}}$) e o $K_{c_{final}}$ no caso do estágio final:

$$K_{ci} = K_{c_{prev}} + \left[\frac{i - \Sigma(L_{prev})}{L_{stage}} \right] (K_{c_{next}} - K_{c_{prev}}) \quad (66)$$

onde

i = número de dias dentro do estágio de crescimento [1.. duração do estágio de crescimento],

K_{ci} = coeficiente de cultura no dia i ,

L_{stage} = duração do estágio sob consideração [dias],

$\Sigma(L_{prev})$ = somatória das durações de todos os estágios anteriores [dias].

Equação 66 pode ser aplica a todos os quatro estágios.

EXEMPLO 28. Definição numérica de K_c

Determine o K_c para o dia 20, 40, 70 e 95 para a cultura do feijão seco (Figura 36).			
Estádio de desenvolvimento da cultura	Duração (dias)	K_c	
Inicial	25	$K_{c_{ini}} = 0.15$	
Desenvolvimento	25	0.15... 1.19	
Intermediário	30	$K_{c_{meio}} = 1.19$	
Final	20	1.19 .. $K_{c_{final}} = 35$	
no $i = 20$:	Estádio inicial, $K_c = K_{c_{ini}} =$	0.15	-
no $i = 40$	Estádio de desenvolvimento,		
Para:	$\Sigma(L_{prev}) = L_{ini} =$	25	dias
e:	$L_{stage} = L_{dev} =$	25	dias
Pela Eq. 66:	$K_c = 0.15 + [(40 - 25)/25](1.19 - 0.15) =$	0.77	-
No $i = 70$:	Estádio intermediário, $K_c = K_{c_{mid}} =$	1.19	-
no $i = 95$	Estádio final,		
Para:	$\Sigma(L_{prev}) = L_{ini} + L_{dev} + L_{mid} = (25 + 25 + 30) =$	80	dias
e:	$L_{stage} = L_{late} =$	20	dias

Pela Eq. 66:	$K_c = 1.19 + [(95-80)/20](0.35-1.19) =$	0.56	-
O coeficiente de cultura no dia 20, 40, 70 e 95 para a cultura do feijão seco são 0.15, 0.77, 1.19 e 0.56 respectivamente.			

Coeficientes de cultura alfafa-baseados

Como duas definições de cultura de referência (grama e alfafa) está em uso em várias partes do mundo, foram desenvolvidas duas famílias de curvas de K_c para culturas agrícolas. Estes são as curvas de K_c alfafa-baseadas por Wright (1981; 1982) e curvas grama-baseadas por Pruitt (Doorenbos e Pruitt 1977; Jensen et al. 1990) e esses informaram neste papel. O usuário tem que exercitar precaução para evitar misturar valores de K_c grama-baseados com referência de alfafa ET e vice-versa. Normalmente, um K_c baseado na referência de alfafa pode ser 'convertido' para uso com uma referência de grama multiplicando por um fator que percorre de aproximadamente 1.0 a 1.3, dependendo do clima (1.05 para condições úmidas, tranquilas, e 1.2 para condições semi-áridas, moderadamente ventosas, e 1.35 para condições áridas, ventosas):

$$K_c(\text{grama}) = K_{\text{ratio}} K_c(\text{alfafa}) \quad (67)$$

onde

$K_c(\text{grama}) = K_c$ grama-baseado (este manual),

$K_c(\text{alfafa}) = K_c$ alfafa-baseado,

$K_{\text{ratio}} =$ fator de conversão (1.0... 1.3).

Uma relação de conversão de referência pode ser estabelecida para qualquer clima usando o K_c meio = 1.20 listaram para alfafa em Tabela 12 e ajustando este K_c então meio para o clima que usa Equação 62. Por exemplo, a Kimberly, Idaho, os Estados Unidos onde $RH_{\text{min}} = 30\%$ e $u_2 = 2.2$ m/s são valores comuns durante os meses de verão, uma relação de conversão de referência entre alfafa e referências de grama que usam Equação 62 é aproximadamente:

$$K_{\text{ratio}} = 1.2 + [0.04(2.2 - 2) - 0.004(30 - 45)] \left(\frac{0.5}{3} \right)^{0.3} = 1.24 \quad (68)$$

onde

$h = 0.5$ m é a altura standard para a referência de alfafa.

Transferência de valores de K_c anteriores

Os valores para $K_{c_{meio}}$ e $K_{c_{final}}$ fornecidos pela Tabela 12 são para uma grande parte baseada nos valores original apresentados na FAO Irrigação e Drenagem Artigos N^{os}. 24 e 33 (FAO-24 e FAO-33), com algum ajuste e revisões refletindo recentes descobrimentos. Semelhantemente ajustes no $K_{c_{meio}}$ para compensar diferenças na aspereza aerodinâmica e área foliar, como introduzido na Equação 62 são derivados dos valores de K_c determinados para diferentes condições de vento e RHmin na Tabela de K_c relacionados na FAO-24, com algum ajuste refletindo na melhoria nos valores de E_{Tc} aumentando sob condições de vento alto e RHmin baixa quando foi utilizada a equação de Penman-Monteith FAO.

O K_c da FAO-24 era principalmente baseado na grama “viva” como cultura de referência. A equação de Penman-Monteith FAO que foi apresentada nesta publicação semelhantemente representa a mesma referência de grama unificada. Por isso os valores de K_c não são em geral muito diferentes entre estas publicações excluídas sob condição de vento alto e RHmin baixa.

Na FAO-24 a equação Penman modificada freqüentemente superestimava a E_{To} em até 25% sob condição de vento alto e evaporativa baixa e requereu freqüentemente calibração local significativa (veja capítulo 2). Valores de K_c derivados de estudos de uso da água que usaram a equação de Penman FAO-24 para calcular evapotranspiração de referência da cultura grama, não podem ser usados e necessitam de ser ajustados usando valores de E_{To} calculados com a equação de Penman-Monteith FAO. Semelhantemente exigência de água da cultura estimativa com base na equação de Penman-Modificada FAO-24 precisarão ser reavaliadas devido às diferenças encontradas entre as equações de referência Penman FAO-24 e Penman-Monteith FAO.

Capítulo 7 - E_{Tc} - coeficiente de cultura duplo ($K_c = K_{cb} + K_e$)

Componente de Transpiração (K_{cb} E_{To})

Coeficiente de cultura basal (K_{cb})

Determinação de valores de K_{cb} diários

Componente de evaporação (K_e E_{To})

Procedimento de cálculo

Limite superior de $K_{c_{max}}$

Coeficiente de redução de evaporação do solo (K_r)

Fração de solo exposto e umedecido (f_{ew})

Cálculo de Ke diário

Calculando ETc

Parte C - Evapotranspiração da cultura sob condições não padrão

Capítulo 7 - ETc - coeficiente de cultura duplo ($K_c = K_{cb} + K_e$): Este capítulo apresenta o outro método de cálculo para evapotranspiração de cultura. O K_c é dividido em dois coeficientes separados, um para transpiração da cultura (i.e., o coeficiente de cultura basal K_{cb}) e um para evaporação do solo (K_e).

Capítulo 7 - ETc - Coeficiente de cultura duplo ($K_c = K_{cb} + K_e$)

Assim como o Capítulo 6, este capítulo também trata do cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc) sob condições padrão onde nenhuma limitação é colocada no crescimento da cultura ou na evapotranspiração. Este capítulo apresenta o procedimento para estimar os efeitos específicos devidos ao umedecimento da superfície do solo no valor do coeficiente de cultura K_c . A solução consiste em dividir o K_c em dois coeficientes separados, um para transpiração da cultura, i.e., o coeficiente de cultura basal (K_{cb}), e um para evaporação do solo (K_e):

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) E_{T_o} \quad (69)$$

A aproximação do coeficiente de cultura duplo é mais complicada e usa de forma intensiva o computador do que a única aproximação do coeficiente de cultura (K_c) do Capítulo 6. O procedimento é realizado diariamente e é utilizado para aplicações que usam computadores. É recomendado que a aproximação fosse seguida quando for necessário melhorar estimativas para o K_c , por exemplo programar irrigações diariamente para campos individuais.

O procedimento de cálculo para a evapotranspiração da cultura, ETc, consiste de:

1. identificar as durações dos estádios de crescimento da cultura, e “selecionar” os coeficientes K_{cb} correspondentes;
2. ajustar os coeficientes K_{cb} selecionados para as condições climáticas durante os estádios;
3. construir a curva do coeficiente de cultura basal (permitindo ao usuário determinar os valores de K_{cb} para qualquer estágio durante o estágio de crescimento);
4. determinar diariamente K_e valor para evaporação de superfície; e

5. calcular ET_c como o produto de ET_o e $(K_{cb} + K_e)$.

Componente de Transpiração ($K_{cb} ET_o$)

Coeficiente de cultura basal (K_{cb})

O coeficiente de cultura basal (K_{cb}) é definido como a relação entre a evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração da cultura de referência (ET_c/ET_o) quando a superfície do solo está seca mas a transpiração está acontecendo a uma taxa potencial, i.e., a água do solo não está limitando a transpiração (Figura 22). Então, " $K_{cb} ET_o$ " representa o componente da transpiração da ET_c . O $K_{cb} ET_o$ inclui um componente de evaporação de difusivo residual $T_{bastecido}$ pela água do solo sob a superfície seca e pela água do solo sob a vegetação densa.

Como os valores de K_c do Capítulo 6 incluem efeitos calculados da média da evaporação da superfície do solo, o K_{cb} estima a média sob o K_c estimado como foi ilustrado na Figura 26 e uma tabela separada para o K_{cb} é requerido. São listados valores recomendados para K_{cb} na Tabela 17 para as mesmas culturas listadas na Tabela 12. Como na Tabela 12, os valores para K_{cb} da Tabela 17 representam K_{cb} para um clima sub-úmido e com velocidade do vento moderada. Para ajuste específico em climas onde RH_{min} difere de 45% ou onde a velocidade de vento é maior ou menor que 2 m/s, o $K_{cb_{meio}}$ e $K_{cb_{final}}$ com valor maior que 0.45 devem ser ajustados usando a seguinte equação:

$$K_{cb} = K_{cb(T_{ab})} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (70)$$

onde

$K_{cb(T_{ba})}$ o valor para $K_{cb_{meio}}$ ou $K_{cb_{final}}$ (se ≥ 0.45) da Tabela 17,

u_2 o valor médio da velocidade do vento diário a 2 m de altura sobre a grama durante o estágio intermediário ou final [$m s^{-1}$] para $1 m s^{-1} \leq u_2 \leq 6 m s^{-1}$,

RH_{min} o valor médio da umidade relativa diária mínima durante o estágio intermediário e final [%] para $20\% \leq RH_{min} \leq 80\%$,

h a altura da planta média durante o estágio intermediário e final [m] (Tabela 12) para $20\% \leq RH_{min} \leq 80\%$.

Para uma discussão completa da influência da correção climática, e a determinação numérica de $K_{cb_{meio}}$ e $K_{cb_{final}}$, o usuário deve retornar às discussões do $K_{c_{meio}}$ e $K_{c_{final}}$ no Capítulo 6.

A Tabela 18 resume as diretrizes gerais que foram usadas na derivação dos valores de K_{cb} dos valores de K_c fornecidos na Tabela 17. Onde resultados de pesquisa locais estão disponíveis, podem ser usados para modificar os valores de K_{cb} da Tabela 17 para refletir os efeitos das condições locais, práticas culturais ou variedades da cultura no K_{cb} . Porém, não deve ser esperado que valores locais de K_{cb} divergir por mais que 0.2 dos valores da Tabela 17. Uma maior divergência deve implicar na necessidade de investigar ou avaliar a técnica de pesquisa local, equipamento e práticas culturais. Onde valores de K_{cb} locais são usados, nenhum ajuste para clima utilizando a Equação 70 é necessário.

EXEMPLO 29. Seleção e ajustamento do coeficiente de cultura basal, K_{cb}

Seleção do $K_{cb_{ini}}$, $K_{cb_{meio}}$ e $K_{cb_{final}}$ para a cultura do feijão seco da Caixa 15.
$K_{cb_{ini}}$, $K_{cb_{meio}}$ e $K_{cb_{final}}$ pode ser selecionado diretamente da Tabela 17 para o feijão seco 0.15, 1.10 e 0.25. Quando ajustado para o clima utilizando a Eq. 70:
$K_{cb_{ini}} = 0.15$ $K_{cb_{meio}} = 1.10 + (0.04 (2.2-2) - 0.004 (30-45))(0.4/3)^{0.3} = 1.14$ $K_{cb_{final}} = 0.25$ (como $K_{cb} < 0.45$)
Altura do feijão na Tabela 12 é 0.4 m.
A correspondente curva K_{cb} é mostrada na Figura 37.

TABELA 17. Coeficiente de cultura basal, K_{cb} , para condição de não estresse, cultura bem manejada em clima sub úmido ($RH_{min} \approx 45\%$, $u_2 \approx 2$ m/s) para usar com a equação Penman-Monteith FAO (ET_0).

Cultura	$K_{cb_{ini}}^1$	$K_{cb_{mid}}$	$K_{cb_{end}}$
a. Small Vegetables	0.15	0.95	0.85
Broccoli		0.95	0.85
Brussel Sprouts		0.95	0.85
Cabbage		0.95	0.85
Carrots		0.95	0.85
Cauliflower		0.95	0.85
Celery		0.95	0.90

Garlic		0.90	0.60
Lettuce		0.90	0.90
Onions			
- dry		0.95	0.65
- green		0.90	0.90
- seed		1.05	0.70
Spinach		0.90	0.85
Radishes		0.85	0.75
b. Vegetables - Solanum Family (<i>Solanaceae</i>)	0.15	1.10	0.70
Egg Plant		1.00	0.80
Sweet Peppers (bell)		1.00 ²	0.80
Tomato		1.10 ²	0.60-0.80
c. Vegetables - Cucumber Family (<i>Cucurbitaceae</i>)	0.15	0.95	0.70
Cantaloupe		0.75	0.50
Cucumber			
- Fresh Market		0.95 ²	0.70
- Machine harvest		0.95	0.80
Pumpkin, Winter Squash		0.95	0.70
Squash, Zucchini		0.90	0.70
Sweet Melons		1.00	0.70
Watermelon		0.95	0.70
d. Roots and Tubers	0.15	1.00	0.85
Beets, table		0.95	0.85
Cassava			
- year 1		0.70 ³	0.20
- year 2		1.00	0.45
Parsnip		0.95	0.85

Potato		1.10	0.65 ⁴
Sweet Potato		1.10	0.55
Turnip (and Rutabaga)		1.00	0.85
Sugar Beet		1.15	0.50 ⁵
e. Lugumes (<i>Leguminosae</i>)	0.15	1.10	0.50
Beans, green		1.00 ²	0.80
Beans, dry and Pulses		1.10 ²	0.25
Chick pea		0.95	0.25
Fababean (broad bean)			
	- Fresh	1.10 ²	1.05
	- Dry/Seed	1.10 ²	0.20
Grabanzo		1.05	0.25
Green Gram and Cowpeas		1.00	0.55-0.25 ⁶
Groundnut (Peanut)		1.10	0.50
Lentil		1.05	0.20
Peas			
	- Fresh	1.10 ²	1.05
	- Dry/Seed	1.10	0.20
Soybeans		1.10	0.30
f. Perennial Vegetables (with winter dormancy and initially bare or mulched soil)			
Artichokes	0.15	0.95	0.90
Asparagus	0.15	0.90 ⁷	0.20
Mint	0.40	1.10	1.05
Strawberries	0.30	0.80	0.70
g. Fibre Crops	0.15		
Cotton		1.10-1.15	0.50-0.40
Flax		1.05	0.20

Sisal ⁸		0.4-0.7	0.4-0.7
h. Oil Crops	0.15	1.10	0.25
Castorbean (<i>Ricinus</i>)		1.10	0.45
Rapeseed, Canola		0.95-1.10 ⁹	0.25
Safflower		0.95-1.10 ⁹	0.20
Sesame		1.05	0.20
Sunflower		0.95-1.10 ⁹	0.25
i. Cereals	0.15	1.10	0.25
Barley		1.10	0.15
Oats		1.10	0.15
Spring Wheat		1.10	0.15-0.3 ¹⁰
Winter Wheat	0.15-0.5 ¹¹	1.10	0.15-0.3 ¹⁰
Maize			
- Field (grain) (<i>field corn</i>)	0.15	1.15	0.50,0.15 ¹²
- Sweet (<i>sweet corn</i>)		1.10	1.00 ¹³
Millet		0.95	0.20
Sorghum			
- grain		0.95-1.05	0.35
- sweet		1.15	1.00
Rice	1.00	1.15	0.70-0.45
j. Forages			
Alfalfa Hay			
- individual cutting periods	0.30 ¹⁴	1.15 ¹⁴	1.10 ¹⁴
- for seed	0.30	0.45	0.45
Bermuda hay			
- averaged cutting effects	0.50	0.95 ¹⁵	0.80
- Spring crop for seed	0.15	0.85	0.60

Clover hay, Berseem - individual cutting periods		0.30 ¹⁴	1.10 ¹⁴	1.05 ¹⁴
Rye Grass hay - averaged cutting effects		0.85	1.00 ¹⁵	0.95
Sudan Grass hay (annual) - individual cutting periods		0.30 ¹⁴	1.10 ¹⁴	1.05 ¹⁴
Grazing Pasture				
	- Rotated Grazing	0.30	0.80-1.00	0.80
	- Extensive Grazing	0.30	0.70	0.70
Turf grass				
	- cool season ¹⁶	0.85	0.90	0.90
	- warm season ¹⁶	0.75	0.80	0.80
k. Sugar cane		0.15	1.20	0.70
I. Tropical Fruits and Trees				
Banana				
	- 1 st year	0.15	1.05	0.90
	- 2 nd year	0.60	1.10	1.05
Cacao		0.90	1.00	1.00
Coffee				
	- bare ground cover	0.80	0.90	0.90
	- with weeds	1.00	1.05	1.05
Date Palms		0.80	0.85	0.85
Palm Trees		0.85	0.90	0.90
Pineapple ¹⁷ (multiyear crop)				
	- bare soil	0.15	0.25	0.25
	- with grass cover	0.30	0.45	0.45
Rubber Trees		0.85	0.90	0.90
Tea				
	- nonshaded	0.90	0.95	0.90
	- shaded ¹⁸	1.00	1.10	1.05

m. Grapes and Berries				
Berries (bushes)		0.20	1.00	0.40
Grapes				
	- Table or Raisin	0.15	0.80	0.40
	- Wine	0.15	0.65	0.40
Hops		0.15	1.00	0.80
n. Fruit Trees				
Almonds, no ground cover		0.20	0.85	0.6019
Apples, Cherries, Pears ²⁰				
	- no ground cover, killing frost	0.35	0.90	0.6519
	- no ground cover, no frosts	0.50	0.90	0.7019
	- active ground cover, killing frost	0.45	1.15	0.9019
	- active ground cover, no frosts	0.75	1.15	0.8019
Apricots, Peaches, Stone Fruit ^{20, 21}				
	- no ground cover, killing frost	0.35	0.85	0.6019
	- no ground cover, no frosts	0.45	0.85	0.6019
	- active ground cover, killing frost	0.45	1.10	0.8519
	- active ground cover, no frosts	0.75	1.10	0.8019
Avocado, no ground cover		0.50	0.80	0.70
Citrus, no ground cover ²²				
	70% canopy	0.65	0.60	0.65
	50% canopy	0.60	0.55	0.60
	20% canopy	0.45	0.40	0.50
Citrus, with active ground cover or weeds ²³				
	70% canopy	0.75	0.70	0,75
	50% canopy	0.75	0.75	0.75
	20% canopy	0.80	0.80	0.85

Conifer Trees ²⁴	0.95	0.95	0.95
Kiwi	0.20	1.00	1.00
Olives (40 to 60% ground coverage by canopy) ²⁵	0.55	0.65	0.65
Pistachios, no ground cover	0.20	1.05	0.40
Walnut Orchard ²⁰	0.40	1.05	0.6019

¹ estes são os valores de Kcb que representa uma condição de uma superfície de solo seca. Estes valores são destinados para ser usado com o coeficiente duplo $K_{cb_{ini}} + K_e$ somente aproximado. Valores para altura máxima da cultura, h, para ajuste climático é determinado na Tabela 12 para Kcb.

² feijões, Ervilhas, Legumes, Tomates, Pimentas e Pepinos às vezes são crescidos em talos que alcançam 1.5 a 2 metros em altura. Em tais casos, valores de Kcb aumentados precisam de ser levados. Para feijões verdes, pimentas e pepinos, podem ser levados 1.10, e para tomates, feijões secos e ervilhas, 1.15. Debaixo deste condiciona h também deveria ser aumentado.

³ o midseason estima para cassava assuma condições de nonstressed durante ou seguindo a estação chuvosa. O Kcb terminam conta de valores para domancy durante a estação seca.

⁴ o Kcb terminam valor por batatas é aproximadamente 0.35 para batatas de estação longas com matança de vinha.

⁵ este Kcb terminam valor é para nenhuma irrigação durante o último mês da estação crescente. O Kcb terminam valor por beterrabas de açúcar é mais alto, até 0.9, quando irrigação ou chuva significativa acontece durante o último mês da estação crescente.

⁶ o primeiro fim de Kcb é para colhido fresco. O segundo valor é para colheu seque.

⁷ o Kcb para aspargo normalmente permanece a ini de Kcb durante colheita das lanças, devido a cobertura de solo escassa. O Kcb que valor meio é para regrowth seguinte de vegetação terminação seguinte de colheita de lanças.

⁸ Kcb para sisal depende da densidade plantando e administração de água (por exemplo, tensão de umidade intencional).

⁹ os mais baixos valores são para colheitas de rainfed que têm populações de planta menos densas.

¹⁰ o valor mais alto é para colheitas mão-colhidas.

¹¹ o dois ini de Kcb estima para trigo de inverno é para menos de 10% cobertura de solo e para durante o dormente, período de inverno, se a vegetação completamente coberturas o solo, mas condições são nonfrozen.

¹² o primeiro Kcb terminam valor está para colheita em umidade de grão alta. O segundo Kcb terminam valor busca para colheita campo completo que seca do grão (para aproximadamente 18% umidade, base de massa molhada).

¹³ se colheu fresco para consumo humano. Uso que Kcb terminam para milho de campo se o doce milho é permitido amadurecer e secar no campo.

¹⁴ estes coeficientes de Kcb para colheitas de feno representam corte seguinte imediatamente; a cobertura cheia; e imediatamente antes de cortar, respectivamente. A estação crescente é descrita como uma série de períodos cortantes individuais.

¹⁵ este Kcb coeficiente meio para bermuda e ryegrass dá feno a colheitas é um Kcb comum global coeficiente meio antes do que calcula a média Kcb para ambos e cortes seguintes. É aplicado ao período que segue o primeiro período de desenvolvimento até o começo do último recente período de estação da estação crescente.

¹⁶ variedades de grama de estação frescas incluem postos densos de bluegrass, ryegrass, e fescue.. variedades de estação Mornas incluem grama de bermuda e St. grama de Augustine. Os 0.90 valores para grama de estação fresca representam um 0.06 a 0.08 m que ceifam altura debaixo de condições de relva gerais. Onde administração de água cuidadosa é praticada e crescimento rápido não é requerido, Kcb para relva pode ser reduzido por 0.10.

¹⁷ a planta de abacaxi tem muito baixo transpiration porque fecha seu stomates durante o dia e os abre durante a noite. Então, a maioria de Etc de abacaxi evaporação é da terra.

¹⁸ incluem as exigências de água das árvores de sombra.

¹⁹ este Kcb terminam valores representam Kcb anterior folhear gota. Depois de gota de folha, Kcb terminam 0.15 para terra nua, seca ou cobertura de solo morta e Kcb termine 0.45 a 0.75 para ativamente cobertura de solo crescente (consulte Capítulo 11).

²⁰ se referem a Eq. 94, 97 ou 98 e notas de rodapé 22 e 23 por calcular Kcb para postos imaturos.

²¹ categoria de fruta de pedra aplica a pêssegos, albricoques, peras, ameixas e pecans.

²² estes valores de Kcb podem ser calculados de Eq. 98 para min de Kc = 0.15 e Kcb cheio = 0.70, 0.65 e 0.70 para a inicial, estação meio e fim de períodos de estação, e eff de fc = fc onde fc = fração de solo coberta por pálio de árvore (por exemplo, o sol é presumido para estar diretamente em cima). O valor de midseason é mais baixo que inicial e terminando valores devido aos efeitos de fechamento de stomatal durante períodos de cume ET. Para úmido e climas de subhumid onde não há menos stomatal controlam por cítrico, valores para ini de Kcb, Kcb meio, e fim de Kcb pode ser aumentado por 0.1 - 0.2, Rogers et al seguinte. (1983).

²³ estes valores de Kcb podem ser calculados como $Kcb = fc \text{ ngc de Kcb} + (1 - fc) Kcb$ cobrem onde ngc de Kcb é o Kcb de cítrico sem cobertura de solo ativa (calculou como em nota de rodapé 22), cobertura de Kcb é o Kcb para a cobertura de solo ativa (0.90), e fc é definido em nota de rodapé 22. Alternativamente, Kcb para cítrico com cobertura de solo

ativa pode ser calculado diretamente de Eq. 98 fixando min de $K_c =$ cobertura de K_{cb} . Para úmido e climas de subhumid onde não menos stomatal controlam por cítrico, valores para ini de K_{cb} , K_{cb} meio, e fim de K_{cb} pode ser aumentado por 0.1 - 0.2, Rogers et al seguinte. (1983). para cobertura de solo non-ativa ou só moderadamente ativa (ativo indica cobertura de solo verde e crescente com LAI > aproximadamente 2 a 3), K_{cb} deveria ser weighted entre K_{cb} para nenhuma cobertura de solo e K_{cb} para cobertura de solo ativa, com o pesagem baseado no " greeness " e área de folha aproximada da cobertura de solo.

²⁴ coníferas exibem stomatal significativo controlam devido a resistência aerodinâmica reduzida. O K_{cb} pode reduzir facilmente debaixo dos valores apresentados, que representam condições bem-molhadas para florestas grandes.

²⁵ estes coeficientes representam aproximadamente 40 a 60% cobertura de solo. Se refira a Eq. 98, exemplo 43, e notas de rodapé 22 e 23 por calcular K_{cb} para postos imaturos.

Origem Primária: $K_{cb\ ini}$: Doorenbos and Kassam (1979); $K_{cb\ meio}$ e $K_{cb\ final}$: Doorenbos and Pruitt (1977); Pruitt (1986); Wright (1981, 1982), Snyder et al. (1989)

TABELA 18. Linha geral para derivar K_{cb} dos valores de K_c fornecidos da Tabela 12

Estádio de crescimento	Condição do solo, irrigação e práticas culturais	K_{cb}	ajustamento
Inicial	Cultura Anual – superfície do solo (quase) nu.	0.15	
	Cultura Perene – superfície do solo (quase) nu.	0.15-0.20	-
	Gramas, arbustos e árvores – frio	0.30 - 0.40	-
	Cultura Perene – alguma cobertura do solo ou cobertura foliar		
	- irrigação pouco freqüente (oliveiras, árvore palmeira, árvore frutífera,...)	$K_{c\ ini}$ (Tab.12) 0.1	-
	- irrigação freqüente (vegetais (tipo-jardim),...)	$K_{c\ ini}$ (Tab.12) 0.2	-
Intermediário	Cobertura do solo maior que 80%	$K_{c\ mid}$ (Tab.12) 0.05	Clima (Eq. 70)
	Cobertura do solo menor que 80% (vegetais)	$K_{c\ mid}$ (Tab.12) 0.10	Clima (Eq. 70)
Final	Irrigação pouco freqüente ou umedecer durante o estágio final	$\sim K_{c\ end} - 0.05$	-
	Irrigação freqüente ou umedecer durante o estágio final	$K_{c\ end} - 0.1$	Clima (Eq. 70)

Clima: ajuste para clima utilizando Eq. 70 onde $K_{cb} > 0.45$

Determinação de valores de Kcb diários

Como delineado no Capítulo 6, somente três pontos são requeridos para descrever e construir a curva do coeficiente de cultura. Depois de dividir o período de crescimento geral em quatro estádios de crescimento, selecionar e ajustar o valor do Kcb correspondendo ao inicial ($K_{cb_{ini}}$), intermediário ($K_{cb_{meio}}$) e final ($K_{cb_{final}}$), a curva do coeficiente de cultura pode ser traçada (Figura 37) e os coeficientes Kcb podem ser derivados (Exemplo 30).

EXEMPLO 30. Determinação de valores diários para Kcb

Calcular o coeficiente basal para a cultura do feijão (Exemplo 29, Figura 37) para o meio dos quatro estádios de desenvolvimento da cultura.
Estádio Inicial ($L_{ini} = 25$ dias), para o dia 12 do período de crescimento: $K_{cb} = K_{cb_{ini}} = 0.15$
Estádio de desenvolvimento da cultura ($L_{dev} = 25$ dias), no dia ($25 + 25/2 =$) 37 do período de desenvolvimento, usando a Eq. 66: $K_{cb} = 0.15 + [(37 - 25)/25] (1.14 - 0.15) = 0.63$
Estádio intermediário ($L_{mid} = 30$ dias), no dia ($25 + 25 + 30/2 =$) 65 para o período de desenvolvimento: $K_{cb} = K_{cb_{mid}} = 1.14$
Estádio final ($L_{late} = 20$ dias), no dia ($25 + 25 + 30 + 20/2 =$) 90 para o período de desenvolvimento, Eq. 66: $K_{cb} = 1.14 + [(90 - (25 + 25 + 30))/20] (0.25 - 1.14) = 0.70$
O coeficiente de cultura basal, K_{cb} , nos dias 12, 37, 65 e 90 do período de desenvolvimento são 0.15, 0.63, 1.14 e 0.70 respectivamente.

Componente de evaporação (K_e ETo)

O coeficiente de evaporação do solo, K_e , descreve o componente de evaporação do ETo. Onde a superfície do solo é molhada, por chuva ou irrigação, K_e é máximo. Onde a superfície do solo está seca, K_e é pequeno e até mesmo zero quando nenhuma água permanece perto da superfície do solo para evaporação.

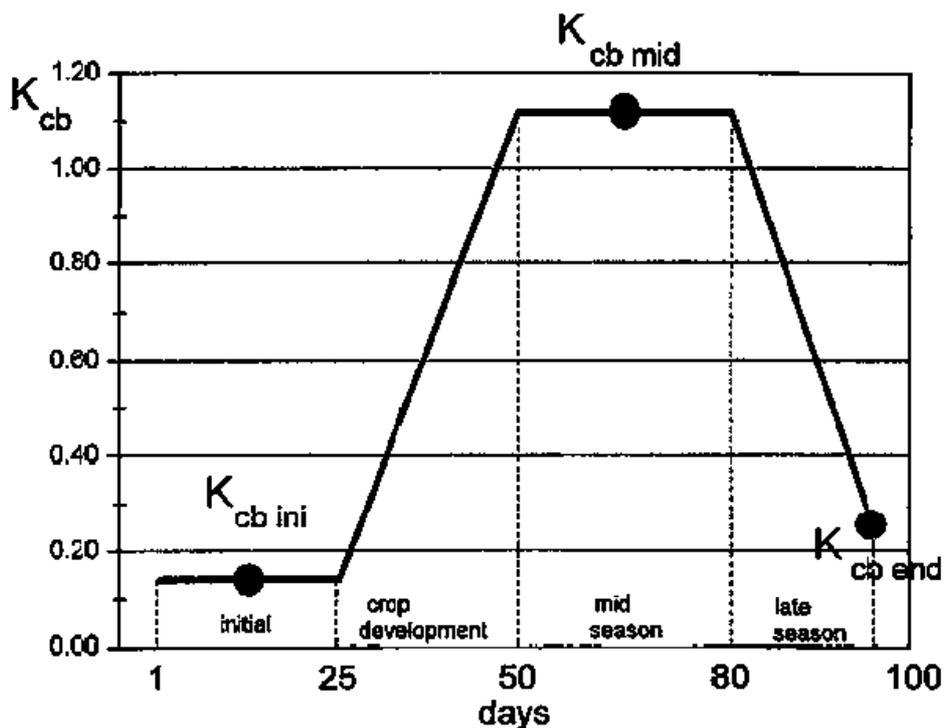


FIGURA 37. Construção da curva do coeficiente basal (K_{cb}) para a cultura do feijão (Exemplo 29) usando a duração dos estádios inicial, desenvolvimento, intermediário e final de 25, 25, 30 e 20 dias, respectivamente.

Procedimento de cálculo

Quando o solo é molhado, a evaporação do solo acontece à taxa máxima. Porém, o coeficiente de cultura ($K_c = K_{cb} + K_e$) nunca pode exceder um valor máximo, $K_{c_{max}}$. Este valor é determinado pela energia disponível para evapotranspiração à superfície de solo ($K_{cb} + K_e \leq K_{c_{max}}$) ou $K_e \leq (K_{c_{max}} - K_{cb})$.

Quando a superfície do solo seca, menos água está disponível para evaporação e uma redução na evaporação começa a acontecer em proporção à quantidade de água que permanece na camada de solo da superfície, ou:

$$K_e = K_r (K_{c_{max}} - K_{cb}) \leq K_{c_{max}} \quad (71)$$

onde

K_e = coeficiente de evaporação do solo,

K_{cb} = coeficiente de cultura basal,

$K_{c_{max}}$ = valor máximo de K_c após uma chuva ou irrigação,

K_r = coeficiente de redução da evaporação dependente da lâmina cumulativa de água depletiva (evaporada) da superfície do solo,

f_{ew} = fração do solo exposto e umedecido, i.e., a fração da superfície do solo da qual a maioria que evaporação acontece.

Em computador que programa terminologia, Equação 71 é expressa como $K_e = \min(K_r (K_{c_{max}} - K_{cb}), f_{ew} K_{c_{max}})$.

Após uma chuva ou irrigação K_r é 1, e evaporação é somente determinada pela energia disponível para evaporação. Com a superfície do solo seca, K_r se torna menos que um e a evaporação é reduzida. K_r se torna zero quando nenhuma água permanece para evaporação na camada de solo superior.

Evaporação acontece predominantemente da fração de solo exposta. Conseqüentemente, evaporação está restringida em qualquer momento pela energia disponível à fração de solo exposta, i.e., K_e não pode exceder $f_{ew} K_{c_{max}}$, onde f_{ew} é a fração de solo de onde a maioria da evaporação acontece, i.e., a fração do solo que não está coberta pela vegetação e é umedecido por irrigação ou precipitação.

O procedimento de cálculo consiste na determinação:

- o limite superior $K_{c_{max}}$;
- o coeficiente de redução da evaporação do solo K_r ; e
- a fração do solo exposto e umedecido f_{ew}

A estimação de K_r requer um cálculo diário do balanço de água para a camada superficial do solo.

Limite superior $K_{c_{max}}$

O $K_{c_{max}}$ representa um limite superior na evaporação e transpiração de qualquer superfície cultivada e é imposto para refletir os obstáculos naturais colocados na energia disponível representada pela diferença do balanço da energia $R_n - G - H$ (Equação 1). $K_{c_{max}}$ varia de aproximadamente 1.05 a 1.30 quando for usada a grama como referência (ET_o):

$$K_{c_{max}} = \max \left\{ \left[1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right], \{ K_{cb} + 0.05 \} \right\} \quad (72)$$

onde

h = altura da planta máxima média durante o estágio de cálculo (inicial, desenvolvimento, intermediário, ou final) [m],

K_{cb} = coeficiente de cultura basal,

$\max ()$ = valor máximo dos parâmetros na chave $\{ \}$ isso é separado pela vírgula.

Na Equação 72 assegura que $K_{c_{max}}$ será sempre maior ou igual à soma $K_{cb} + 0.05$. Esta exigência sugere que a superfície do solo molhado sempre aumentará o valor do K_{cb} por 0.05 após o molhamento completo da superfície do solo, até mesmo durante os estádios de cobertura do solo completo. O valor de 1.2 em vez de 1 é usado para $K_{c_{max}}$ na Equação 72 por causa do efeito do aumento da aspereza aerodinâmica pelas culturas circunvizinhas durante os estádios de desenvolvimento, intermediário e final da cultura que pode aumentar a transferência turbulenta do vapor da superfície do solo exposto. O coeficiente “1.2” também reflete o impacto da redução do albedo do solo molhado e a contribuição do calor armazenado do solo seco antes do evento de molhamento. Todos estes fatores podem contribuir para o aumento da evaporação em relação à referência.

O coeficiente “1.2” na Equação 72 representa o efeito dos intervalos de molhamento que são maiores do que 3 ou 4 dias. Se os eventos de irrigação ou precipitação são mais freqüentes, por exemplo diariamente ou então a cada dois dias, a solo tem menos oportunidade para absorver o calor entre umedecimentos, então o coeficiente “1.2” na Equação 72 pode ser reduzido para aproximadamente 1.1. O intervalo de tempo para computar $K_{c_{max}}$ pode variar de diário para mensal.

Coeficiente de redução de evaporação do solo (K_r)

A evaporação do solo exposto pode ser assumida que acontece em duas fases: uma é limitada pela energia, e a outra é em uma taxa descendente. Quando a superfície de solo está molhada, K_r é 1. Quando o conteúdo de água na camada superior do solo se torna limitado, K_r diminui e se torna zero quando a quantidade total de água que pode ser evaporada da superfície do solo é depletada.

Quantidade máxima de água que pode ser evaporada

No procedimento de evaporação simples, é assumido que o conteúdo de água média que evapora da camada do solo está entre a capacidade de campo, θ_{FC} que ocorre imediatamente após um evento maior de molhamento e o solo que pode secar a um nível de conteúdo de água do solo que é o meio caminho entre capacidade de campo (nenhuma água

partiu) e ponto de murcha, θ_{WP} . A Quantidade de água que pode ser evaporada durante um ciclo completo de secamento pode ser calculada como:

$$TEW = 1000 (\theta_{FC} - 0.5 \theta_{WP}) Z_e \quad (73)$$

onde

TEW = água evaporada total = lâmina máxima de água que pode ser evaporada do solo quando a superfície do solo foi inicialmente completamente umedecida [mm],

θ_{FC} = conteúdo de água do solo a capacidade de campo [$m^3 m^{-3}$],

θ_{WP} = conteúdo de água do solo no ponto de murcha [$m^3 m^{-3}$],

Z_e = profundidade da camada superficial do solo isto é sujeito ao secamento com o objetivo da evaporação [0.10-0.15m].

Onde for desconhecido, um valor para Z_e , a profundidade efetiva da camada de evaporação do solo, de 0.10-0.15 m é recomendada. Valores típicos para θ_{FC} , θ_{WP} e TEW são determinados em Tabela 19.

TABELA 19. Características típicas da água do solo para diferentes tipos de solo

Tipos de Solo (Classificação Textural do Solo EUA)	Características da Água no Solo			Parâmetros de Evaporação	
	θ_{FC}	θ_{WP}	$(\theta_{FC} - \theta_{WP})$	Quantidade de água evaporada	
				Estágio 1 REW	estágio 1 e 2 TEW* ($Z_e = 0.10m$)
	m^3/m^3	m^3/m^3	m^3/m^3	mm	mm
Areia	0.07 - 0.17	0.02 - 0.07	0.05 - 0.11	2 - 7	6 - 12
Areia argilosa	0.11 - 0.19	0.03 - 0.10	0.06 - 0.12	4 - 8	9 - 14
Sandy loam	0.18 - 0.28	0.06 - 0.16	0.11 - 0.15	6 - 10	15 - 20
Loam	0.20 - 0.30	0.07 - 0.17	0.13 - 0.18	8 - 10	16 - 22
Silt loam	0.22 - 0.36	0.09 - 0.21	0.13 - 0.19	8 - 11	18 - 25
Silt	0.28 - 0.36	0.12 - 0.22	0.16 - 0.20	8 - 11	22 - 26
Silt clay loam	0.30 - 0.37	0.17 - 0.24	0.13 - 0.18	8 - 11	22 - 27
Silty clay	0.30 - 0.42	0.17 - 0.29	0.13 - 0.19	8 - 12	22 - 28
Clay	0.32 - 0.40	0.20 - 0.24	0.12 - 0.20	8 - 12	22 - 29

*TEW = $(\theta_{FC} - 0.5 \theta_{WP}) Z_e$

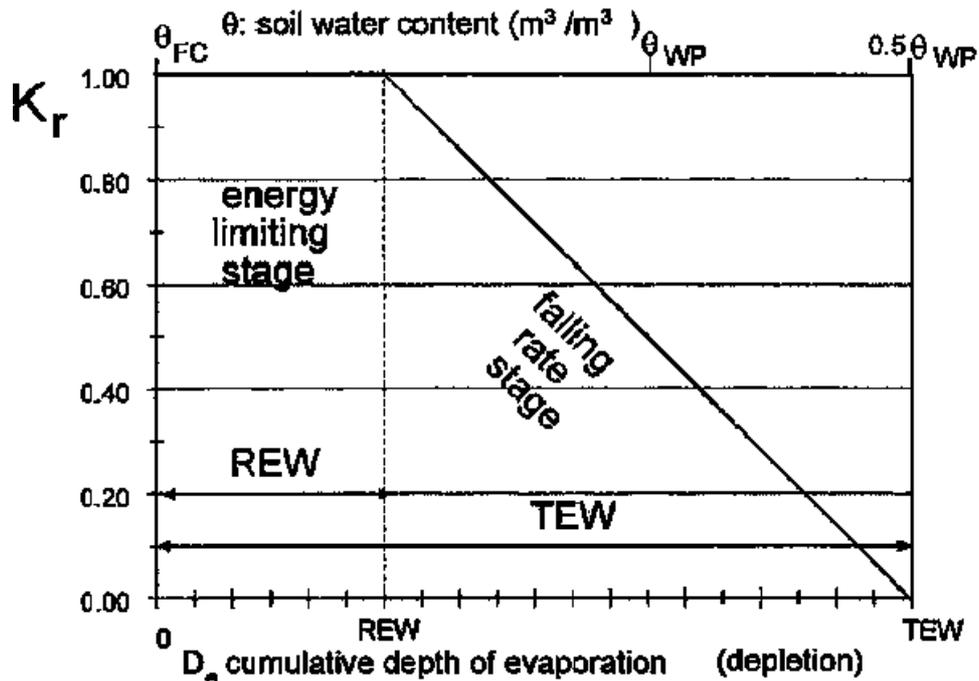


FIGURA 38. Coeficiente de redução da evaporação do solo, K_r

Estágio1: A energia que limita a fase

No começo de um ciclo secante, após uma chuva pesada ou irrigação, o conteúdo de água na superfície do solo do solo está na capacidade de campo e a quantidade de água perdida por evaporação, D_e , é zero. Durante a fase 1 do processo secante, a superfície do solo permanece molhada e é assumido que a evaporação do solo exposta à atmosfera acontecerá à taxa máxima somente limitada pela disponibilidade de energia à superfície do solo. Esta fase alimenta até a lâmina cumulativa de evaporação, D_e , é tal que as propriedades hidráulicas da camada superior do solo se torna limitante e não pode ser transportada a água até à superfície do solo a uma taxa que possa atender a demanda potencial. Durante a fase 1, $K_r = 1$.

A lâmina cumulativa de evaporação, D_e , ao término da fase 1 é REW (água prontamente evaporada, é a lâmina máxima de água que pode ser evaporada da camada da superfície do solo sem restrição durante a fase 1). A lâmina normalmente varia de 5 a 12 mm e é geralmente maior para solos bem estruturado e de textura média. Valores típicos para REW são determinados na Tabela 19.

Estágio2: fase de taxa decedente

A segunda fase (onde a taxa de evaporação está reduzindo) é chamada de “estágio da taxa decedente” a evaporação e começa quando D_e excede REW . Neste momento, a

superfície do solo é visivelmente seca, e a evaporação do solo exposto é decrescente proporcionalmente à quantidade de água que permanece na camada superficial do solo:

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \text{ for } D_{e,i-1} > REW \quad (74)$$

onde

K_r = coeficiente de redução da evaporação dependente da depleção da água (lâmina cumulativa de evaporação) da camada da superfície do solo ($K_r = 1$ quando $D_{e,i-1} \leq REW$),

$D_{e,i-1}$ = lâmina cumulativa de evaporação (depleção) da camada da superfície do solo ao término do dia $i-1$ (dia anterior) [mm],

TEW = lâmina máxima cumulativa de evaporação (depleção) da camada da superfície do solo quando $K_r = 0$ (TEW = água evaporada total) [mm],

REW = lâmina cumulativa de evaporação (depleção) ao término da fase 1 (REW = água prontamente evaporada) [mm].

EXEMPLO 31. Determinação da evapotranspiração de um solo nu

Determine a evapotranspiração para a superfície do solo argiloso ($K_{cb} \approx 0.15$) para dez dias sucessivos após uma chuva pesada. A evapotranspiração de referência durante o período é $ET_o = 4.5$ mm/dia, e o clima é sub úmido e vento leve.								
Para a Tabela 19			Para solo argiloso: TEW \approx 20 mm e REW \approx 9 mm					
Para chuva e solo nu			$f_{ew} = 1$					
Pela Eq. 72			$K_{c \max} = 1.20$					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	
Dia	D_e começo mm	Estágio	K_r	K_e	K_e mm/dia	ET_c	$D_{e \text{ end}}$ mm	ET_c mm/dia
1	0.00	1	1	1.05	4.73	4.73	4.73	5.4
2	4.73	1	1	1.05	4.73	9.45	9.45	5.4
3	9.45	2	$(20 - 9.45)/(20 - 9) = 0.96$	1.01	4.53	13.98	13.98	5.2
4	13.98	2	$(20 - 13.98)/(20 - 9) = 0.55$	0.57	2.59	16.57	16.57	3.3
5	16.57	2	$(20 - 16.57)/(20 - 9) = 0.31$	0.33	1.47	18.04	18.04	2.1
6	18.04	2	$(20 - 18.04)/(20 - 9) = 0.18$	0.19	0.84	18.88	18.88	1.5
7	18.88	2	$(20 - 18.88)/(20 - 9) = 0.10$	0.11	0.48	19.36	19.36	1.2

8	19.36	2	$(20 - 19.36)/(20 - 9) = 0.06$	0.06	0.27	19.64	0.9
9	19.64	2	$(20 - 19.64)/(20 - 9) = 0.03$	0.03	0.16	19.79	0.8
10	19.79	2	$(20 - 19.79)/(20 - 9) = 0.02$	0.02	0.09	19.88	0.8
(1)	Dia						
(2)	Depleção no começo do dia (= depleção do dia anterior).						
(3)	Estágio de evaporação do solo (estágio 2 começa se $D_e > REW = 9$ mm).						
(4)	K_r ($K_r = 1$ para o estágio 1. Use a Eq. 74 para o estágio 2).						
(5)	Pela Eq. 21: $K_e = K_r (K_{c_{max}} - K_{cb}) = K_r (1.20 - 0.15) = 1.05$ $K_r \leq 1.20$.						
(6)	Componente de Evaporação: $K_e ET_o = K_e (4.5$ mm/dia).						
(7)	Depleção no final do dia = (2) - (6).						
(8)	$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o = (0.15 + K_e) ET_o = (0.15 + K_e) 4.5$ mm/dia, onde $K_{cb} ET_o = (0.15 ET_o) \approx 0.7$ mm/dia é basal, evaporação "difusivo" do solo, possivelmente para mais abaixo da lâmina Z_e (~ 0.10 a 0.15 m). Visto que para esta situação de solo nu, onde pode ser admitido K_{cb} igual a zero de forma que o máximo K_e se transforma $K_e = K_{c_{max}} = 1.20$. Então todas as evaporações são retiradas da camada superficial do solo.						
O exemplo demonstra que a estimação do K_r requer o cálculo diário do balanço de água. Isto vai facilitar o desenvolvimento da próxima seção para o cálculo diário de K_e .							

Fração do solo exposto e umedecido (few)

few: procedimento de cálculo

Em culturas com cobertura do solo incompleta, evaporação do solo não acontece frequentemente uniformemente em cima da superfície inteira, mas é maior entre plantas onde exposição para luz solar acontece e onde mais ventilação do ar pode transportar vapor da superfície de solo para sobre o dossel. Isto é especialmente verdade onde somente parte da superfície do solo é umedecida através de irrigação.

É reconhecido que a localização e a fração da superfície do solo exposta a radiação solar muda a um certo nível com a hora do dia e dependendo da orientação das fileiras. O procedimento apresentado aqui estima um cálculo geral da fração média da superfície do solo na qual a maioria da evaporação acontece. A evaporação difusiva do solo em baixo do dossel é assumida que é amplamente incluído no coeficiente basal K_{cb} .

Onde a superfície do solo é completamente umedecida, por precipitação ou irrigação, então a fração da superfície do solo da qual a maioria da evaporação acontece, few, é definido

essencialmente como $(1 - fc)$, onde fc é a fração média da superfície do solo coberta por vegetação e $(1 - fc)$ é a fração aproximada da superfície do solo que está exposta. Porém, para sistemas de irrigação onde somente uma fração da superfície do solo é umedecida, f_{ew} deve ser limitado a f_w , fração da superfície do solo umedecida através de irrigação (Figura 39). Então, f_{ew} é calculado como:

$$f_{ew} = \min(1 - fc, f_w) \quad (75)$$

onde

$1 - fc$ = média exposta da fração do solo não coberta (ou sombreado) através da vegetação [0.01 - 1],

f_w = fração média da superfície do solo umedecida por irrigação ou precipitação [0.01 - 1].

A função “min ()” seleciona o mais baixo valor entre os valores “ $1 - fc$ ” e “ f_w ”. A Figure 39 ilustra a relação de f_{ew} para $(1 - fc)$ e f_w .

A limitação imposta pela Equação 75 assume que a fração do solo umedecido através da irrigação acontece dentro da fração do solo exposta a luz solar e ventilação. Geralmente este é o caso, exceto talvez a irrigação por gotejamento (Figura 39).

No caso de irrigação por gotejamento onde a maioria do solo umedecido através da irrigação pode estar em baixo do dossel e pode ser então sombreada, podem ser exigidos modelos mais complexos da superfície de solo e padrões de molhamento para calcular evaporação total com precisão. Neste caso, o valor para f_w pode precisar ser reduzido para aproximadamente um meio para um terço daquele determinado na Tabela 20 solo responder pelos efeitos de matização de emissores pelo dossel de planta na taxa de evaporação de umedecido (Exemplo 34). Uma aproximação geral poderia ser multiplicar f_w por $[1 - (2/3)fc]$ para irrigação por gotejamento.

f_w : fração da superfície do solo umedecida por irrigação ou precipitação

A Tabela 20 apresenta valores típicos para f_w . Onde uma mistura de irrigação e precipitação acontece dentro do mesmo estádio secante ou no mesmo dia, o valor para f_w deveria estar baseado em uma média de sobrecarregado do f_w para precipitação ($f_w = 1$) e o f_w para o sistema de irrigação. A pesagem deveria ser aproximadamente proporcional às lâminas de infiltração de cada fonte de água.

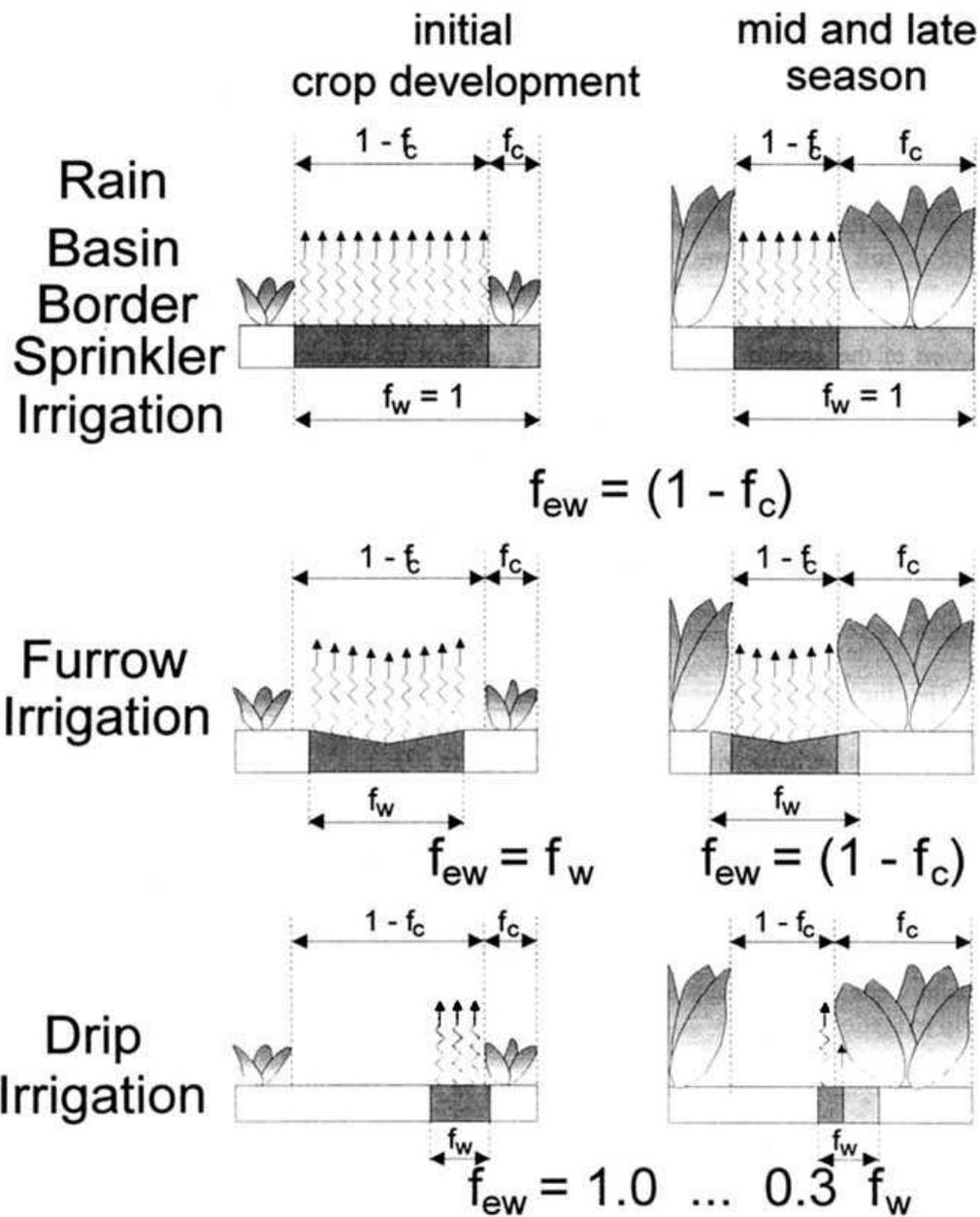


FIGURA 39. Determinação da variável f_{ew} (áreas expostas) como uma função da fração do solo coberto (f_c) e a fração da superfície umedecida (f_w)

TABELA 20. Valores médios da fração da superfície do solo f_w umedecido por irrigação ou precipitação

Evento de umedecimento	f_w
Precipitação	1.0
Irrigação por aspersão	1.0
Irrigação por bacia	1.0
Irrigação por inundação	1.0

Irrigação por sulco (todos sulcos), estrito	0.6...1.0
Irrigação por sulco (todos sulcos), largo	0.4... 0.6
Irrigação por sulco (sulcos alternados)	0.3...0.5
Irrigação por gotejamento	0.3... 0.4

Alternativamente, em cada dia da aplicação, as seguintes regras podem ser aplicadas para determinar f_w para esse e dias subsequentes de uma maneira mais simplificada:

- Superfície é umedecida por irrigação e chuva: f_w é o f_w para o sistema de irrigação;
- Superfície é umedecida através de irrigação: f_w é o f_w para o sistema de irrigação;
- Superfície é umedecida através de chuva significativa (i.e., > 3 a 4 mm) sem irrigação: $f_w = 1$;
- Quando não existe nem irrigação nem precipitação significativa: f_w é o f_w do dia anterior.

1 - f_c : fração do solo exposto

A fração da superfície do solo que é coberta pela vegetação é chamada de f_c . Então, (1 - f_c) representa a fração do solo que é exposta à luz solar e ao vento e é o local onde ocorre a maior parte da evaporação do solo úmido. O valor para f_c é limitado para < 0.99 . O usuário deveria assumir valores apropriados para os vários estádios do crescimento da cultura. Valores típicos para f_c e (1 - f_c) é determinado na Tabela 21.

TABELA 21. Valores médios da fração coberta por vegetação (f_c) e exposta pela luz do sol (1 - f_c)

Estádio de crescimento da cultura	f_c	1 - f_c
Estádio inicial	0.0 - 0.1	1.0 - 0.9
Estádio de desenvolvimento	0.1 - 0.8	0.9 - 0.2
Estádio intermediário	0.8 - 1.0	0.2 - 0.0
Estádio final	0.8 - 0.2	0.2 - 0.8

Onde f_c não é medido, pode ser calculado usando a relação:

$$f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{c\min}}{K_{c\max} - K_{c\min}} \right)^{(1+0.5h)} \quad (76)$$

onde

f_c = fração efetiva da superfície do solo coberta por vegetação [0 - 0.99],

K_{cb} = valor do coeficiente de cultura basal para o dia particular ou estágio,

$K_{c\min}$ = K_c mínimo para solo seco e sem cobertura do solo [\approx 0.15 - 0.20],

$K_{c\max}$ = K_c máximo imediatamente após um evento de molhamento (Equação 72),

h = altura média da planta [m].

Esta equação deveria ser usada com precaução e deveria ser validada com observações de campo. O $K_{c\min}$ é o coeficiente de cultura mínimo para solo seco e nu quando a transpiração e evaporação do solo estão próximas dos níveis básicos (difusivo). $K_{c\min}$ são recomendados \approx 0.15 - 0.20. O valor do $K_{c\min}$ é uma parte integrante de todos os coeficientes de K_{cb} . $K_{c\min}$ ordinariamente tem o mesmo valor do $K_{cb_{ini}}$ usado para culturas anuais sob condições de solo quase nu (0.15 - 0.20).

A Equação 76 assume que o valor para K_{cb} é muito afetado pela fração da superfície do solo coberta por vegetação. Esta é uma suposição boa para a maioria das culturas e condições. O expoente “1 + 0.5h” na equação representa o efeito da altura da planta em sombrear a superfície do solo e aumentando o valor do K_{cb} dado um valor específico para f_c . O usuário deveria limitar a diferença $K_{cb} - K_{c\min}$ para ≥ 0.01 para estabilidade numérica. O valor para f_c mudará diariamente com as mudanças de K_{cb} . Então, a equação acima é aplicada diariamente.

Aplicação da Equação 76 estima aquelas diminuições de f_c durante o período do estágio final em proporção a K_{cb} , embora o solo possa permanecer coberto com vegetação senescendo. Esta estimativa ajuda responder pelo transporte local de calor sensível de senescência deixa à superfície de solo abaixo.

EXEMPLO 32. Cálculo do coeficiente ($K_{cb} + K_e$) sob irrigação por aspersão

Um campo com cultura de algodão irrigado por aspersão. O K_{cb} para um dia específico (durante o período de desenvolvimento) foi estimado utilizando a Tabela 17 e Eq. 70 e então interpolado para a curva K_{cb} como 0.9. A $ET_o = 7$ mm/dia, $u_2 = 3$ m/s e $RH_{\min} = 20\%$. Estimar o coeficiente de cultura ($K_{cb} + K_e$).

Assumindo $h = 1$ m, pela Eq. 72, $K_{c\max}$ para um clima árido é:

$$K_{c\max} = \max \left\{ \left\{ 1.2 + [0.04(3-2) - 0.004(20-45)] \left(\frac{1}{3} \right)^{0.3} \right\}, \{0.9 + 0.05\} \right\} = 1.30$$

Pela Eq. 76, onde $K_{c\min} = 0.15$:

$$f_c = [(K_{cb} - K_{c\min}) / (K_{c\max} - K_{c\min})]^{(1+0.5h)} = [(0.9-0.15) / (1.3-0.15)]^{(1+0.5(1))} = 0.53.$$

Como a cultura foi irrigada por aspersão, $f_w = 1.0$ e pela Eq. 75:

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) = \min(1 - 0.53, 1.0) = 0.47.$$

Assumindo que a irrigação foi suficiente para elevar a capacidade de campo à camada que evapora da superfície do solo, de forma que $K_r = 1$, evaporação se encontra no estágio 1.

$$\text{Pela Eq. 71: } K_e = 1.00 (1.30 - 0.90) = 0.40$$

O valor é comparado com o limite mais elevado $f_{ew} K_{c\max}$ para assegurar deste modo menos que o limite superior:

$f_{ew} K_{c\max} = 0.47 (1.30) = 0.61$, o qual é maior do que o valor para K_e . Então, o valor para K_e pode ser usado como não limitação.

O K_c total para a cultura, assumindo uma umidade de não estresse devido ao perfil de solo seco, é

$$K_c = K_{cb} + K_e = 0.9 + 0.40 = 1.30.$$

Este valor é grande porque a superfície do solo está muito úmida, a cultura tem uma superfície rugosa maior quando comparada com a cultura de referência grama, e o clima árido ($u_2 = 3$ m/s e $RH_{\min} = 20\%$). Nesta situação, aconteceu de K_c ser igual a $K_{c\max}$, a cultura foi bem irrigada por aspersão.

EXEMPLO 33. Cálculo do coeficiente ($K_{cb} + K_e$) sob irrigação por sulco

A cultura do algodão do exemplo anterior (Ex. 32) foi irrigada por irrigação por sulco alternado substituindo a irrigação por aspersão, e a fração da superfície do solo umedecido pela irrigação é 0.3.

A f_{ew} neste caso foi calculada pela Eq. 75 como:

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) = \min(1 - 0.53, 0.3) = 0.3.$$

Assumindo que a irrigação foi suficiente para elevar a fração f_{ew} da camada superficial do solo até a capacidade do campo, de forma que $K_r = 1$, evaporação no estágio 1.

$$\text{Pela Eq. 71: } K_e = 1.00 (1.30 - 0.9) = 0.40$$

O valor é comparado com o limite superior $f_{ew} K_{c\max}$ o qual é $0.30 (1.30) = 0.39$. Porque $0.40 > 0.39$, K_e para a f_{ew} área superficial é constrito em 0.39.

O K_c total para o algodão irrigado por sulco, assumindo que não houve estresse de umidade por causa do solo seco, é $K_c = K_{cb} + K_e = 0.9 + 0.39 = 1.29$. Este valor é essencialmente igual ao exemplo anterior (Ex. 32) porque no cálculo assume que o solo entre os sulcos alternados é a porção que é umedecida pela irrigação, de forma que a maior parte da superfície do solo recebeu um sombreamento da vegetação ou umidade do solo.

EXEMPLO 34. Calcular o coeficiente de cultura ($K_{cb} + K_e$) sob irrigação por gotejamento

A cultura do algodão do exemplo anterior (Ex. 32) foi irrigado por gotejamento, onde os emissores foram instalados embaixo do dossel do algodão. A fração da superfície do solo umedecida pela irrigação é 0.3.

A f_{ew} nesse caso é calculado pela Eq. 75 como $f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w)$. Porque os emissores estão embaixo do dossel da cultura de forma que pouca energia está disponível para evaporação, o valor para f_w é reduzido multiplicando por $1 - (2/3)f_c$, de forma que:

$$f_{ew} = \min[(1 - f_c), (1 - 0.67 f_c) f_w] = \min[(1-0.53), (1 - 0.67(0.53))(0.3)] = 0.19$$

Assumindo que a irrigação foi suficiente para elevar a f_w porção da camada que evapora até a capacidade de campo, de forma que $K_r = 1$, evaporação no estágio 1.

Pela Eq. 71: $K_e = 1.00 (1.30-0.90) = 0.40$.

O valor é comparado com o limite superior $f_{ew} K_{c\max} = 0.19 (1.30) = 0.25$. Porque $0.25 < 0.40$, K_e para a fração f_w da área superficial é limitada pela energia disponível. Então $K_e = 0.25$.

O K_c total para a irrigação por gotejamento, assumindo que não houve estresse devido ao solo seco, é:

$K_c = K_{cb} + K_e = 0.9 + 0.25 = 1.15$. Este valor de K_c é menor do que os valores da irrigação por aspersão e superfície (Exemplos 32 e 33).

Cálculo diário de K_e

Balço de água diário

A estimação do K_e no procedimento de cálculo requer uma computação do balanço de água diária para a camada superficial do solo para o cálculo da evaporação cumulativa ou depleção da condição molhada. A equação do balanço diário da água para a fração do solo exposto e umedecido f_{ew} é (Figura 40):

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + T_{ew,i} + DP_{e,i} \quad (77)$$

onde

$D_{e, i-1}$ = lâmina cumulativa de evaporação da fração da superfície do solo exposto e umedecido após seu molhamento completo ao término do dia $i-1$ [mm],

$D_{e, i}$ = lâmina cumulativa de evaporação (depleção) após um molhamento completo da superfície do solo ao término de dia i [mm],

P_i = precipitação no dia i [mm],

RO_i = escoamento superficial para fora da superfície do solo no dia i [mm],

I_i = lâmina de irrigação que infiltra no solo no dia i [mm],

E_i = evaporação no dia i (i.e., $E_i = K_e E_{To}$) [mm],

$T_{ew, i}$ = lâmina de transpiração da fração da camada da superfície do solo exposto e umedecido no dia i [mm],

$D_{Pe, i}$ = perda por percolação profunda da camada de superfície do solo no dia i se o conteúdo de água do solo exceder a capacidade de campo [mm], f_w fração da superfície do solo umedecido por irrigação [0.01 - 1],

f_{ew} = fração do solo exposto e umedecido [0.01 - 1].

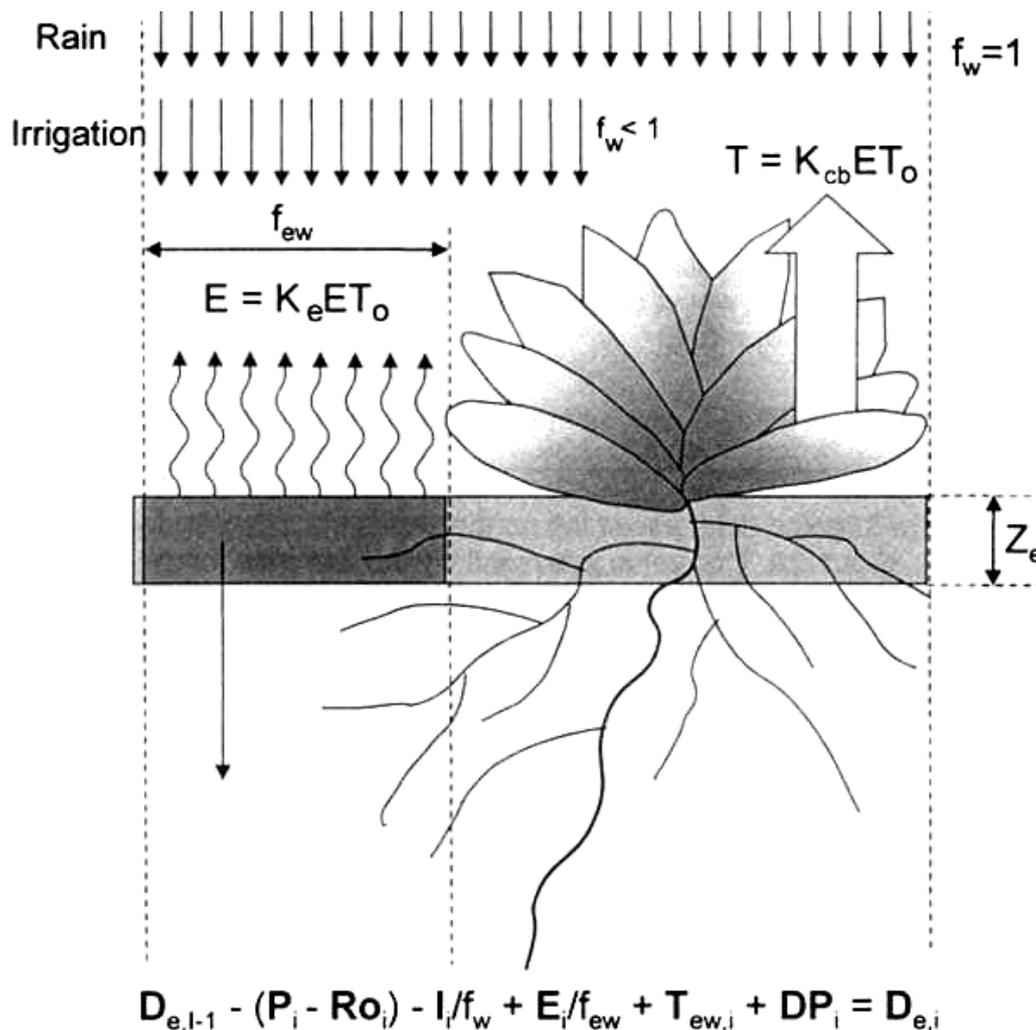


FIGURA 40. Balanço de água na camada superficial do solo

Limites em $D_{e, i}$

Assumindo que a superfície do solo está na capacidade de campo após uma chuva pesada ou irrigação, o valor mínimo para a depleção $D_{e, i}$ é zero. Como a superfície do solo seca, $D_{e, i}$ aumenta e na ausência de qualquer evento de molhamento alcançará continuamente

seu valor máximo TEW (Equação 73). Nesse momento nenhuma água permanece para evaporação na camada superior do solo, K_r se torna zero, e o valor para $D_{e,i}$ permanece a TEW até a superfície do solo ser uma vez mais umedecido. Os limites impostos no $D_{e,i}$ são por conseguinte:

$$0 \leq D_{e,i} \leq TEW \quad (78)$$

Depleção inicial

Para iniciar o balanço de água na camada que estava evaporando, pode assumir o usuário que a superfície do solo está próximo da capacidade de campo após uma chuva pesada ou irrigação, i.e., $D_{e,i-1} = 0$. Onde um longo período de tempo decorreu do último evento de molhamento, o usuário pode assumir que toda a água de evaporação foi esvaziada da camada de evaporação no começo de cálculos, i.e., $D_{e,i-1} = TEW = 1000 (\theta_{FC} - 0.5 \theta_{WP}) Z_e$.

Precipitação e escoamento superficial

P_i é equivalente à precipitação diária. Precipitação diária na quantidade menor do que aproximadamente 0.2 ETo normalmente é evaporado completamente e pode ser ignorado no K_e e nos cálculos do balanço de água. A quantidade de chuva perdida por escoamento superficial depende de: intensidade da chuva; declividade do solo; tipo do solo, suas condições hidráulicas, conteúdo de umidade anterior; e da cobertura do solo. Pode ser assumido que RO_i é zero para situações gerais, ou pode ser considerada somente uma certa porcentagem de P_i . Isto é especialmente verdade para o balanço de água da camada de superfície do solo, como quase todos eventos de precipitação que teriam grandes intensidades ou lâminas para causar escoamento superficial o conteúdo de água da camada da superfície do solo elevaria provavelmente a capacidade de campo. Então, o impacto do componente de escoamento superficial pode ser ignorado. Eventos de precipitação leve geralmente terão pequeno ou nenhum escoamento superficial.

Irrigação

Ii geralmente é expresso como uma lâmina de água que é equivalente à lâmina de irrigação infiltrada média distribuída no campo inteiro. Então, o valor I_i/f_w é usado para descrever a concentração real do volume de irrigação em cima da fração do solo que é umedecido (Figura 31).

Evaporação

É assumido que a evaporação em baixo do dossel da vegetação está incluída no K_{cb} e não é quantificada então explicitamente. A evaporação estimada se concentra completamente no solo exposto, superfície do solo umedecida. A evaporação E_i é determinada por $K_e E_{To}$. O E_i/f_{ew} estima a concentração real da evaporação sob a fração do solo que é exposto e umedecido.

Transpiração

Com exceção da cultura com o sistema radicular raso (i.e., onde a lâmina máxima na zona radicular é < 0.5 a 0.6 m), a quantidade de transpiração da camada do solo que evapora é pequena e pode ser ignorada (i.e., $T_{ew} = 0$). Além disso, para culturas em fila, a maior parte da água extraída pelas raízes pode ser sob o dossel da vegetação. Então, T_{ew} da fração f_{ew} da superfície do solo pode ser assumido igual a zero nestes casos.

EXEMPLO 35. Estimação da evapotranspiração da cultura com a aproximação do coeficiente de cultura duplo

Estimativa da evapotranspiração, ET_c , para dez dias sucessivos. Supondo que:

- o solo é um pouco arenoso, caracterizado por $\theta_{FC} = 0.23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $\theta_{WP} = 0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$,
- a profundidade da camada superficial do solo sujeito ao secamento devido a evapotranspiração, Z_e , é 0.1 m,
- durante o período, a altura da cultura era $h = 0.30$ m, a velocidade do vento médio $u_2 = 1.6 \text{ m s}^{-1}$, e $RH_{\min} = 35\%$,
- o K_{cb} no dia 1 é 0.30 e aumentou para 0.40 no dia 10,
- a fração do solo exposto, $(1 - f_c)$, decresceu de 0.92 no dia 1 para 0.86 no dia 10,
- ocorreu toda evaporação da água de depleção da camada de evaporação do solo no começo do cálculo ($D_{e, i-1} = TEW$),
- foi feita uma irrigação no começo do dia 1 ($I = 40$ mm), e a fração da superfície umedecida pela

irrigação foi, $f_w = 0.8$,

- a chuva de 6 mm ocorreu no começo do dia 6.

Pela Tab. 19

$REW \approx 8 \text{ mm}$

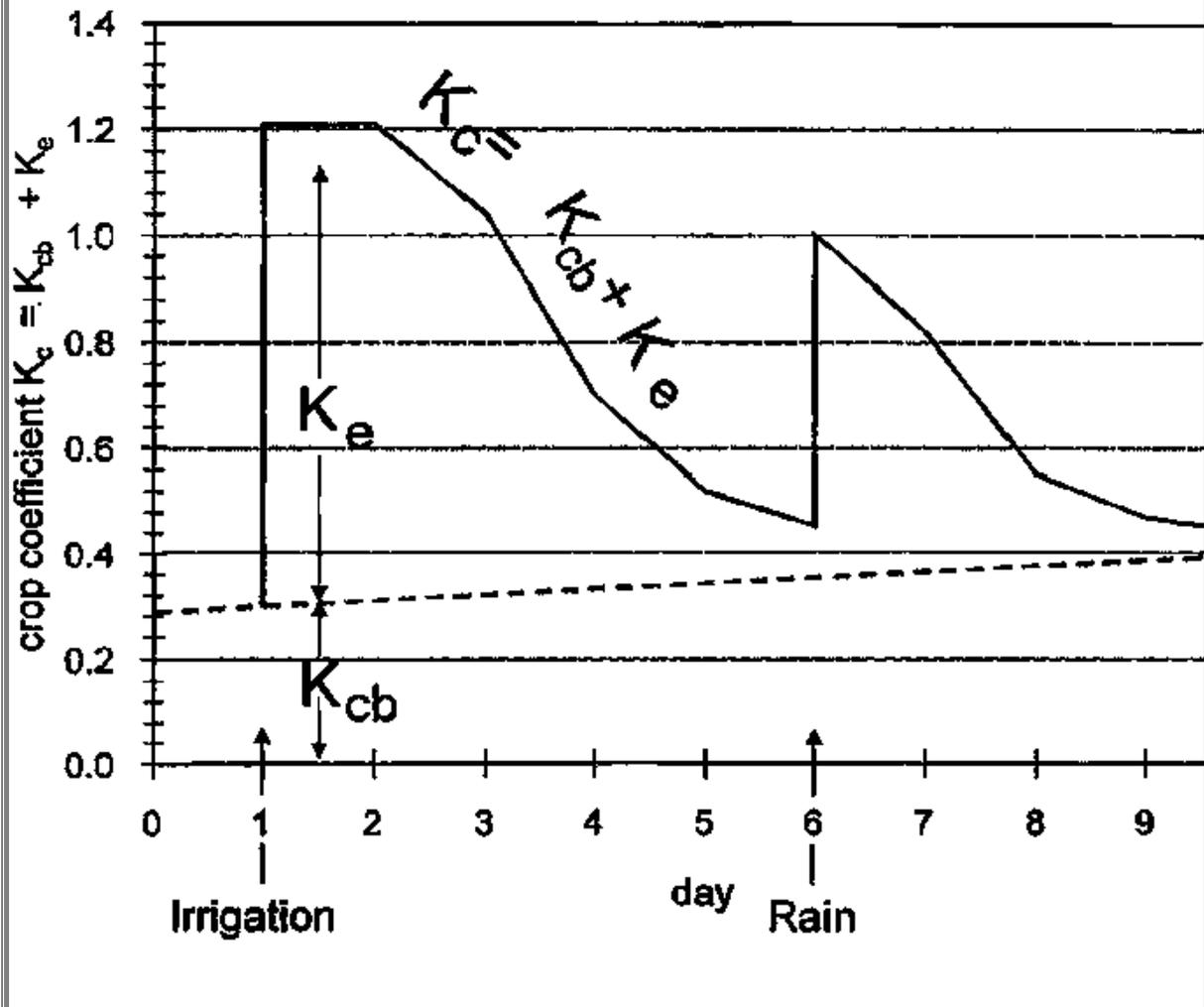
Pela Eq. 73

$TEW = 1000 (0.23 - 0.5(0.10)) 0.1 = 18 \text{ mm}$

Pela Eq. 72

$K_{c \text{ max}} = 1.2 + [0.04(1.6 - 2) - 0.004(35 - 45)] (0.3/3)^{0.3} = 1.21$

Toda água evaporada que foi usada na depleção no começo do cálculo, $D_{e, i-1} = TEW = 18 \text{ mm}$



(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
Dia	ET_o	P-RO	I/f_w	$1 - f_c$	f_w	f_{ew}	K_{cb}	$D_{e, \text{start}}$	K_r	K_e	E/f_{ew}	DP_e	$D_{e, \text{end}}$	E	K_c	ET_c
	mm/d	mm	mm					mm			mm	mm	mm	mm/d		mm/d
start	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	-	-	-
1	4.5	0	50	0.92	0.8	0.80	0.30	0	1.00	0.91	5.1	32	5	4.1	1.21	5.5

2	5.0	0	0	0.91	0.8	0.80	0.31	5	1.00	0.90	5.6	0	11	4.5	1.21	6.1
3	3.9	0	0	0.91	0.8	0.80	0.32	11	0.70	0.62	3.0	0	14	2.8	1.04	4.0
4	4.2	0	0	0.90	0.8	0.80	0.33	14	0.40	0.35	1.8	0	16	1.5	0.70	2.9
5	4.8	0	0	0.89	0.8	0.80	0.34	16	0.20	0.18	1.1	0	17	0.8	0.52	2.5
6	2.7	6	0	0.89	1	0.89	0.36	11	0.75	0.64	2.0	0	13	1.7	1.00	2.7
7	5.8	0	0	0.88	1	0.88	0.37	13	0.53	0.45	3.0	0	16	2.6	0.82	4.7
8	5.1	0	0	0.87	1	0.87	0.38	16	0.20	0.17	1.0	0	17	0.9	0.55	2.8
9	4.7	0	0	0.87	1	0.87	0.39	17	0.09	0.08	0.4	0	18	0.4	0.47	2.2
10	5.2	0	0	0.86	1	0.86	0.40	18	0.05	0.04	0.2	0	18	0.2	0.44	2.3

(1) número do dia.

(2) E_{T0} é determinado. Note que E_{T0} seria valores de previsão no tempo real da irrigação programada mas busca valores conhecidos da ocorrência diária, durante uma atualização dos cálculos.

(3) (P-RO) busca valores conhecidos da ocorrência diária, durante uma atualização dos cálculos.

(4) profundidade da irrigação líquida para a parte da superfície do solo umedecida através da irrigação.

(5) $(1 - f_c)$ é determinado (interpolação entre 0.92 m no dia 1 e 0.86 m no dia 10).

(6) se chuva significativa: $f_{w,i} = 1.0$ (Tab. 20)

Se irrigação: $f_{w,i} = 0.8$ (determinado),

caso contrário: $f_{w,i} = f_{w,i-1}$.

(7) Eq. 75. Fração da superfície do solo da qual a maioria da evaporação acontece.

(8) K_{cb} é determinado (interpolação entre 0.30 no dia 1 e 0.40 no dia 10).

(9) $D_{e,i}$ começo (começo da depleção do dia)

Se ocorrer precipitação e irrigação de manhã cedo no dia o estado da depleção da camada da superfície do solo (ao começo do dia) deveria ser atualizado:

$$= \text{Max}(D_{e,i-1} - I_{n,i}/f_{wi} - (P-RO)_i, \text{ ou } 0).$$

onde $D_{e,i-1}$ vem da coluna 14 do dia anterior.

Se ocorrer precipitação e irrigação de tarde no dia, então a coluna 6 deveria ser fixada igual à $D_{e,i-1}$ (coluna 14 do dia anterior).

(10) se $D_{e,i} \leq \text{REW Kr} = 1$

Se $D_{e,i} > REW$ $K_r = Eq. 74.$

(11) Eq. 71 onde $K_e = K_r (K_{c_{max}} - K_{cb}) \leq K_{c_{max}}$. (por exemplo, $K_e = \min (K_r (K_{c_{max}} - K_{cb}), f_{ew} K_{c_{max}})$).

(12) evaporação da fração exposta e umedecida da superfície do solo = $(K_e ETo)/f_{ew}$.

(13) Eq. 79 onde $DP_e \geq 0$. (Esta é a infiltração profunda da camada evaporante).

(14) $D_{e,i}$ (depleção no fim do dia) é a Eq. 77 onde $D_{e,i-1}$ é o valor da coluna 14 do dia anterior.

(15) evaporação média expressa como distribuiu em cima da superfície do campo inteiro = $K_e ETo$.

(16) $K_c = K_{cb} + K_e$.

(17) Eq.69.

O cálculo do balanço de água diário para a camada da superfície, até mesmo para culturas com raiz rasa, não é normalmente sensível a T_{ew} , como T_{ew} é uma parte secundária do fluxo da lâmina Z_e durante os primeiros 3-5 dias após um evento de molhamento. Então, T_{ew} geralmente pode ser ignorado. Podem ser respondidos os efeitos da redução do conteúdo de água da camada de solo que evaporou devido a T_{ew} posteriormente quando é assumido que $T_{ew} = 0$ diminuindo o valor por Z_e , por exemplo de 0.15 a 0.12 m ou de 0.10 a 0.08 m.

Infiltração profunda

Após uma chuva pesada ou irrigação, o conteúdo de água no solo da camada superficial (camada Z_e) poderia exceder a capacidade de campo. Porém, neste procedimento simples é assumido que o conteúdo de água de solo está na θ_{FC} após um evento de molhamento completo quase imediatamente, de forma que a depleção $D_{e,i}$ na Equação 77 é zero. Após uma chuva pesada ou irrigação, drenagem (infiltração) da água da camada da superfície do solo é calculado como:

$$DP_{e,i} = (P_i - RO_i) + \frac{I_i}{f_{ww}} - D_{e,i-1} \geq 0 \quad (79)$$

Contanto que o conteúdo de água do solo na camada de evaporação esteja abaixo da capacidade de campo (i.e., $D_{e,i} > 0$), o solo não escoará e $DP_{e,i} = 0$.

Ordem de cálculo

Fazendo cálculos para o procedimento $K_{cb} + K_e$, por exemplo quando usando uma planilha eletrônica, os cálculos deveriam proceder na ordem seguinte: K_{cb} , h , $K_c \max$, f_c , f_w , f_{ew} , K_r , K_e , E , DPe , De , I , K_c , e ET_c .

Calculando ET_c

O procedimento de cálculo se aplica com a utilização de um computador, ou na forma de planilha eletrônicas (Exemplo 35) ou na forma de programar estruturar idiomas. O procedimento de cálculo consiste determinando:

a. Evapotranspiração de Referência, ET_o ,:

Estimativa ET_o : o procedimento é determinado no Capítulo 4.

b. Estádios de Crescimento:

Determine as durações localmente ajustadas das quatro fases de crescimento (para informação geral consulte Tabela 11):

- Fase de crescimento inicial: L_{ini} ,
- Fase de desenvolvimento da cultura: L_{dev} ,
- Fase de meio-estação (intermediário): L_{meio} ,
- Fase final: L_{final} .

c. Coeficiente de cultura basal, K_{cb} ,:

Calcule coeficientes de cultura basais durante cada dia do estágio de crescimento:

- selecionar $K_{cb_{ini}}$, $K_{cb_{meio}}$ e $K_{cb_{final}}$ da Tabela 17;
- ajuste $K_{cb_{meio}}$ e $K_{cb_{final}}$ às condições climáticas locais (Equação 70);
- determine os valores de K_{cb} diários
- estágio inicial de crescimento: $K_{cb} = K_{cb_{ini}}$,
- estágio de desenvolvimento: de $K_{cb_{ini}}$ para $K_{cb_{meio}}$ (Equação 66),
- estágio intermediário: $K_{cb} = K_{cb_{meio}}$,
- estágio final: de $K_{cb_{meio}}$ a $K_{cb_{final}}$ (Equação 66).

d. Coeficiente de evaporação, K_e :

Calcule o valor máximo de K_c , i.e., o limite superior $K_{c_{max}}$ (Equação 72), e Determinar durante cada dia do período de crescimento:

- a fração do solo coberta por vegetação, f_c (Tabela 21 ou Equação 76),
- a fração da superfície do solo umedecido por irrigação ou precipitação, f_w (Tabela 20),
- a fração da superfície do solo da qual a maior evaporação acontece, f_{ew} (Equação 75),
- a depleção cumulativa da camada do solo que evapora, D_e , determinado por meio de um balanço de água diário da superfície do solo (Equação 77),
- o coeficiente de redução de evaporação correspondente, K_r (Equação 74), e
- o coeficiente de evaporação de solo, K_e (Equação 71).

e. Evapotranspiração da cultura, ET_c :

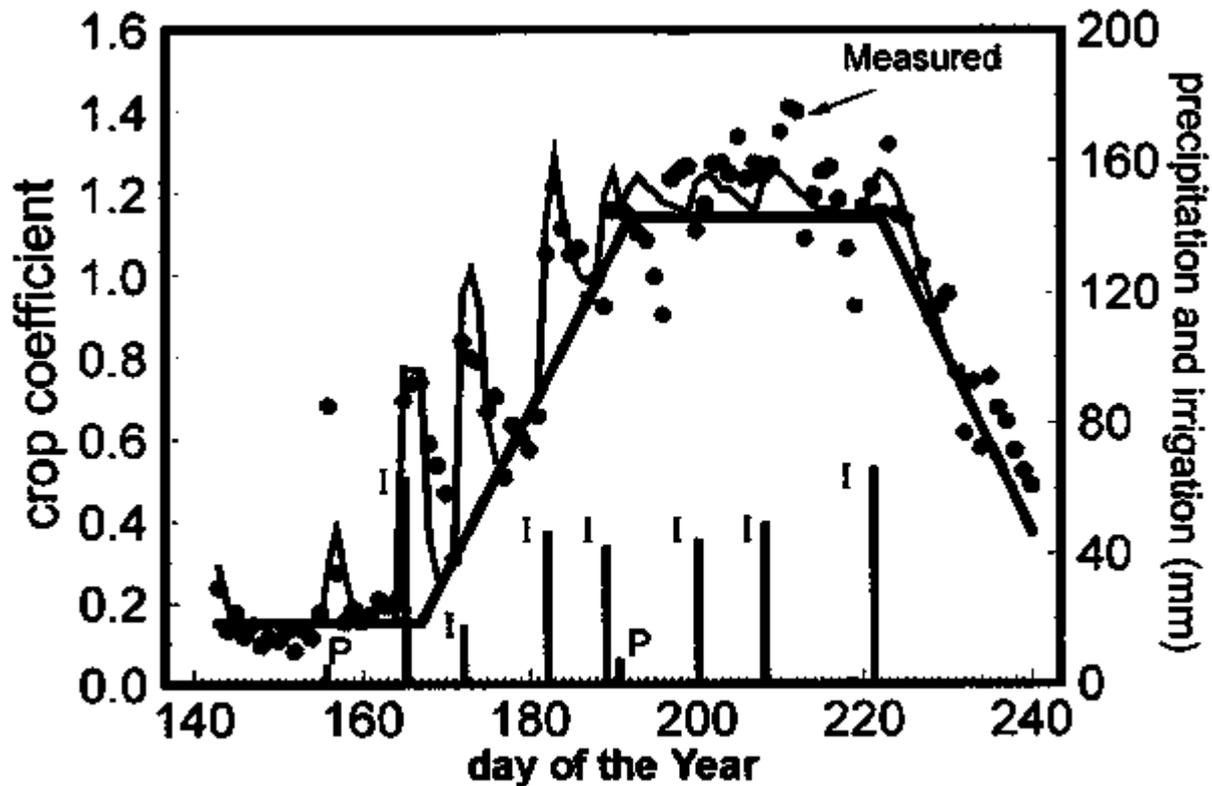
Calcule $ET_c = (K_{cb} + K_e) ETo$ (Equação 69).

BOX 16. Case study of dry bean crop at Kimberly, Idaho, the United States (dual crop coefficient)

Results from applying the $K_{cb} + K_e$ procedure for a snap bean crop harvested as dry seed are shown in the figure below. This example uses the same data set that was used in the case study of Box 15. The measured ET_c data were measured using a precision lysimeter system at Kimberly, Idaho. Values for $K_{cb_{ini}}$, $K_{cb_{mid}}$, and $K_{cb_{end}}$ were calculated in Example 29 as 0.15, 1.14, and 0.25. The lengths of growth stages were 25, 25, 30, and 20 days. The K_{cb} values are plotted in Fig. 37. The value for $K_{c_{max}}$ from Eq. 72 for the mid-season period averaged 1.24, based on $u_2 = 2.2$ m/s and $RH_{min} = 30\%$ for Kimberly. The soil at Kimberly was a silt loam texture. Assuming that the depth of the evaporation soil layer, Z_e , was 0.1 m, values for $TEW = 22$ mm and $REW = 9$ mm, based on Eq. 73 and using soil data from Table 19.

The occurrence and magnitudes of individual wetting events are shown in the figure below. Nearly all wetting events were from irrigation. Because the irrigation was by furrow irrigation of alternate rows, the value for f_w was set equal to 0.5. Irrigation events occurred at about midday or during early afternoon.

The agreement between the estimated values for daily $K_{cb} + K_e$ (thin continuous line) and actual 24-hour measurements (symbols) is relatively good. Measured and predicted $K_{cb} + K_e$ was higher following wetting by rainfall or irrigation, as expected. The two wet soil evaporation 'spikes' occurring during the late initial period and early development period (between days 160 and 180) were less than $K_{c_{max}}$, because this evaporation was from wetting by furrow irrigation where $f_w = 0.5$. The value for f_{ew} was constrained to f_w by Eq. 75 during these two events, because during this period, $f_w < 1 - f_c$. Therefore, less than all of the 'potential energy' was converted into evaporation due to the limitation on maximum evaporation per unit surface area that was imposed by Eq. 71.



Measured (symbols) and predicted (thin line) daily coefficients ($K_{cb} + K_e$) and the basal crop curve (thick line) for a dry bean crop at Kimberly, Idaho. P in the figure denotes a precipitation event and I denotes an irrigation (data from Wright, 1990).

Parte C - evapotranspiração de Cultura sob de condições de não padrão

Em campos bem-administrados, as condições padrão são geralmente as condições de campo atuais. O Etc calculou por meio dos procedimentos descritos em parte B é o evapotranspiração de cultura sob das condições de campo padrão.

Onde as condições encontraram no campo difira das condições padrão, uma correção em Etc é requerido. Baixa fertilidade de solo, toxicity salgado, water logging de solo, pestes, doenças e a presença de horizontes de solo duros ou impenetráveis na zona de raiz podem resultar em crescimento de planta escasso e mais baixo evapotranspiração. Escassez de água de solo e salinidade de solo podem reduzir absorção de água do solo e evapotranspiração de cultura de limite. O evapotranspiração de pequeno isolado se levanta de plantas ou de campos onde duas culturas diferentes são junto crescidas ou onde são usados mulches para reduzir evaporação também pode divergir do evapotranspiração de cultura sob de condições de padrão.

Esta parte discute o efeito em ET de administração e condições ambientais que divergem das condições padrão. Os efeitos ambientais são descritos introduzindo coeficientes de tensão e ajustando K_c para as condições de campo.

Anexo 8. exemplo de Cálculo por aplicar o procedimento de K_c duplo em planificação de irrigação

Este anexo ilustra em mais detalhe a aplicação das várias equações por calcular K_{cb} , K_e e Etc usando o K_c duplo aproximam de Capítulo 7. O exemplo está na forma de uma planilha eletrônica de computador e é aplicado à colheita de feijão seca, comestível que era usado em exemplo emba 15 e 16 de Capítulos 6 e 7. A planilha eletrônica é mostrada em Figura 8.1, onde o horário de irrigação é determinado usando o procedimento de balanço de solo-água diário descrito em Capítulo 8. O turno de irrigações é baseado na administração permitiu depleção (MAD) da água disponível que pode ser armazenada na zona de raiz. O horário de irrigação e a evaporação de solo molhada calculada correspondendo são diferentes dos valores atuais mostrados em Caixa 16 de Capítulo 7, desde então Embale 16 representa o horário de irrigação atual usado a Kimberly durante 1974. O horário atual divergiu um pouco do horário teórico de Figura 8.1.

São indicadas as fórmulas de planilha eletrônica usadas para cálculos e as referências a equações no texto em Caixa 8.1. Os nomes variáveis usados para parâmetros seguem a mesma convenção usada em Capítulos 1 a 9. Os nomes variáveis são definidos na Lista de símbolos principais e abreviações na introdução para este artigo. São definidas algumas exceções em Tabela 8.1.

A planilha eletrônica em Figura 8.1 inclui colunas para variáveis T_{max} , u_2 e T_{dew} . São usadas o T_{max} e colunas de T_{dew} para calcular RH_{min} diário. São usadas os u_2 e colunas de RH_{min} para ajustar K_{cb} meio e K_{cb} final usando Equação 70 de Capítulo 7 e calcular max de K_c que usa Equação 72 diariamente. Os dados nas primeiras 7 filas de Figura 8.1 isso aparece dentro de caixas represente a colheita específica e informação de solos nas que são entradas pelo usuário para uma colheita particular e combinação de solo. Toda a outra informação (fora de caixas) é calculado automaticamente pelo programa de planilha eletrônica. As colunas que têm títulos sublinhados dobro representam os dados que são introduzem pelo usuário na planilha eletrônica.

Podem ser usados os cálculos em Figura 8.1 para verificar outro computador programa ou cálculos de planilha eletrônica para K_e , K_c e etc. diferenças Pequenas podem resultar e podem depender das suposições de cronometrar de irrigações. A planilha eletrônica de Figura 8.1 presume que toda a irrigação e eventos de precipitação acontecem cedo de manhã. A planificação e magnitudes de irrigações estão baseado na depleção de água de solo ao término do dia anterior. A planilha eletrônica também presume que toda a drenagem da zona de raiz devido à precipitação de excesso acontece no dia do evento de precipitação. É assumido que escoamento superficial de precipitação é zero. Se necessário, podem ser entrados em procedimentos por estimar escoamento superficial de precipitação na planilha eletrônica que usa procedimentos descrita em a maioria dos livros de ensino de hidrologia padrão. É assumido que a profundidade líquida de irrigação que é retida na zona de raiz de colheita é precisamente igual à profundidade de depleção do dia anterior. Esta suposição presume conhecimento perfeito de depleção de água de solo pelo irrigator ou que todas as irrigações são adequadas ou excessivas. Esta suposição pode não segurar para alguma irrigação condiciona e pode ser mudado pelo usuário como precisou.

Fórmulas de planilha eletrônica criavam a planilha eletrônica de Figura 8.1 é listado em Caixa 8.1 para a Microsoft Excel idioma (versões 5 e mais alto). Formulae para outros tipos de planilha eletrônicas seria semelhante. Formulae para o Corel Quattro-a favor de idioma (versões 5 e mais alto) pode ser carregado do FAO internet local.

Parte C - Evapotranspiração da Cultura sob condições não padrão

Em campos bem manejados, as condições padrão são geralmente as condições de campo reais. A Etc estimada por meio dos procedimentos descritos na parte B é a evapotranspiração da cultura sob condições de campo padrão.

Onde as condições encontradas no campo difiram das condições padrão, uma correção na Etc é requerida. Baixa fertilidade do solo, salinidade, baixa umidade do solo, pragas, doenças e a presença de horizontes de solo duros ou impenetráveis na zona radicular podem resultar numa redução do crescimento da planta e menor evapotranspiração. Quantidade reduzida de água no solo e salinidade pode reduzir o transporte de água do solo para a cultura e limitar a evapotranspiração. A evapotranspiração de stand pequeno isolado de plantas ou de campos onde duas culturas diferentes são crescidas junta ou onde são usadas coberturas

mortas para reduzir a evaporação também pode divergir da evapotranspiração da cultura sob condições padrão.

Esta parte discute o efeito na ET do manejo e condições ambientais que divergem das condições padrão. Os efeitos ambientais são descritos introduzindo coeficientes de estresse e ajustando K_c para as condições de campo.

Capítulo 8 - Etc sob condições de estresse da água no solo

Forças que agem na diminuição da água do solo na sua energia potencial e torna esta menos disponível para extração radicular da planta. Quando o solo está com umidade, a água tem uma energia potencial alta, é relativamente livre para mover e é levada facilmente para a parte aérea pelas raízes da planta. Em solos secos, a água tem uma baixa energia potencial e é fortemente retida pelo vaso capilar e forças de absorção à matriz de solo, e é menos extraída facilmente pela cultura.

Quando a energia potencial da água do solo está abaixo de um valor crítico, é dito que a cultura está com estresse de água. Os efeitos do estresse de água no solo são descritos multiplicando o coeficiente de cultura basal (K_{cb}) pelo coeficiente de estresse de água, K_s :

$$Etc\ adj = (K_s K_{cb} + K_e) ETo \quad (80)$$

Para condições de água no solo limitante, $K_s < 1$. Onde não existe nenhum estresse de água no solo, $K_s = 1$.

K_s descreve o efeito do estresse de água na transpiração da cultura. Onde o único coeficiente de cultura é usado, o efeito de estresse de água está incorporado no K_c como:

$$Etc\ adj = K_s K_c ETo \quad (81)$$

Porque o coeficiente de estresse de água (K_s) reflete preferencialmente somente o impacto na transpiração da cultura do que a evaporação do solo, então a aplicação do K_s utilizado na Equação 80 é geralmente mais válida do que a sua aplicação na Equação 81. Porém, em situações onde a evaporação do solo não é um componente grande na Etc, o uso da Equação 81 fornecerá resultados razoáveis.

Disponibilidade de água do solo

Água disponível total (TAW)

Disponibilidade de água do solo se refere à capacidade de um solo para reter água disponível para plantas. Depois de uma chuva ou irrigação pesada, o solo drenará até a capacidade de campo ser alcançada. Capacidade de campo é a quantidade de água que um solo bem drenado deveria reter contra as forças gravitacionais, ou a quantidade de água que permanece no solo quando a drenagem rápida diminuiu notadamente. Na ausência de abastecimento de água, o conteúdo de água na zona radicular diminuirá como resultado da extração de água pela cultura. Com a extração da água progressivamente, a água restante é aderida às partículas do solo com maior força, a baixa energia potencial e isto tornam mais difícil para a planta extrair água do solo. Eventualmente, um ponto é alcançado onde a cultura já não pode mais extrair a água restante. A extração de água do solo se torna zero quando o ponto de murchamento é alcançado. O ponto de murchamento é o conteúdo de água ao qual as plantas murcharão permanentemente.

Como o conteúdo de água não pode ser armazenado acima da capacidade de campo contra as forças gravitacionais e drenará e como o conteúdo de água abaixo do ponto de murchamento não pode ser extraído pelo sistema radicular da planta, a água disponível total na zona radicular está na diferença entre o conteúdo de água na capacidade de campo e o ponto murchamento:

$$TAW = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r \quad (82)$$

onde

TAW = água disponível total na zona radicular [mm],

θ_{FC} = conteúdo de água na capacidade de campo [$m^3 m^{-3}$],

θ_{WP} = conteúdo de água no ponto de murchamento [$m^3 m^{-3}$],

Z_r = profundidade efetiva do sistema radicular [m].

TAW é a quantidade de água máxima que uma cultura pode extrair da sua zona radicular, e sua magnitude depende do tipo de solo e da profundidade efetiva do sistema radicular. São apresentados valores típicos para capacidade de campo e ponto de murchamento na Tabela 19 para várias classes de textura do solo. Valores da profundidade efetiva máxima do sistema radicular para várias culturas são apresentados na Tabela 22.

Água prontamente disponível (RAW)

Embora a água está teoricamente disponível até o ponto de murchamento, a extração de água pela cultura está reduzida à bem antes do ponto de murchamento ser alcançado. Onde

o solo está suficientemente úmido, o solo fornece água muito rapidamente para atender a demanda atmosférica da cultura, e extração de água iguala a Etc. Como a água no solo diminui constantemente, é retida mais fortemente à matriz do solo e mais difícil fica a extração. Quando o conteúdo de água do solo atinge um determinado valor, já não pode ser transportada muito rapidamente das raízes até a parte aérea da cultura para responder à demanda de transpiração e a cultura começa a experimentar o estresse. A fração da TAW que uma cultura pode extrair da zona radicular sem sofrer estresse de água é a água do solo prontamente disponível:

$$RAW = p \text{ TAW} \quad (83)$$

onde

RAW = água do solo prontamente disponível na zona radicular [mm],

p = fração média da Água do Solo Disponível Total (TAW) essa pode ser esvaziada da zona radicular antes do estresse de umidade (redução na ET) varia de [0-1].

São apresentados valores para p na Tabela 22. O fator p difere entre as culturas. O fator p normalmente varia de 0.30 para plantas com sistema radicular pouco profundo e taxas altas de Etc ($> 8 \text{ mm d}^{-1}$) para 0.70 para plantas com sistema radicular profundas e baixas taxas de Etc ($< 3 \text{ mm d}^{-1}$). O valor de 0.50 para p é um valor médio utilizado para muitas culturas.

A fração p é uma função do poder de evaporação da atmosfera. A baixas taxas de Etc, os valores de p apresentados na Tabela 22 são maiores do que as taxas mais altas de Etc. Para condições de clima seco e quente onde Etc é alto, p é de 10-25% menor que os valores apresentados na Tabela 22, e o solo é irrigado quando o estresse começa a acontecer. Quando a evapotranspiração da cultura é baixo, p estará até 20% maior que os valores apresentados. Frequentemente, um valor constante para p é usado para um período específico de crescimento, em vez de ir variando o valor de p diariamente. Uma aproximação numérica para ajustar p para a taxa de ETc é $p = p_{(\text{Tabela 22})} + 0.04 (5 - ETc)$ sendo o p ajustado limitado a $0.1 \leq p \leq 0.8$ e ETc está em mm/dia. A influência do ajuste numérico é mostrada na Figura 41.

TABELA 22. Valores da profundidade efetiva máxima do sistema radicular (Z_r), e da fração de depleção da água do solo para que nenhum estresse ocorra (p), para culturas comuns

Crop	Maximum Depth (m)	Root Depth (m)	Depletion Fraction ² (for ET ≈ 5 mm/day)
a. Small Vegetables			
Broccoli	0.4-0.6		0.45
Brussel Sprouts	0.4-0.6		0.45
Cabbage	0.5-0.8		0.45
Carrots	0.5-1.0		0.35
Cauliflower	0.4-0.7		0.45
Celery	0.3-0.5		0.20
Garlic	0.3-0.5		0.30
Lettuce	0.3-0.5		0.30
Onions			
	- dry	0.3-0.6	0.30
	- green	0.3-0.6	0.30
	- seed	0.3-0.6	0.35
Spinach	0.3-0.5		0.20
Radishes	0.3-0.5		0.30
b. Vegetables - Solarium Family (<i>Solanaceae</i>)			
Egg Plant	0.7-1.2		0.45
Sweet Peppers (bell)	0.5-1.0		0.30
Tomato	0.7-1.5		0.40
c. Vegetables - Cucumber Family (<i>Cucurbitaceae</i>)			
Cantaloupe	0.9-1.5		0.45
Cucumber			
	- Fresh Market	0.7-1.2	0.50
	- Machine harvest	0.7-1.2	0.50
Pumpkin, Winter Squash	1.0-1.5		0.35

Squash, Zucchini	0.6-1.0	0.50
Sweet Melons	0.8-1.5	0.40
Watermelon	0.8-1.5	0.40
d. Roots and Tubers		
Beets, table	0.6-1.0	0.50
Cassava		
- year 1	0.5-0.8	0.35
- year 2	0.7-1.0	0.40
Parsnip	0.5-1.0	0.40
Potato	0.4-0.6	0.35
Sweet Potato	1.0-1.5	0.65
Turnip (and Rutabaga)	0.5-1.0	0.50
Sugar Beet	0.7-1.2	0.55 ³
e. Legumes (<i>Leguminosae</i>)		
Beans, green	0.5-0.7	0.45
Beans, dry and Pulses	0.6-0.9	0.45
Beans, lima, large vines	0.8-1.2	0.45
Chick pea	0.6-1.0	0.50
Fababean (broad bean)		
- Fresh	0.5-0.7	0.45
- Dry/Seed	0.5-0.7	0.45
Grabanzo	0.6-1.0	0.45
Green Gram and Cowpeas	0.6-1.0	0.45
Groundnut (Peanut)	0.5-1.0	0.50
Lentil	0.6-0.8	0.50
Peas		
- Fresh	0.6-1.0	0.35

	- Dry/Seed	0.6-1.0	0.40
Soybeans		0.6-1.3	0.50
f. Perennial Vegetables (with winter dormancy and initially bare or mulched soil)			
Artichokes		0.6-0.9	0.45
Asparagus		1.2-1.8	0.45
Mint		0.4-0.8	0.40
Strawberries		0.2-0.3	0.20
g. Fibre Crops			
Cotton		1.0-1.7	0.65
Flax		1.0-1.5	0.50
Sisal		0.5-1.0	0.80
h. Oil Crops			
Castorbean (<i>Ricinus</i>)		1.0-2.0	0.50
Rapeseed, Canola		1.0-1.5	0.60
Safflower		1.0-2.0	0.60
Sesame		1.0-1.5	0.60
Sunflower		0.8-1.5	0.45
i. Cereals			
Barley		1.0-1.5	0.55
Oats		1.0-1.5	0.55
Spring Wheat		1.0-1.5	0.55
Winter Wheat		1.5-1.8	0.55
Maize, Field (grain) (<i>field corn</i>)		1.0-1.7	0.55
Maize, Sweet (<i>sweet corn</i>)		0.8-1.2	0.50
Millet		1.0-2.0	0.55
Sorghum			
	- grain	1.0-2.0	0.55

	- sweet	1.0-2.0	0.50
Rice		0.5-1.0	0.20 ⁴
j. Forages			
Alfalfa			
	- for hay	1.0-2.0	0.55
	- for seed	1.0-3.0	0.60
Bermuda			
	- for hay	1.0-1.5	0.55
	- Spring crop for seed	1.0-1.5	0.60
Clover hay, Berseem		0.6-0.9	0.50
Rye Grass hay		0.6-1.0	0.60
Sudan Grass hay (annual)		1.0-1.5	0.55
Grazing Pasture			
	- Rotated Grazing	0.5-1.5	0.60
	- Extensive Grazing	0.5-1.5	0.60
Turf grass			
	- cool season ⁵	0.5-1.0	0.40
	- warm season ⁵	0.5-1.0	0.50
k. Sugar Cane		1.2-2.0	0.65
l. Tropical Fruits and Trees			
Banana			
	- 1 st year	0.5-0.9	0.35
	- 2 nd year	0.5-0.9	0.35
Cacao		0.7-1.0	0.30
Coffee		0.9-1.5	0.40
Date Palms		1.5-2.5	0.50
Palm Trees		0.7-1.1	0.65

Pineapple		0.3-0.6	0.50
Rubber Trees		1.0-1.5	0.40
Tea			
	- non-shaded	0.9-1.5	0.40
	- shaded	0.9-1.5	0.45
m. Grapes and Berries			
Berries (bushes)		0.6-1.2	0.50
Grapes			
	- Table or Raisin	1.0-2.0	0.35
	- Wine	1.0-2.0	0.45
Hops		1.0-1.2	0.50
n. Fruit Trees			
Almonds		1.0-2.0	0.40
Apples, Cherries, Pears		1.0-2.0	0.50
Apricots, Peaches, Stone Fruit		1.0-2.0	0.50
Avocado		0.5-1.0	0.70
Citrus			
	- 70% canopy	1.2-1.5	0.50
	- 50% canopy	1.1-1.5	0.50
	- 20% canopy	0.8-1.1	0.50
Conifer Trees		1.0-1.5	0.70
Kiwi		0.7-1.3	0.35
Olives (40 to 60% ground coverage by canopy)		1.2-1.7	0.65
Pistachios		1.0-1.5	0.40
Walnut Orchard		1.7-2.4	0.50

¹os valores maiores para Zr são para solos que não têm camadas adensadas significante ou outras características que podem restringir a profundidade do sistema radicular. Podem ser usados os valores menores para Zr para programar irrigação e os valores maiores por modelar estresse de água do solo ou para condições de chuva (época de chuva).

² os valores para p foram para $ET_c \approx 5$ mm/dia. O valor para p pode ser ajustado para diferente ET_c de acordo com

$$p = p_{\text{Tabela 22}} + 0.04 (5 - ET_c)$$

onde p é expresso como uma fração e ET_c em mm/dia.

³ Besoloba açucareira experimentam freqüentemente recente tarde que murcha em climas áridos iguale a $p < 0.55$, com impacto normalmente só secundário em rendimento de açúcar.

⁴ o valor para p para arroz é 0.20 de saturação.

⁵ variedades de grama de estação frescas incluem bluegrass, ryegrass e fescue. Variedades de estação mornas incluem grama de bermuda, grama de búfalo e St. grama de Augustine. Gramas são variáveis sistema radicular profundidade. Alguns arraigam sob de 1.2 m enquanto outros têm profundidades sistema radicular rasas. As profundidades sistema radicular mais fundas para gramas representam condições onde manejo de água cuidadosa é praticada com depleção mais alta entre irrigações para encorajar a exploração radicular mais funda.

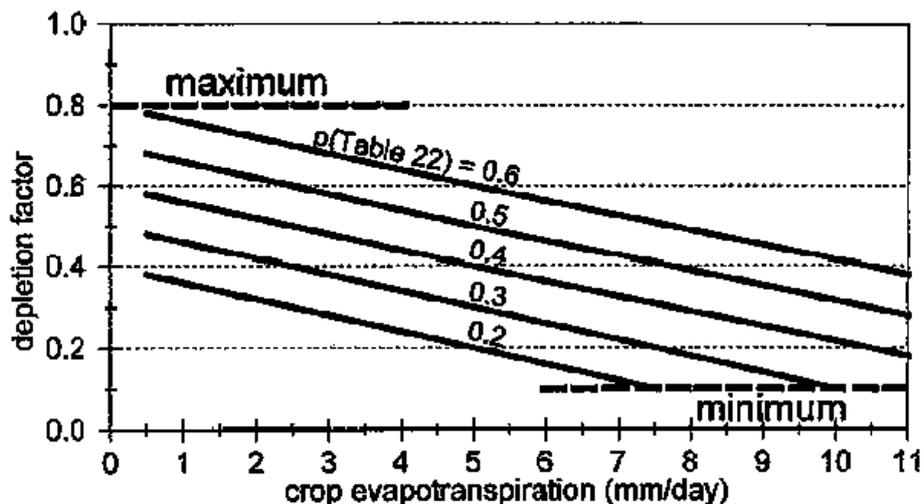


FIGURE 41. Fator de depleção (p) para níveis diferentes de evapotranspiração da cultura

EXEMPLO 36. Determinação de água de solo prontamente disponível para várias culturas e tipos de solo

Estimativa da RAW para uma as culturas da Cebola adulta, tomate e milho. Assumindo para essas culturas que estão sendo cultivadas em solos areno siltosa, siltosa e argilo siltosa.			
Pela Table 22	Cebola	$Z_r \approx 0.4$ m	$p = 0.30$
	Tomate	$Z_r \approx 0.8$ m	$p = 0.40$
	Milho	$Z_r \approx 1.2$ m	$p = 0.55$
Pela Table 19	Loamy sand	$\theta_{FC} \approx 0.15$ m ³ m ⁻³	$\theta_{WP} \approx 0.06$ m ³ m ⁻³

	1000 ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$) = 90 mm(water)/m(soil depth)					
Silt	$\theta_{FC} \approx 0.32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$			$\theta_{WP} \approx 0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$		
	1000 ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$) = 170 mm(water)/m(soil depth)					
Silty clay	$\theta_{FC} \approx 0.35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$			$\theta_{WP} \approx 0.23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$		
	1000 ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$) = 120 mm(water)/m(soil depth)					
	Loamy sand		Silt		Silty clay	
	TAW (Eq. 82) mm	RAW (Eq. 83) mm	TAW (Eq. 82) mm	RAW (Eq. 83) mm	TAW (Eq. 82) mm	RAW (Eq. 83) mm
Cebola	36	11	68	20	48	14
Tomate	72	29	136	54	96	38
Milho	108	59	204	112	144	79

Expressar a tolerância das culturas para o estresse de água como uma função da fração (p) de TAW não está completamente correto. A taxa de extração de água pelo sistema radicular é influenciada de fato mais diretamente pelo nível de energia potencial da água do solo (potencial matricial do solo associada à condutividade hidráulica) através do conteúdo de água. Como um certo valor do potencial matricial do solo corresponde em tipos de solo diferentes em conteúdos de água diferentes, o valor para p também é uma função do tipo de solo. Geralmente, pode ser admitido que para solos de textura fina (argila) os valores de p apresentados na Tabela 22 podem ser reduzidos de 5-10%, enquanto para solos de textura mais grossa (areia), eles podem ser aumentados de 5-10%.

RAW é semelhante ao termo Manejo Permitido de Depleção (MAD) introduziu por Merriam However, valores para MAD é influenciado pelo manejo e fatores econômicos além dos fatores físicos que influenciam p. Geralmente, $MAD < RAW$ onde existe risco ou incerteza, e $MAD > RAW$ onde o estresse de umidade na planta é uma parte intencional de manejo de água do solo.

Coefficiente de estresse de água (Ks)

Os efeitos do estresse de água do solo na ET_c são descritos reduzindo o valor do coeficiente de cultura. Isto é realizado multiplicando o coeficiente de cultura pelo coeficiente de estresse de água K_s (Equações 80 e 81).

Conteúdo de água na zona radicular também pode ser expressa através da depleção na zona radicular, D_r , i.e., escassez de água relativa à capacidade de campo. Na capacidade de campo, a depleção na zona radicular será zero ($D_r = 0$). Quando a água solo é extraída pela evapotranspiração, a depleção aumenta e o estresse será induzido quando D_r fica igual a RAW. Depois que a depleção da zona radicular exceder RAW (conteúdo de água abaixo de θ_t), a depleção da zona radicular é alta o bastante para limitar evapotranspiração para valores menor que os valores potenciais e a evapotranspiração da cultura começa a diminuir em proporção à quantidade de água que permanece na zona radicular (Figura 42).

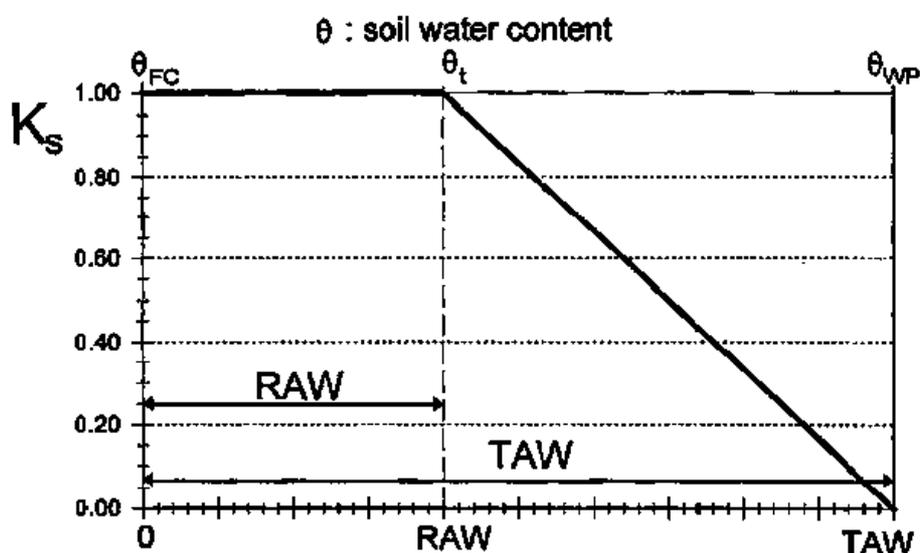
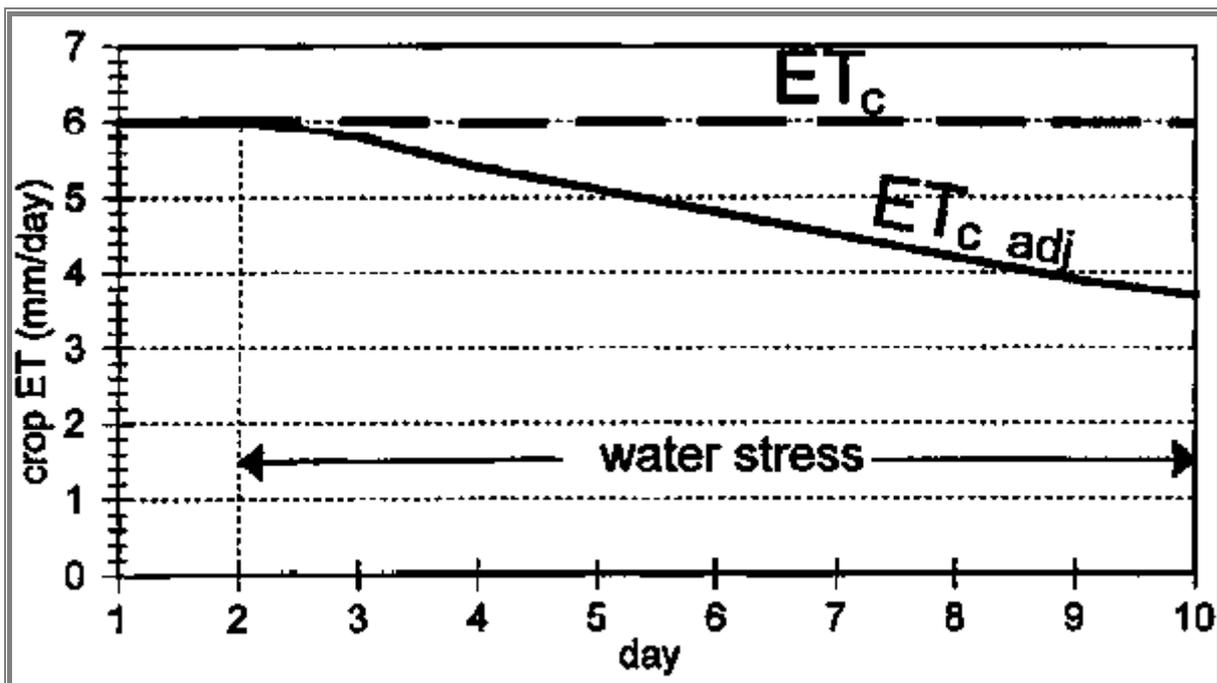


FIGURE 42. Coeficiente de estresse de água, K_s .

EXEMPLO 37. Efeito do estresse de água na evapotranspiração da cultura

Estimativa do efeito do estresse de água na evapotranspiração para a cultura do tomateiro adulto ($Z_r = 0.8$ m e $p = 0.40$) cultivado em solo siltoso ($\theta_{FC} = 0.32$ e $\theta_{WP} = 0.12$ $m^3 m^{-3}$) para os próximos 10 dias quando a depleção na zona radicular é 55 mm e nenhuma chuva ou irrigação são esperados ou planejados. A ET_o estimada para a decade é 5 mm/dia e $K_c = 1.2$.



Pela Eq. 82		TAW = 1000 (0.32-0.12) 0.8 = 160 mm					
Pela Eq. 83		RAW = 0.40 (160) = 64 mm					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Dia	ET _o	K _c	ET _c	D _{r, i start}	K _s	ET _{c adj}	D _{r, i end}
	mm/dia		mm/dia	mm		mm/dia	mm
Começo	-	-	-	-	-	-	55.0
1	5.0	1.2	6.0	55.0	1.00	6.0	61.0
2	5.0	1.2	6.0	61.0	1.00	6.0	67.0
3	5.0	1.2	6.0	67.0	0.97	5.8	72.8
4	5.0	1.2	6.0	72.8	0.91	5.4	78.3
5	5.0	1.2	6.0	78.3	0.85	5.1	83.4
6	5.0	1.2	6.0	83.4	0.80	4.8	88.2
7	5.0	1.2	6.0	88.2	0.75	4.5	92.6
8	5.0	1.2	6.0	92.6	0.70	4.2	96.9
9	5.0	1.2	6.0	96.9	0.66	3.9	100.8
10	5.0	1.2	6.0	100.8	0.62	3.7	104.5
(1)	Número do Dia.						

(2)	Evapotranspiração da Cultura de Referência.
(3)	Coefficiente da cultura.
(4)	Eq. 58, ETc para não estresse de água.
(5)	Depleção na zona radicular no começo do dia (coluna 8 do dia anterior),
(6)	Eq. 84 onde $K_s = 1$ se $D_{r,i} < RAW$.
(7)	Eq. 81, ETc sob condição de estresse de água no solo.
(8)	Depleção no final do dia.

O exemplo demonstra o valor estimado de K_s requerido diariamente no cálculo do balanço de água. O cálculo desenvolvido está na próxima seção.

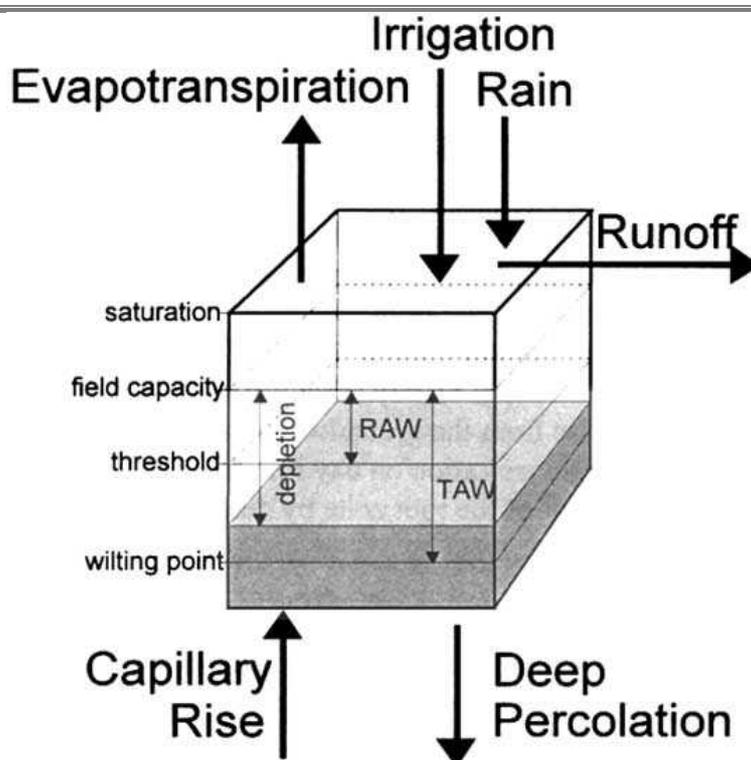


FIGURE 43. Equilíbrio da água na zona radicular

Para $D_r > RAW$, K_s é determinado por:

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{(1-p)TAW} \quad (84)$$

onde

K_s = fator de redução da transpiração dependente da água disponível do solo [0 - 1],

D_r = depleção na zona radicular [mm],

TAW = água disponível total na zona radicular [mm],

p = fração da TAW que uma cultura pode extrair da zona radicular sem sofrer estresse de água [-].

Depois do cálculo de K_s , a evapotranspiração ajustada ET_c adj é calculada por meio da Equação 80 ou 81 e depende dos coeficientes utilizados para estimar a evapotranspiração da cultura. Quando a depleção na zona radicular é menor que RAW, $K_s = 1$.

Equilíbrio de água de solo

A estimativa de K_s requer um cálculo do balanço de água diário na zona radicular. Esquemáticamente (Figura 43), a zona radicular pode ser representada por meio de um recipiente no qual o conteúdo de água pode flutuar. Expressar o conteúdo de água como depleção na zona radicular é útil. Faz a soma e subtração do ganho e perda dos vários parâmetros do balanço de água do solo normalmente são expressos em termos de lâmina de água. Chuva, irrigação e ascensão pelo vaso capilar da água subterrânea para a zona radicular somam a água da zona radicular e diminuem a depleção na zona radicular. Evaporação do solo, transpiração da cultura e perdas por percolação removem a água da zona radicular e aumentam a depleção. O balanço de água diário, expressa em termos de depleção ao término do dia é:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + Etc_{,i} + DP_i \quad (85)$$

onde

$D_{r,i}$ = depleção na zona radicular ao término do dia i [mm],

$D_{r,i-1}$ = conteúdo de água na zona radicular ao término do dia anterior, $i-1$ [mm],

P_i = precipitação no dia i [mm],

RO_i = escoamento na superfície do solo no dia i [mm],

I_i = lâmina de irrigação líquida no dia i [mm],

CR_i = ascensão capilar do lençol freático no dia i [mm],

$Etc_{,i}$ = evapotranspiração da cultura no dia i [mm],

DP_i = perda de água fora da zona radicular por percolação profunda no dia i [mm].

Limites em $D_{r,i}$

Na Figura 43 é assumido que pode ser armazenada água na zona radicular até a capacidade de campo ser alcançada. Embora após uma chuva ou irrigação pesada a água temporariamente pode exceder a capacidade de campo, é assumido que a quantidade total de água acima da capacidade de campo é perdida no mesmo dia através da percolação profunda e atende a ET durante aquele dia. Assumindo que a zona radicular está na capacidade de campo após uma chuva ou irrigação pesada, o valor mínimo para a depleção $D_{r,i}$ é zero. Como os resultados de percolação profunda e evapotranspiração, diminuirá o conteúdo de água na zona radicular gradualmente a depleção na zona radicular aumentará. Na ausência de qualquer evento de molhamento (chuva ou irrigação), o conteúdo de água no solo alcançará seu valor mínimo θ_{WP} . Nesse momento nenhuma água estará disponível para evapotranspiração na zona radicular, K_s se torna zero, e a depleção na zona radicular alcança o seu valor máximo TAW. Os limites impostos em $D_{r,i}$ são:

$$0 \leq D_{r,i} \leq TAW \quad (86)$$

Depleção inicial

Iniciar o balanço de água na zona radicular, a depleção inicial $D_{r,i-1}$ deve ser estimado. A depleção inicial pode ser derivada do conteúdo de água do solo medido por:

$$D_{r,i-1} = 1000(\theta_{FC} - \theta_{i-1}) Z_r \quad (87)$$

onde θ_{i-1} é o conteúdo de água médio do solo na zona radicular efetiva. Após uma chuva ou irrigação pesada, o usuário pode assumir que na zona radicular está próxima a capacidade de campo, i.e., $D_{r,i-1} \approx 0$.

Precipitação (P), escoamento superficial (RO) e irrigação (I)

P_i é equivalente à precipitação diária. A precipitação diária em quantidades menor que aproximadamente 0.2 ETo normalmente é evaporado completamente e pode ser desprezada especialmente nos cálculos de balanço de água quando o coeficiente de cultura único está sendo utilizado. I_i é equivalente à lâmina média de irrigação infiltrada. Podem ser utilizados os procedimentos padrão dos textos de hidrologia para estimar o escoamento superficial durante a precipitação.

Ascensão capilar (CR)

A quantidade de água transportada para a zona radicular por ascensão capilar depende do tipo de solo, da profundidade do lençol freático e da umidade na zona radicular. Normalmente pode ser assumido que CR é zero quando o lençol freático está mais que aproximadamente 1 m abaixo da zona radicular. Foi apresentada um pouco de informação sobre CR no FAO Irrigação e Drenagem Artigo N°. 24. CR será um tópico em uma futura publicação da FAO.

Evapotranspiração (ETc)

Onde a depleção da água do solo é menor que RAW, a evapotranspiração da cultura é igual a $ET_c = K_c ETo$. Assim que $D_{r,i}$ exceder RAW, a evapotranspiração da cultura será reduzida e ET_c pode ser calculada utilizando as Equação 80 ou 81.

Percolação profunda (DP)

Após uma chuva ou irrigação pesada, o conteúdo de água do solo na zona radicular poderia exceder a capacidade de campo. Neste procedimento simples é assumido que o conteúdo de água do solo está em θ_{FC} dentro do mesmo dia do evento de molhamento, de forma que a depleção $D_{r,i}$ na Equação 85 se torna zero. Então, após uma chuva ou irrigação pesada

$$DP_i = (P_i - RO_i) + I_i - ET_{c,i} - D_{r,i-1} \geq 0 \quad (88)$$

Enquanto que o conteúdo de água do solo na zona radicular estiver abaixo da capacidade de campo (i.e., $D_{r,i} > 0$), a solo não drenará e $DP_i = 0$.

O termo DP_i na Equações 85 e 88 não pode ser confundidos com o $DP_{e,i}$ termo utilizado nas Equações 77 e 79 para a lâmina de evaporação. Podem ser calculadas ambas as condições ao mesmo tempo, mas são independentes um do outro.

Previsão ou determinação de irrigações

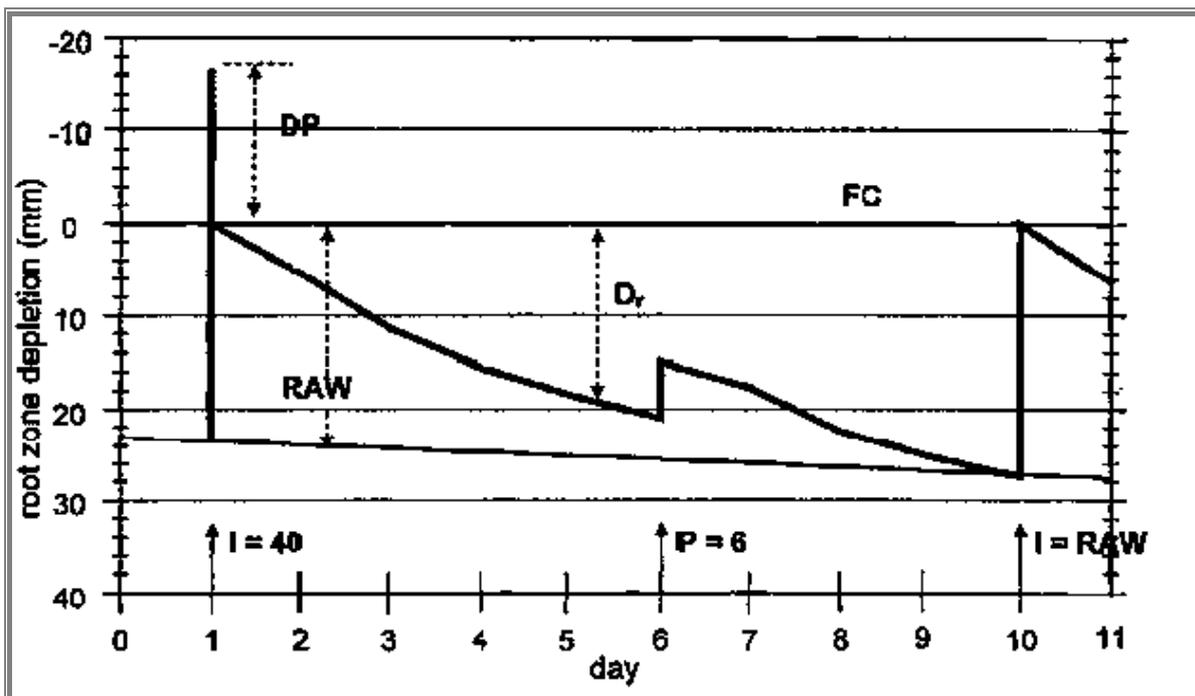
A Irrigação é requerida quando a chuva é insuficiente para compensar a perda da água pela evapotranspiração. O objetivo primário da irrigação é aplicar água no período certo e na quantidade certa. Calculando o balanço de água diariamente no solo na zona radicular

(Equação 85), o momento e a lâmina de irrigações futuras podem ser planejados. Para evitar o estresse de água da cultura, as irrigações deveriam ser aplicadas antes ou no momento quando a água do solo que está prontamente disponível terminou ($D_{r,i} \leq \text{RAW}$). Para evitar as perdas por percolação profundas que podem lixiviar os nutrientes relevantes para fora da zona radicular, deveria ser a lâmina de irrigação líquida menor ou igual à depleção da zona radicular ($I_i \leq D_{r,i}$).

O Exemplo 38 ilustra a aplicação de um balanço de água na zona radicular para prever a data da irrigação para evitar o estresse de água. O exemplo utiliza vários cálculos para K_e do Exemplo 35. Uma planilha eletrônica completa que inclui todos os cálculos necessários para prever a data da irrigação e $K_c = K_{cb} + K_e$ diariamente é apresentado no Anexo 8.

EXEMPLO 38. Irrigação que programa para evitar estresse de água de cultura

Planejamento da irrigação para o Exemplo 35. Supondo que:	
- irrigação será aplicada quando RAW for utilizado,	
- o fator de depleção (p) é 0.6,	
- todas as irrigações e precipitações ocorrerão de manhã,	
- a profundidade da zona radicular (Z_r) no dia 1 é 0.3 m e aumentará para 0.35 m para o dia 10,	
- a depleção na zona radicular para o começo do balanço no dia 1 ($D_{r,i-1}$) é RAW.	
Pela Eq. 82	$TAW = 1000 (0.23 - 0.10) Z_{r,i} = 130 Z_{r,i}$ [mm]
Pela Eq. 83	$RAW = 0.6 TAW = 78 Z_{r,i}$ [mm]
No dia 1,	Quando $Z_r = 0.3$ m: $D_{r,i-1} = RAW = 78 (0.3) = 23$ mm



(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
Dia	ET _o	Z _r	RAW	D _{r, i start}	P-RO	I	K _s	K _{cb}	K _e	K _c	ET _c	DP	D _{r, i end}
	mm/d	m	mm	mm	mm	mm					mm	mm	mm
start	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23
1	4.5	0.30	23	0	0	40	1	0.30	0.91	1.21	5.5	17	5
2	5.0	0.31	24	5	0	0	1	0.31	0.90	1.21	6.1	0	12
3	3.9	0.31	24	12	0	0	1	0.32	0.72	1.04	4.0	0	16
4	4.2	0.32	25	16	0	0	1	0.33	0.37	0.70	2.9	0	18
5	4.8	0.32	25	18	0	0	1	0.34	0.18	0.52	2.5	0	21
6	2.7	0.33	26	15	6	0	1	0.36	0.64	1.00	2.7	0	18
7	5.8	0.33	26	18	0	0	1	0.37	0.45	0.82	4.7	0	22
8	5.1	0.34	26	22	0	0	1	0.38	0.17	0.55	2.8	0	25
9	4.7	0.34	27	25	0	0	1	0.39	0.08	0.47	2.2	0	27
10	5.2	0.35	27	0	0	27	1	0.40	0.81	1.21	6.3	0	6

- (1) Número do dia.
- (2) Para o Exemplo 35.
- (3) Z_r é determinado (interpolando entre 0.3 m no dia 1 e 0.35 m no dia 10).

(4)	Eq. 83.
(5)	<p>$D_{r,i \text{ start}}$ (depleção na zona radicular no início do dia)</p> <p>Se a precipitação e irrigação ocorrer de manhã, então</p> $D_{r,i \text{ start}} = \text{Max}(D_{r,i-1 \text{ end}} - I - (P-RO), \text{ ou } 0)$ <p>Se a precipitação e irrigação ocorrer de tarde, então</p> $D_{r,i \text{ start}} = D_{r,i-1 \text{ end}}$ <p>onde $D_{r,i-1 \text{ end}}$ é o valor da coluna 14 do dia anterior</p> <p>desde então a profundidade da zona radicular aumenta a cada dia, o conteúdo de água no subsolo (θ_{sub}) ele tem que ser considerado atualizado $D_{r,i}$</p> $D_{r,i} = D_{r,i-1} + 1000 (\theta_{\text{FC}} - \theta_{\text{sub},i-1}) \Delta Z_{r,i}$ <p>No exemplo é assumido que esta θ_{sub} é a capacidade de campo (devido a uma super irrigação e uma chuva excessiva no dia anterior). Então, uma combinação da equação para $D_{r,i}$ pode ser utilizada.</p>
(6)	Pelo Exemplo 35.
(7)	<p>Irrigação é requerida quando $D_{r,i} \geq \text{RAW}$.</p> <p>No dia 1, a lâmina de irrigação (infiltrou no solo) é determinada (para o Exemplo 35: $I = 40 \text{ mm}$)</p> <p>No dia 10, outra irrigação é requerida. Uma irrigação de uma lâmina líquida de 27 mm para reabastecer a zona radicular e evitar perda de água por percolação profunda ($\text{DP} = 0 \text{ mm}$).</p>
(8)	Eq. 84, onde $K_s = 1$ para $D_{r,i} \leq \text{RAW}$.
(9)	Para o Exemplo 35.
(10)	<p>Dia 1 até 9: Para o Exemplo 35.</p> <p>Dia 10: a próxima irrigação extra de manhã, a camada superficial do solo estará úmida e K_r é 1 ou para Eq. 71: $K_e = (1.21 - 0.40) = 0.81$.</p>
(11)	$K_c = K_s K_{cb} + K_e$.
(12)	Eq. 80.
(13)	Eq. 88, onde $D_{r,i-1}$ é o valor da coluna 14 do dia anterior.
(14)	$D_{r,i}$ (depleção na zona radicular no final do primeiro dia) = o começo $D_{r,i}$ no princípio do dia seguinte (olha o roda pé 5). Para Eq. 85, onde $D_{r,i-1}$ é o valor da coluna 14 do dia anterior.

Efeitos da salinidade do solo

Sais na solução de água de solo podem reduzir evapotranspiração fazendo água de solo menos disponível " para extração radicular de planta. Sais têm uma afinidade por água e conseqüentemente é requerida força adicional pela cultura para extrair água de uma solo salina. A presença de sais na solução de água de solo reduz a energia potencial total da solução de água de solo. Além, um pouco de sais causam efeitos tóxicos em plantas e podem reduzir metabolismo de planta e crescimento. Uma função é apresentada aqui isso prediz a redução em evapotranspiração causado por salinidade de água de solo. A função é derivada combinando equações de rendimento-salinidade da Irrigação de FAO e Drenagem Papel N°29 com rendimento-ET equações de Irrigação de FAO e Drenagem Papel N°33. A equação resultante provê uma primeira aproximação da redução em evapotranspiração esperado sob de várias condições de salinidade.

Há evidência que rendimento de cultura e transpiração não são como sensível mugir potencial osmótico como eles são mugir potencial de matricial. Sob de condições salinas, muitas plantas podem compensar parcialmente para baixo potencial osmótico da água de solo construindo conteúdos de solute internos mais altos. Isto é acabado absorvendo íones da solução de solo e sintetizando osmolytes orgânico. Ambos estas reações reduzem o impacto de potencial osmótico em disponibilidade de água. Porém, síntese de osmolytes orgânico requer despesa de energia metabólica. Então crescimento de planta está freqüentemente reduzido sob de condições salinas. O crescimento de planta reduzido imprensa transpiração reduzindo cobertura de solo e às vezes está adicionalmente devido a fechamento de stomatal parcial.

Outros impactos de sais na solo incluem sódio direto e toxicities de cloreto e deficiências nutrientes induzidas. Estas deficiências reduzem crescimento de planta reduzindo a taxa de alongamento de folha, a amplificação, e a divisão de celas em folhas. A modalidade depende do método de irrigação. Com irrigação de irrigador, adsorção de sódio e cloreto pela folha pode resultar em condições tóxicas para toda a espécie de cultura. Com superfície ou irrigação de gota, geralmente dirija condições tóxicas só acontecem em vinha e culturas de árvore; porém, níveis altos de sódio podem induzir deficiências de cálcio por toda a espécie de cultura.

Desde mudanças de concentração salgadas como a água de solo mudanças contentes, salinidade de solo normalmente está medida e expressou em base da condutividade elétrica do extrato de saturação da solo (ECe). O ECe é definido como a condutividade elétrica da solução de água de solo depois da adição de uma quantidade suficiente de água destilada para

trazer o conteúdo de água de solo para saturação. E_{Ce} é expressado tipicamente em deciSiemens por metro (dS m⁻¹). Sob de condições de manejo ótimas, rendimentos de cultura permanecem a níveis de potencial até um específico, umbral condutividade elétrica do saturação solo água extrato (umbral de E_{Ce}) é alcançado. Se o E_{Ce} média dos aumentos de zona radicular sobre este valor de umbral crítico, o rendimento é presumido para começar a diminuir linearmente em proporção ao aumento em salinidade. A taxa de diminuição em rendimento com aumento em salinidade normalmente é expressada como uma rampa, b, tendo unidades de % redução em rendimento por dS/m aumenta em E_{Ce}.

Todas as plantas não respondem a salinidade de uma maneira semelhante; algumas culturas podem produzir rendimentos aceitáveis a muita salinidade de solo mais alta nívela que outros. Isto é porque algumas culturas podem melhor fazer os ajustes osmóticos precisados que os permitem a extrair mais água de uma solo salina, ou eles podem ser mais tolerantes de alguns dos efeitos tóxicos de salinidade. É provida tolerância salgada para muitas culturas agrícolas na Irrigação de FAO e Drenagem Empapela Não. 33 e 48. O umbral de E_{Ce} e rampa são apresentados b destas fontes em Tabela 23.

Como pode ser observado dos dados em Tabela 23, há um 8 a 10-fold Valor em tolerância salgada de culturas agrícolas. O efeito de salinidade de solo em rendimento e evapotranspiração de cultura é conseqüentemente cultura específico.

O umbral de E_{Ce} e parâmetros de b em Tabela 23 eram principalmente determinados em experiências de pesquisa que usam quase irrigação de afiançar-estado onde suja conteúdos de água foi mantida a níveis perto de capacidade de campo. Porém, sob da maioria dos tipos de irrigação que programa para irrigador e irrigação de superfície, o conteúdo de água de solo é esvaziado tipicamente bem para sob de capacidade de campo, de forma que o EC da solução de água de solo, ECSW, aumenta antes a irrigação, embora o EC do extrato de saturação não mude. A concentração salgada aumentada na solução de água de solo reduz o potencial osmótico da solução de água de solo (fica mais negativo), de forma que a planta tem que gastar energia mais metabólica e pode mostrar força mais mecânica para absorver água. Além, efeitos metabólicos e tóxicos de sais em plantas podem se tornar mais pronunciados como a solo seca e aumento de concentrações. Porém, a variação em conteúdo de água de solo durante um intervalo de irrigação não foi achada para influenciar evapotranspiração de cultura fortemente. Isto está por causa da ascensão de conteúdo de água de solo a níveis que são anteriores que experimentou cedo sob de irrigação estatal fixa em um intervalo de irrigação longo. Há um semelhante, counteractive diminuem depois em conteúdo de água de

solo em um intervalo de irrigação longo. Além, a distribuição de sais na zona radicular sob de baixa irrigação de frequência pode reduzir impactos de salinidade durante a primeira porção do intervalo de irrigação. Também, sob de irrigação de frequência alta da superfície de solo, perdas de evaporação de solo são mais altas. Por conseguinte, determinado a mesma lâmina de aplicação, a fração lixiviando está reduzida. Por estas razões, não foi achada normalmente a duração de intervalo de irrigação e a mudança em EC de água de solo durante o intervalo para ser fatores na redução de ET, dado que são infiltradas as mesmas lâminas de água com o passar do tempo na zona radicular.

Em alguns casos, evaporação aumentada sob de irrigação de frequência alta da superfície de solo pode contrariar reduções em K_c causou por E_{c_e} alto da zona radicular. Sob destas condições, o K_c total e E_{c_e} não é muito diferente das condições non-salinas, padrão sob de irrigação menos freqüente, embora rendimentos de cultura e transpiração de cultura estejam reduzidos. Por causa disto, sob de condições salinas, o K_s que reduz fator deveria ser aplicado só com a aproximação de K_c dual.

Em artigos de revisão em impactos de salinidade em produção de cultura, Letey et al. (1985) e Shalhevet (1994) concluiu isso efetua de salinidade de solo e estresse de água é geralmente aditivo nos impactos deles/delas em evapotranspiração de cultura. Então, o mesmo rendimento-ET funções podem reter para ambos escassez de água induziu estresse e para salinidade induziu estresse.

Relação produtividade-salinidade

Uma aproximação amplamente praticada por predizer a redução em produtividade de cultura devido a salinidade foi descrita na Irrigação de FAO e Drenagem Papel N°29. A aproximação presume que, sob de condições de manejo ótimas, produtividades de cultura permanecem a níveis de potencial até um específico, umbral que condutividade elétrica da solução de água de solo é alcançada. Quando salinidade aumenta além deste umbral, são presumidos produtividades de cultura para diminuir linearmente em proporção ao aumento em salinidade. A salinidade de água de solo é expressada como a condutividade elétrica do extrato de saturação, E_{c_e} . Em forma de equação, o procedimento seguiu em Irrigação de FAO e Drenagem que Papel N°29 é:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - \left(EC_e - EC_{e\text{threshold}} \right) \frac{b}{100} \quad (89)$$

para condições onde $EC_e >$ umbral de EC_e onde:

Y_a = produtividade de cultura atual

Y_m = máximo esperou produtividade de cultura quando $EC_e <$ umbral de EC_e

EC_e = condutividade elétrica má do extrato de saturação para a zona radicular [dS m-1]

Umbral de EC_e = condutividade elétrica do extrato de saturação ao umbral de EC_e quando semeie primeiro produtividade reduz sob de Y_m [dS m-1]

b = redução em produtividade por aumento em EC_e [% / (dS m-1)]

Foram providos valores para umbral de EC_e e b na Irrigação de FAO e Papel de Drenagem N°29 e 48 e foram apresentados em Tabela 23 para muitas culturas agrícolas.

Dados de salinidade-produtividade da Irrigação de FAO e Drenagem empapela Nos. 29 e 48 eram principalmente de estudos onde sujam conteúdo de água foi segurado a about-3 potencial de m (-30 kPa) ou mais alto à 0.3 a 0.6 lâmina de m, dependendo da cultura. Porém, estes documentos indicam que para a maioria das culturas, os dados são transferíveis a situações de campo típicas onde a água de solo prontamente disponível (RAW) é esvaziado entre irrigações.

Relação de estresse de produtividade-umidade

Uma simples, linear função de produção da cultura-água foi introduzida pela FAO Irrigação e Drenagem Artigo N°33 para predizer a redução na produtividade da cultura quando o estresse da cultura foi causada por uma escassez de água do solo:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m} \right) = K_y \left(1 - \frac{ET_{c\text{adj}}}{ET_c} \right) \quad (90)$$

onde:

K_y = fator de resposta da produtividade [-]

$ET_{c\text{adj}}$ = evapotranspiração da cultura ajustada (real) [mm d⁻¹]

ET_c = evapotranspiração da cultura para condições padrão (nenhum estresse de água) [mm d-1]

K_y é um fator que descreve a redução na produtividade relativa de acordo com a redução na ET_c causada pela escassez de água do solo. Na FAO N°33, valores de K_y são específica para cultura e podem variar em função do crescimento da cultura. Em geral, a diminuição na produtividade devido a déficit de água durante o período vegetativo e de

maturação é relativamente pequena, enquanto durante o florescimento e os períodos de formação da produtividade será grande. Valores para K_y para cada estágio de crescimento individual e para o período de crescimento completo foram incluído na FAO Irrigação e Drenagem Artigo N°33. São resumidos valores sazonais para K_y na Tabela 24.

Combinado salinidade-ET relação de redução

Nenhuma estresse de água ($D_r < RAW$)

Quando estresse de salinidade acontece sem estresse de água, Equações podem ser combinados 89 e 90 e podem ser resolvidos para um K_s equivalente onde $K_s = E_{tc} \text{ adj} / E_{Tc}$:

$$K_s = 1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e\text{threshold}}) \quad (91)$$

para condições quando $EC_e >$ umbral de EC_e e depleção de água de solo é menos que a lâmina de água de solo prontamente disponível ($D_r < RAW$). D_r e RAW é definido na seção prévia.

Com estresse de água ($D_r > RAW$)

Quando solo estresse de água acontece além de estresse de salinidade, Equação 84 em Capítulo 8 e Equações são combinados 89 e 90 para se render:

$$K_s = \left(1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e\text{threshold}}) \right) \left(\frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \right) \quad (92)$$

para condições quando $EC_e >$ umbral de EC_e e $D_r > RAW$. Figure 44 espetáculos o impacto de redução de salinidade em K_s como aumentos de salinidade. Nota que a aproximação presume aquele RAW (e p) não muda com salinidade crescente. Isto pode ou pode não ser uma suposição boa para algumas culturas.

Limitações

Porque o impacto de salinidade em crescimento de planta e produtividade e em evapotranspiração de cultura está um processo tempo-integrado, geralmente é usado só o valor sazonal para K_y para predizer a redução em evapotranspiração. Só há valores de K_y em Irrigação de FAO e Drenagem papel N°33 para aproximadamente 23 culturas. São resumidos

os valores sazonais para K_y de papel N°33 em Tabela 24. Para muitas culturas, o K_y sazonal é quase 1. Para culturas onde K_y é desconhecido, o usuário pode usar $K_y = 1$ em Equações 91 e 92 ou pode selecionar o K_y para um tipo de cultura que tem behaviour semelhante.

Equações que são sugeridos 91 e 92 como estimativas só aproximadas de impactos de salinidade em ET, e representa efeitos gerais de salinidade em evapotranspiração como acontecendo em cima de um período estendido de tempo (como mediu em semanas ou meses). não é esperado que Estas equações sejam preciso para predizer Etc durante dias específicos. Nem eles incluem outros efeitos complicando como toxicity de íon específico. Aplicação de equações 91 e 92 presumem que o EC_e representa o EC_e média para a zona radicular.

As equações apresentadas podem não estar válidas em salinidade alta onde as relações lineares entre EC_e , produtividade de cultura e K_s podem não reter. O uso de Equações normalmente deveriam ser restringidos 91 e 92 a $EC_e < EC_{threshold} + 50/b$. além, as equações predizem $Y_a = 0$ antes de $K_s = 0$ quando $K_y > 1$ e vice-versa.

Como indicou mais cedo, redução em Etc na presença de salinidade de solo é causado freqüentemente parcialmente por tamanho de planta reduzido e fração de cobertura de solo. Estes efeitos são largamente incluídos nos valores de coeficiente em Tabela 23. Então, onde planta crescimento é afetado por salinidade e Equações 91 e 92 são aplicados, é requerida nenhuma outra redução em K_c e usa LAI ou fração de cobertura de solo por exemplo, como descreveu em Capítulo 9.

TABELA 23. Tolerância salgada de culturas agrícolas comuns expressou como condutividade elétrica do extrato de saturação de solo ao umbral quando semeie primeiro produtividade reduz sob do potencial de produtividade cheio (EC_e , umbral) e como a rampa (b) de redução em produtividade de cultura com salinidade crescente além de EC_e , umbral.

Crop ¹	$EC_{e \text{ threshold}}^2 (dS m^{-1})^3$	b ⁴ (%/dS m ⁻¹)	Rating ⁵
a. Small vegetables			
Broccoli	2.8	9.2	MS
Brussels sprouts	1.8	9.7	MS
Cabbage	1.0-1.8	9.8-14.0	MS

Carrots	1.0	14.0	S
Cauliflower	1.8	6.2	MS
Celery	1.8-2.5	6.2-13.0	MS
Lettuce	1.3-1.7	12.0	MS
Onions	1.2	16.0	S
Spinach	2.0-3.2	7.7-16.0	MS
Radishes	1.2-2.0	7.6-13.0	MS
b. Vegetables - Solanum Family (<i>Solanaceae</i>)			
Egg Plant	-	-	MS
Peppers	1.5-1.7	12.0-14.0	MS
Tomato	0.9-2.5	9.0	MS
c. Vegetables Cucumber Family (<i>Cucurbitaceae</i>)			
Cucumber	1.1-2.5	7.0-13.0	MS
Melons		-	MS
Pumpkin, winter squash	1:2	13.0	MS
Squash, Zucchini	4.7	10.0	MT
Squash (scallop)	3.2	16.0	MS
Watermelon	-	-	MS
d. Roots and Tubers			
Beets, red	4.0	9.0	MT
Parsnip	-	-	S
Potato	1.7	12.0	MS
Sweet potato	1.5-2.5	10.0	MS
Turnip	0.9	9.0	MS
Sugar beet	7.0	5.9	T
e. Legumes (<i>Leguminosae</i>)			
Beans	1.0	19.0	S

Broadbean (faba bean)	1.5-1.6	9.6	MS
Cowpea	4.9	12.0	MT
Groundnut (Peanut)	3.2	29.0	MS
Peas	1.5	14.0	S
Soybeans	5.0	20.0	MT
f. Perennial Vegetables (with winter dormancy and initially bare or mulched soil)			
Artichokes	-	-	MT
Asparagus	4.1	2.0	T
Mint	-	-	-
Strawberries	1.0-1.5	11.0-33.0	S
g. Fibre crops			
Cotton	7.7	5.2	T
Flax	1.7	12.0	MS
h. Oil crops			
Casterbean	-	-	MS
Safflower	-	-	MT
Sunflower	-	-	MS
i. Cereals			
Barley	8.0	5.0	T
Oats	-	-	MT
Maize	1.7	12.0	MS
Maize, sweet (sweet corn)	1.7	12.0	MS
Millet	-	-	MS
Sorghum	6.8	16.0	MT
Rice ⁶	3.0	12.0	S
Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	6.0	7.1	MT
Wheat, semidwarf (<i>T. aestivum</i>)	8.6	3.0	T

Wheat, durum (<i>Triticum turgidum</i>)	5.7-5.9	3.8-5.5	T
j. Forages			
Alfalfa	2.0	7.3	MS
Barley (forage)	6.0	7.1	MT
Bermuda	6.9	6.4	T
Clover, Berseem	1.5	5.7	MS
Clover (alsike, ladino, red, strawberry)	1.5	12.0	MS
Cowpea (forage)	2.5	11.0	MS
Fescue	3.9	5.3-6.2	MT
Foxtail	1.5	9.6	MS
Hardinggrass	4.6	7.6	MT
Lovegrass	2.0	8.4	MS
Maize (forage)	1.8	7.4	MS
Orchardgrass	1.5	6.2	MS
Rye-grass (perennial)	5.6	7.6	MT
Sesbania	2.3	7.0	MS
Sphaerophysa	2.2	7.0	MS
Sudangrass	2.8	4.3	MT
Trefoil, narrowleaf birdsfoot	5.0	10.0	MT
Trefoil, big	2.3	19.0	MS
Vetch, common	3.0	11.0	MS
Wheatgrass, tall	7.5	4.2	T
Wheatgrass, fairway crested	7.5	6.9	T
Wheatgrass, standard crested	3.5	4.0	MT
Wildrye, beardless	2.7	6.0	MT
k. Sugar cane	1.7	5.9	MS
l. Tropical Fruits and Trees			

Banana	-	-	MS
Coffee	-	-	-
Date Palms	4.0	3.6	T
Palm trees	-	-	T
Pineapple (multi-year crop)	-	-	MT
Tea	-	-	-
m. Grapes and berries			
Blackberry	1.5	22.0	S
Boysenberry	1.5	22.0	S
Grapes	1.5	9.6	MS
Hops	-	-	-
n. Fruit trees			
Almonds	1.5	19.0	S
Avocado	-	-	S
Citrus (Grapefruit)	1.8	16.0	S
Citrus (Orange)	1.7	16.0	S
Citrus (Lemon)	-	-	S
Citrus (Lime)	-	-	S
Citrus (Pummelo)	-	-	S
Citrus (Tangerine)	-	-	S
Conifer trees	-	-	MS/MT
Deciduous orchard			
- Apples	-	-	S
- Peaches	1.7	21.0	S
- Cherries	-	-	S
- Pear	-	-	S
- Apricot	1.6	24.0	S

	- Plum, prune	1.5	18.0	S
	- Pomegranate	-	-	MT
Olives		-	-	MT

1 os dados só servem como uma diretriz - Tolerância varia e depende de clima, condições de solo e práticas culturais. Culturas são frequentemente menos tolerantes durante germinação e fase de muda.

2 E_{Ce}, umbral significa salinidade de zona radicular média à qual produtividade começa a recusar

3 salinidade de zona radicular está medida por condutividade elétrica do extrato de saturação da solo, informado em deciSiemens por metro (dS m⁻¹) a 25 °C

4 b é a redução de porcentagem em produtividade de cultura por 1 dS/m aumento em E_{Ce} além de umbral de E_{Ce}

5 avaliações são: T = Tolerante, MT = Moderadamente Tolerante, MS = Moderadamente e S = Sensível

6 porque arroz de paddy é crescido debaixo de condições inundadas, valores se referem à condutividade elétrica da água de solo enquanto as plantas são submergidas

Fontes primárias:

Ayers e Westcot, 1985. Irrigação de FAO e Papel de Drenagem N° 29. Molhe qualidade por agricultura; Rhoades, Kandiah e Mashali, 1992. Irrigação de FAO e Papel de Drenagem N° 48. O uso de águas salinas para produções de cultura.

Aplicação

Debaixo de condições de estado fixas, pode ser predito o valor para E_{Ce} como uma função de EC da irrigação molhe (EC_{iw}) e a fração lixiviando, usando uma fórmula lixiviando standard. Por exemplo, a FAO-29 fórmula lixiviando LR = EC_{iw}/(5 E_{Ce} - EC_{iw}) prediz a exigência lixiviando quando aproximadamente um 40-30-20-10 por cento água extração padrão acontece do superior abaixar quartos da zona de raiz antes para irrigação. EC_{iw} é a condutividade elétrica da água de irrigação. Desta equação, E_{Ce} é calculado como:

$$E_{C_e} = \frac{1 + LF}{LF} \frac{EC_{iw}}{5} \quad (93)$$

TABELA 24. Funções de resposta de rendimento sazonais de Irrigação de FAO e Papel de Drenagem Não. 33.

Crop	K _y
Alfalfa	1.1
Banana	1.2-1.35

Beans	1.15
Cabbage	0.95
Citrus	1.1-1.3
Cotton	0.85
Grape	0.85
Groundnet	0.70
Maize	1.25
Onion	1.1
Peas	1,15
Pepper	1.1
Potato	1.1
Safflower	0.8
Sorghum	0.9
Soybean	0.85
Spring Wheat	1.15
Sugarbeet	1.0
Sugarcane	1.2
Sunflower	0.95
Tomato	1.05
Watermelon	1.1
Winter wheat	1.05

onde LF, a fração lixiviando atual, é usado em lugar de LR, a exigência lixiviando. Equação 93 prediz $E_{Ce} = 1.5 E_{Ciw}$ debaixo de condições onde uns 15-20 por cento lixiviando fração é empregado. Podem ser usadas outras equações de fração lixiviando em lugar da FAO-29 equação para ajustar características locais. Equação 93 é só verdade se a qualidade de água de irrigação e a fração lixiviando são constantes em cima da estação crescente. Tempo é exigido atingir um equilíbrio salgado na solo. Se há que inverno importante chove de água de qualidade alta e freqüentemente lixiviando excelente, o equilíbrio salgado na solo será

bastante diferente no começo da estação e com um mais baixo ECe comum da zona de raiz que seria predito de Equação 93. Uma calibração local apropriada de Equação 93 é desejável debaixo destas condições particulares.

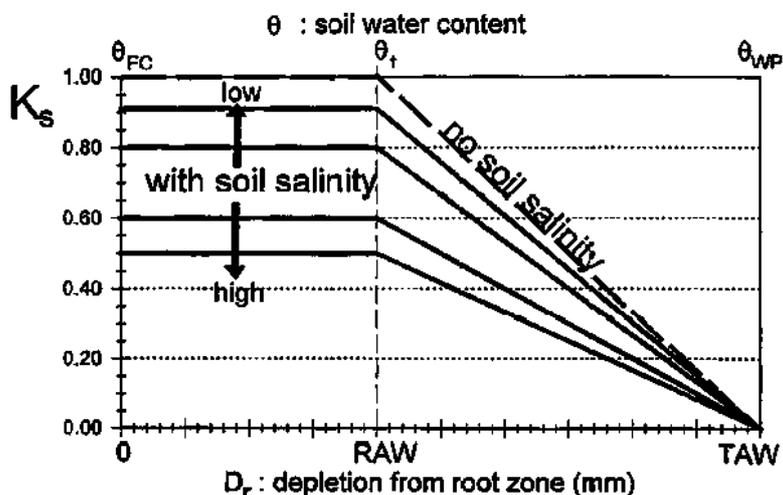


FIGURE 44. O efeito de salinidade de solo no coeficiente de tensão de água Ks

EXEMPLO 39. Efeito de salinidade do solo na evapotranspiração de cultura

A field of beans is cultivated on a silt loam soil and is irrigated during the midseason period using water having salinity $EC_{iw} = 1 \text{ dS m}^{-1}$. A 15 percent leaching fraction is employed. The $EC_{e, \text{threshold}}$ and slope from Table 23 are 1.0 dS m^{-1} and $19 \text{ \%}/(\text{dS m}^{-1})$ respectively. The seasonal K_y from FAO Irrigation and Drainage Paper No 33 and Table 24 for beans is $K_y = 1.15$. Compare the effect on crop evapotranspiration for various levels of soil water depletion in the root zone under saline and nonsaline conditions. The TAW and RAW for the bean crop are 110 and 44 mm (for $p = 0.4$).

Since the leaching fraction is 0.15, EC_e is estimated from Equation 93 as $EC_e = 1.5 EC_w = 1.5 (1) = 1.5 \text{ dS m}^{-1}$. The K_s in the presence of salinity stress and absence of moisture stress is:

$$K_s = \left(1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e \text{ threshold}}) \right) = \left(1 - \frac{19}{1.15(100)} (1.5 - 1.0) \right) = 0.92$$

The K_s in the presence of moisture stress, but in the absence of salinity stress is:

$$K_s = \left(\frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \right) = \left(\frac{110 - D_r}{100 - 44} \right) = \left(\frac{110 - D_r}{66} \right)$$

The K_s in the presence of both moisture stress and salinity stress is:

$$K_s = \left(1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e \text{ threshold}}) \right) \left(\frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \right) = 0.92 \left(\frac{110 - D_r}{66} \right)$$

The effect on crop evapotranspiration for various soil water depletions in the root zone (D_r) are:

D_r (mm)	K_s no soil salinity		K_s with soil salinity ($EC_e = 1.5 \text{ dS m}^{-1}$) (Eq. 92)		Additional reduction in potential ET_c due to salinity
0	1.00	no reduction in ET_c	0.92	8% reduction in ET_c	8%
35	1.00	no reduction in ET_c	0.92	8% reduction in ET_c	8%
40	1.00	no reduction in ET_c	0.92	8% reduction	8%
44	1.00	no reduction in ET_c	0.92	8% reduction	8%
50	0.91	9% reduction	0.83	17% reduction	8%
60	0.76	24% reduction	0.69	31 % reduction	7%
70	0.61	39% reduction	0.56	44% reduction	5%
80	0.45	55% reduction	0.42	58% reduction	3%
90	0.30	70% reduction	0.28	72% reduction	2%
100	0.15	85% reduction	0.14	86% reduction	1%
110	0.00	$ET_c = 0$	0.00	$ET_c = 0$	--

Capítulo 9 - ET_c para vegetação natural, atípica e não prístina

Atípico se refere a gênero ou arranjos de culturas agrícolas que não são listadas ou descritas nas Tabelas 12 e 17. Vegetação não prístina é definida, neste texto, como vegetação que tem menos que condições crescentes perfeitas ou estas características (i.e., condições relativamente mais pobres de densidade, altura, área foliar, fertilidade, ou vitalidade) quando comparada com “condições de prístina”.

A aproximação por meio de que uma cultura é caracterizada por um coeficiente de cultura, K_c , e o evapotranspiration de cultura é determinado pelo produto de K_c e o evapotranspiration de referência ET_o , provê um modo simples e conveniente de também caracterizar o evapotranspiration de vegetação natural e para práticas de cultivo non-típicas. Este capítulo apresenta procedimentos por calcular valores de K_c por vegetação natural e para vegetação agrícola para a qual valores de K_c não estão disponíveis.

Aproximação de cálculo

Como descreveu em Figura 27, o primeiro passo na aproximação de $K_c E_{To}$ é a estimação de durações de fases de crescimento. Isto também aplica a vegetação natural e outra. O próximo passo é o desenvolvimento de curvas de coeficiente de cultura das que representam as relações E_{To} para E_{To} durante o vários crescimento organiza da vegetação.

Fase de crescimento inicial

O procedimento para calcular coeficientes de cultura para a fase de crescimento inicial para vegetação natural, non-típica e non-prístina é idêntico a isso descrito em Capítulo 6 (único coeficiente de cultura ini de K_c) ou Capítulo 7 (coeficiente de cultura dual, ini de $K_{cb} + K_e$). O coeficiente de cultura nesta fase é principalmente determinado pela frequência com que a terra é wetted.

Fases de estação meio e recentes

O K_c durante o período de meio-estação (K_c meio e K_{cb} meio) e menos o K_c durante o recente período de estação diferem disso descrito em capítulos prévios. Como a cobertura de solo para vegetação natural e non-prístina está freqüentemente reduzido, o K_c é afetado a uma extensão grande pela frequência de irrigação de and/or de precipitação e pela quantia de área foliar e cobertura de solo.

Aproximação de coeficiente de cultura dual

A determinação de K_c para vegetação natural, non-típica ou non-prístina ordinariamente deveria seguir a aproximação descrita em Capítulo 7 por meio de que transpiration separado (K_{cb}) e evaporação (K_e) coeficientes são usados. Podem ser calculados os efeitos de evaporação da superfície de terra diretamente como tal.

Dois procedimentos que podem ser usados para ajustar o coeficiente de cultura basal (K_{cb} adj meio) para vegetação escassa é apresentado nesta seção. Nestes aproximações, K_{cb} adj meio ou é calculado de LAI (Equação 97) ou de cobertura de solo efetiva (Equação 98). Depois da determinação de K_{cb} adj meio, o coeficiente de evaporação de terra, K_e , deveria ser determinado para obter o coeficiente de cultura para a fase de meio-estação: K_c adj meio = K_{cb} adj meio + K_e . São apresentados procedimentos por calcular K_e em Capítulo 7.

Até mesmo onde o K_{cb} calculado adj meio é pequeno, o adj de K_c total (= adj de $K_{cb} + K_e$) precipitação seguinte às vezes pode ser como alto ou mais alto que o K_c para vegetação prístina devido a evaporação de superfície de entre vegetação escassa.

Única aproximação de coeficiente de cultura

Quando o único coeficiente de cultura K_c de Capítulo 6 é usado, os efeitos comuns de terra molhar estão incorporados em um K_c mau geral. Algumas diretrizes para a estimação de adj de K_c são determinadas nas seções seguintes. O único coeficiente de cultura também pode ser derivado do K_{cb} ajustado considerando a frequência de terra molhar, i.e., durante o período de midseason, adj de $K_c = adj$ de $K_{cb} + 0.05$ para molhando infreqüente e adj de $K_{cb} + 0.10$ para wettings de até uma vez uma semana. Para wettings mais freqüente, deveria ser usada a aproximação de coeficiente de cultura dual.

Alternativamente, Equações podem ser usados 97 e 98 para determinar K_c em vez de K_{cb} . Então, min de K_c em Equações podem ser fixados 97 e 98 igual para ini de K_c onde ini de K_c é calculado de Figura 29 ou 30. O uso de ini de K_c incorpora efeitos de evaporação de terra e então serve como um mais baixo limite na estimativa para K_c meio.

Condições de tensão de água

Onde chuva ou irrigação é baixa, tensão de água poderia ser induzida e o evapotranspiration derrubarão debaixo do evapotranspiration de cultura standard, etc. A redução no valor para K_c debaixo de condições de baixa disponibilidade de água de terra é determinado usando o coeficiente de tensão K_s como descreveu em Capítulo 8.

Fase de meio-estação - Ajuste para vegetação escassa

Ajuste de observações de campo simples

Como uma aproximação áspera para K_c durante a fase de meio-estação para Culturas que normalmente quase completamente sombra a terra debaixo de condições prístinas, mas onde cobertura está reduzida devido a doença, acentue, pestes, ou plantando densidade, os valores para K_c meio e K_{cb} meio pode ser reduzido por um fator que depende do desenvolvimento de vegetação atual:

$$Adj \text{ de } K_c = K_c - A_{cm} \quad (94)$$

onde

$K_c =$ o K_c de Tabela 12 (K_c meio) ou 17 (K_{cb} meio) depois de ajustar isto para clima (Equação 62 ou 70),

Adj de $K_c =$ o K_c ajustado (K_c adj meio ou K_{cb} adj meio).

O ajuste de K_c que usa Equação 94 não aplica quando Culturas freqüentemente são wetted e aumentaram evaporação de terra compensa para a cobertura de solo reduzida. Debaixo destas condições Equação 94 deveria ser aplicada só a K_{cb} .

O coeficiente de ajuste, A_{cm} , é calculado de:

$$(95)$$

onde LAI é o índice de área foliar atual (Caixa 17) e LAI_{dense} é o índice de área foliar esperado para a mesma cultura debaixo de normal, práticas de administração de cultura standards. Os valores para LAI na acima de equação podem ser substituídos por valores pela fração de cobertura de solo (f_c):

$$(96)$$

EXEMPLO 40. Primeiro aproximação do coeficiente de cultura para a fase de meio-estação para vegetação escassa

Estimação de K_{cb} meio de Índice de Área foliar (LAI)

Vegetação natural tem menos área foliar ou fração de cobertura de solo tipicamente que faz vegetação agrícola que foi desenvolvida para cobertura de solo cheia e para água de terra favouring condiciona crescimento vigoroso. Isto é especialmente verdade em climas semi-áridos e áridos. O valor para K_{cb} meio para vegetação natural ou non-prístina deveria ser reduzido quando plante and/or de densidade folheiam área é mais baixo que para condições de cobertura cheias (geralmente definiu como quando LAI 3). Onde LAI pode ser medido ou pode ser aproximado, um cume K_{cb} meio para vegetação agrícola natural, non-típica ou non-prístina pode ser aproximado semelhante a um procedimento usado por Ritchie como:

$$K_{cb} \text{ meio} = \min \text{ de } K_c + (K_{cb} \text{ cheio} - K_c \text{ min})(1 - \exp[-0.7 \text{ LAI}]) \quad (97)$$

onde

K_{cb} K_{cb} basal calculado meio durante a meio-estação quando plante and/or de densidade folheiam área é mais baixo que para condições de cobertura cheias,

K_{cb} K_{cb} basal calculado cheio durante a meio-estação (a tamanho de planta de cume ou altura) para vegetação que tem cobertura de solo cheia ou LAI > 3 (Equações 99 e 100),

Min de K_c o K_c mínimo para terra nua (min de K_c 0.15 - 0.20),

LAI índice de área foliar atual, definido como a área foliars por área de superfície de solo subjacente calculada a média em cima de uma área grande. Só um lado de folhas é contado [m² m⁻²].

Equação 97 é recomendada para gênero anuais de vegetação que ou é natural ou está em um estado non-prístino devido a densidade escassa ou efeitos de algum tipo de tensão ambiental em crescimento.

A relação expressada em Equação 97 produz resultados semelhante para esses sugeridos por Ritchie (1974). Para $LAI > 3$, K_{cb} meio cheio. O LAI usado em Equação 97 deveria ser o 'green' LAI que representa folhas só saudáveis que são ativo em transferência de vapor.

Estimação de K_{cb} meio de cobertura de solo efetiva (eff de f_c)

Onde efetivamente só estimativas da fração de superfície de terra cobriram através de vegetação está disponível, a aproximação seguinte para K_{cb} podem ser usados adj meio:

(98)

onde

K_{cb} K_{cb} basal calculado meio durante a meio-estação quando plante and/or de densidade folheiam área é mais baixo que para condições de cobertura cheias,

K_{cb} K_{cb} basal calculado cheio durante a meio-estação (a tamanho de planta de cume ou altura) para vegetação que tem cobertura de solo cheia ou $LAI > 3$ (veja Equações 99 e 100),

Min de K_c o K_c mínimo para terra nua (na presença de vegetação) (K_c min 0.15-0.20),

f_c observaram fração de superfície de terra que é coberta através de vegetação como observou de nadir (em cima) [0.01 - 1],

eff de f_c a fração efetiva de superfície de terra cobriu ou obscureceu através de vegetação [0.01-1] (veja Caixa 18),

h a altura de planta [m].

Condutância de Stomatal e transporte de água dentro de plantas podem limitar ET debaixo de condições de vegetação escassa, alta. Debaixo destas condições, K_{cb} meio está limitado pelo " $2f_c$ " termo em Equação 98. Equação 98 aplica bem a árvores e arbustos.

Estimação de K_{cb} cheio

Culturas agrícolas:

Culturas agrícolas Non-prístinas representam Culturas que não desenvolveram ao potencial deles/delas devido a tensões ambientais causadas por escassez de água de terra, fertilidade, infectam e pastam ou dano de inseto ou devido a baixa densidade de planta. O valor para K_{cb} cheio em Equações podem ser levados 97 e 98 como o K_{cb} valor meio listado para qualquer "

cultura de cheio-cobertura " (eff de fc ~ 1) em Tabela 17, depois de ajustar isto para clima (Equação 70):

$$(99)$$

onde

u_2 valor mau para velocidade de vento a 2 altura de m durante a meio-estação [m s⁻¹],

RHmin valor mau para diário de mínimo umidade relativa durante a meio-estação [%].

h altura de planta de máximo má [m].

Vegetação natural e Culturas não listaram em Tabela 17:

Para vegetação natural, Culturas de nonfull-cobertura, ou para Culturas não listadas em Tabela 17, Kcb cheio pode ser aproximado como uma função de clima e altura de planta má para áreas de vegetação que é maior que alguns hectares:

$$(100)$$

onde

Kcb, h Kcb meio para vegetação de cobertura cheia (LAI > 3) debaixo de condições de vento sub-úmidas e tranqüilas (RHmin = 45% e $u_2 = 2$ m s⁻¹), (Equação 101),

u_2 valor mau para velocidade de vento a 2 altura de m durante a meio-estação [m s⁻¹],

RHmin valor mau para diário de mínimo umidade relativa durante a meio-estação [%]

h altura de planta de máximo má [m].

O valor para Kcb, h é calculado como:

$$Kcb, h = 1.0 + 0.1 h \text{ para } h \leq 2 \text{ m} \quad (101)$$

onde Kcb, h é limitado a 1.20 quando $h > 2$ m. O valor de 1.2 representa um limite superior geral em Kcb meio para vegetação alta que tem cobertura de solo cheia e LAI > 3 debaixo das condições de vento sub-úmidas e tranqüilas. Este limite de 1.2 é ajustado para outras condições climáticas em Equação 100. Equações 100 e 101 produto uma aproximação geral para o aumento em Kcb cheio com altura de planta e clima. A forma destas equações adere a tendências representadas em Equação 70.

Para pequeno, isolado esteja tamanhos, Kcb cheio pode precisar de ser aumentado além do valor dado por Equação 99 ou 100, como discutiu em Capítulo 10.

Conclusão

Equações podem ser usados 97 e 98 calcular ou reduzir Kcb para vegetação agrícola non-prístina. Os explicador em Equações 97 e 98 refletem os efeitos de advection de microscale (transfira) de calor sensato de superficies de terra secas entre plantas para folhas de planta,

assim ET crescente por área foliar de unidade, e os efeitos de aspereza aerodinâmica aumentada como o valor para diminuições de LAI. Equação 98 sugere que como aumentos de h, área foliar total e aspereza efetiva de aumento de vegetação, aumentando o coeficiente de cultura assim. Além, como aumentos de h, mais oportunidade para microadvection de calor de terra para pálio acontece e troca turbulenta dentro do pálio aumenta para a mesma quantia de cobertura de solo. Tudo estes fatores afetam a magnitude relativa de Kcb meio.

Equações que deveriam ser usados 97 e 98 com precaução como eles provêm só uma estimativa do máximo que Kcb esperou durante crescimento de planta de cume para vegetação com folhas acontecendo saudáveis e uma superfície de terra seca. Onde controle de stomatal é maior que então para vegetação agrícola típica, o Kcb deveria ser reduzido usando o jogo de recomendações mais adiante fora na próxima seção (Equação 102).

EXEMPLO 41. Estimação de coeficiente de cultura de meio-estação

EXEMPLO 42. Estimação de coeficiente de cultura de meio-estação para cobertura de solo reduzida

Fase de meio-estação - Ajuste para controle de stomatal

O valor para Kcb cheio em Equações 97 e 98 podem precisar de ser reduzidos para vegetação que tem um grau alto de controle de stomatal. Para vegetação como alguns gênero de vegetação de deserto ou árvores com resistência de folha significativamente maior que o da maioria das Culturas agrícolas onde r_l é comumente aproximadamente 100 s m^{-1} , o Kcb meio calculou usando Equações 97 e 98 pode ser modificado multiplicando por um fator de correção de resistência, Fr. O fator de correção de resistência é desenvolvido baseado no FAO equação de Penman-Monteith:

$$(102)$$

onde

r_l resistência de folha má para a vegetação em questão [s m^{-1}].

O r_l de resistência de folha mau é 100 s m^{-1} para a grama referência de ETo e para muitas Culturas agrícolas. Podem ser achados valores para r_l para muitas plantas agrícolas e non-agrícolas em Körner et al. (1978) e Allen al de et. (1996). equação 102 reflete a aspereza aerodinâmica fixa de grama em lugar de a aspereza da vegetação específica, desde que o Kc

ajustado é multiplicado pela grama ETo e o Kc já reflete os efeitos da aspereza aerodinâmica para a vegetação específica.

EXEMPLO 43. Estimação de Kcb meio de cobertura de solo com redução para controle de stomatal

A equação menosprezaria Fr (superestime a redução em Kcb) se usou com a aspereza atual da vegetação quando $rl > 100 \text{ s m}^{-1}$ por causa da falta em Equação 102 de efeitos de realimentação que reduziram Etc está usando temperatura e pressão de vapor perfis deficitários em cima da cultura. Estes parâmetros geralmente aumentam com diminuir Etc e então umedece a redução em Etc .

Recente fase de estação

Durante a recente fase de estação, o Kcb começa a diminuir até que alcança Kcb terminam ao término do período crescente. Podem ser escalados valores para fim de Kcb de Kcb meio em proporção à saúde e condição de folha da vegetação a terminação da estação crescente e de acordo com a duração do recente período de estação (i.e., se deixa senesce lentamente ou é matado através de congelação). podem ser escalados Valores para fim de Kc semelhantemente de Kc meio; porém, a redução em fim de Kc será afetada pela frequência de molhar por irrigação ou precipitação e fim de Kc pode ser proportionally menos.

Se calculou de Equações 97 e 98, fim de Kcb deveria ser reduzido se é representar valores de Kc por plantas com controle de stomatal que é maior que que para vegetação agrícola (onde $rl > 100 \text{ s m}^{-1}$) ou refletir efeitos de ageing e senescence em controle de stomatal. Nestes situações, terminam o Kcb calculado valores deveriam ser multiplicados pelo Fr de Equação 102. Alternativamente, eles podem ser reduzidos por aproximadamente 10% para cada que dobram de rl sobre 100 s m^{-1} quando temperatura de ar de diário má (T_{mean}) é aproximadamente 30° C e por aproximadamente 20% para cada que dobram de rl sobre 100 s m^{-1} quando T_{mean} é aproximadamente 15° C .

Alternativamente, pode ser reduzido o valor para fim de Kcb relativo para o valor calculado por Kcb meio em proporção à fração de folhas saudáveis verdes que permanecem ao término da recente fase de estação relativo para isso durante a meio-estação. Isto pode estar frequentemente baseado em uma pesquisa visual de mim campo e pode ser então uma observação subjetiva.

O parâmetro de f_c e h provavelmente são o índices mais simples para calcular no campo. Novamente, Equações que só deveriam ser usados 97 e 98 como general ou estimativas preliminares de fim de K_{cb} .

Calculando E_{tc} adj que usa rendimentos de cultura

Uma função de produção de cultura-água simples, linear foi introduzida na Irrigação de FAO e Papel de Drenagem Não. 33 predizer a redução em rendimento de cultura quando semente tensão é causada por uma escassez de água de terra. Esta função foi apresentada mais cedo como Equação 90:

$$(90)$$

onde

Y_a = rendimento atual da cultura [$kg\ ha^{-1}$]

Y_m = máximo (esperou) rendimento em ausência de ambiental ou tensões de água

K_y = fator de resposta de rendimento []

E_{tc} = potencial (esperou) evapotranspiration de cultura na ausência de ambiental ou tensões de água ($K_c E_{To}$)

E_{tc} adj = atual (ajustou) evapotranspiration de cultura como resultado de ambiental ou tensões de água

Foram informados valores para K_y em Papel Não. 33 para um alcance largo de Culturas por predizer o efeito de tensão de água e redução associada em E_{tc} adj em rendimento de cultura. São apresentados fatores lá por predizer reduções de rendimento para quando tensão acontece em só uma fase de crescimento de cultura, ou quando é distribuída tensão ao longo do período crescente. São resumidas funções de resposta de rendimento sazonais em Tabela 24.

Muitas tensões ambientais como escassez de água, salinidade, baixa fertilidade e rendimento de impacto de doença reduzindo a quantia de E_{tc} adj relativo à quantia potencial etc. O mesmo pode ser verdade para quando rendimentos estão reduzidos devido ao uso de baixas densidades para populações de planta. Então, para estimativas muito gerais de E_{tc} adj, a pessoa pode inverter Equação 90 e pode resolver para o fator de tensão, K_s :

$$(103)$$

onde K_s é multiplicado por K_{cb} ou por K_c em equações 80 ou 81 predizer o E_{tc} adj no presense da água ou outras tensões ambientais ou para baixas populações de planta ou virilidade. O E_{tc} adj predito usando K_s de equação 103 provê mesmo general e estimativa aproximada de mensal ou até mesmo evapotranspiration sazonal. Equação 103 trabalhos

melhor para forragem ou outras Culturas indiscriminadas onde o valor para K_y é relativamente constante durante a estação.

Equação 103 é geralmente só válida para uso predizendo evapotranspiration de cultura atual para uso em equilíbrio de água regional estuda, para estudos de depleção de solo-água e recarrega, ou por calcular uso de água histórico. O procedimento não é válido para predizer Etc para diário ou períodos de tempo semanais devido à mesma natureza geral do coeficiente de K_y e a balança de tempo sazonal do rendimento de cultura. Os procedimentos apresentaram previamente por ajustar Etc usando um equilíbrio de água de terra diário, salinidade funciona, ou são recomendadas reduções em K_c baseado em área foliar ou fração de cobertura de solo em cima do uso de equação 103.

EXEMPLO 44. Estimação aproximada de K_s de dados de rendimento de cultura

Capítulo 9 - Etc para vegetação natural, non-típica e non-prístina

Non-típico se refere a tipos ou arranjos de colheitas agrícolas que não são listadas ou são descritas em Mesas 12 e 17. Vegetação Non-prístina é definida, no uso aqui, como vegetação que tem menos que condições crescentes perfeitas ou está características (i.e., condições relativamente mais pobres de densidade, altura, área de folha, fertilidade, ou vitalidade) como comparou 'condições de pristine'.

A aproximação por meio de que uma colheita é caracterizada por um coeficiente de colheita, K_c , e o evapotranspiration de colheita é determinado pelo produto de K_c e o evapotranspiration de referência E_{To} , provê um modo simples e conveniente de também caracterizar o evapotranspiration de vegetação natural e para práticas de cultivo non-típicas. Este capítulo apresenta procedimentos por calcular valores de K_c por vegetação natural e para vegetação agrícola para a qual valores de K_c não estão disponíveis.

Aproximação de cálculo

Como descreveu em Figura 27, o primeiro passo na aproximação de $K_c E_{To}$ é a estimativa de durações de fases de crescimento. Isto também aplica a vegetação natural e outra. O próximo passo é o desenvolvimento de curvas de coeficiente de colheita das que representam as relações Etc para E_{To} durante o vários crescimento organiza da vegetação.

Fase de crescimento inicial

O procedimento para calcular coeficientes de colheita para a fase de crescimento inicial para vegetação natural, non-típica e non-prístina é idêntico a isso descrito em Capítulo 6 (único coeficiente de colheita ini de K_c) ou Capítulo 7 (coeficiente de colheita dual, ini de $K_{cb} + K_e$). O coeficiente de colheita nesta fase é principalmente determinado pela frequência com que a terra é wetted.

Fases de estação meio e recentes

O K_c durante o período de meio-estação (K_c meio e K_{cb} meio) e menos o K_c durante o recente período de estação diferem disso descrito em capítulos prévios. Como a cobertura de solo para vegetação natural e non-prístina está frequentemente reduzido, o K_c é afetado a uma extensão grande pela frequência de irrigação de and/or de precipitação e pela quantia de área de folha e cobertura de solo.

Aproximação de coeficiente de colheita dual

A determinação de K_c para vegetação natural, non-típica ou non-prístina ordinariamente deveria seguir a aproximação descrita em Capítulo 7 por meio de que transpiration separado (K_{cb}) e evaporação (K_e) coeficientes são usados. Podem ser calculados os efeitos de evaporação da superfície de terra diretamente como tal.

Dois procedimentos que podem ser usados para ajustar o coeficiente de colheita basal (K_{cb} adj meio) para vegetação escassa é apresentado nesta seção. Nestes aproximações, K_{cb} adj meio ou é calculado de LAI (Equação 97) ou de cobertura de solo efetiva (Equação 98). Depois da determinação de K_{cb} adj meio, o coeficiente de evaporação de terra, K_e , deveria ser determinado para obter o coeficiente de colheita para a fase de meio-estação: K_c adj meio = K_{cb} adj meio + K_e . São apresentados procedimentos por calcular K_e em Capítulo 7.

Até mesmo onde o K_{cb} calculado adj meio é pequeno, o adj de K_c total (= adj de $K_{cb} + K_e$) precipitação seguinte às vezes pode ser como alto ou mais alto que o K_c para vegetação prístina devido a evaporação de superfície de entre vegetação escassa.

Única aproximação de coeficiente de colheita

Quando o único coeficiente de colheita K_c de Capítulo 6 é usado, os efeitos comuns de terra molhar estão incorporados em um K_c mau geral. Algumas diretrizes para a estimação de adj

de K_c são determinadas nas seções seguintes. O único coeficiente de colheita também pode ser derivado do K_{cb} ajustado considerando a frequência de terra molhar, i.e., durante o período de midseason, $\text{adj de } K_c = \text{adj de } K_{cb} + 0.05$ para molhando infrequente e $\text{adj de } K_{cb} + 0.10$ para wettings de até uma vez uma semana. Para wettings mais frequente, deveria ser usada a aproximação de coeficiente de colheita dual.

Alternativamente, Equações podem ser usados 97 e 98 para determinar K_c em vez de K_{cb} . Então, $\text{min de } K_c$ em Equações podem ser fixados 97 e 98 igual para $\text{ini de } K_c$ onde $\text{ini de } K_c$ é calculado de Figura 29 ou 30. O uso de $\text{ini de } K_c$ incorpora efeitos de evaporação de terra e então serve como um mais baixo limite na estimativa para K_c meio.

Condições de tensão de água

Onde chuva ou irrigação é baixa, tensão de água poderia ser induzida e o evapotranspiration derrubarão debaixo do evapotranspiration de colheita standard, etc. A redução no valor para K_c debaixo de condições de baixa disponibilidade de água de terra é determinado usando o coeficiente de tensão K_s como descreveu em Capítulo 8.

Fase de meio-estação - Ajuste para vegetação escassa

Ajuste de observações de campo simples

Como uma aproximação áspera para K_c durante a fase de meio-estação para colheitas que normalmente quase completamente sombra a terra debaixo de condições prístinas, mas onde cobertura está reduzida devido a doença, acentue, pestes, ou plantando densidade, os valores para K_c meio e K_{cb} meio pode ser reduzido por um fator que depende do desenvolvimento de vegetação atual:

$$\text{Adj de } K_c = K_c - A_{cm} \quad (94)$$

onde

$K_c =$ o K_c de Mesa 12 (K_c meio) ou 17 (K_{cb} meio) depois de ajustar isto para clima (Equação 62 ou 70),

$\text{Adj de } K_c =$ o K_c ajustado (K_c adj meio ou K_{cb} adj meio).

O ajuste de K_c que usa Equação 94 não aplica quando colheitas frequentemente são wetted e aumentaram evaporação de terra compensa para a cobertura de solo reduzida. Debaixo destas condições Equação 94 deveria ser aplicada só a K_{cb} .

O coeficiente de ajuste, A_{cm} , é calculado de:

$$A_{cm} = 1 - \left[\frac{LAI}{LAI_{dense}} \right]^{0.5} \quad (95)$$

onde LAI é o índice de área de folha atual (Caixa 17) e LAIdense é o índice de área de folha esperado para a mesma colheita debaixo de normal, práticas de administração de colheita standards. Os valores para LAI na acima de equação podem ser substituídos por valores pela fração de cobertura de solo (fc):

$$A_{cm} = 1 - \left[\frac{f_c}{f_{c,dense}} \right]^{0.5} \quad (96)$$

EXAMPLE 40. First approximation of the crop coefficient for the mid-season stage for sparse vegetation

Uma colheita de tomate estava crescida em Davis, Califórnia, os Estados Unidos em 1980 e só desenvolveu 50% cobertura de solo durante o período de midseason (Pruitt et al., 1984). A altura da colheita de tomate era 0.75 m. A porcentagem típica de cobertura de solo para tomates a cobertura cheia efetiva a Davis é 85 a 90% e corresponde ao Kcb meio listou em Mesa 17 para tomates. Os valores ms para velocidade de vento e umidade relativa mínima durante o período de midseason eram $u_2 = 1.1$ m/s e $RH_{min} = 30\%$. A latitude a Davis é 38.5° N e o ponto central do midseason acontece 20 de julho. O que é um Kcb ajustado meio para tomates que refletem a 50% condição de cobertura de solo?

From Tables 12 and 17, $K_{c, mid} = 1.2$ and $K_{cb, mid} = 1.15$.

Following adjustments for climate (Eq. 62 and Eq. 70) where $u_2 = 1.1$ m/s, $RH_{min} = 30\%$ and mean crop height = 0.75 m,

$$K_c = K_{c, \text{Table}} + [0.04(1.1 - 2) - 0.004(30 - 45)](0.75/3)^{0.30} = K_{c, \text{Table}} + 0.02 \text{ yields,}$$

$$K_{c \text{ mid}} = 1.22 \text{ and } K_{cb \text{ mid}} = 1.17.$$

The ground cover fraction implied in the tabulated values for tomatoes grown under pristine conditions is about 85% ($f_{c \text{ dense}} = 0.85$). For a sparse tomato crop where $f_c = 0.50$,

From Eq. 96

$$A_{cm} = 1 - (0.50/0.85)^{0.5} = 0.23$$

The $K_{cb \text{ mid adj}}$ and $K_{c \text{ mid adj}}$ for 50% ground cover is (from Eq. 94)

$$K_{cb \text{ mid adj}} = 1.17 - 0.23 = 0.94$$

$$K_{c \text{ mid adj}} = 1.22 - 0.23 = 0.99$$

Compare the results with Example 42 where a more precise derivation of $K_{cb \text{ mid adj}}$ is made.

As a first estimate, the crop coefficient is expected to be 20% lower than the value under pristine conditions.

Estimação de K_{cb} meio de Índice de Área de Folha (LAI)

Vegetação natural tem menos área de folha ou fração de cobertura de solo tipicamente que faz vegetação agrícola que foi desenvolvida para cobertura de solo cheia e para água de terra favouring condiciona crescimento vigoroso. Isto é especialmente verdade em climas semi-áridos e áridos. O valor para K_{cb} meio para vegetação natural ou non-prístina deveria ser reduzido quando plante and/or de densidade folheiam área é mais baixo que para condições de cobertura cheias (geralmente definiu como quando $LAI \geq 3$). Onde LAI pode ser medido ou pode ser aproximado, um cume K_{cb} meio para vegetação agrícola natural, non-típica ou non-prístina pode ser aproximado semelhante a um procedimento usado por Ritchie como:

$$K_{cb \text{ mid}} = K_{c \text{ min}} + (K_{cb \text{ full}} - K_{c \text{ min}})(1 - \exp[-0.7 LAI]) \quad (97)$$

onde

K_{cb} K_{cb} basal calculado meio durante a meio-estação quando plante and/or de densidade folheiam área é mais baixo que para condições de cobertura cheias,

K_{cb} K_{cb} basal calculado cheio durante a meio-estação (a tamanho de planta de cume ou altura) para vegetação que tem cobertura de solo cheia ou $LAI > 3$ (Equações 99 e 100),

Min de K_c o K_c mínimo para terra nua (min de $K_c \gg 0.15 - 0.20$),

LAI índice de área de folha atual, definido como a área de folhas por área de superfície de solo subjacente calculada a média em cima de uma área grande. Só um lado de folhas é contado [$m^2 m^{-2}$].

Equação 97 é recomendada para tipos anuais de vegetação que ou é natural ou está em um estado non-prístino devido a densidade escassa ou efeitos de algum tipo de tensão ambiental em crescimento.

A relação expressada em Equação 97 produz resultados semelhante para esses sugeridos por Ritchie (1974). Para $LAI > 3$, K_{cb} meio \gg K_{cb} cheio. O LAI usado em Equação 97 deveria ser o 'green' LAI que representa folhas só saudáveis que são ativo em transferência de vapor.

BOX 17. Measuring and estimating LAI

LAI pode ser medido diretamente colhendo folhas saudáveis todo verdes de vegetação em cima de um medido ou prescreveu área, por exemplo, 1 m^2 ou 10 m^2 , e medindo então e somando as áreas de folhas individuais que usam métodos de photometric ou medindo áreas de várias folhas de representante, calculando a média, e multiplicando então pelo número total de folhas contou.

Na ausência de medidas para LAI, LAI pode ser calculado para vegetação escassa, anual como:

$$LAI = LAI_{dense} \left[\frac{Population}{Population_{dense}} \right]^a$$

where

LAI_{dense} LAI para a espécie de planta particular debaixo de normal, 'dense' ou condições crescentes prístinas.

LAI_{dense} pode ser obtido de várias fontes fisiológicas e livros de ensino em colheitas e vegetação.

Número de população de plantas por área de unidade de superfície de terra debaixo das condições crescentes atuais [Nenhum. m-2].

$Population_{dense}$ numeram de plantas por área de unidade de superfície de terra abaixo o 'dense' ou condições crescentes prístinas [Nenhum. m-2].

um $um = 0.5$ quando população é formada de plantas crescentes vigorosas; $um = 1$ quando plantas são menos vigorosas.

O 0.5 explicador na equação simula a tendência para vegetação compensar para reduzido esteja densidade aumentando o tamanho e áreas de folha totais para plantas individuais. Então, LAI não desaba nenhuma proporção direta para plantar população.

Debaixo de condições onde o tamanho de planta não aumenta com reduzido esteja densidade, o 'explicador de a' na equação deveria ser fixado a 1 ($um = 1$). Estas condições posteriores podem acontecer onde suja fertilidade é pobre ou onde suja salinidade, tensão de água de terra, ou waterlogging inibem crescimento e densidade de posto, de forma que o crescimento de plantas individuais é retardado..

Estimação de K_{cb} meio de cobertura de solo efetiva (eff de f_c)

Onde efetivamente só estimativas da fração de superfície de terra cobriram através de vegetação está disponível, a aproximação seguinte para K_{cb} podem ser usados adj meio:

Estimação de K_{cb} meio de cobertura de solo efetiva (eff de f_c)

Onde efetivamente só estimativas da fração de superfície de terra cobriram através de vegetação está disponível, a aproximação seguinte para K_{cb} podem ser usados adj meio:

$$K_{cbmid} = K_{cmin} + (K_{cbfull} - K_{cmin}) \left(\min \left(1, 2f_c, (f_{ceff}) \left(\frac{1}{1+h} \right) \right) \right) \quad 98)$$

where

$K_{cb\ mid}$ estimated basal K_{cb} during the mid-season when plant density and/or leaf area are lower than for full cover conditions,

$K_{cb\ full}$ estimated basal K_{cb} during the mid-season (at peak plant size or height) for vegetation having full ground cover or LAI > 3 (see Equations 99 and 100),

$K_{c\ min}$ the minimum K_c for bare soil (in the presence of vegetation) ($K_{c\ min} \square 0.15-0.20$),

f_c observed fraction of soil surface that is covered by vegetation as observed from nadir (overhead) [0.01 - 1],

$f_{c\ eff}$ the effective fraction of soil surface covered or shaded by vegetation [0.01-1] (see Box 18),

h the plant height [m].

Condu ncia de Stomatal e transporte de  gua dentro de plantas podem limitar ET debaixo de condi es de vegeta o escassa, alta. Debaixo destas condi es, $K_{cb\ meio}$ est  limitado pelo " $2f_c$ " termo em Equa o 98. Equa o 98 aplica bem a  rvores e arbustos.

BOX 18. Measuring and estimating $f_{c\ eff}$

$f_{c\ eff}$ de f_c deveriam representar a fra o da superf cie de terra que est  sombreado atrav s de vegeta o normalmente. Este valor   geralmente maior que f_c , a fra o atual da superf cie de terra que   coberta atrav s de vegeta o como observou diretamente em cima de. A quantia de matiza o representa a quantia de radia o solar interceptada por plantas para convers o potencial em evapotranspiration. A fra o total de matiza o   uma fun o do  ngulo de sol e o tamanho horizontal e forma de plantas individuais (ou filas) relativo   altura deles/delas.

$f_{c\ eff}$ de f_c para ' rectangular' amoldados p lio como filas de planta mais agr colas podem

ser aproximados como:

$$f_{c\text{eff}} = f_c \left[1 + \frac{\text{HWR}}{\tan(\eta)} \right] \leq 1$$

where

f_c observaram fração de superfície de terra que é coberta através de vegetação como observou de nadir (em cima) [0.01-1],

Altura de HWR para relação de largura de plantas individuais ou grupos de plantas quando viu do leste ou do oeste [],

$\tan(h)$ tangente do ângulo mau do sol, h , sobre o horizonte durante o período de evapotranspiration de máximo (geralmente entre 11.00 e 15.00 horas) []. Para a maioria das aplicações, h pode ser computado a meio-dia solar (12.00 horas).

HWR é computado como:

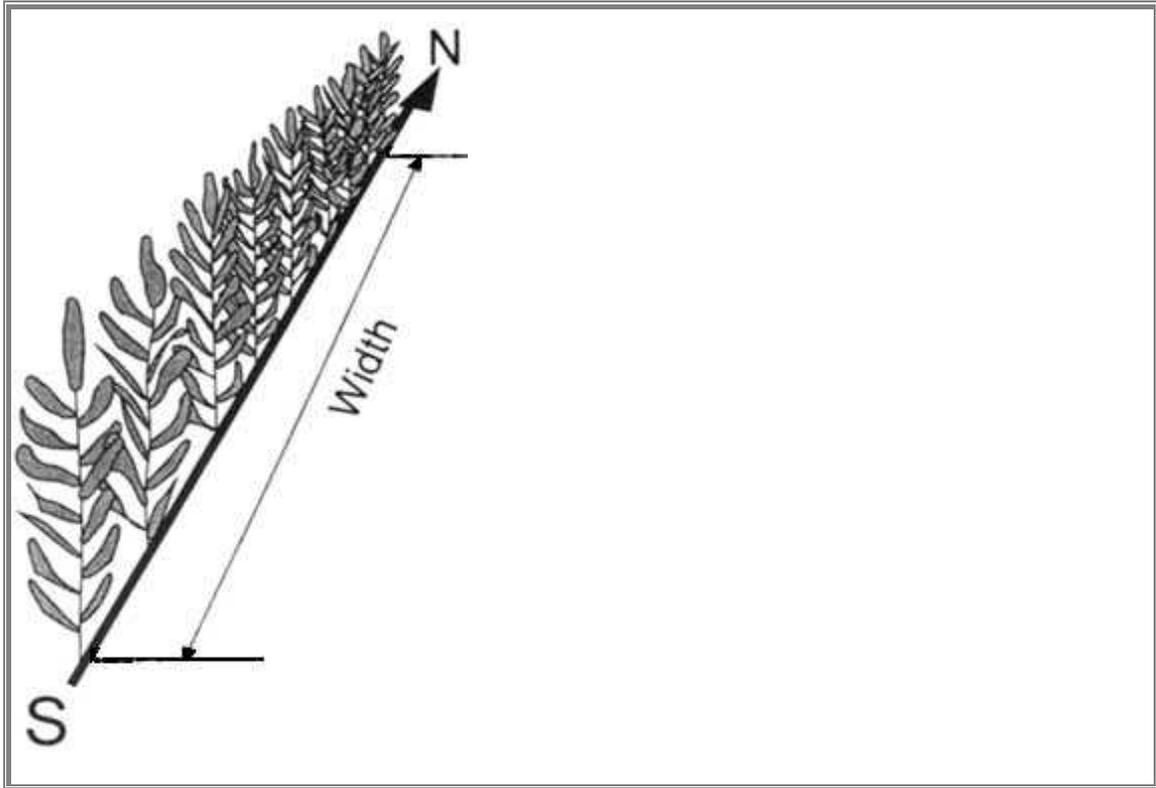
$$\text{HWR} = \frac{h_{\text{canopy}}(\cos(\Gamma))}{\text{Width}}$$

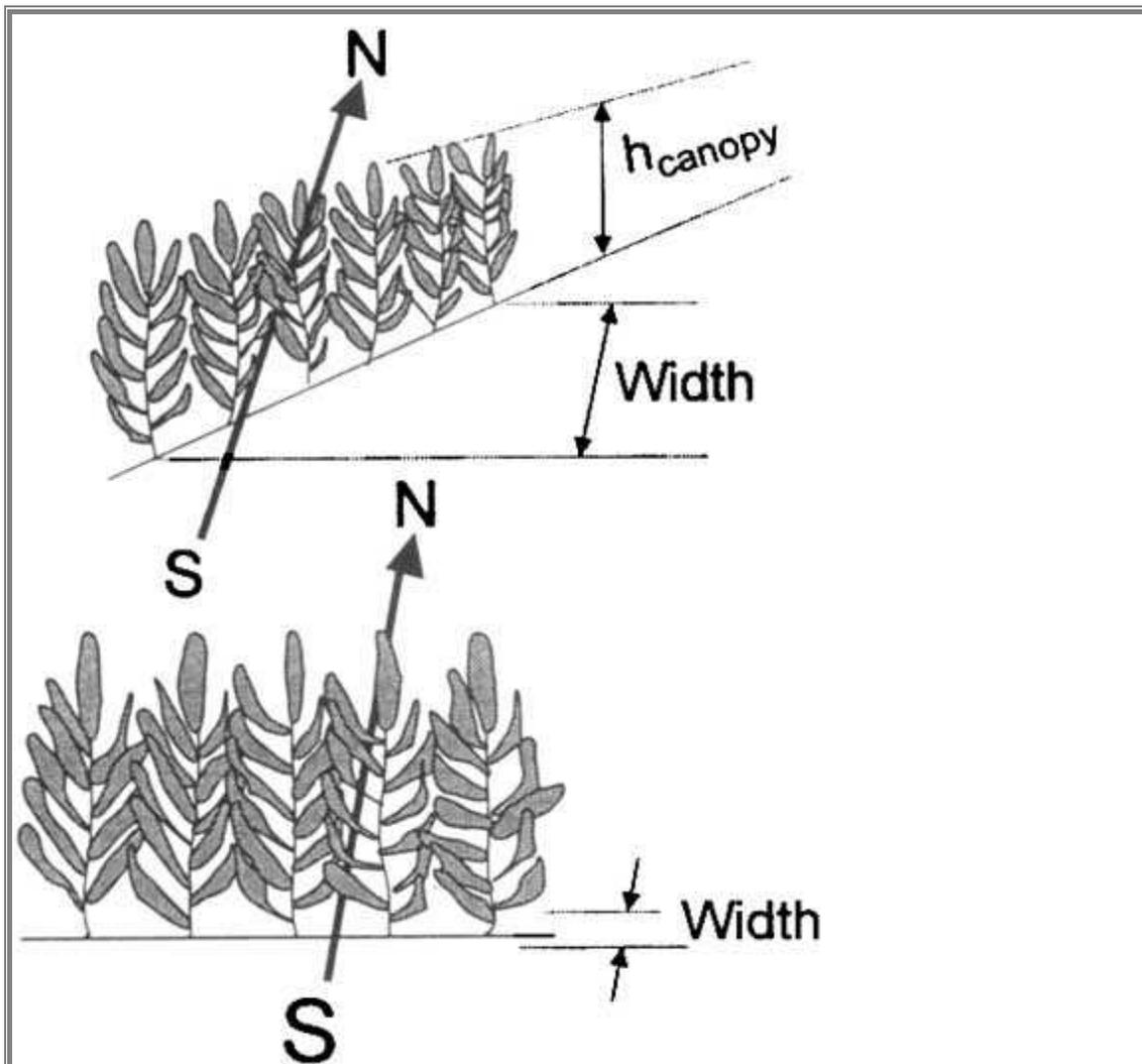
where

h_{canopy} significam altura vertical da área de pálio da planta [m],

Largura largura má do pálio de uma planta ou grupo de plantas (por exemplo, fila) [m]

Ângulo de G de fila de planta de direção de leste-oeste [rad] (para filas de leste-oeste, $G = 0$; para filas norte-suis, $G = \pi/2$)





Para filas norte-suis, o HWR seria zero, como $\cos(p/2) = 0$. Isto implica que plantas que correm de norte para sul teria $eff_{fc} = f_c$ como toda a terra é exposta ao sol em vários momentos do dia e como a área sombreada está igual à fração de cobertura de vegetação a meio-dia.

Para árvores ou vegetação que não têm pálio que estendem ao solo, h_{canopy} não inclui a mais baixa duração de tronco, mas só o pálio ativo. Então, nestes situações, $h_{canopy} < h$ onde h é altura de planta má.

Para círculo ou pálio amoldados esféricos como árvores, eff_{fc} podem ser calculados como:

$$f_{c\text{eff}} = \frac{f_c}{\sin(\eta)} \leq 1$$

onde $\sin(h)$ é o seno do ângulo mau do sol, h , sobre o horizonte durante o período de evapotranspiration de máximo (geralmente entre 11.00 e 15.00) []

Ângulo mau do sol sobre o horizonte durante o período de evapotranspiration de máximo (h)

O seno de h pode ser calculado durante qualquer tempo específico de dia como:

$$\sin(\square) = \sin(\square)\sin(\square) + \cos(\square)\cos(\square)\cos(\square)$$

onde

latitude de j [rad] (negativo para latitudes meridionais)

d declinação solar [rad] (Eq. 24)

w ângulo de tempo solar [rad] (Eq. 31)

Geralmente, podem ser calculados eff de f_c a meio-dia solar (12.00), de forma que $w = 0$ e a acima de equação reduz:

$$\sin(\square) = \sin(\square)\sin(\square) + \cos(\square)\cos(\square)$$

O valor para h pode ser obtido levando o arcsine da acima de equação.

Estimação de K_{cb} cheio

Colheitas agrícolas:

Colheitas agrícolas Non-prístinas representam colheitas que não desenvolveram ao potencial deles/delas devido a tensões ambientais causadas por escassez de água de terra, fertilidade, infectam e pastam ou dano de inseto ou devido a baixa densidade de planta. O valor para K_{cb}

cheio em Equações podem ser levados 97 e 98 como o Kcb valor meio listado para qualquer "colheita de cheio-cobertura" (eff de fc ~ 1) em Mesa 17, depois de ajustar isto para clima (Equação 70):

$$K_{cbfull} = K_{cbmidTable} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (99)$$

onde

u_2 valor mau para velocidade de vento a 2 altura de m durante a meio-estação [m s⁻¹],
 RH_{min} valor mau para diário de mínimo umidade relativa durante a meio-estação [%].
 h altura de planta de máximo má [m].

Vegetação natural e colheitas não listaram em Mesa 17:

Para vegetação natural, colheitas de nonfull-cobertura, ou para colheitas não listadas em Mesa 17, Kcb cheio pode ser aproximado como uma função de clima e altura de planta má para áreas de vegetação que é maior que alguns hectares:

$$K_{cbfull} = K_{cb,h} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (100)$$

where

$K_{cb,h}$ $K_{cb\ mid}$ for full cover vegetation (LAI > 3) under sub-humid and calm wind conditions ($RH_{min} = 45\%$ and $u_2 = 2\ m\ s^{-1}$), (Equation 101),

u_2 mean value for wind speed at 2 m height during the mid-season [m s⁻¹],

RH_{min} mean value for minimum daily relative humidity during the mid-season [%]

h mean maximum plant height [m].

The value for $K_{cb,h}$ is estimated as:

$$K_{cb,h} = 1.0 + 0.1 h \text{ for } h \leq 2\ m \quad (101)$$

onde K_{cb} , h é limitado a £ 1.20 quando $h > 2$ m. O valor de 1.2 representa um limite superior geral em K_{cb} meio para vegetação alta que tem cobertura de solo cheia e $LAI > 3$ debaixo das condições de vento sub-úmidas e tranqüilas. Este limite de 1.2 é ajustado para outras condições climáticas em Equação 100. Equações 100 e 101 produto uma aproximação geral para o aumento em K_{cb} cheio com altura de planta e clima. A forma destas equações adere a tendências representadas em Equação 70.

Para pequeno, isolado esteja tamanhos, K_{cb} cheio pode precisar de ser aumentado além do valor dado por Equação 99 ou 100, como discutiu em Capítulo 10.

Conclusão

Equações podem ser usados 97 e 98 calcular ou reduzir K_{cb} para vegetação agrícola non-prístina. Os explicador em Equações 97 e 98 refletem os efeitos de advection de microscale (transfira) de calor sensato de superficies de terra secas entre plantas para folhas de planta, assim ET crescente por área de folha de unidade, e os efeitos de aspereza aerodinâmica aumentada como o valor para diminuições de LAI. Equação 98 sugere que como aumentos de h , área de folha total e aspereza efetiva de aumento de vegetação, aumentando o coeficiente de colheita assim. Além, como aumentos de h , mais oportunidade para microadvection de calor de terra para pálio acontece e troca turbulenta dentro do pálio aumenta para a mesma quantia de cobertura de solo. Tudo estes fatores afetam a magnitude relativa de K_{cb} meio.

Equações que deveriam ser usados 97 e 98 com precaução como eles provêem só uma estimativa do máximo que K_{cb} esperou durante crescimento de planta de cume para vegetação com folhas acontecendo saudáveis e uma superficie de terra seca. Onde controle de stomatal é maior que então para vegetação agrícola típica, o K_{cb} deveria ser reduzido usando o jogo de recomendações mais adiante fora na próxima seção (Equação 102).

EXAMPLE 41. Estimation of mid-season crop coefficient

Estimate $K_{cb \text{ mid}}$ and $K_{c \text{ mid}}$ for rectangular shaped 2 m tall vegetation that is as tall as it is wide, where 30% of the ground is covered by vegetation ($f_c = 0.3$) on 19 July (day 200 of the year) and at latitude 40°N . $RH_{\min} = 55\%$ and $u_2 = 1.5$ m/s during the mid-season period.

On day $J = 200$ at latitude ($\phi = 40$ ($\phi / 180$) = 0.70 radians (40°N), from Eq. 24, the solar

declination $\delta = 0.36$ radians.

At solar noon ($\theta = 0$):

$$\sin(\theta) = \sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi) = 0.94$$

The value for θ by taking the arcsine of above value is 1.24 radians and $\tan(\theta) = 2.8$. If $f_c = 0.3$ and the HWR for the vegetation is 1, then $f_{c \text{ eff}}$ from Box 18 is: $0.3(1 + 1/2.8) = 0.41$.

From Eq. 101 $K_{cb, h} = 1.0 + 0.1(2) = 1.20$ ($\theta = 1.20$, so OK)

From Eq. 100 $K_{cb \text{ full}} = 1.20 + (0.04(1.5 - 2) - 0.004(55 - 45)) (2/3)^{0.3} = 1.15$

Therefore, $K_{cb \text{ mid}}$ estimated by Eq. 98 for $K_{c \text{ min}} = 0.15$ is

$$K_{cb \text{ mid}} = K_{c \text{ min}} + (K_{cb \text{ full}} - K_{c \text{ min}}) \min[1, 2f_c, (f_{c \text{ eff}})^{(1/(1+h))}] = 0.15 + (1.15 - 0.15) \min[1, 2(0.3), (0.4)^{(1/(1+2))}] = 0.75$$

This value does not need any further adjustment for climate.

$K_{c \text{ mid}}$ (where $K_{c \text{ mid}}$ includes average wetting effects) can be derived from $K_{cb \text{ mid}}$ using the guidelines presented in the calculation procedures at the beginning of this chapter

$$K_{c \text{ mid}} = K_{cb \text{ mid}} + (0.05 \dots 0.10) = 0.80 \dots 0.85$$

depending on the frequency of soil wetting.

The estimated crop coefficients for the mid-season stage are $K_{cb \text{ mid}} = 0.75$ and $K_{c \text{ mid}} = 0.80$ to 0.85 .

EXAMPLE 42. Estimation of mid-season crop coefficient for reduced ground cover

Uma estimativa mais precisa de K_{cb} meio para a colheita de tomate de Exemplo 40 que só desenvolveu 50% cobertura de solo a Davis, Califórnia, que os Estados Unidos podem ser calculados se a pessoa sabe que a colheita de tomate foi plantada em 1.52 m que rema leste-oeste corrente, que a colheita alcançou uma altura de planta de 0.75 m e que a altura para relação de largura da colheita de tomate pode ser calculada como aproximadamente

1.0 para as filas de leste-oeste. A latitude é 38.5°N e o ponto central da meio-estação acontece 20 de julho.

O que é o K_{cb} ajustado meio para tomates que refletem a 50% condição de cobertura de solo

On day $J = 201$ (20 July) at latitude $\phi = 38.5$ ($\phi / 180$) = 0.67 radians (38.5°N), from Eq. 24 the solar declination $\delta = 0.36$ radians. At solar noon ($\omega = 0$):

$$\sin(\theta) = \sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta) = 0.95$$

The value for θ by taking the arcsine of the above value is 1.26 radians. Therefore, for the observed HWR = 1 and $f_c = 0.5$, the effective soil cover for the east-west rows can be calculated as (Box 18):

$$f_{c\text{ eff}} = 0.5 [1 + 1/\tan(1.26)] = 0.66$$

The $K_{cb\text{ mid}}$ in Table 17 representing a full cover tomato crop is 1.15 and the average h for fully developed tomatoes (this variety) is about 0.75 also. Following adjustment for climate (using Eq. 99)

$$K_{cb\text{ full}} = 1.15 + [0.04(1.1 - 2) - 0.004(30 - 45)] (0.75/3)^{0.30} = 1.17$$

From Eq. 98 and using $K_{c\text{ min}} = 0.15$, the adjusted $K_{cb\text{ mid}}$ for 50% ground cover would be:

$$K_{cb\text{ mid adj}} = 0.15 + (1.17 - 0.15) \min(1, 2(0.5), 0.66^{1/(1+0.76)}) = 0.95$$

The results $K_{cb\text{ mid adj}} = 0.95$ for 50% ground cover are similar to the first estimate calculated in Example 40 and compare with the measured $K_{cb\text{ mid}} \sim 0.90$ to 1.00 as determined by precision lysimeter by Pruitt *et al.* (1984).

Fase de meio-estação - Ajuste para controle de stomatal

O valor para K_{cb} cheio em Equações 97 e 98 podem precisar de ser reduzidos para vegetação que tem um grau alto de controle de stomatal. Para vegetação como alguns tipos de vegetação de deserto ou árvores com resistência de folha significativamente maior que o da maioria das colheitas agrícolas onde r_l é comumente aproximadamente 100 s m⁻¹, o K_{cb} meio calculou usando Equações 97 e 98 pode ser modificado multiplicando por um fator de correção de

resistência, Fr. O fator de correção de resistência é desenvolvido baseado no FAO equação de Penman-Monteith:

$$F_r \approx \frac{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}{\Delta + \gamma \left(1 + 0.34u_2 \frac{r_l}{100} \right)} \quad (102)$$

onde

rl resistência de folha má para a vegetação em questão [s m-1].

O rl de resistência de folha mau é 100 s m-1 para a grama referência de ETo e para muitas colheitas agrícolas. Podem ser achados valores para rl para muitas plantas agrícolas e non-agricolas em Körner et al. (1978) e Allen al de et. (1996). equação 102 reflete a aspereza aerodinâmica fixa de grama em lugar de a aspereza da vegetação específica, desde que o Kc ajustado é multiplicado pela grama ETo e o Kc já reflete os efeitos da aspereza aerodinâmica para a vegetação específica.

EXEMPLO 43. Estimação de Kcb meio de cobertura de solo com redução para controle de stomatal

Um grove de árvores de azeitona tem uma árvore que espaça de 10 m. O diâmetro horizontal das árvores como viu em cima de é 5 m. A altura de árvore é 5 m. O mais baixo 1.5 m das árvores não têm nenhuma folhagem. A cobertura de solo entre as árvores é nua. O mau u2 durante a fase de crescimento de meio-estação são 2 m/s e o RHmin mau = 25%. O ponto central da fase de crescimento de meio-estação está 29 junho (i.e., dia 180 do ano). A latitude da localização é 30°N.

Calcule Kcb Eq usando meio. 98 para o 10x10 m e por um 5x10 m espaçar.

On day J = 180 (29 June) at latitude ($\phi = 30$ ($\phi / 180$) = 0.52 radians (30°N) and from Eq. 24 the solar declination $\delta = 0.405$ radians. At solar noon ($\omega = 0$):

$$\sin(\theta) = \sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta) = 0.99$$

As olive trees have somewhat round shapes, the effective fraction of ground cover (Box

18) can be estimated as $f_{c\text{ eff}} = f_c / (\sin(\square))$.

$$f_c = \text{area of canopy/area tree spacing} = (\square (5)^{2/4}) / (10)(10) = 0.196$$

$$f_{c\text{ eff}} = 0.196 / 0.99 = 0.20$$

From Eq. 101: $K_{cb, h} = 1.0 + 0.1(5) > 1.2$ or $K_{cb, h} = 1.2$

From Eq. 100: $K_{cb\text{ full}} = 1.2 + [0 - 0.004(25 - 45)](5/3)^{0.3} = 1.29$

From Eq. 98 and using $K_{c\text{ min}} = 0.15$: $K_{cb\text{ mid}} = 0.15 + (1.29 - 0.15) \min(1, 2(0.196), (0.20)^{1/(1+5)}) = 0.60$

Körner *et. al.* (1979) indicate that olives (*Olea europaea*) have r_l of about 420 s/m. Therefore, assuming that average $T_{\text{mean}} = 25^\circ\text{C}$ and that the elevation of the grove is 0 m (sea level), so that $\square = 0.189$ kPa (Eq. 13) and $\square = 0.0676$ kPa (Eq. 8), F_r is estimated from Eq. 102 as:

$$F_r \approx \frac{0.189 + 0.0676(1 + 0.34(2))}{0.189 + 0.0676\left(1 + 0.34(2)\frac{420}{100}\right)} = 0.67$$

The $K_{cb\text{ mid}}$ adjusted for increased stomatal control using F_r is then

$$K_{cb\text{ mid adj}} = F_r K_{cb\text{ mid}} = 0.67 (0.60) = 0.40$$

The value $K_{cb\text{ mid adj}} = 0.40$ estimated for $f_c = 0.20$ is less than the value for $K_{cb\text{ mid}}$ in Table 17 for olives for $f_c = 0.40$ to 0.67, due to the differences in f_c . The value from Table 17 is 0.70, which after adjustment for climate using Eq. 70 equals 0.79.

If the olives had been planted on a 5x10 m spacing, as is common in California, the United States, and which is reflected in the K_{cb} values for olives in Table 17, then $f_c = 0.39$, $f_{c\text{ eff}} = 0.40$, and $K_{cb\text{ mid}}$ from Eq. 98 is $K_{cb\text{ mid}} = 1.04$, so that the estimated $K_{cb\text{ mid}}$ adjusted for stomatal control using $F_r = 0.67$ is $K_{cb\text{ mid adj}} = 0.67(1.04) = 0.70$. This value compares with the value of 0.79 obtained from Table 17 for mature trees, after adjustment for climate.

The basal crop coefficient, $K_{cb\text{ mid}}$, taking the low density, climatic condition and stomatal control into account is 0.40. It increases to 0.70 for the 5x10 m spacing.

A equação menosprezaria F_r (superestime a redução em K_{cb}) se usou com a aspereza atual da vegetação quando $r_l > 100 \text{ s m}^{-1}$ por causa da falta em Equação 102 de efeitos de realimentação que reduziram E_{tc} está usando temperatura e pressão de vapor perfis deficitários em cima da colheita. Estes parâmetros geralmente aumentam com diminuir E_{tc} e então umedece a redução em E_{tc} .

Recente fase de estação

Durante a recente fase de estação, o K_{cb} começa a diminuir até que alcança K_{cb} terminam ao término do período crescente. Podem ser escalados valores para fim de K_{cb} de K_{cb} meio em proporção à saúde e condição de folha da vegetação a terminação da estação crescente e de acordo com a duração do recente período de estação (i.e., se deixa senesce lentamente ou é matado através de congelação). podem ser escalados Valores para fim de K_c semelhantemente de K_c meio; porém, a redução em fim de K_c será afetada pela frequência de molhar por irrigação ou precipitação e fim de K_c pode ser proportionally menos.

Se calculou de Equações 97 e 98, fim de K_{cb} deveria ser reduzido se é representar valores de K_c por plantas com controle de stomatal que é maior que que para vegetação agrícola (onde $r_l > 100 \text{ s m}^{-1}$) ou refletir efeitos de ageing e senescence em controle de stomatal. Nestes situações, terminam o K_{cb} calculado valores deveriam ser multiplicados pelo F_r de Equação 102. Alternativamente, eles podem ser reduzidos por aproximadamente 10% para cada que dobram de r_l sobre 100 s m^{-1} quando temperatura de ar de diário má (T_{mean}) é aproximadamente 30° C e por aproximadamente 20% para cada que dobram de r_l sobre 100 s m^{-1} quando T_{mean} é aproximadamente 15° C .

Alternativamente, pode ser reduzido o valor para fim de K_{cb} relativo para o valor calculado por K_{cb} meio em proporção à fração de folhas saudáveis verdes que permanecem ao término da recente fase de estação relativo para isso durante a meio-estação. Isto pode estar freqüentemente baseado em uma pesquisa visual de mim campo e pode ser então uma observação subjetiva.

O parâmetro de f_c e h provavelmente são o índices mais simples para calcular no campo. Novamente, Equações que só deveriam ser usados 97 e 98 como general ou estimativas preliminares de fim de K_{cb} .

Calculando E_{tc} adj que usa rendimentos de colheita

Uma função de produção de colheita-água simples, linear foi introduzida na Irrigação de FAO e Papel de Drenagem Não. 33 predizer a redução em rendimento de colheita quando

semeie tensão é causada por uma escassez de água de terra. Esta função foi apresentada mais cedo como Equação 90:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_{c,adj}}{ET_c}\right) \quad (90)$$

where

Y_a = actual yield of the crop [kg ha^{-1}]

Y_m = maximum (expected) yield in absence of environmental or water stresses

K_y = yield response factor []

ET_c = potential (expected) crop evapotranspiration in the absence of environmental or water stresses ($K_c ET_o$)

$ET_{c,adj}$ = actual (adjusted) crop evapotranspiration as a result of environmental or water stresses

Foram informados valores para K_y em Papel Não. 33 para um alcance largo de colheitas por predizer o efeito de tensão de água e redução associada em $ET_{c,adj}$ em rendimento de colheita. São apresentados fatores lá por predizer reduções de rendimento para quando tensão acontece em só uma fase de crescimento de colheita, ou quando é distribuída tensão ao longo do período crescente. São resumidas funções de resposta de rendimento sazonais em Mesa 24.

Muitas tensões ambientais como escassez de água, salinidade, baixa fertilidade e rendimento de impacto de doença reduzindo a quantia de $ET_{c,adj}$ relativo à quantia potencial etc. O mesmo pode ser verdade para quando rendimentos estão reduzidos devido ao uso de baixas densidades para populações de planta. Então, para estimativas muito gerais de $ET_{c,adj}$, a pessoa pode inverter Equação 90 e pode resolver para o fator de tensão, K_s :

$$K_s = 1 - \frac{1}{K_y} \left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) \quad (103)$$

onde K_s é multiplicado por K_{cb} ou por K_c em equações 80 ou 81 predizer o Etc adj no presense da água ou outras tensões ambientais ou para baixas populações de planta ou virilidade. O Etc adj predito usando K_s de equação 103 provê mesmo general e estimativa aproximada de mensal ou até mesmo evapotranspiration sazonal. Equação 103 trabalhos melhor para forragem ou outras colheitas indiscriminadas onde o valor para K_y é relativamente constante durante a estação.

Equação 103 é geralmente só válida para uso predizendo evapotranspiration de colheita atual para uso em equilíbrio de água regional estuda, para estudos de depleção de solo-água e recarrega, ou por calcular uso de água histórico. O procedimento não é válido para predizer Etc para diário ou períodos de tempo semanais devido à mesma natureza geral do coeficiente de K_y e a balança de tempo sazonal do rendimento de colheita. Os procedimentos apresentaram previamente por ajustar Etc usando um equilíbrio de água de terra diário, salinidade funciona, ou são recomendadas reduções em K_c baseado em área de folha ou fração de cobertura de solo em cima do uso de equação 103.

EXEMPLO 44. Estimação aproximada de K_s de dados de rendimento de colheita

Um esquema de irrigação (projeto) cultiva feijões secos, comestíveis. Lá é conhecido para ser uma escassez de água de irrigação e uma redução correspondente em rendimento de colheita. O rendimento informado para o esquema calcula a média 1100 kg/ha. O rendimento potencial para a região e variedade de feijões, na ausência de água ou tensões ambientais e com fertilidade de terra boa está 1800 kg/ha.

De Irrigação de FAO e Papel de Drenagem Não. 33 ou Mesa 24, o K_y para feijões secos, que assumem que são distribuídas tensões uniformemente pela estação crescente, é 1.15. Então, de Equação 103, é o K_s calculado para aplicar com Equação 80 para a estação crescente:

$$K_s = 1 - \frac{1}{1.15} \left(1 - \frac{1100}{1800} \right) = 0.66$$

Therefore, the $ET_{c \text{ adj}}$ for the season is predicted to be only 0.66 of maximum ET_c under pristine growing conditions.

The estimated seasonal $ET_{c \text{ adj}}$ is predicted to be $ET_{c \text{ adj}} = 0.66 ET_c$ where ET_c is predicted as $ET_c = K_c ET_o$.

Capítulo 10 - Etc debaixo de várias práticas de administração

Este capítulo discute vários tipos de fatores que podem causar os valores por K_c e Etc divergir dos valores standards descreveram nos Capítulos 6 e 7. Estes fatores se referem aos efeitos de mulches de superfície, intercropping, áreas pequenas de vegetação e práticas de cultivo específicas.

É pretendido que este capítulo serve como um recurso para situações onde práticas de cultivo são conhecidas para divergir desses assumiram em Mesas 12 e 17, mas onde calcula de K_c e Etc ainda é necessário. Este capítulo está por nenhum meios exaustivo. O intento é

demonstrar alguns dos procedimentos que podem ser usados para fazer ajustes a K_c responder por divergências de condições de padrão.

Efeitos de mulches de superfície

Mulches são frequentemente usados em produção vegetal reduzir perdas de evaporação da superfície de terra, acelerar desenvolvimento de colheita em climas frescos aumentando temperatura de terra, reduzir erosão, ou ajudar em controle de erva daninha. Mulches pode ser composto de materiais de planta orgânicos ou eles podem ser mulches sintético que consistem em folhas de plástico.

Mulches de plástico

Mulches de plástico geralmente consistem em folhas magras de polyethylene ou um material semelhante colocadas em cima da superfície de solo, especialmente ao longo das filas de planta. Buracos estão cortados no filme de plástico em espaçamentos de planta permitir a vegetação de planta para emergir. Mulches de plástico podem ser transparentes, brancos ou negro. Colour influencia albedo principalmente durante as fases cedo da colheita. Porém, como a intenção é usar um procedimento simples por ajustar K_c para mulched semente, nenhuma distinção é feita entre os tipos diferentes de mulches de plástico.

Mulches de plástico reduzem a evaporação de água substancialmente da superfície de terra, especialmente debaixo de sistemas de irrigação de gota. Associado com a redução em evaporação é um aumento geral em transpiration de vegetação causada pela transferência de ambos sensato e radiative aquecem da superfície da cobertura de plástico a vegetação adjacente. Embora o transpiration taxe debaixo de mulch pode aumentar por uma média de 10-30% em cima da estação como comparou a não usando nenhum mulch, o K_c estima diminuição por uma média de 10-30% devido à 50-80% redução em evaporação de terra. Um resumo de reduções observadas em K_c , em evaporação, e aumentos em transpiration em cima de estações crescentes são determinados em Mesa 25 para cinco colheitas hortícolas. Geralmente, taxas de crescimento de colheita e rendimentos vegetais são aumentados pelo uso de mulches de plástico.

TABELA 25. Reduções aproximadas em K_c e evaporação de superfície e aumentos em transpiration para várias colheitas hortícolas debaixo de mulch de plástico completo como comparou sem mulch que usa irrigação de gota

Crop	Reduction in K_c (%)	¹Reduction in evaporation (%)	¹ Increase in transpiration (%)	in Source
Squash	5-15	40-70	10-30	Safadi (1991)
Cucumber	15-20	40-60	15-30	Safadi (1991)
Cantaloupe	5-10	80	35	Battikhi and Hill (1988)
Watermelon	25-30	90	-10	Battikhi and Hill (1986), Ghawi and Battikhi (1986)
Tomato	35	not reported	not reported	Haddadin and Ghawi (1983)
Average	10-30	50-80	10-30	

¹ relativo a não usar nenhum mulch

Único coeficiente de colheita, K_c ,

Considerar os efeitos de mulch de plástico em Etc, os valores para K_c meio e K_c terminam para as colheitas hortícolas listadas em Mesa 12 pode ser reduzido por 10-30% e pode ser dependido da frequência de irrigação (use o valor mais alto por irrigação de gota freqüente). O valor para ini de K_c debaixo de mulch é freqüentemente tão baixo quanto 0.10. Quando o mulch de plástico não cobre o wetted de terra completamente pelos emissores de goteira, ou onde chuva significativa acontece, então a redução em K_c meio ou fim de K_c será menos, em proporção à fração de superfície molhada coberta pelo mulch.

Coeficiente de colheita dual, $K_{cb} + K_e$

Quando calculando K_{cb} basal para mulched semeia, de menos ajuste é precisado normalmente à curva de K_{cb} e é da ordem de uma 5-15% redução em K_{cb} , como é geralmente compreendido que o 'evaporação de basal' de água da superfície de terra é menos com um mulch de plástico, entretanto o transpiration é aumentado. O efeito em K_{cb} poderia ser maior em algumas situações e com alguns tipos de baixas colheitas de densidade. Calibração local de K_{cb} (e K_c) para uso com cultura de mulch é encorajado.

Quando calculando o coeficiente de evaporação de terra K_e com mulch de plástico, o f_w deveriam representar a fração equivalente relativa da superfície de solo que pode contribuir a evaporação pela abertura fura no plástico cubra e para a fração de superfície que é wetted, mas não é coberto pelo mulch. A área efetiva de buracos de abertura normalmente é dois a quatro vezes a área física das aberturas (ou até mais alto) responder por transferência de vapor de debaixo da folha.

Mulches orgânico

Mulches orgânico são freqüentemente usados com produção de pomar e com colheitas de fila debaixo de operações de lavoura reduzidas. Mulches orgânico podem consistir em resíduos de planta de unincorporated ou material estrangeiro importados ao campo como palha. A profundidade do mulch orgânico e a fração da superfície de terra coberta pode variar

amplamente. Estes dois parâmetros afetarão a quantia de redução em evaporação da superfície de terra.

EXEMPLO 45. Efeitos de mulch de superfície

Um mulch de plástico é colocado em cima de pepinos debaixo de irrigação de goteira. O mulch é plástico claro que cobre a superfície de campo inteira, com aberturas pequenas em cada planta. Ajuste ambos o K_c mau e basal estima para esta colheita para refletir a presença do mulch.

From Table 12, $K_{c\ ini}$, $K_{c\ mid}$ and $K_{c\ end}$ for fresh market cucumbers have values equal to 0.4, 1.0 and 0.75.

Como o mulch de plástico está contínuo com aberturas só pequenas em cada planta, é assumido que o ini de K_c é só 0.10 (este valor deveria ser ajustado para cima se precipitação acontece).

The $K_{c\ mid}$ and $K_{c\ end}$ values are estimated as:

$$K_{c\ mid} = 0.85 (1.0) = 0.85$$

$$K_{c\ end} = 0.85 (0.75) = 0.64$$

onde os 0.85 multiplicadores são derivados de Mesa 25 e refletem um assumiu 15% redução em Etc devido ao mulch, assumindo uma frequência de irrigação aproximadamente semanal.

From Table 17, the values for $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$, and $K_{cb\ end}$ are 0.15, 0.95 and 0.7 for this same cucumber crop. The $K_{cb\ ini}$ is assumed to be similar to the $K_{c\ ini}$ for mulched cover and is therefore set equal to 0.10. The $K_{cb\ mid}$ and $K_{cb\ end}$ values are estimated to be reduced by 10% so that:

$$K_{cb\ mid} = 0.9 (0.95) = 0.86$$

$$K_{cb\ end} = 0.9 (0.7) = 0.63$$

Estes valores basais são semelhantes aos valores ajustados para K_c . Isto é esperado como evaporação do mulch coberto que superfície pode ser ignorada. Ajuste adicional para este K_c estima para responder por clima é Eq usando necessário. 62 e 70.

Os valores para K_c mau e K_{cb} são semelhantes com valores de 0.10 pela fase inicial, 0.85 para a fase de meio-estação e 0.64 ao término da recente fase de estação.

Único coeficiente de colheita, K_c ,

Uma regra geral quando aplicando K_c de Mesa 12 é reduzir a quantia de evaporação de água de terra por aproximadamente 5% para cada 10% de superfície de terra que é coberta efetivamente por um mulch orgânico.

Por exemplo, se 50% da superfície de terra fossem cobertos por um mulch de resíduo de colheita orgânico, então a evaporação de terra seria reduzida por aproximadamente 25%.

· No caso de K_c ini que representa evaporação principalmente de terra a pessoa reduziria ini de K_c por aproximadamente 25% nesta situação.

· Nos casos de K_c meio e K_c terminam, a pessoa reduziria estes valores por 25% da diferença entre (K_c meio - K_{cb} meio) e (K_c terminam - K_{cb} terminam) de Mesas 12 e 17. Geralmente, as diferenças entre valores em Mesas 12 e 17 são só 5-10% de forma que o ajuste para K_c meio e K_c terminam para responder por um mulch orgânico pode não ser muito grande.

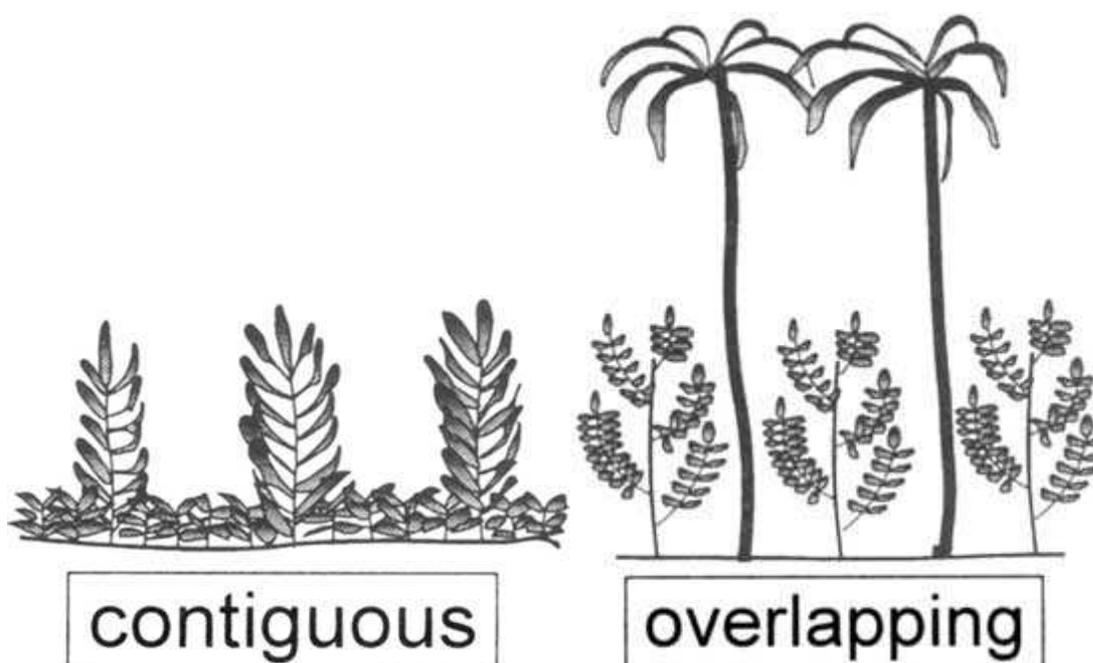




FIGURE 45. Situações diferentes de intercropping

Coeficiente de colheita dual, $K_{cb} + K_e$

Quando aplicando a aproximação com um equilíbrio de água separado da capa de terra de superfície, a magnitude do componente de evaporação ($K_e E_{To}$) deveria ser reduzido por aproximadamente 5% para cada 10% de superfície de terra cobertos pelo mulch orgânico. K_{cb} não é mudado.

Estas recomendações são só aproximadas e tentam responder pelos efeitos de reflexão parcial de radiação solar de resíduo, microadvection de calor de resíduo na terra, movimento lateral de água de terra de debaixo de resíduo para terra exposta, e o efeito isolante da cobertura orgânica. Como estes parâmetros podem variar amplamente, são requeridas observações locais e medidas se são requeridas estimativas precisas.

Intercropping

Intercropping se refere à situação onde duas colheitas diferentes são junto crescidas dentro de um campo. Para a estimação do coeficiente de colheita, uma distinção é feita entre (Figura 45):

- vegetação Contígua onde os pátio das duas colheitas se misturam a alguma altura (por exemplo, milho e intercropping de feijões);
- Overlapping colheitas onde o dossel de uma cultura é bem anterior que do outro de forma que os pátio não pode ser considerado que são contíguo (por exemplo, árvores de data que sobrepõem árvores de pomegranate em um oásis); e
- Border colheitas onde colheitas altas como quebra-vento limitam campos de colheitas menores, ou borda de árvores alta uma colheita de campo.

Há um limite superior à energia disponível evaporar água. Isto é representado através de $K_{c\max}$ (Equação 72 de Capítulo 7) para todas as colheitas em campos cultivados maior que 3-5 ha:

$$K_{c\max} = \max \left(\left\{ 1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right\}, \{ K_{cb} + 0.05 \} \right) \quad (72)$$

onde h é a altura para a colheita mais alta. Debaixo de todas as condições quando combinando coeficientes de colheita para colheitas de múltiplo, K_c deveria ser estrangido por este salto superior ($K_c \leq \max de K_c$).

Vegetação contígua

Onde a colheita mais alta tem folhagem de pátio que estende até a mesma elevação como isso do topo da colheita menor, pode ser considerado que o pátio de vegetação é contíguo. Por exemplo, na África e América do Sul, milho e feijões intercropped são freqüentemente como vegetação contígua, com uma fila de milho plantada por um ou mais filas de feijões. Outro exemplo é o cultivo de cinco a sete filas de intercropped de trigo com três filas de milho em muitas áreas de China.

Cobertura de solo semelhante

Onde a área de folha ou fração de solo cobriram pela vegetação (f_c) é semelhante para cada colheita, o K_c em Mesas 12 e 17 para a colheita mais alta (se este K_c é mais alto) pode ser levado para representar o campo inteiro. A colheita mais alta agirá em alguma sensação como um clothesline de forma que K_c (e Etc) para a colheita mais alta por unidade de área de solo é aumentado em cima daquele determinado em Mesa 12 ou 17. Porém, o K_c (e Etc) para

a colheita menor será reduzido devido ao efeito de quebra-vento pela colheita mais alta. Como resultado, o K_c para o campo pode ser como um todo semelhante à média de weighted do K_c estima para as duas colheitas de Mesas 12 e 17, ou, o K_c total pode seguir mais de perto o K_c predisse completamente para um sown de campo à colheita mais alta (campo de $K_c \gg K_c$ colheita mais alta). podem ser reduzidos Rendimentos para a colheita menor relativo para esses para única produção de cultivar devido aos efeitos de matização pela colheita mais alta e a competição para água de terra.

Cobertura de solo diferente

Onde as frações de solo cobriram por cada colheita é diferente, o K_c para um campo de intercropped pode ser calculado através de pesagem o K_c estima para as colheitas individuais de acordo com a fração de área coberta por cada colheita e pela altura da colheita:

$$K_{c\text{field}} = \frac{f_1 h_1 K_{c1} + f_2 h_2 K_{c2}}{f_1 h_1 + f_2 h_2} \quad (104)$$

onde f_1 e f_2 são as frações da superfície de campo plantadas a colheitas 1 e 2, h_1 e h_2 são as alturas de colheitas 1 e 2, e K_{c1} e K_{c2} são os valores de K_c para semeia 1 e 2.

Vegetação sobrepondo

Onde intercropping requer sobrepondo de espaçamentos, o pálio de uma colheita é bem anterior o outro. Este é o caso, por exemplo em Califórnia meridional onde são plantadas árvores cítricas em groves de palma de data. Onde um espaçamento denso normal é usado para as datas e para as árvores cítricas, o K_c pode aumentar como a densidade da vegetação combinada aumenta, proporcional ao aumento em LAI (Exemplo 47), com máximo K_c constrangeu por ou max de K_c (Equação 72) ou por K_{cb} cheio (Equações 99 e 100) a menos que a área de campo total seja pequena de forma que lá é um clothesline adicional ou efeito de oásis como discutiu na próxima seção.

EXEMPLO 46. Milho de Intercropped e feijões

Determine the representative $K_{c\text{mid}}$ for a situation where a single 1 m wide row of

maize is grown for each 2 m of squash, where $RH_{\min} \square 45\%$ and $u_2 \square 2 \text{ m/s}$.

Da Tabela 12, o K_c meio e h para milho é 1.20 e 2 m e o K_c meio e h para abóbora é 0.95 e 0.3 m. de Nenhuma correção é precisada para clima. O K_c representativo meio pode ser obtido através de pesagem o K_c individual valores meio de acordo com a fração da superfície de campo alocada a cada colheita ($f_1 \gg 0.3$ para milho e $f_2 \gg 0.7$ para abóbora) e de acordo com as alturas das colheitas como (Eq. 104):

$$K_{c\text{mid}} = \frac{0.30(2)(1.20) + 0.70(0.3)(0.95)}{0.30(2) + 0.70(0.3)} = 0.14$$

Podem ser obtidos valores por K_c diário de uma maneira semelhante construindo K_c individual encurva e então pesagem interpolou valores das curvas de K_c individuais durante qualquer dia específico que usa Eq. 104.

The crop coefficient for the mid-season and entire field is 1.14.

Colheitas de borda

Onde colheitas altas como quebra-vento ou palmas de data limitam campos de colheitas menores, o pavimento superior da colheita mais alta pode interceptar energia de calor sensata extra do fluxo de ar. Debaixo destas condições, o K_c é weighted de acordo com as áreas para cada colheita. Porém, anterior ao pesagem, o K_c para a colheita de borda, se mais alto que o campo (interior) colheita, deveria ser ajustado para clothesline potencial imprense (próxima seção).

Áreas pequenas de vegetação

Vegetação natural e um pouco de agricultura de subsistência frequentemente acontece em grupos pequenos ou se levanta de plantas. O valor para K_c para estes postos pequenos depende do tipo e condição de outra vegetação que cerca o posto pequeno.

Áreas cercadas por vegetação que tem aspereza semelhante e condições de umidade

Na maioria de casos para vegetação natural ou para vegetação agrícola non-prístina, o valor para K_c tem que aderir a limites superiores para K_c de aproximadamente 1.20-1.40, quando a expansão de areal da vegetação é maior que aproximadamente 2000 m². Isto é requerido como ET de áreas grandes de vegetação é governado através de princípios de troca de energia un-dimensionais e pelo princípio de conservação de energia. ET de postos pequenos (<2000 m²) só aderirá a estes mesmos princípios e limites onde a altura de vegetação, área de folha, e disponibilidade de água de terra são semelhantes a isso da vegetação circunvizinha.

EXEMPLO 47. Vegetação sobrepondo

Um 20 ha datam grove de palma em Deserto de Palma, Califórnia, os Estados Unidos têm uma árvore que espaça de 6 m. Interplanted entre as filas de palmas são árvores de laranja pequenas (50% dossel) em um 6 m espaçar. A palma e árvores cítricas são 3 m de um ao outro nas filas. Altura das palmas é 10 m e altura do cítrico é 3 m. A folhagem de pálio das palmas é bem anterior que do cítrico de forma que os pálio não pode ser considerado contíguo. RH_{min} comum mau durante a meio-estação é 20% e $u_2 = 2$ m/s. O K_c meio de Mesa 12 para datas é 0.95 e quando ajustou para umidade e vento que usam Eq. 62 são K_c meio = 1.09. O K_c meio de Mesa 12 por ter cítrico 50% pálio sem cobertura de solo é 0.60 e quando ajustou para umidade e vento que usam Eq. 62 são K_c meio = 0.70.

O interplanting de cítrico entre as palmas de data a área de folha total do pomar aumentou de forma que Etc pelo plantar combinar (palmas e cítrico junto) será maior que para qualquer um plantando só. O K_c combinado calculado meio será calculado como uma função do aumento em LAI total. Primeiro o LAI estima do plantings individual é calculado invertendo Eq. 97 resolver para LAI:

$$LAI = -1.4 \ln \left[1 - \frac{K_{cb} - K_{cmin}}{K_{cbfull} - K_{cmin}} \right]$$

onde min de K_c é o K_c basal mínimo para terra nua (uns 0.15 a 0.20) e K_{cb} cheio é a meio-estação de máximo que K_c esperou para a colheita se havia cobertura de solo completa, calculou usando Eq. 99. Baseado em Eq. 99, com $h = 10$ m para as palmas de

data e $h = 3$ m para o cítrico, o K_{cb} valores cheios para as duas colheitas assume cobertura de solo completa para cada e é K_{cb} cheio = 1.34 para palmas e K_{cb} cheio = 1.30 para cítrico (usando $RH_{min} = 20\%$ e $u_2 = 2$ m/s). Estas estimativas ignoram efeitos de qualquer controle de stomatal sem igual. Então, usando a acima de equação, o LAI efetivo estima das palmas de data e cítrico é calculado para ser aproximadamente:

$$LAI_{palms} = -1.4 \ln[1 - (1.09 - 0.15)/(1.34 - 0.15)] = 2.2$$

$$LAI_{citrus} = -1.4 \ln[1 - (0.70 - 0.15)/(1.30 - 0.15)] = 0.9$$

Therefore, the effective LAI for the date palm-citrus combination is estimated to be approximately

$$LAI_{combined} = LAI_{palms} + LAI_{citrus} = 2.2 + 0.9 = 3.1.$$

O aumento em K_c meio para o pomar de palma de data que resulta do aumento em LAI do interplanting de cítrico é calculado usando uma relação da função LAI-baseada introduzida em Eq. 97. Isto resulta na relação:

$$K_{c\text{mid}} = K_{c\text{mid}\text{singlecrop}} \left[\frac{1 - \exp(-0.7LAI_{combined})}{1 - \exp(-0.7LAI_{singlecrop})} \right]$$

onde $LAI_{combined}$ é o LAI para o dois plantings de intercropped combinados e colheita de LAI_{single} é o LAI para a colheita mais alta, única. K_c única colheita meio é a meio-estação K_c para a colheita mais alta, única (neste caso as palmas de data). Nesta aplicação, a acima de equação é resolvida como:

$$K_{c\text{mid}} = 1.09 \left[\frac{1 - \exp(-0.7(3.1))}{1 - \exp(-0.7(2.2))} \right] = 1.23$$

Então, o K_c meio calculou para o complexo de palmas de data e cítrico junto é 1.23. Este valor é comparado com o máximo esperado K_c baseado em limitações de energia, representadas por max de K_c de Eq. 72 o qual neste caso para $h = 10$ m é max de $K_c = 1.34$. Porque K_c meio $<$ max de K_c (i.e., $1.23 < 1.34$), o K_c meio = são aceitados 1.23 como a estimativa aproximada do K_c meio para o campo de intercropped.

Clothesline e efeitos de oásis

Debaixo do efeito de clothesline onde altura de vegetação é maior que o dos ambientes (aspereza diferente condiciona), ou debaixo do efeito de oásis onde vegetação tem disponibilidade de água de terra mais alta que os ambientes (umidade diferente condiciona), o cume valores de K_c podem exceder o 1.20-1.40 limite. O usuário deveria exercitar precaução quando extrapolando medidas de ET levadas destes tipos de postos de vegetação ou enredos a postos maiores ou regiões como um overestimation de ET regional podem acontecer.

Expansões pequenas de vegetação alta que é cercada através de cobertura menor podem exibir um efeito de clothesline. Isto acontece onde transporte turbulento de calor sensato no pátio e transporte de vapor longe do pátio é aumentado pelo 'broadsideing' de horizontalmente de vento na vegetação mais alta. Além, a capa de limite interna sobre a vegetação pode não estar em equilíbrio com a superfície nova. Então, ET das expansões isoladas, em um por base de área de unidade, pode ser significativamente maior que o E_{To} correspondente computou para a referência de grama. Exemplos do clothesline ou efeitos de oásis seriam ET de uma única fila de árvores cercada por vegetação pequena ou cercariam por um campo non-semeado seco, ou ET de uma tira estreita de cattails (uma vegetação de hydrophytic) ao longo de um canal de fluxo. K_c estima até e excedendo dois foram registrados para tais situações.

Onde são precisadas de estimativas de ET para tais expansões pequenas, isoladas de vegetação cercadas por cobertura menor (clothesline efetua) ou terra seca (efeito de oásis), então o K_c pode exceder a referência de grama por 100% ou mais. Estimativas de K_c para as expansões de vegetação deveriam conter u_2 , RH_{min} e parâmetros de h para ajustar K_c estima, e parâmetros que expressam a aridez da área circunvizinha, a largura geral do posto de vegetação e a habilidade do vento para penetrar na vegetação. A equação também deveria considerar que o LAI da vegetação para respondem pela habilidade da vegetação para administrar e acontecer a quantia de água exigiu pela condição de clothesline/climatic. Um limite superior de 2.5 normalmente é colocado em K_c para representar um limite superior na capacidade de stomatal da vegetação para prover vapor de água para o fluxo de ar debaixo do clothesline ou condições de oásis. Para vegetação com uma grande resistência de folha, como para alguns tipos de vegetação de deserto ou árvores, o limite superior deveria ser multiplicado por um fator de correção de resistência, Fr , calculado em Capítulo 9 Equação 102 usando.

Figure 46 curvas de exemplo de presentes de K_c para áreas pequenas de vegetação contra largura de posto de vegetação, para condições onde $u_2 = 2$ m/s, $RH_{min} = 30\%$, altura

de vegetação = 2 m, e LAI = 3. A curva superior representa condições onde a vegetação específica é cercada através de vegetação morta, seque terra nua, ou até mesmo pedregulho ou asfalto. Nesta situação, são geradas quantias grandes de calor sensato da área circunvizinha devido à falta de ET. Algum deste calor sensato é advected no downwind de vegetação. A mais baixa curva representa condições onde a vegetação é cercada através de grama bem-molhada. Há muito calor menos sensato disponível da área circunvizinha nesta situação, aumentar ET (e K_c) de downwind de vegetação. A influência da aridez dos ambientes no K_c para uma expansão pequena é aparente. As duas curvas mostradas mudarão com mudanças em u_2 , RH_{min} , h , e LAI. O usuário é acutelado que Figura 46 provê estimativas só gerais de K_c debaixo de clothesline e condições de oásis. Estas estimativas deveriam ser verificadas onde possíveis medidas locais válidas usando.

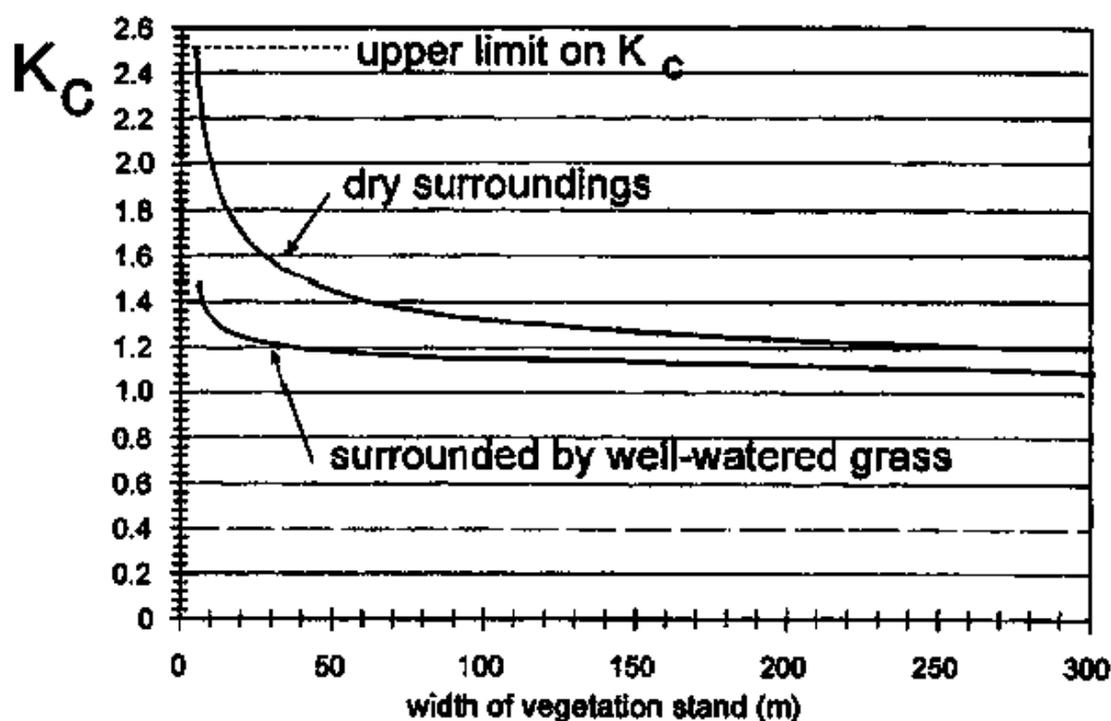


FIGURE 46. K_c encurva para áreas pequenas de vegetação debaixo do efeito de oásis como uma função da largura da expansão de vegetação para condições onde $RH_{min} = 30\%$, $u_2 = 2$ m/s, altura de vegetação (h) = 2 m e LAI = 3

ET calcula de expansões grandes de vegetação ou de expansões pequenas de vegetação que é cercada por misturas de outra vegetação que tem aspereza semelhante e

condições de umidade quase sempre deveria ser menos que ou iguala a 1.4 ETo, até mesmo debaixo de condições áridas.

Para fraturas de vento altas, como únicas filas de árvores, é uma estimativa aproximada para Kc:

$$K_c = \min\left(1.2 + \frac{F_r h_{\text{canopy}}}{\text{width}}, 2.5\right) \quad (105)$$

onde:

Fr stomatal resistência correção fator (Equação 102)

hcanopy significam altura vertical de área de pálio [m]

Largura de largura (densidades horizontais) do quebra-vento [m]

O Kc = 2.5 limite imposto em Equação 105 representa um limite superior aproximado em Etc de árvores por unidade fundamentou área. Porém, este valor tem incerteza grande. Porque disponibilidade de água de terra pode limitar evapotranspiration de fraturas de vento, um equilíbrio de água de terra e cálculo do Ks tensão fator deveria ser administrado.

Administração induziu tensão ambiental

Muitas colheitas agrícolas são intencionalmente água acentuada durante períodos de crescimento de colheita específicos para encorajar características de colheita particulares. A tensão de água é iniciada retendo ou reduzindo irrigações. Em situações onde este tipo de administração cultural é practised, o Kc deveria ser reduzido para responder pela redução em evapotranspiration.

Tensão ambiental de escassez de água de terra, baixa fertilidade de terra, ou salinidade de terra pode causar alguns tipos de plantas para acelerar o ciclo de reproductive deles/delas. Nestes situações, pode ser encurtada a duração da estação crescente, particularmente o período de meio-estação. Acentue durante o período de desenvolvimento pode aumentar a duração daquele período. Então, a duração da meio-estação, Lmid, e talvez as durações do desenvolvimento e recentes estações podem precisar de ser ajustadas para environmentally acentuou ou danificou vegetação. Pesquisa local e observação é crítica identificar as

magnitudes e extensão destes ajustes. Alguns exemplos de modificações para K_c e para durações de períodos crescentes é descrito abaixo.

Semente de alfafa

Um pouco de forragem semeia como alfafa que é crescido para produção de semente é intencionalmente água acentuou reduzir a quantia de vegetação e encorajar produção aumentada de flores e semente. Em áreas sujeito a invernos gelados, a redução em K_c para colheitas arraigadas fundas como alfafa depende da quantia de água feita disponível de precipitação durante o dormente (inverno) estação e na quantia de chuva e irrigação limitada durante a estação crescente. Então, os efeitos da tensão intencional nos valores para K_c deveriam ser modelled que usam o procedimento de colheita basal apresentados em Capítulo 7 e o coeficiente de K_s e procedimento de equilíbrio de água apresentados em Capítulo 8.

Algodão

Em produção de algodão, pode ser iniciada tensão de água de terra durante o período de desenvolvimento demorar desenvolvimento de flor e encorajar desenvolvimento de boll. Esta prática retarda a taxa de crescimento da planta de algodão e demoras a data de cobertura cheia. Para algodão, acontece geralmente o conseguimento de cobertura cheia e o começo da meio-estação quando o LAI alcança aproximadamente três. Quando suje tensão de água e retardamento de crescimento é practised, cobertura cheia pode acontecer depois do começo de florescer. O efeito de tensão durante o período de desenvolvimento em Etc pode ser incorporado na curva de K_c estendendo a duração do período de desenvolvimento no período de meio-estação. A duração da estação total geralmente permanece o mesmo.

Doce beterrabas

Freqüentemente são conseguidas beterrabas de açúcar iniciar tensão de água de terra moderada durante o recente período de estação desidratar raízes e se concentrar açúcares. De uma irrigação terminal pode ser precisada só antes colher para ajudar em extração de raiz. Quando este tipo de tensão de água é practised, o valor para fim de K_c está reduzido de 1.0 a 0.6 (Mesa 12, Nota de rodapé 5).

Café

Plantas de café são freqüentemente intencionalmente água acentuou reduzir crescimento de vegetação e encorajar desenvolvimento de baga. Debaixo destas condições, Kc estima de Mesa 12 deveria ser reduzido. Além, campos de café podem ser limitados por árvores que servem como quebra-vento. O efeito de quebra-vento é reduzir o Kc do café planta devido a uma redução em vento e radiação solar em cima das plantas. A redução em Kc poderia ser significativa onde quebra-vento são altos e freqüentes. Porém, o Kc para a área de campo inteira, inclusive os quebra-vento, pode ser aumentado pela presença das árvores, relativo aos valores para Kc para café mostrado em Mesa 12, devido a área de folha total aumentada da combinação de café-árvore e a aspereza aerodinâmica aumentada.

Chá

Iniciação e desenvolvimento de folhas novas em plantas de chá acontecem freqüentemente e seguem o começo da estação chuvosa. Durante a estação seca, iniciação de folhas novas está lenta ou non-existente. O transpiration de folhas mais velhas é mais baixo que para folhas novas devido a efeitos de idade de folha em condutância de stomatal. Então, o Kc, quando folhas envelheceram (mais que 2-3 meses velho), será talvez 10-20% abaixam que mostrado em Mesas 12 e 17. Semelhante a, café, campos de chá podem ser limitados por árvores que servem como quebra-vento. O efeito de quebra-vento é reduzir o Kc do chá planta, mas aumentar o Kc potencialmente para a plantação inteira, como descreveu para café.

Azeitonas

Growers pode aumentar espaçamentos de árvores de azeitona debaixo de condições de rainfed em áreas com menos chuva. Isto é feito para aumentar a área de solo por árvore que contribui chuva infiltrada a transpiration da árvore. Por exemplo, na Tunísia, o espaçamento de mudanças de árvores de azeitona do norte para o sul, em proporção a chuva anual. A árvore que espaça influências o Kc para a colheita (Exemplo 43).

Capítulo 11 - Etc durante períodos non-crescentes

Este capítulo descreve procedimentos por predizer Etc durante períodos non-crescentes. São definidos períodos Non-crescentes como períodos durante os quais nenhuma colheita agrícola foi plantada. Em climas temperados, períodos non-crescentes podem incluir períodos de congelação e continuamente condições congeladas.

Tipos de condições de superfície

O tipo e condição da superfície de solo durante ordens de períodos non-crescentes o alcance para etc. Onde a superfície é terra nua, então o Kc será bastante semelhante ao ini de Kc predito em Capítulo 6. Onde a superfície é coberta por vegetação quase morta ou algum tipo de mulch orgânico ou resíduo de colheita, então o Kc será semelhante a isso para agricultura que usa um mulch de superfície. Onde a superfície é coberta por crescimento de erva daninha ou crescimento de 'volunteer' planta, então o Kc variará de acordo com a área de folha ou fração de solo cobertas pela vegetação e pela disponibilidade de água de terra. Onde a superfície é neve coberta ou gelada, então o Kc é difícil predizer e um valor constante para Etc pode ter que ser assumido.

Terra nua

Único coeficiente de colheita

Onde o solo é partidário principalmente nu esquerdo colha, então o seguinte de K_c colhe será influenciado fortemente pela frequência e quantia de precipitação. K_c para terra nua pode ser calculado como $K_c = \text{ini de } K_c$ onde ini de K_c que usa o procedimento de Capítulo 6 é calculado.

Coeficiente de colheita dual

Onde um equilíbrio de água de terra diário pode ser aplicado, o usuário pode eleger para aplicar o K_c dual aproxime de Capítulo 7. Nesta situação, a capa de topsoil pode secar a muito baixos conteúdos de água durante períodos que não têm nenhuma precipitação. Então, os valores para K_{cb} e para min de K_c em Equações deveriam ser fixados 71 e 76 igual zerar. Isto provê para a oportunidade para predizer $E_{tc} = 0$ durante períodos longos que não têm nenhuma chuva. Isto é necessário preservar o equilíbrio de água da capa de evaporação e da zona de raiz em total. O cálculo de equilíbrio de água diário, determinado $K_{cb} = 0$, proverá as estimativas mais precisas de E_{tc} durante os períodos non-crescentes.

Superfície cobriu com vegetação morta

Único coeficiente de colheita

Onde a superfície de solo tem um resíduo de planta ou outro mulch orgânico morto cobrem, ou onde separa dos restos de colheita de unharvested suspendidos sobre a superfície em um morto ou senesced condicionam, então a superfície responderá semelhantemente a uma superfície coberta por mulch. Neste caso, K_c pode ser fixado igual a ini de K_c como predisse de figuras 29 e 30, mas o valor para ini de K_c pode ser reduzido por aproximadamente 5% para cada 10% de superfície de terra que é coberta efetivamente por um mulch orgânico.

Coeficiente de colheita dual

Evaporação de morto, vegetação molhada pode ser significativa durante alguns dias que seguem um evento de precipitação. Então, na aproximação de K_c dual, deveria ser fixado o valor para f_c igual para zerar para refletir a falta de cobertura verde e f_w deveria ser fixado igual a 1.0 para refletir o molhando de terra e mulch cubra através de precipitação.

O mulch morto ou vegetação secarão mais depressa que iria a terra subjacente se estava exposto. Além, a terra será protegida um pouco de evaporação pelo mulch morto ou cobertura de vegetação. Então, perdas de evaporação totais serão menos que o TEW predisse de Equação 73. Isto pode ser considerado para reduzindo o valor por TEW por 5% para cada 10% de superfície de terra que é coberta efetivamente por um mulch orgânico. O valor para REW deveria ser limitado menos que ou iguala que para TEW.

Superfície cobriu com vegetação ao vivo

Durante partidário de períodos congelação-livre colha, ervas daninhas podem começar a germinar e crescer. Esta vegetação é provida com água de armazenamento no perfil de terra e de qualquer chuva. Além, semente de colheita perdida durante colheita pode germinar eventos de chuva seguintes e pode somar à cobertura de solo. A quantia de superfície de solo coberta por vegetação dependerá da severidade de infestation de erva daninha; a densidade da colheita voluntária; ladrilhe freqüência e extensão de lavoura de terra; a disponibilidade de água de terra ou chove, e qualquer dano através de congelação.

Pode ser predito o valor para K_{cb} durante o período non-crescente com o passar do tempo de acordo com a quantia de vegetação que cobre a superfície. Isto pode ser feito por estimativas de LAI que usa Equação 97 ou estimativas da fração de cobertura de solo, f_c , usando Equação 98.

Único coeficiente de colheita

Na única aproximação de coeficiente de colheita, o valor para K_{cb} determinou usando procedimentos em Capítulo 9 pode ser convertido em um K_c equivalente somando 0.05 a 0.15 de acordo com a freqüência de chuva e superfície molhando.

É importante que o K_c para vegetação durante o período non-crescente seja limitado de acordo com a quantidade de água de terra disponível para prover a evapotranspiração. Caso contrário, a lei de conservação de massa será violada. Debaixo de todas as condições, a integração de K_c e E_{To} em cima do curso do período non-crescente não pode exceder a soma da precipitação que acontece durante o período mais qualquer água de terra residual no seguinte de zona de raiz, colha, isso pode ser esvaziado pela vegetação subsequente. A zona de raiz neste caso é a zona de raiz para a erva daninha ou colheitas voluntárias. Um equilíbrio de água de terra diário pode prover para a melhor estimativa de água de terra induzindo tensão e redução associada em K_c e Etc.

Coefficiente de colheita dual

Debaixo da aproximação de coeficiente de colheita dual, K_{cb} pode ser predito de acordo com a quantidade de superfície que é coberta por vegetação que usa Equação 97 ou 98. Então, um equilíbrio de água de terra diário cheio do topsoil junto com um equilíbrio de água de terra diário cheio da zona de raiz pode ser empregado como descreveu em Capítulo 7. Os equilíbrios de água de terra aderirão automaticamente à lei de conservação de massa, de forma que o total Etc da erva daninha ou vegetação voluntária não será superestimada. Novamente, porque a capa de topsoil pode secar para debaixo de murchar ponto debaixo de condições de chuva escassa, os valores para K_{cb} e \min de K_c usados em Equações que deveriam ser fixados 71 e 76 igual zero. Desta maneira, o equilíbrio de água de terra diário com cálculos de K_c duais pode progredir ao longo do período non-crescente com resultados bons.

Gelado ou neves cobriram superfícies

Onde a superfície de solo é neve coberta ou gelada, qualquer vegetação será largamente non-responsiva e non-contribuindo Etc, e a quantidade de Etc será relacionado de perto à disponibilidade de água livre à superfície e para o albedo da superfície.

O albedo de neve cobriram superfícies podem variar de 0.40 para cobertura de neve velha, suja para 0.90 para neve fresca, seca. Então, o Etc para cobertura de neve menos que E_{To} será para grama, como 25-85% menos energia de onda curta está disponível. Além, um pouco de energia deve ser usada para derreter a neve antes de evaporação.

O uso de ET_o debaixo de tais condições é de valor limitado, como a suposição de condições que sustentam uma cobertura de grama verde é violado. É até mesmo possível obter valores negativos para em alguns dias de inverno ET_o onde a radiação de longwave da superfície é grande e o vapor pressiona déficit é pequeno. Está debaixo destas condições que condensação líquida de água da atmosfera é possível. Isto seria semelhante negar evaporação.

Dado o valor limitado de ET_o (ou ET_p plano) debaixo de neve coberta ou gelado condições, um único, comum valor pode usar prediz melhor etc. o Wright (1993) ache que Etc calculou a média 1 mm/day em cima de períodos de inverno a Kimberly, Idaho, os Estados Unidos que eram seis meses longo (1 outubro para 30 março). A latitude de Kimberly é $42^\circ N$ e a elevação é aproximadamente 1200 m. Em cima do período de estudo de seis-ano, o solo era 50% cobertos por neve para 25% do tempo de 1 outubro para 30 março. O solo, quando exposto, estava congelado aproximadamente 50% do tempo. O K_c calculou a média 0.25 durante períodos quando a terra não estava congelada mas onde congelações estavam acontecendo (outubro e novembro cedo). Quando o solo teve 50% cobertura de neve ou maior, o Etc calculou a média só 0.4 mm/day. o Wright achou isso durante o seis-mês período non-crescente, total cumulativo Etc excedeu precipitação por aproximadamente 50 mm.

Figure 47 espetáculos as medidas más de Etc durante o 1985-1991 período de estudo. As medidas têm correspondência alta à energia de radiação de onda curta total disponível em um dia claro, R_{so} , calculado como $0.75 R_a$. Há algum atraso entre Etc e R_{so} e R_s causaram através de temperaturas mais frescas em janeiro - março como comparou ao outubro - período de dezembro. A relação de ET_c/R_{so} calculou a média só 0.17 em cima do período de seis-mês, e calculou a média 0.11 de 1 Dec. - 10 arruinam. A relação de ET_c/R_s calculou a média 0.23 em cima do período de seis-mês, e calculou a média 0.15 de 1 Dec. - 10 arruinam.

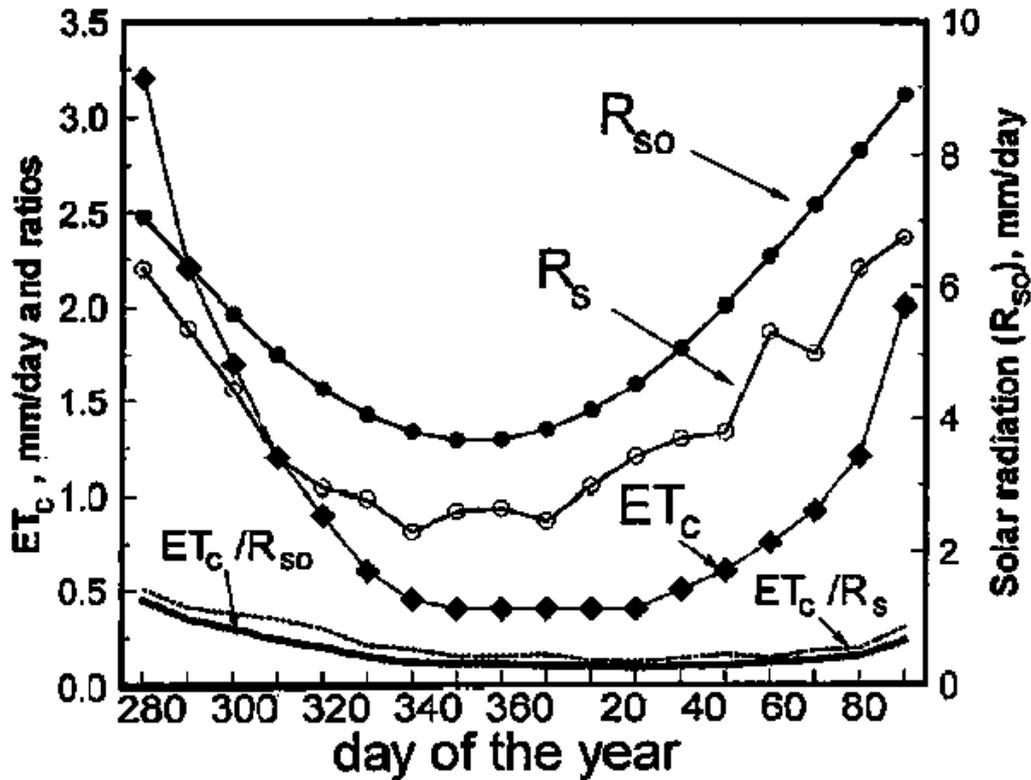


FIGURE 47. Evapotranspiration mau mediram durante non-crescente, períodos de inverno a Kimberly, Idaho, Estados Unidos por Wright (1993)

Um estudo semelhante administrou em Logan, Utah, os Estados Unidos (latitude 41.6°N, elevação 1350 m) em cima de um período de oito-ano mostrou que Etc variou amplamente com umidade de superfície de terra e temperatura de ar durante os meses de inverno. O 'average' Kc de novembro para março era 0.5 não tendo nenhuma cobertura de neve há dias. Há dias com cobertura de neve, ' Etc' variou de 0 a 1.5 mm/day. Semelhantemente, Kc é aproximadamente 0.4 para trigo de inverno durante períodos congelados na região de China do norte (latitude próximo 39°N.

Único Coeficiente de Colheita

O acima de procedimento pode prover estimativas para o único Kc durante períodos de estação non-crescentes que têm neve cubra ou condições geladas. Porém, é conhecido o valor atual para Kc para variar amplamente e será menos quando água está menos disponível na superfície de terra.

Coeficiente de Colheita dual

Um equilíbrio de água de terra diário que usa a aproximação de coeficiente de colheita dual é necessário prever com precisão Etc debaixo de gelar e condições de cobertura de neve. No método de coeficiente de colheita dual, um equilíbrio de água diário é administrado para o topsoil e a estimativa para K_c pode ser reduzido de acordo com água disponível. Porém, além da validade limitada do conceito de E_{To} debaixo de congelado ou neves cobriram condições, o coeficiente de evaporação, K_e , pode ser reduzido quando a superfície de solo está congelada, como a água em um estado congelado está menos disponível.

Outros, mais complexos modelos por prever Etc debaixo de condições de estação non-crescentes, cobertura de neve, e gelando, está disponível na literatura e deveria ser consultado e talvez aplicado quando estimativas precisas para Etc é precisado. Alguns destes são listados em seção K das Referências.