

7. Necessidades de água e de rega das culturas: uso de modelos

L. S. Pereira

Luís Santos Pereira: Centro de Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. Contacto: lspereira@isa.utl.pt

7.1. Introdução

A necessidade de água de uma cultura corresponde à procura evapotranspirativa dessa cultura em determinado ambiente e recebendo tratos culturais determinados. A evapotranspiração (ET) das culturas pode observar-se através de lisímetros, ser calculada com precisão recorrendo a observações micrometeorológicas ou ser estimada com base em variáveis agro-meteorológicas observadas, solução que é usada na prática, nomeadamente na gestão do regadio.

O método prático de cálculo da evapotranspiração das culturas (ETC) recorre a observações climáticas padrão e utiliza um duplo passo de estima (Allen et al., 1998; 2006b; Pereira et al., 2010): por um lado, calculando a procura climática que representa as condições ambientais através da evapotranspiração de referência (ETO); por outro lado, considerando a especificidade da cultura através de um coeficiente cultural (K_c). Para o efeito, recorre-se a uma dupla padronização: a da cultura de referência para o cálculo da ETO, e a da cultura em causa, de forma a considerar que a mesma é cultivada em condições favoráveis à obtenção da produção máxima, condições para as quais se define K_c .

Se tais condições óptimas não se verificam, como é corrente na prática de campo, deve recorrer-se a um terceiro passo de estima, quer utilizando um coeficiente de stress (K_s), quer ajustando o K_c às condições reais (K_c real).

As necessidades de água para a rega são estimadas através do balanço hídrico do solo cultivado. Para tanto, considera-se que parte das necessidades de água são satisfeitas pela precipitação,

pela reserva de água do solo e pela ascensão capilar e que as saídas de água correspondem à ET (transpiração pelas plantas e evaporação a partir do solo), à percolação para além da zona radicular e ao eventual escoamento à superfície do solo. Estas necessidades são posteriormente corrigidas pela eficiência da rega e com a fracção de lavagem, quando haja que controlar a salinidade do solo, para obtenção das necessidades brutas ou totais da cultura na prática de rega.

7.2. Conceitos de base e evapotranspiração de referência

A evaporação da água exige grandes quantidades de energia. O processo evapotranspirativo é regulado por trocas de energia à superfície dos cobertos vegetais e é limitado pela quantidade de energia disponível. Assim, é possível estimar a taxa de evapotranspiração através do balanço dos fluxos de energia. Os termos principais do balanço de energia, correspondentes a ganhos ou perdas para as superfícies vegetais, são a radiação líquida proveniente da atmosfera (R_n), o calor sensível para o ar ou para a camada limite (H), o calor sensível a partir do (ou para o) solo (G) e a evaporação ou evapotranspiração, expressa como densidade de fluxo de calor latente (λET). O balanço de energia pode ser expresso por:

Equação 1

$$\lambda ET = R_n - H - G$$

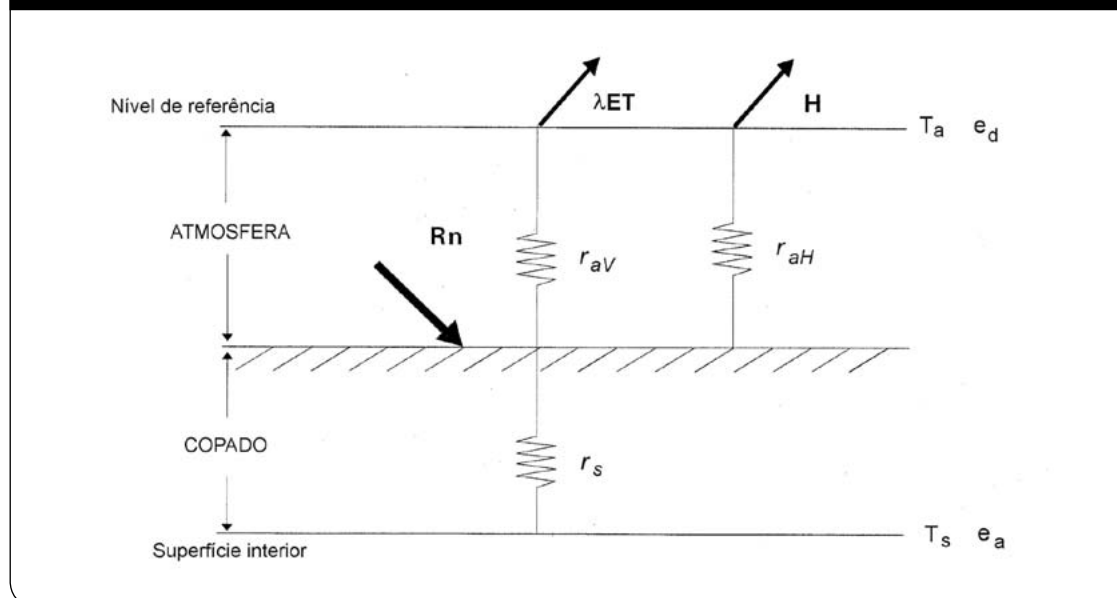
Todos os termos da (1) são expressos em unidades de energia por unidade de área horizontal e por unidade de tempo. Os termos do lado direito desta equação do balanço de energia podem ser calculados a partir de factores climáticos e de factores relativos à vegetação (factores culturais), medidos ou estimados. Os factores climáticos englobam os fluxos de radiação de curto e longo comprimento de onda, de e para a atmosfera, os efeitos sobre H resultantes do movimento horizontal do ar (velocidade do vento) e das temperaturas do ar e da superfície e os fluxos de calor do solo. Os factores culturais englobam a resistência à difusão de vapor entre o interior e o exterior das folhas e caules e a resistência à difusão de vapor desde as superfícies da vegetação ou a superfície do solo até à atmosfera.

Com objectivos de estimação, os processos de transferência turbulenta no interior e acima dos copados, bem como os efeitos da partição da radiação líquida e da energia no interior dos copados, podem ser representados por simples resistências. Para o efeito pode utilizar-se o modelo linear “big leaf” de Monteith (Monteith, 1965; Monteith e Unsworth, 1990), no qual se consideram duas resistências, de superfície e aerodinâmica, que operam em série entre o interior das folhas e um plano de referência acima da cultura (Figura 1).

A resistência de superfície (r_s) pode ser calculada a partir da resistência à passagem dos fluxos de vapor através das aberturas estomáticas (r_L) tomando em conta a área foliar total da cultura. Porém, engloba também a resistência aos fluxos de vapor relativos à evaporação directa da água do solo e aos fluxos não turbulentos de vapor que ocorrem no interior do copado até este atingir a superfície exterior. A resistência aerodinâmica (r_A) representa a resistência à transferência turbulenta do vapor (r_{AV}) entre o coberto vegetal e um plano de referência, associada à correspondente transferência vertical de calor sensível de ou para a cultura ou vegetação (r_{AH}), como se representa na Figura 1. Estes assuntos são abundantemente tratados na literatura (e.g. Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998; Pereira e Allen, 1999; Pereira et al., 1999; Pereira et al., 2010).

A equação do balanço de energia pode ser formulada em função de R_n e G e dos parâmetros que comandam H e λET . Assumindo que todos os fluxos são verticais (ausência de advecção), que os coeficientes de transferência relativos à difusão turbilhonar são os mesmos para λET e H e que as diferenças entre coeficientes de transferência relativos à quantidade de movimento e ao calor podem ser quantificadas através de uma simples razão, a equação de Penman-Monteith

Figura 1: Representação esquemática do modelo de Penman-Monteith com identificação dos termos essenciais do balanço de energia, R_n , λET e H e das resistências aerodinâmicas para o calor e o vapor ($r_{aH} = r_{aV} = r_a$) e da resistência de superfície (r_s).



(Monteith, 1965; Monteith e Unsworth, 1990) toma a forma:

Equação 2

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho C_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)}$$

Onde $(e_s - e_a)$ é o déficit de pressão de vapor (vpd) do ar ao nível do plano de referência (altura das medições meteorológicas) onde a temperatura é t_a e a pressão de vapor é e_a , ρ é a densidade média do ar, c_p é o calor específico do ar a pressão constante, Δ é o declive da relação pressão de vapor à saturação - temperatura do ar, γ é a constante psicrométrica, r_s é a resistência de superfície e r_a é a resistência aerodinâmica.

A eq. 2 pode ser utilizada directamente para calcular a ET de qualquer coberto vegetal desde que se conheçam os valores dos parâmetros culturais ao longo das várias fases vegetativas. Porém, tais parâmetros não se conhecem para a maioria das culturas. Conhecendo-se, porém, para a relva de climas temperados, torna-se possível assumi-la como cultura de referência e, normalizando a altura da cultura, de que dependem as resistências referidas, é possível dar à eq. 2 uma forma tal que seja apenas dependente do clima, isto é das variáveis climáticas correntemente observadas em estações agrometeorológicas (cf. Allen et al., 1994a, Pereira et al., 1999).

Nestas condições, a evapotranspiração de referência (ET_0) define-se como a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética, para a qual se assume uma altura de 0.12 m, uma resistência de superfície constante de 70 s m⁻¹ e um albedo de 0.23, semelhante à evapotranspiração de um extenso coberto de relva (grama) verde de altura uniforme, em crescimento activo, cobrindo totalmente o solo e bem abastecido de água. Consequentemente, como descrito em Allen et al. (1994a e b; 1998; 2006a e b; 2007b), a eq. 2 toma a forma seguinte, designada como equação FAO-PM para a evapotranspiração de referência:

Equação 3

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)}$$

onde:

ET_0	evapotranspiração de referência [mm d ⁻¹]
R_n	radiação líquida à superfície da cultura [MJ m ⁻² d ⁻¹]
G	densidade do fluxo de calor do solo [MJ m ⁻² d ⁻¹]
T	média da temperatura do ar a 2 m de altura [°C]
U_2	velocidade do vento a 2 m de altura [m s ⁻¹]
$(e_s - e_a)$	déficit da pressão de vapor medido a 2 m de altura [kPa]
Δ	declive da curva de pressão de vapor [kPa °C ⁻¹]
γ	constante psicrométrica [kPa °C ⁻¹]
C_n	coeficiente para a cultura de referência [kJ ⁻¹ kg K] resultante da conversão de segundos para dias ou horas e de coeficientes devidos à substituição das variáveis ρ , c_p e r_a (definidas na eq. 2). $C_n = 900$ para cálculos diários e $C_n = 37$ ($\approx 900/24$) para cálculos horários.
C_d	coeficiente de vento para a cultura de referência [kJ ⁻¹ kg K], resultante da razão r_s/r_a (no denominador da eq. 2)
0.408	valor para $1/\lambda$ com $\lambda = 2.45$ MJ kg ⁻¹

Para cálculos diários, assumindo $r_s = 70$ s m⁻¹, tem-se $C_d = 0.34$. Para cálculos horários é preferível distinguir as horas de noite e de dia, fazendo $r_s = 50$ s m⁻¹ durante as horas do dia e $r_s = 200$ s m⁻¹ durante as horas de noite (Allen et al., 2006a). Nestas condições tem-se $C_d = 0.24$ para as horas de dia ($R_n > 0$) e $C_d = 0.96$ para as horas de noite ($R_n \leq 0$). O fluxo de calor sensível para o solo (G) assume-se como nulo para cálculos diários. Para cálculos horários far-se-há $G_{hr} = 0.1 R_n$ durante as horas de dia e $G_{hr} = 0.5 R_n$ durante as horas de noite.

O cálculo dos parâmetros da eq. 3 deve ser padronizado (vd. Allen et al., 1998, 2006b, 2007b; Pereira et al., 2010). Em caso de falta de observações ou de má qualidade de dados da humidade do ar, da radiação solar ou da duração da insolação, ou da velocidade do vento, pode seguir-se a metodologia de estimação de variáveis em falta indicada por Allen et al. (1998; 2006b), que permite o cálculo da ET_0 diária ou mensal recorrendo apenas a observações da temperatura máxima e mínima, como demonstrado por Pereira

et al. (2003) e Popova et al. (2006). De referir que foi possível estimar os valores diários de E_{TO} a partir de simples previsões meteorológicas com erros aceitáveis, maiores em climas áridos e pequenos em climas húmidos e sub-húmidos (Cai et al., 2007; 2009).

De grande importância é a qualidade das observações e que à estação meteorológica não correspondam condições de aridez já que a eq. 3 foi estabelecida, conforme a definição acima, para condições de pleno abastecimento hídrico da vegetação acima da qual se fazem as observações. Allen et al. (1998; 2006b) propuseram metodologias simples para análise e correcção de dados que é necessário e conveniente utilizar.

7.3. Evapotranspiração das culturas

Coefficientes culturais

A evapotranspiração cultural, E_{TC} (mm d-1), é calculada multiplicando a evapotranspiração de referência, E_{TO} (mm d-1), pelo coeficiente cultural, K_c (adimensional), como vulgarizado por Doorenbos e Pruitt (1975) e adoptado posteriormente (Allen et al., 1998 e 2006b; Pereira, 2004; Pereira e Alves, 2005; Pereira et al., 2010):

Equação 4

$$E_{TC} = K_c E_{TO}$$

O coeficiente cultural, conforme bases teóricas analisadas por Pereira et al. (1999), representa a integração dos efeitos de três características que distinguem a evapotranspiração da cultura da de referência:

- a altura da cultura (h), que afecta a rugosidade e a resistência aerodinâmica;
- a resistência de superfície relativa ao par cultura - solo, que é afectada pela área foliar (determinando o número de estomas), pela fracção de cobertura do solo pela vegetação, pela idade e condição das folhas que afecta a resistência estomática, e pelo teor de humidade à superfície do solo, que afecta a evaporação directa a partir deste;

- o albedo da superfície cultura-solo, que é influenciado pela fracção de cobertura do solo, pela vegetação e pelo teor de humidade à superfície do solo e influencia a radiação líquida disponível à superfície, R_n , que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo de evaporação.

Durante o período vegetativo, o valor de K_c varia à medida que a cultura cresce e se desenvolve, do mesmo modo que varia com a fracção de cobertura da superfície do solo pela vegetação, e à medida que as plantas envelhecem e atingem a maturação. Por este motivo, tem sido procurado calcular K_c em função do LAI efectivo dado que a transpiração de uma cultura varia ao longo do ciclo vegetativo de forma semelhante ao LAI. No entanto, apenas se tem atingido um sucesso relativo porque a E_T da cultura varia também com a evaporação da água do solo, a qual é mais importante na fase inicial da cultura, quando a cobertura do solo é pequena, e se reduz muito em culturas que sombreiam bem o solo quando desenvolvidas.

Os valores de K_c representam a E_T para condições de cultivo óptimas, de forma a que as culturas atinjam o seu potencial produtivo, i.e., para culturas submetidas a uma gestão agronómica apropriada às condições de meio e a uma gestão da água que evite stress hídrico. Na prática, porém, a E_T real das culturas é frequentemente inferior à E_{TC} potencial (eq. 4) desde que as condições culturais ou a gestão hídrica sejam menos boas, ou devido à salinidade do solo ou da água. Convém, assim, estabelecer uma diferença clara entre a E_{TC} , que representa condições potenciais de produção (eq. 4), e a E_T relativa a condições não óptimas, que designamos por “ E_{TC} real” e se define:

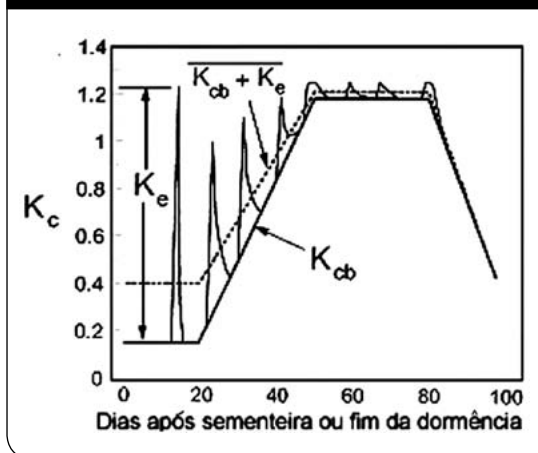
Equação 5

$$E_{TC \text{ REAL}} = K_c \text{ REAL } E_{TO}$$

Onde K_c real é o coeficiente cultural “real” incorporando um conjunto de impactes de stress ambiental e cultural. K_c real é obtido a partir de K_c através de vários processos referidos por Allen et al. (1998, 2006b; 2007b), nomeadamente por simples comparação entre as densidades de copado ou dos LAI da cultura com os esperados para uma cultura saudável e sem stress.

Os coeficientes culturais podem ser aproximados como K_c simples ou K_c duais (Figura 2).

Figura 2: Curva típica dos coeficientes culturais, mostrando o coeficiente de base, K_{cb} , o coeficiente da evaporação do solo, K_e , e o K_c simples



A forma dual é a seguinte:

Equação 6

$$K_c = K_s K_{cb} + K_e$$

Onde K_c é o coeficiente cultural (eq. 4), k_{cb} é o coeficiente cultural basal, k_s é o coeficiente de stress e k_e é o coeficiente de evaporação da água do solo. O K_c simples representa a soma dos valores médios de k_{cb} e k_e para cada fase vegetativa da cultura, isto é:

Equação 7

$$K_c = \overline{K_{cb} + K_e}$$

O coeficiente de base (K_{cb}) é a razão entre a ET_c e a ET_0 quando a camada superficial do solo se encontra seca, mas sendo o teor em água do solo na zona radicular adequado para manter a cultura em conforto hídrico. Deste modo, o k_{cb} representa o limite inferior (ou valor de base) do k_c quando se lhe subtraem os efeitos do humedecimento da camada superficial do solo pela rega ou pela precipitação. O coeficiente de stress ou de déficit de humidade do solo (k_s) reduz o

valor de K_{cb} quando o teor de humidade do solo na zona radicular é insuficiente para manter a plena transpiração das plantas. Por seu lado, o coeficiente de evaporação do solo (K_e) representa a evaporação do solo húmido à superfície, a qual se adiciona à transpiração representada no K_{cb} para representar a ET .

Coefficientes culturais simples

A curva dos coeficientes culturais caracteriza tipicamente o desenvolvimento de uma cultura anual, desde a sementeira ou plantação até à colheita, sendo que as mudanças na forma da curva acompanham o desenvolvimento e a senescência da cultura (Figura 3). Naturalmente, são necessárias algumas adaptações quando se trata de culturas multianuais ou perenes.

A curva dos coeficientes culturais (Figura 3) é construída através dos passos seguintes:

Dividir o ciclo vegetativo em quatro períodos de acordo com a fenologia e o desenvolvimento da cultura: (1) período inicial, (2) período de crescimento rápido, (3) período intermédio e (4) período final.

Identificar os três valores de K_c que correspondem a $k_{c\text{ ini}}$, $k_{c\text{ mid}}$ e $k_{c\text{ end}}$:

$K_{c\text{ ini}}$: valor de $\overline{K_{cb} + K_e}$ durante o período inicial:

culturas anuais - da sementeira ou plantação até $\approx 10\%$ de cobertura do solo

culturas perenes - desde que termina a dormência até que se estabelece o crescimento vegetativo.

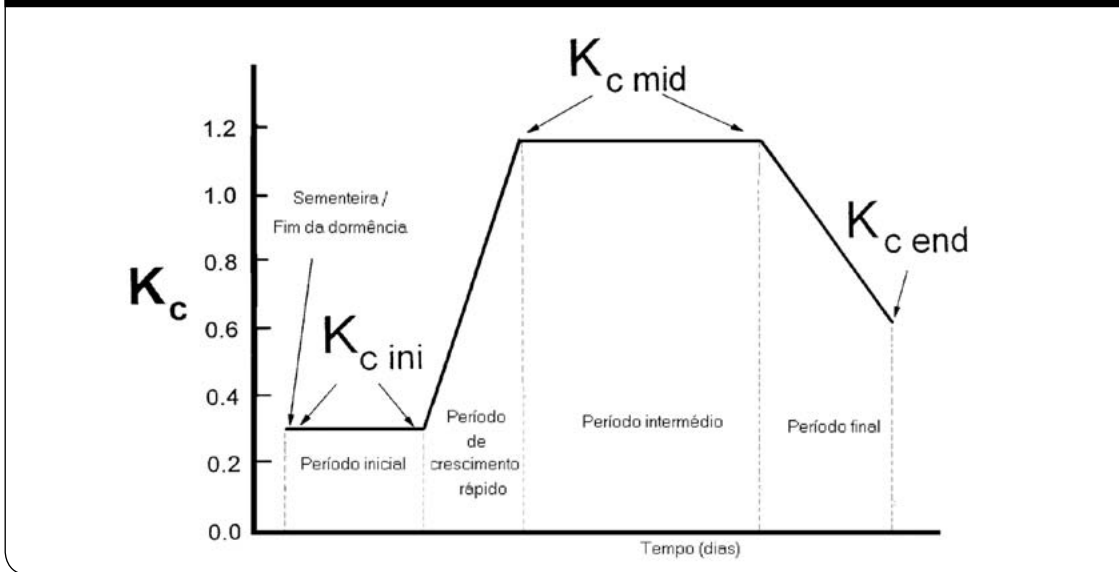
$K_{c\text{ mid}}$: valor de $\overline{K_{cb} + K_e}$ durante o período intermédio:

culturas anuais - desde que se estabelece a cobertura total do solo até ao início da maturação ou senescência

culturas perenes - desde que se atinge o desenvolvimento vegetativo pleno até ao início da senescência ou a mudança de coloração das folhas

$K_{c\text{ end}}$: valor de $\overline{K_{cb} + K_e}$ na data de colheita ou do início da dormência.

Figura 3: Curva dos coeficientes culturais e definição dos períodos vegetativos correspondentes (adaptado de Allen et al., 1998).



Traçar os segmentos de recta relativos aos quatro períodos de desenvolvimento como indicado na Figura 3.

As curvas dos coeficientes culturais são fáceis de definir para culturas anuais uma vez que os quatro períodos vegetativos assinalados acima (Figura 3) são fáceis de identificar. Para culturas perenes é necessário proceder à sua definição por comparação com as fases do ciclo de culturas conhecidas tomando em atenção as indicações acima (Allen et al., 1998, 2006b).

O traçado das curvas dos coeficientes culturais e os consequentes resultados do cálculo da ETC são particularmente sensíveis à definição temporal dos períodos vegetativos acima referidos – os erros resultantes são frequentemente maiores dos que os devidos à escolha dos Kc – pelo que os mesmos devem basear-se em observação das culturas. Os valores tabelados por Allen et al. (1998; 2006b; Pereira et al., 2010) podem afastar-se muito dos reais dado que estes dependem muito das variedades, das datas de sementeira ou plantação, das práticas culturais e das condições ambientais, nomeadamente as que determinam as taxas de crescimento e a maturação dos produtos finais.

Os valores de Kc mid e Kc end tabelados (Allen et al., 1998; 2006b; Pereira, 2004; Pereira et al., 2010) correspondem a condições de clima sub-húmido, caracterizadas por humidade relativa

mínima diária média $RH_{min} \approx 45\%$ e velocidade média diária do vento $u_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$. É absolutamente necessário corrigi-los para as condições climáticas locais, incluindo efeitos advectivos. Tomando como base considerações empíricas e a base teórica analisada por Pereira et al. (1999), tal correcção para o período intermédio faz-se através de

Equação 8

$$K_{c \text{ mid}} = K_{c \text{ mid tab}} + 0.04 (u_2 - 2) - 0.004 (RH_{\text{min}} - 45) \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

Onde o valor coeficiente cultural para o período intermédio, $k_{c \text{ mid}}$, se obtém do respectivo valor tabelado, $k_{c \text{ mid tab}}$, em função de u_2 , de rh_{min} e da altura média da cultura, h [m], quando o seu desenvolvimento vegetativo é máximo. Esta correcção (eq. 8) aplica-se igualmente ao coeficiente cultural final $k_{c \text{ end}}$ se > 0.45 (valores menores correspondem a condições em que a cultura seca ou perdeu as folhas nessa data tornando desnecessário o ajustamento).

Os valores tabelados de $k_{c \text{ mid}}$ e $k_{c \text{ end}}$ (Allen et al., 1998; 2006b; Pereira, 2004; Pereira et al., 2010) cobrem muito insuficientemente as culturas tropicais e, por isso, deverá desenvolver-se estudo adequado que recolha e padronize a informação recolhida em países tropicais e subtropicais para as culturas típicas destas regiões.

No caso de culturas perenes arbustivas e arbóreas, caso de culturas fruteiras, porque não cobrem totalmente o solo e este pode estar nu, coberto por vegetação activa ou coberto com mulch, é necessário adaptar os valores tabelados de K_c mid e K_c end apresentados por aqueles autores à densidade de cobertura pela vegetação (cf. Allen e Pereira, 2009) ou recorrer aos K_{cb} e K_e .

Em culturas anuais, a ETC durante o período inicial é predominantemente devida à evaporação da água do solo na sua camada superficial. Consequentemente, K_c ini deve ser estimado considerando procura evaporativa da atmosfera (representada pela ETO), a frequência de humedecimentos da superfície do solo durante o período inicial, tanto pela rega como pela precipitação, as quantidades infiltradas e as características do solo para armazenar água nos 10 a 15cm superficiais e para ceder água por capilaridade até esta camada evaporativa a partir da camada inferior. Para o seu cálculo pode usar-se um método gráfico ou procedimentos de cálculo numérico como referido por Allen et al. (1998, 2005b; 2006a) e Pereira (2004). Em ambos os casos, os K_c ini calculados devem ser corrigidos pela fracção de solo humedecida (fw), que varia entre 1.0 para a chuva e a aspersão e 0.3 a 0.4 para a rega gota a gota: por um lado, a água aplicada é considerada concentrada nessa fracção fw ; por outro lado, o K_c ini assim

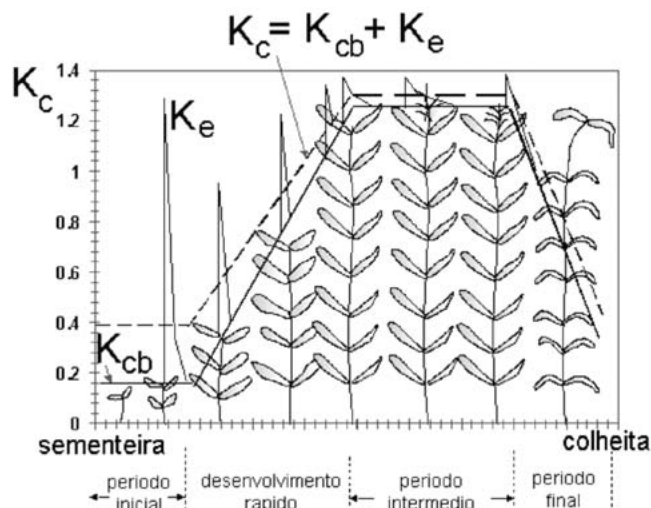
calculado deve ser multiplicado por fw visto se referir a toda a superfície da parcela.

Coefficientes culturais duais

Para regas de alta-frequência e para culturas com cobertura parcial do solo, assim como para regiões com precipitação frequente, o uso da metodologia dos coeficientes culturais duais (Figura 4) permite produzir estimativas da evapotranspiração cultural mais exactas (Allen et al., 2005b). De facto, dividir o coeficiente cultural (K_c) nas componentes de evaporação do solo (K_e) e de coeficiente cultural basal (K_{cb}) permite uma melhor percepção das fracções de água, provenientes da precipitação ou da rega, utilizadas pela cultura, assim como avaliar as vantagens de manter uma fracção do solo seca ou a utilização de “mulches” para controlar a evaporação do solo (E).

As primeiras aplicações da metodologia dos coeficientes culturais duais são relatadas por Allen (2000) para a cultura do algodão e por Liu e Pereira (2000) para as culturas de trigo e milho na China. Outra aplicação à cultura de algodão, cultura de cobertura parcial do solo, é relatada por Howell et al. (2004), que confirmaram a exactidão do método e a sua capacidade para comparação da ETC entre rega deficitária, rega para a produção máxima e sem rega. Outros estudos referem bons resultados na sua utiliza-

Figura 4: Coeficiente cultural de base K_{cb} relativo à transpiração da cultura e coeficiente de evaporação a partir do solo K_e para as várias fases de uma cultura



ção em pomares (e.g. Paço et al., 2009), cereais (Zhao et al., 2010) e outras culturas (Godinho et al., 2008)

Os valores de K_{cb} estão tabelados para numerosas culturas (Allen et al., 1998, 2006b; 2007b) ou podem ser calculados a partir dos K_c simples (Pereira, 2004; Pereira e Alves, 2005; Pereira et al., 2010) definindo-se uma curva de coeficientes culturais de base em tudo semelhante à dos K_c simples referida acima já que as fases de desenvolvimento das culturas (Figura 4) são as mesmas. Os valores de K_{cb} devem ser também corrigidos para o clima (Eq. 8).

O valor máximo para k_e ocorre num período imediatamente a seguir a uma rega ou a chuva (Figura 4). A evaporação a partir do solo é governada pela quantidade de energia disponível à superfície do solo, a qual depende da porção da energia total que é consumida pela planta na transpiração. O coeficiente K_E decresce depois de cada humedecimento à medida que aumenta a quantidade acumulada de água evaporada a partir da camada superficial do solo. Consequentemente, K_e pode ser calculado como

Equação 9

$$K_e = K_r (K_{cmax} - K_{cb})$$

Onde K_r é coeficiente de redução da evaporação [0-1], k_{cb} é coeficiente cultural de base, e k_{cmax} é valor máximo para K_c imediatamente a seguir a uma chuva ou uma rega. k_e é limitado pela fracção de solo humedecido e exposto à luz solar, f_{ew} [0.01 – 1], resultando por isso

Equação 10

$$K_e \leq f_{ew} K_{cmax}$$

K_{cmax} verificar-se-á imediatamente a seguir à chuva ou à rega, podendo calcular-se recorrendo à função “max” (máximo entre) por

Equação 11

$$K_{cmax} = \max \left[\left(1.2 + [0.04 (U_2 - 2) - 0.004 (RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right), (K_{cb} + 0.05) \right]$$

Esta equação estima a evaporação que ocorre numa superfície cultivada, independentemente do grau de cobertura. No entanto, a evaporação a partir do solo é maior na fracção de solo que não esteja coberta pela cultura e que tenha sido humedecida pela chuva ou pela rega, f_{ew} . Nestas condições o fluxo evaporativo concentra-se na fracção de solo humedecido exposta à radiação. Quando se calcula um único K_c max, então U_2 , RH_{min} e H correspondem a valores médios referentes ao período vegetativo intermédio. Quando se realizam cálculos mais detalhados, U_2 e RH_{min} correspondem a valores médios referentes a períodos curtos (p. ex. 5 ou 10 dias). H pode ser estimado para os mesmos intervalos de tempo; para o período inicial, H pode assumir-se artificialmente igual ao da cultura de referência ($H = 0.12$ m).

O método usado para estimar a evaporação a partir do solo é semelhante ao usado para calcular K_c ini, admitindo-se uma evaporação bifásica. Na primeira fase, a taxa de evaporação é máxima enquanto a evaporação acumulada, D_e [mm], não atingir REW . Quando D_e excede REW , o processo evaporativo decorre na segunda fase e a taxa de evaporação decresce proporcionalmente à quantidade de água ainda disponível para evaporar, $TEW - REW$. Deste modo, o coeficiente K_r (Eq. 9) pode calcular-se do modo seguinte (Figura 5):

Equação 12a

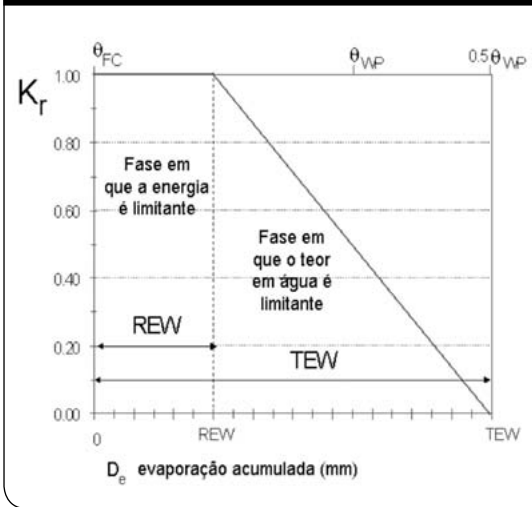
$$K_r = 1 \quad \text{para} \quad D_e \leq REW$$

Equação 12b

$$K_r = \frac{TEW - D_e}{TEW - REW} \quad \text{para} \quad D_e > REW$$

onde REW e TEW [mm] correspondem, respectivamente à água facilmente evaporável e à água evaporável total na camada evaporativa do solo e D_e é a evaporação acumulada [mm] originada na fracção f_{ew} de solo humedecido e exposto à radiação solar directa.

Figura 5: Teoria bifásica da evaporação para estimar a evaporação a partir de um solo com vegetação recorrendo ao coeficiente de decréscimo da evaporação (Allen et al., 2005a e b).



De calcula-se através de um balanço hídrico diário do solo relativo à camada superior do solo (Figura 6), com uma espessura Z_e , menor em solos ligeiros (100 mm) e maior em solos pesados (≥ 150 mm) referente apenas à fracção FEW de solo húmido e exposto à radiação solar.

A equação do balanço hídrico da camada evaporativa do solo é então:

Equação 13

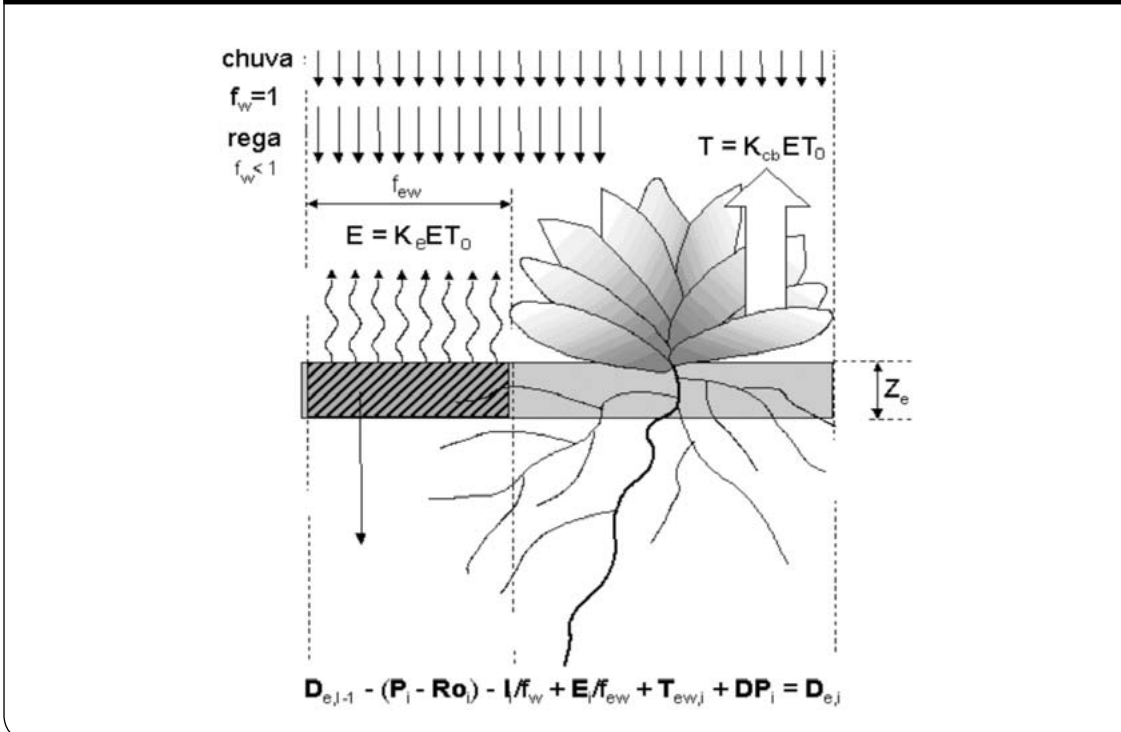
$$D_{e,j} = D_{e,j-1} - (P_j - RO_j) - \frac{I_j}{f_w} + \frac{E_j}{f_{ew}} + T_{e,j} + DP_{e,j}$$

para $[0 \leq D_{e,j} \leq TEW]$

Onde o índice j identifica o dia para o qual a estimativa é feita, P_j é a precipitação [mm], RO_j o escoamento [mm], limitado a $[0 \leq RO_j \leq P_j]$, I_j a lâmina média de rega que se infiltra na parcela regada [mm], E_j a evaporação a partir da fracção f_{ew} de solo humedecido e exposto à radiação solar directa [mm], $T_{e,j}$ a transpiração [mm] originada na mesma fracção f_{ew} de solo humedecido e exposto $[0.01 - 1]$, $DP_{e,j}$ a percolação a partir da mesma fracção quando o teor de humidade excede a capacidade de campo, e f_w é a fracção de solo humedecido pela rega ou precipitação $[0.3 - 1]$. Os procedimentos para a estimativa destes parâmetros são dados por Allen et al. (2005b; 2006b) e Pereira et al. (2010).

Para culturas sobre as quais não há informação sobre os coeficientes culturais mas de que se conhece a fracção de cobertura do solo pela vegeta-

Figura 6: Balanço hídrico da camada evaporativa de um solo cultivado.



ção (Fc), Kcb mid pode estimar-se (Allen et al., 1998, 2006b):

Equação 14

$$K_{cb\ mid} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min}) \left[\min \left[2f_c, f_{c\ eff} \frac{1}{(1+h)} \right] \right]$$

Onde f_c é a fracção de solo coberto pela vegetação, $f_{c\ eff}$ é a fracção efectiva de solo coberta por vegetação, obtida a partir de f_c de forma a considerar o efeito de sombra da vegetação sobre o solo descoberto, $K_{cb\ full}$ é o máximo valor de K_{cb} para culturas que cobrem completamente o solo tendo a mesma altura h , e $K_{c\ min}$ é o valor de K_c para solo seco e nu (0.15 a 0.20 ou, em períodos longos sem chuva ou rega, 0.0). As estimativas de f_c e de $f_{c\ eff}$, tal como de h , são forçosamente realizadas ao caracterizar a vegetação cuja evapotranspiração se pretende estimar. Por seu lado, $K_{cb\ h}$ pode estimar-se por

Equação 15

$$K_{cb\ full} = \min(1.0 + 0.1h, 1.20) + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left[\frac{h}{3} \right]^{0.3}$$

Quando a vegetação ocorra em tufos isolados, $K_{cb\ H}$ deverá majorar-se para ter em conta efeitos de advecção local. Quando a vegetação possua alto grau de controlo estomático, $K_{cb\ H}$ deve ser corrigido por defeito.

Para o caso de culturas que cobrem o solo apenas parcialmente, é conveniente o recurso ao coeficiente de densidade da vegetação (K_d), cuja equação se baseia na fracção de solo coberto (ou ensombrado ao meio dia) pela vegetação e na altura média das plantas como proposto por Allen et al. (2007b) e Allen e Pereira (2009):

Equação 16

$$K_d = \min \left(1, M_L f_{c\ eff}, f_{c\ eff} \frac{1}{(1+h)} \right)$$

Onde $f_{c\ eff}$ é a fracção do solo efectivamente coberto ou ensombrado ao meio dia pela vegetação [0 a 1.0], h é a altura média das plantas [m], e M_L é um multiplicador de $f_{c\ eff}$ para impor um limite superior à transpiração relativa por unidade de área [1.2 a 2.0].

A fracção $F_{c\ eff}$ calcula-se genericamente a partir de f_c tomando em conta a altura da cultura e o ângulo solar ao meio-dia, β , (Figura 7) :

Equação 17

$$f_{c\ eff} = \frac{f_c}{\sin(\beta)} \leq 1$$

Nestas condições, o K_{cb} das culturas cuja densidade das plantas e/ou a área foliar são inferiores à cobertura completa pode estimar-se pela equação

Equação 18

$$K_{cb} = K_{c\ min} + K_d (K_{cb\ full} - K_{c\ min})$$

onde $K_{c\ min}$ é o valor mínimo de K_{cb} representando solo nu, $K_{cb\ full}$ é o K_{cb} que teria a vegetação se ocorresse condições de cobertura total (corrigido para o clima local) e K_d é o factor densidade (eq. 16). Toma-se $K_{c\ min} \approx 0.0$ durante longos períodos sem chuva ou rega e $K_{c\ min} \approx 0.15$ a 0.20 em períodos em que ocorre rega ou chuva. No caso de fruteiras com solo vegetado (relva ou outra herbácea) a equação 18 toma a forma.

Equação 19

$$K_{cb} = K_{cb\ cover} + K_d (\max [K_{cb\ full} - K_{cb\ cover}, 0])$$

onde $K_{cb\ cover}$ é o K_{cb} da cobertura do solo em ausência de folhagem. Para as fruteiras construí-se entretanto um novo procedimento de cálculo a partir da densidade dos pomares e altura das plantas cujos resultados principais originaram novas tabelas de K_c e K_{cb} para várias culturas fruteiras e vinha (Allen e Pereira, 2009).

Na Tabela 1 apresentam-se para várias fruteiras os valores de $K_{cb\ full}$, $K_{c\ min}$ e $K_{cb\ cover}$ para fruteiras relativos aos períodos inicial, intermédio e final para uso com as equações 16 a 19 (Allen et al., 2007b). Estas aproximações pelos coeficientes culturais de base podem ser utilizadas para a normalização de valores de K_c para culturas tropicais e sub-tropicais a partir da informação disponível em estudos locais.

Figura 7: Esquema do cálculo da fração sombreada $f_{c\text{ eff}}$ em função da fração coberta f_c e do ângulo do sol acima do horizonte β durante o período em que a ET é máxima (geralmente entre as 11.00 e as 15.00 horas).

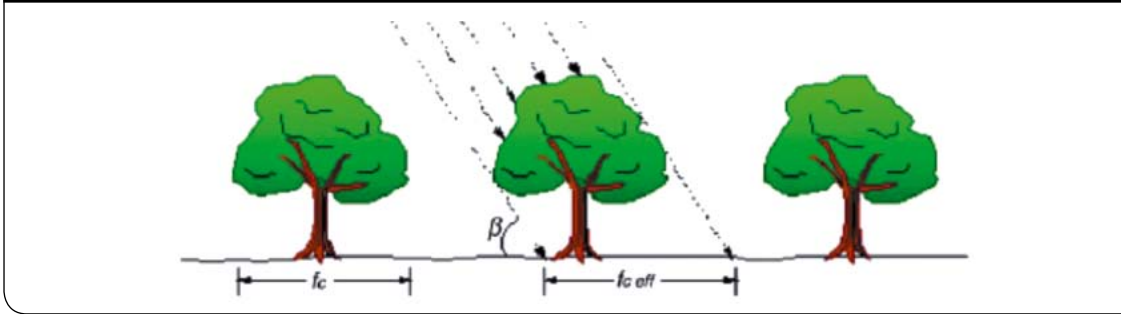


Tabela 1. Valores de $K_{cb\text{ full}}$, $K_{c\text{ min}}$ e $K_{cb\text{ cover}}$ para fruteiras relativos aos períodos inicial, intermédio e final para uso com as equações 16 a 18 (Allen et al., 2007b)

	$K_{cb\text{ full}}^{[1]}$ -ini	$K_{cb\text{ full}}^{[1]}$ -mid	$K_{cb\text{ full}}^{[1]}$ -end	$K_{c\text{ min}}^{[1]}$	$K_{cb\text{ cover}}^{[1]}$ -ini	$K_{cb\text{ cover}}^{[1]}$ -mid, end
Amêndoas						
-s/ cobertura do solo ^[2]	0.20	1.00	0.70[3]	0.15	--	--
- solo coberto	0.20	1.00	0.70[3]	0.15	0.75	0.80
Maçãs, cerejas, peras						
- c/ vernalização ^[4]	0.30	1.15	0.80[3]	0.15	0.40	0.80
- s/ vernalização ^[4]	0.30	1.15	0.80[3]	0.15	0.75	0.80
Alperces, pessegos, ameixas						
- c/ vernalização ^[5]	0.30	1.20	0.80[3]	0.15	0.40	0.80
- s/ vernalização ^[6]	0.30	1.20	0.80[3]	0.15	0.70	0.80
Abacate						
- s/ cobertura do solo ^[7]	0.30	1.00	0.90	0.15	--	--
- solo coberto	0.30	1.00	0.90	0.15	0.75	0.80
Citrinos ^[8]	0.80	0.80	0.80	0.15	0.75	0.80
Manga						
- s/ cobertura do solo ^[9]	0.25	0.85	0.70	0.15	--	--
Oliveiras ^[10]	0.60	0.70	0.60	0.15	0.70	0.70
Pistaquios	0.30	1.00	0.70	0.15	0.70	0.70
Nozes ^[12]	0.40	1.10	0.65	0.15	0.75	0.80
Uvas						
- de mesa ^[13]	0.20	1.15	0.90	0.15	0.70	0.70
- para vinho ^[13]	0.20	0.80	0.60	0.15	0.70	0.70

- [1] Geralmente, o valor de $K_{c\text{ ini}}$ é estimado como $0.10 + K_{cb\text{ ini}}$ dado pela eq. 18 e $K_{c\text{ mid}}$ e $K_{c\text{ end}}$ são estimados por $0.05 + K_{cb\text{ mid}}$ ou $K_{cb\text{ end}}$ dados pela Eq. 18.
- [2] fazendo $F_{c\text{ eff}} = 0.4$, $ML = 1.5$ and $h = 4\text{ m}$ para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56.
- [3] os $K_{c\text{ end}}$ representam K_c antes da queda das folhas; depois tem-se $K_{c\text{ end}} = 0.20$ para solo nu e seco ou vegetação morta e $K_{c\text{ end}} = 0.50$ to 0.80 para vegetação em crescimento activo.
- [4] fazendo $F_{c\text{ eff}} = 0.5$, $MI = 2$ and $h = 3\text{ m}$ para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de k_{cb} similares aos de FAO-56
- [24] fazendo $F_{c\text{ eff}} = 0.45$, $MI = 1.5$ and $h = 3\text{ m}$ para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de k_{cb} similares aos de FAO-56
- [25] fazendo $F_{c\text{ eff}} = 0.45$, $MI = 1.5$, $h = 3\text{ m}$ para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de k_{cb} similares aos de FAO-56
- [26] fazendo $F_{c\text{ eff}} = 0.4$, $MI = 2$ and $h = 4\text{ m}$ para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de k_{cb} similares aos de FAO-56.
- [27] fazendo $F_{c\text{ eff}} = 0.2$, 0.5 e 0.7 , $MI = 1.5$ and $h = 2$, 2.5 e 3 m para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} cerca de 15% superiores aos valores indicados no FAO-56 para os mesmos 3 níveis de valores de $F_{c\text{ eff}}$
- [28] fazendo $F_{c\text{ eff}} = 0.7$ to 0.85 , $MI = 1.5$ and $h = 5\text{ m}$ para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de Azevedo et al. (2003).
- [29] fazendo $F_{c\text{ eff}} = 0.7$, $MI = 1.5$ and $h = 4\text{ m}$ para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56
- [30] fazendo $F_{c\text{ eff}} = 0.7$, $MI = 1.5$ and $h = 5\text{ m}$ para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56
- [31] fazendo $F_{c\text{ eff}} = 0.45$, $MI = 1.5$, $h = 2\text{ m}$ para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 18 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56
- [32] fazendo $F_{c\text{ eff}} = 0.5$, $MI = 1.5$ and $h = 2\text{ m}$ para K_d na Eq.16, obtêm-se pela Eq. 21 valores de K_{cb} similares aos de FAO-56

Teledeteção para obtenção dos coeficientes culturais

O uso de imagens de satélite permite o cálculo de diversos índices de vegetação ao combinar a informação relativa à reflexão das ondas de vários comprimentos. O mais utilizado é o NDVI, que se relaciona bem com o estado hídrico das culturas e, por isso, com os K_c ou K_{cb} (Figura 8). Para o efeito pode recorrer-se a vários algoritmos e há que realizar calibração cuidadosa para adequada relação entre os NDVI e os K_c ou K_{cb} (Allen et al., 2007a).

São já numerosos os trabalhos neste domínio, destacando-se a sua aplicação para apoio a avisos de rega (Calera et al., 2005; Garatuza-Payan e Watts, 2005); para análise regional da ET e para o planeamento de recursos hídricos para a agricultura (Bastiaanssen e Harshadeep, 2005; Allen et al., 2007a).

O uso de informação produzida por teledeteção obriga à utilização de sistemas de informação geográfica (SIG) visto tal informação ser espacializada. Para o uso de tal informação requere-se modelação do balanço hidrológico com bases de dados georeferenciados. Entre tais dados devem mencionar-se as propriedades hidráulicas dos solos – capacidade de campo e ponto de emurchecimento – bem como as propriedades evaporativas do solo – TEW e REW –, necessárias ao cálculo da evaporação diária quando se usam K_c duais. Para tanto há que realizar o mapeamento de solos a partir de observações de campo, do

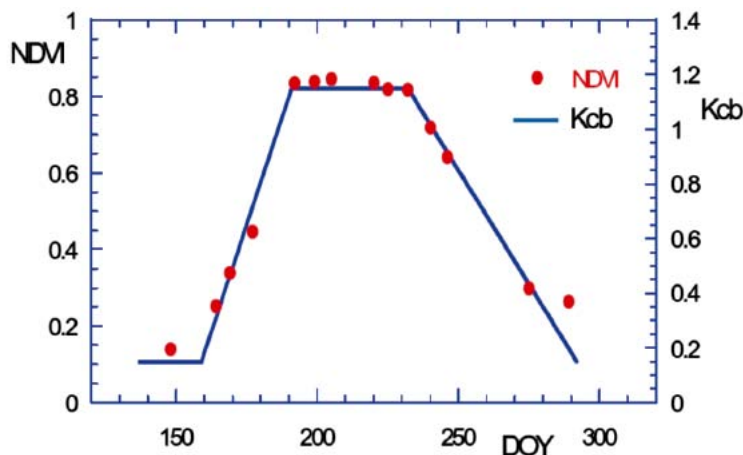
uso de funções de pedo-transferência, da análise variogramas relativos às propriedades em estudo, e de métodos de interpolação, nomeadamente o krigging (Mateus et al., 2007).

7.4. Necessidades de água para rega e balanço hídrico do solo

O conhecimento do balanço hídrico do solo na zona explorada pelas raízes é fundamental para uma boa gestão da água em regadio. Na condução da rega é necessário responder a três questões: quando, quanto e como regar. A resposta dependerá do grau de conhecimento dos processos ligados às transferências hídricas na zona de enraizamento da cultura regada, entre as plantas, o solo e a atmosfera.

As manifestações fisiológicas das plantas devidas à carência hídrica deverão servir como indicadores padrão para determinar quando regar. Estes indicadores podem ter carácter empírico, como cor, viçosidade, turgidez, enrolamento das folhas, ou constituir métodos científicos, como os relativos ao potencial da água nas folhas, à temperatura do copado, ou a variação dos diâmetros de caules e ramos. Por outro lado, poderão servir de padrão para a calibração prática de métodos baseados na medição de processos que ocorrem no meio onde a cultura se desenvolve, - a atmosfera e o solo, caso da medição do fluxo de seiva para estimar a taxa de transpiração

Figura 8: Relações entre a curva dos K_c e a curva dos NDVI para uma cultura de milho em Barrax (Calera et al., 2005)



da cultura, a utilização de medições de variáveis meteorológicas para estimar a ET cultural (que se analisou acima), a observação da taxa de variação do teor de água no solo por métodos como o gravimétrico, o da sonda de neutrões ou o do TDR, ou do potencial da água no solo com tensiómetros. Em todos os casos, as variáveis observadas permitem otimizar a decisão relativa à oportunidade da rega desde que os métodos estejam calibrados ou validados para a cultura e o ambiente em que esta se desenvolve.

Contudo, estes ou outros métodos não se podem dissociar dos processos de transferência hídrica no solo, pois este constitui o meio onde se efectua o armazenamento e transporte de água até às raízes das plantas. No entanto, o papel do solo é menos importante no caso de rega com pequenas dotações e de alta frequência, já que a dotação tende a ser igual ao consumo (devido contudo prevenir-se os riscos de salinização da zona de enraizamento). Porém, a dotação de rega não deverá depender apenas do intervalo entre regas ou da extracção da água pelas plantas e evaporação, mas também do teor armazenado no solo e da possibilidade de ocorrerem contribuições a partir da toalha freática através da ascensão capilar. Por outro lado, pode ocorrer percolação para além da zona radicular se as dotações forem excessivas, com arrastamento de fertilizantes, como pode ter que se aplicar dotações majoradas de uma fracção de lavagem destinada ao controlo da salinidade através da lavagem controlada dos sais da solução do solo. A dotação a aplicar depende porém do método de rega utilizado (Pereira, 1999; Pereira et al., 2002).

A determinação do balanço hídrico do solo na zona de enraizamento, com a respectiva quantificação dos termos que o constituem e a caracterização dos padrões de ocorrência dos processos de transferência hídrica (padrões de extracção radical e de escoamento de água no solo) é uma necessidade determinante para a gestão da rega e para o seu melhoramento e optimização (vd. Cameira et al., 2003, 2005)

A equação geral do balanço hídrico na zona de enraizamento de espessura Δz (m) e para um intervalo de tempo Δt (dias)

Equação 20

$$\Delta S = (P + I_n + GW) - (Q_r + DP + ET_c)$$

Onde ΔS é a variação do armazenamento de água no solo, P é a precipitação, I_n é a dotação de rega, GW é o fluxo acumulado de ascensão capilar, Q_r é o escoamento superficial, DP é o fluxo acumulado de percolação e etc é a evapotranspiração da cultura, sendo todos os termos expressos em mm e relativos ao período Δt . A Eq. 20 pode resolver-se em relação a qualquer uma das variáveis, permitindo calcular as necessidades de rega I_n . Q_r geralmente despreza-se, P observa-se, a ET_c calcula-se como se referiu atrás, enquanto GW e DP podem estimar-se por vários métodos (Liu et al., 2006). ΔS pode observar-se ou simular-se em conjunto com I_n , como acontece nos modelos de balanço hídrico (Pereira et al., 1992; 1995).

Para a realização do balanço hídrico, porém, é mais adequado recorrer a limiares relativos aos teores de humidade do solo. Adoptando o conceito de fracção da água do solo extraível sem afectar a produção (p) pode calcular-se a água facilmente disponível (RAW):

Equação 21

$$RAW = p TAW = p 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r$$

Onde RAW é a água do solo facilmente disponível e TAW é a água disponível total, ambos expressos em mm e referindo-se à profundidade Z_r da zona explorada pelas raízes [m], p é a fracção da água do solo extraível sem afectar a produção, i.e., a fracção de TAW que pode ser extraída da zona radicular sem que ocorra stress hídrico, enquanto θ_{FC} e θ_{WP} representam os teores de água do solo à capacidade de campo e no coeficiente de emurchecimento [$m^3 m^{-3}$]. Os valores indicativos da fracção p e da profundidade explorada pelas raízes Z_r para um grande número de culturas são dados por Allen et al. (1998; 2006b), Pereira (2004) e Pereira et al., (2010). Os valores de p devem ajustar-se ao clima, nomeadamente em função de et .

O balanço hídrico do solo visando simular o seu teor de humidade para cada dia i pode escrever-se

Equação 22

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - Q_{ri}) - I_{ni} - ET_{ci} - DP_i + GW_i}{1000Z_{ri}}$$

Onde θ_i e θ_{i-1} são os teor de água do solo na zona radicular [m³ m⁻³] nos dias i e $i-1$. Esta equação pode resolver-se em ordem a I_n para o dia em que i atinge o limiar de rega pretendido. Não se regando com défice, será o correspondente à fracção p definida acima tendo-se:

Equação 23

$$\theta_p = (1-p)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP}$$

Se a fracção extraível for diferente por decisão de gestão do regante, incluindo por carência de água, a variável p será substituída por MAD . A quantidade de água necessária para restabelecer então o teor de água do solo à capacidade de campo é

Equação 24

$$I_{ni} = 1000Z_{ri} (\theta_{FC} - \theta_p)$$

cujo somatório para todo o ciclo cultural, depois de corrigido para as necessidades de lavagem de sais, corresponde às necessidades líquidas de água para rega, IWR :

Equação 25

$$IWR = \frac{ET_c - P - GW + DP + \Delta S}{1 - LR}$$

Onde LR é a fracção de lavagem e onde se considerou o termo $Q_r = 0$ na Eq. 21.

As necessidades brutas ou globais de água de rega, $GIWR$, para a cultura em causa dependem do processo de aplicação da água, i.e., do método e sistema de rega, e do sistema de transporte e distribuição da água a partir da sua origem. Para o efeito, considera-se a eficiência global E_f , inclusiva da eficiência de aplicação relativa ao sistema de rega utilizado e das eficiências de distribuição e de transporte relativas à rede de rega, ou seja,

Equação 26

$$GIWR = \frac{IWR}{E_f}$$

7.5. Modelos

Modelo winisareg

Bom número de modelos de simulação do balanço hídrico constituem ferramentas preciosas para a determinação das necessidades de rega e para a condução da rega (Pereira et al., 1992; 1995). De entre eles destacamos o modelo ISAREG (Teixeira e Pereira, 1992; Pereira et al., 2003), disponível em Windows – modelo WINISAREG - e capaz de lidar com a ascensão capilar e a percolação através da zona radicular (Liu et al., 2006). A explicação sumária do modelo apresenta-se na Figura 9. O modelo tem sido utilizado em vários países, incluindo Argentina, Brasil e Uruguai.

O modelo (Figura 9 e 10) é composto por um programa para o cálculo da evapotranspiração de referência com o método FAO-PM (Eq. 3), $EVAP56$, que inclui a estimativa de parâmetros no caso de variáveis meteorológicas em falta, por um programa para parameterizar a cultura, e por um módulo de simulação do balanço hídrico, calculando as necessidades de água e de rega das culturas com diversos passos de tempo e diversas opções de entrada de dados climáticos, de solos e da cultura.

Para a calibração e validação do modelo utilizam-se observações da água do solo ao longo do ciclo vegetativo das culturas e relativas a todo

Figura 9: Esquema do modelo ISAREG com indicação dos programas associados, dos dados utilizados, dos procedimentos de cálculo e do tipo de resultados

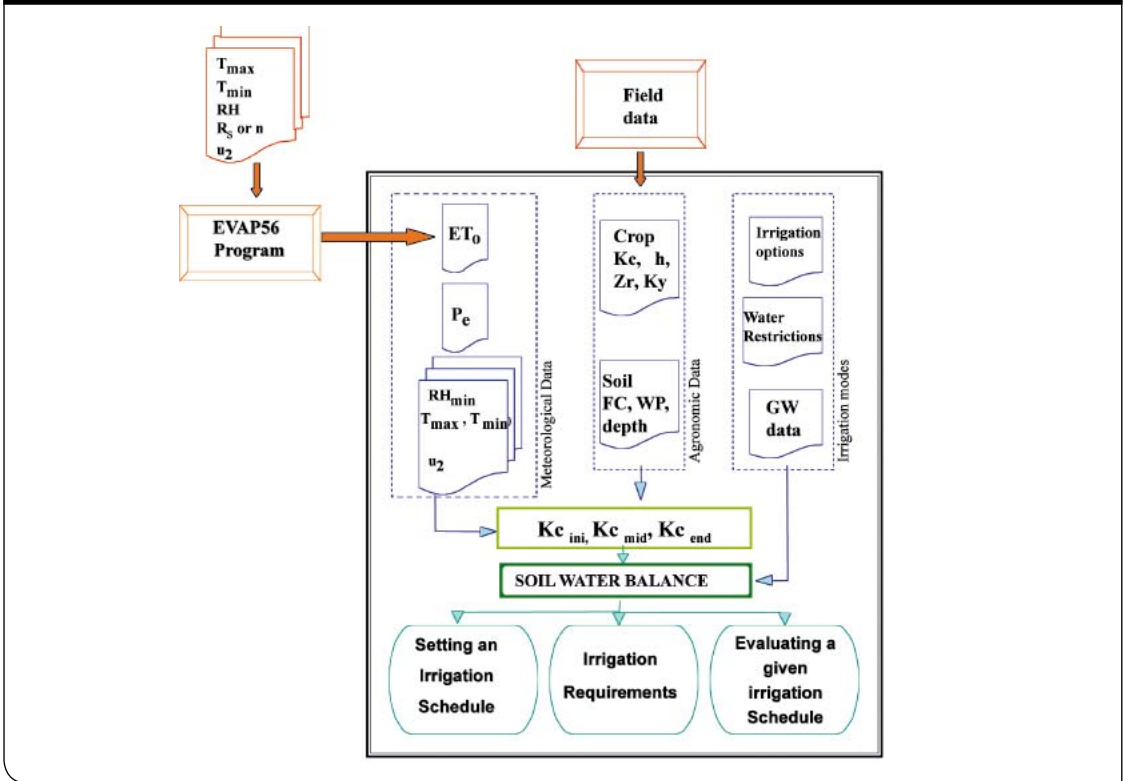
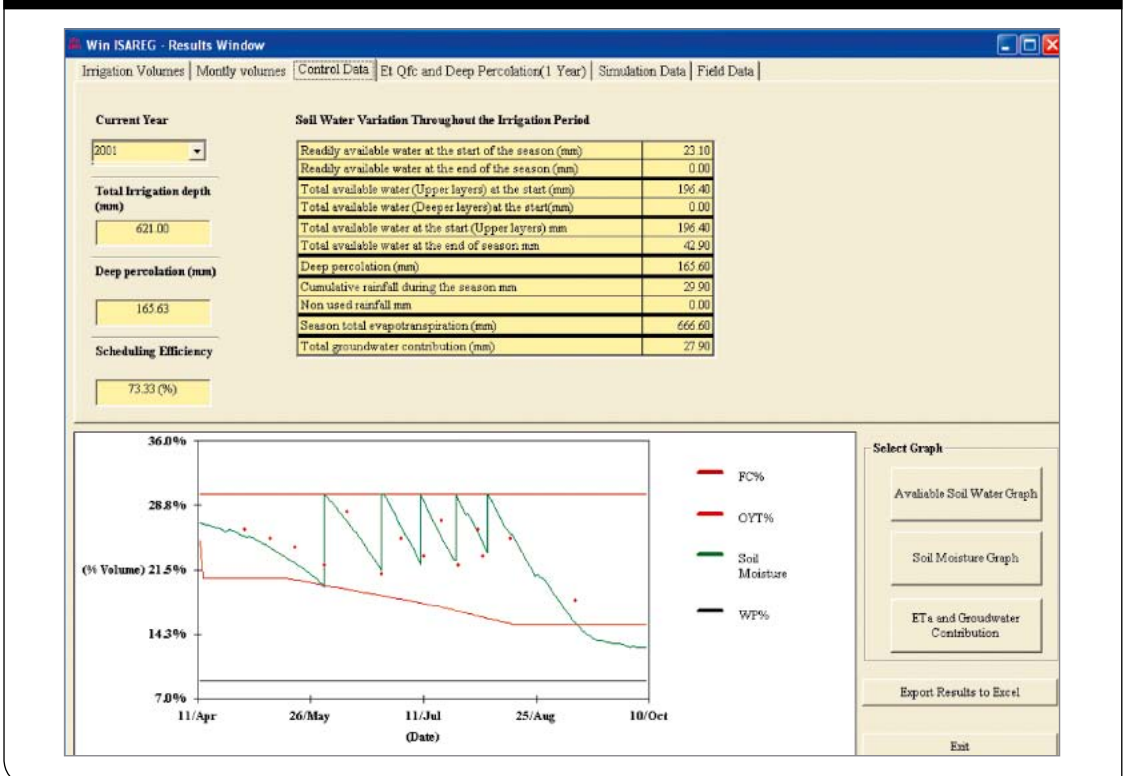


Figura 10: Resultados da simulação da rega do algodão para validação do modelo em Fergana, UZ (Cholpankulov et al., 2008)



o perfil de solo susceptível de ser explorado pelas raízes (Figura 11). Tal procedimento permite calibrar os K_c e p a utilizar para a cultura em estudo e nas condições ambientais em que foi cultivada, o que permite explorar o modelo com segurança na procura de soluções de gestão da rega mais adequadas. Vários exemplos estão actualmente publicados, tanto no que se refere a calibração como a validação, e.g. algodão (Cholpankulov et al., 2008); milho (Popova et al., 2006) e hortícolas (Chaterlain et al., 2010). A Figura 10 mostra uma saída de resultados de simulação no processo de calibração.

Modelo SimDualKc

Um outro modelo de grande interesse é o SimDualKc (Godinho et al., 2008). O objectivo principal do modelo SimDualKc é desenvolver opções para a calendarização da rega, nomeadamente para culturas com cobertura parcial do solo, especialmente hortícolas e pomares, e/ou para sistemas com regas de alta-frequência como é o caso da microrrega. A aplicação foi estruturada segundo uma arquitectura de três camadas (Figura 11): a base de dados, o modelo computacional e a interface gráfica (Godinho et al., 2008).

A base de dados permite guardar a informação relativa ao solo, cultura, clima, sistema de rega e características da simulação, permitindo construir o campo da simulação. Os dados de base são inseridos no modelo, no início da simula-

ção, através de uma base de dados em MSAccess e referem-se a:

Dados meteorológicos: temperaturas mínima, T_{min} , e máxima, T_{max} , diárias, [°C]; velocidade do vento, U_2 [m s⁻¹]; evapotranspiração de referência, ET_0 [mm]; precipitação efectiva, P_e [mm].

Dados de cultura: data de plantação, duração dos diferentes estágios culturais, L [dias]; valores tabelados (ou observados) do coeficiente cultural basal, K_{cb} ; comprimento máximo e mínimo da raiz, Z_r [m]; altura da cultura [m]; fracção de solo molhada pela rega, F_w ; fracção de solo coberta, F_c ; fracção de solo molhado que se encontra exposto há radiação solar, F_{EW} ; fracção de esgotamento da água do solo em conforto hídrico, p , e.

Dados de solo: profundidade da camada evaporativa, d [mm]; água facilmente evaporável, REW [mm]; água totalmente evaporável, TEW [mm]; total de água disponível, TAW [mm m⁻¹].

O módulo computacional foi desenvolvido de modo a permitir simular o balanço hídrico em múltiplas condições: 1) com várias hipóteses de rega e sem rega; 2) para culturas que cobrem total ou apenas parcialmente o solo; 3) para solo com e sem cobertura de mulch; 4) para pomares com solo com vegetação activa ou não. Tal permite usar o modelo para (Figura12):

- a) calcular as necessidades de rega de uma cultura

Figura 11: Estrutura do modelo SimDualKc.

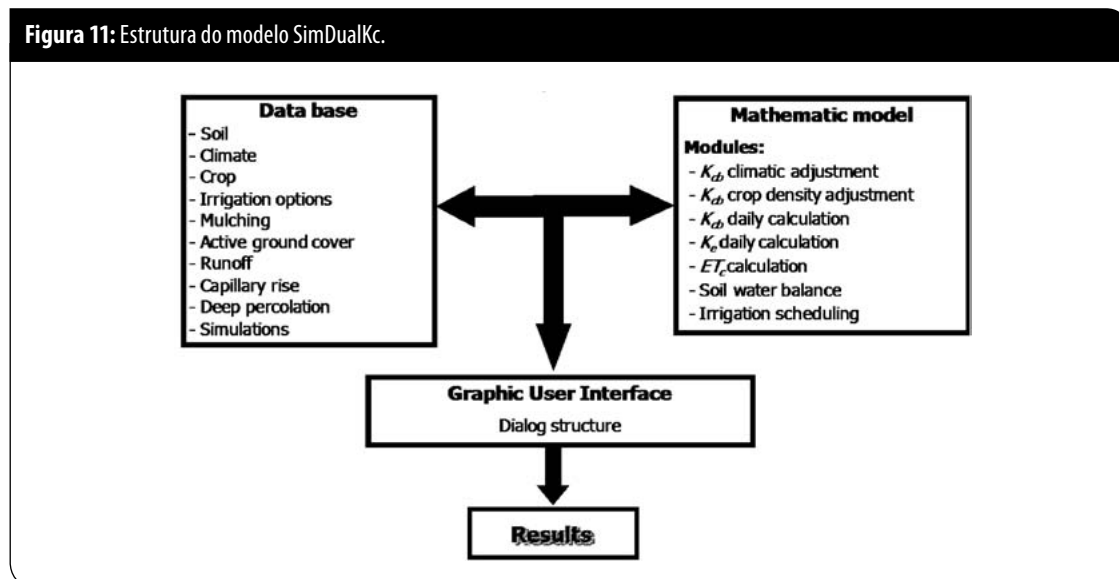


Figura 12: Diagrama do SimDualKc

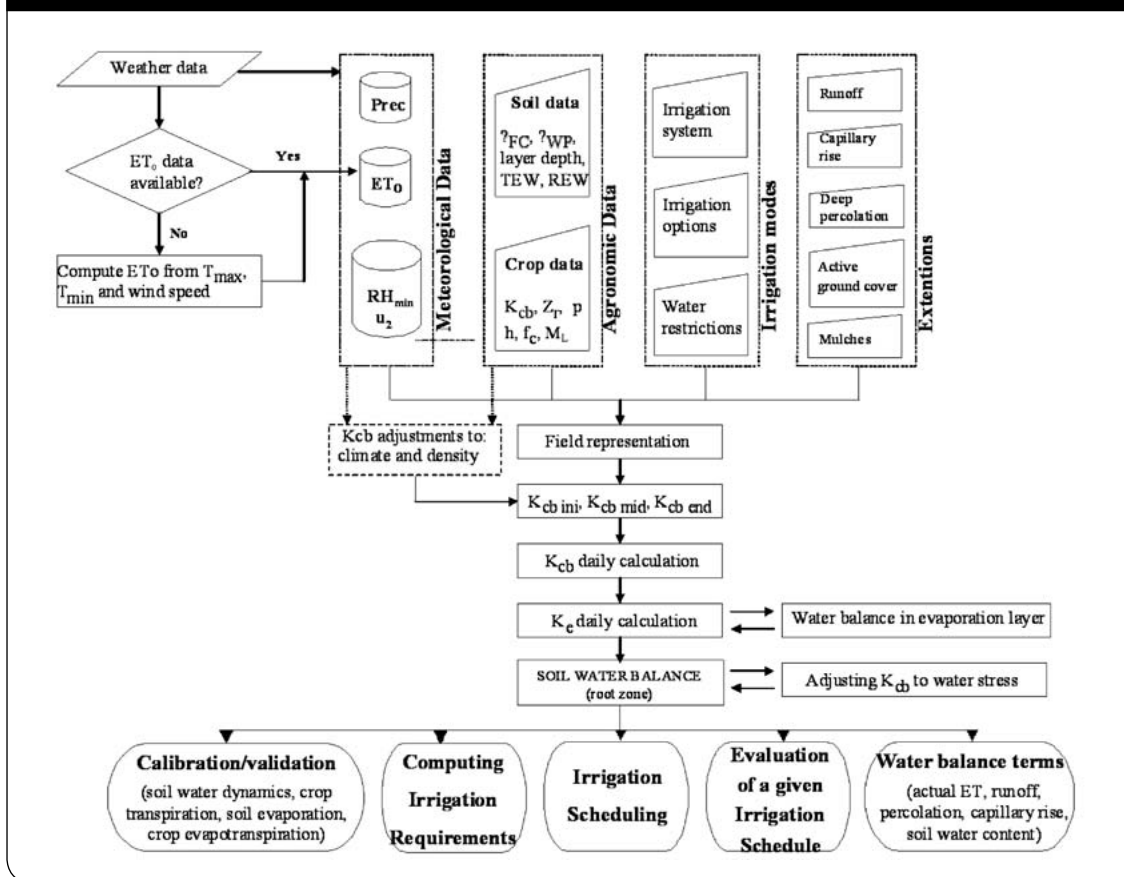
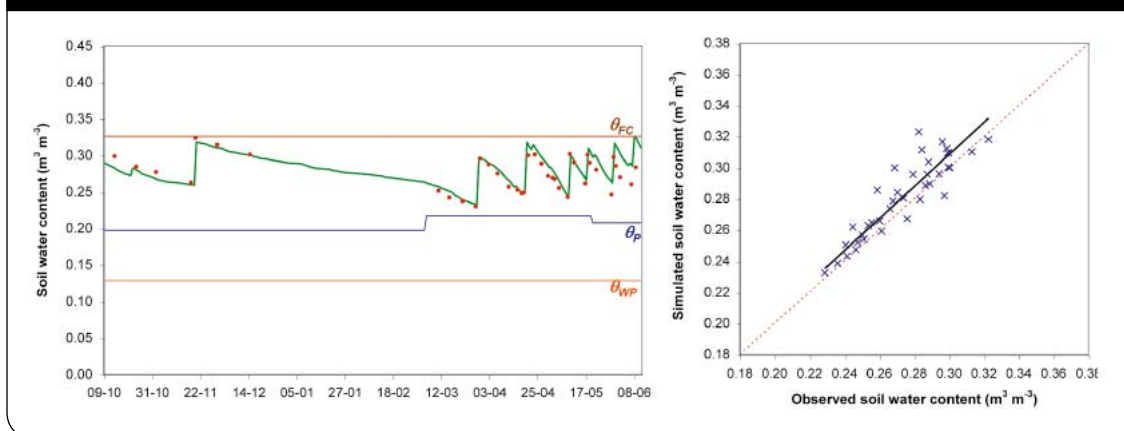


Figura 13: Validação do modelo SIMDualKc para trigo em Daxing, China (Zhao et al., 2010)



- b) estabelecer e avaliar calendários de rega
- c) calcular os termos do balanço hidrológico de qualquer superfície com vegetação.

O modelo foi testado para várias culturas, incluindo pomares (e.g. Paço et al., 2009), cereais (Zhao et al., 2010), e algodão (Figura 13), tanto em

Portugal como em vários países Mediterrânicos, na Ásia Central e na China.

Os resultados são apresentados tanto em forma tabular como gráfica e podem ser exportados para Excel. Actualmente trabalha-se no seu melhoramento em várias áreas: 1) proporcionar o

seu funcionamento em base de dados SIG; 2) adicionar um módulo de análise multicritério para fazer funcionar o modelo como ferramenta de apoio à decisão em regadio; 3) criar uma versão para funcionamento na Web.

7.6. Conclusões

Relativamente à determinação das necessidades de água das culturas deve concluir-se que a metodologia proposta pela FAO e recentemente melhorada por Allen et al. (2007b) e Allen e Pereira (2009) aqui resumida, tanto referente à definição da evapotranspiração de referência

como aos coeficientes culturais, quer os médios quer os duais, permite boa precisão de cálculo, comprovada para grande variedade de climas e regiões do mundo, desde que utilizados em relação com observações de campo.

A determinação das necessidades de rega e a definição das dotações pode ser facilitada pelo uso de modelos de simulação do balanço hídrico. Requerem-se, porém, calibração e validação bem como adequada parameterização no que respeita ao solo e à cultura. Esperam-se avanços na relação com os SIG, na adopção de análise multicritério e no recurso à Web para levar a informação aos agricultores.