

ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DE CULTURA DO TRIGO NO CERRADO BRASILEIRO COMBINANDO BALANÇO HÍDRICO E SENSORIAMENTO REMOTO

Mirta T. Petry¹, Cassiane R. Rosário¹; Leonardo Chechi¹, Bruno C. Mantovanelli²,
Douglas Henrique Haubert Cerutti³, Cássio Miguel Ferrazza¹

RESUMO: Os coeficientes de cultivo, fundamentais para o cálculo da evapotranspiração das culturas (ET_c), podem ser obtidos a partir de índices de vegetação (VI's) derivados de produtos do sensoriamento remoto. Nesse trabalho, uma combinação de modelo de balanço hídrico e VI's foi utilizada para derivar a fração de cobertura e coeficientes de cultivo (K_c) do trigo irrigado, no Cerrado brasileiro. O trabalho foi realizado em duas áreas irrigadas por pivô central, em Cristalina-GO, nos anos de 2017 (área 1) e 2018 (área 2). Imagens do satélite Sentinel 2 foram utilizadas para derivar os VI's a partir da reflectância da cultura e calcular a fração de cobertura ao longo do ciclo da cultura. O modelo SIMDualKc foi utilizado para simular o balanço hídrico do solo. As observações de campo incluíram a identificação dos principais estádios fenológicos, a medição da umidade do solo, utilizando sensores de matriz granular, tipo watermark, instalados em três profundidades, com leituras automáticas do potencial de água no solo e, ao final do ciclo, a determinação do rendimento de grãos. Indicadores estatísticos como o coeficiente de regressão forçado à origem (b_0) e o coeficiente de determinação (R^2) foram usados para comparar os dados simulados pelo modelo e aqueles obtidos pelo VI. Os resultados demonstram boa correlação entre os coeficientes de cultura basal obtidos por simulação ($K_{cb\ SIMDual}$) e aqueles obtidos pelos VI's ($K_{cb\ VI}$), com um b_0 de 0.89 e 1.03, para as áreas 1 e 2, respectivamente, com um R^2 de 0,98 para ambas às áreas.

PALAVRAS-CHAVE: Balanço hídrico do solo, fração de cobertura, evapotranspiração.

¹ Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

² Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

³ Departamento de Informática, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

ESTIMATING CROP COEFFICIENTES IN IRRIGATED WHEAT IN BRAZILIAN CERRADO COMBINING SOIL WATER BALANCE AND REMOTE SENSING

ABSTRACT: Crop coefficients, which are fundamental for computing crop evapotranspiration (ET_c), can be estimated from vegetation indices (VIs) derived from remote sensing (RS) products. In this study, a combination of soil water balance model and crop coefficients from VI's was used to derive the ground cover fraction and crop coefficients (K_c) of irrigated wheat in the Brazilian Cerrado. The study was carried out in two areas irrigated by central pivot, in Cristalina-GO, in the 2017 (area 1) and 2018 (area 2) growing seasons. Images of the Sentinel 2 satellite were used to derive the VIs from the crop reflectance and estimate the ground cover fraction throughout the crop cycle. The SIMDualKc model was used to simulate the soil water balance. Field observations included identifying the major crop stages, soil moisture measurement, using granular matrix sensors (watermark), installed at three depths, with automatic readings of soil water potential and, at the end of the cycle, the grain yield. Statistical indicators such as the regression coefficient forced to origin (b_0) and coefficient of determination (R^2) were used to compare the data simulated by the model and those obtained by the VI. The results showed a good correlation between the basal crop coefficients obtained by the model ($K_{cb\ SIMDual}$) and those obtained by the VIs ($K_{cb\ VI}$), with a b_0 ranging from 0.89 to 1.03, for areas 1 and 2, respectively, and an R^2 of 0,98 for both areas.

KEYWORDS: Soil water balance; ground cover fraction, evapotranspiration.

INTRODUÇÃO

A estimação precisa da evapotranspiração da cultura (ET_c) é fundamental para um adequado manejo da irrigação, principalmente em áreas irrigadas. O manejo efetivo da água de irrigação em escala de produtor necessita de atualização em tempo real da área irrigada, com informações do estágio da cultura e consumo de água, dados esses muitas vezes difíceis de serem obtidos através de monitoramentos apenas da superfície. Dessa forma, o monitoramento do requerimento hídrico das culturas irrigadas é possível através de observações de satélite, combinadas com informações meteorológicas de superfície ou modelos de balanço hídrico (Pôças et al., 2015; Garrido-Rubio, 2018). De acordo com Campos et al. (2016), modelos de balanço hídrico são largamente utilizados no manejo da

água na agricultura, por serem o procedimento mais largamente utilizado no monitoramento e calendarização da irrigação,

A ET_c usualmente é calculada através da aproximação K_c-ET_o , adotada desde o FAO56 (Allen et al., 1998), onde a evapotranspiração de referência (ET_o) é multiplicada por um coeficiente de cultura (K_c). A primeira é estimada a partir de parâmetros meteorológicos, pois representa a demanda evaporativa da atmosfera no local, enquanto o K_c representa as características da cultura, como área foliar, propriedades do dossel e resistência aerodinâmica, bem como a variação durante o ciclo (Pereira et al., 2015). Essa metodologia também pode incluir a aproximação dos coeficientes de cultivo duais propostos por Wright (1982), onde se distingue separadamente a transpiração da planta (T_c) e a evaporação do solo (E_s). Recentemente, a estimativa da ET_c baseada no sensoriamento remoto (SR) tem sido objeto de múltiplos estudos (Mateos et al., 2013, Pôças et al., 2015). Imagens de satélite podem ser úteis para estimar as curvas de K_c pela obtenção da ET_c da cultura em tempo espacial e temporal e, por consequência, computar o requerimento hídrico. O mais amplo uso dessa aproximação considera a relação entre os VI derivados a partir dos dados da refletância do SR e os coeficientes de cultura da vegetação, tanto o K_c como o K_{cb} (Pôças et al., 2015).

O uso de imagens multiespectrais contínuas com base no SR vem a ser uma ferramenta útil para monitorar parâmetros biofísicos das plantas, as quais são relacionadas com a ET_c , com aplicação direta no manejo da irrigação (Calera et al., 2017). A vantagem dessas tecnologias em relação às medições de campo (Allen et al., 2011) é a possibilidade de encobrir grandes áreas, além de serem mais baratas que as observações de campo.

A vantagem na obtenção de coeficientes de cultura por VI (K_c VI ou K_{CB} VI), é que estes parâmetros evidenciam a ocorrência ou não de stress, uma vez que, o VI se relaciona com características da planta, como área foliar, altura do dossel, fração de cobertura e biomassa (Viña et al., 2011). Assim, o principal objetivo desse trabalho foi combinar os coeficientes de cultivo obtidos via modelo de balanço hídrico e aqueles derivados de índices de vegetação, no trigo cultivado no Cerrado, e avaliar a adequação dessa aproximação ao manejo da irrigação.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em uma propriedade rural em Cristalina, GO (16°13'42,1" S e 47°37'34,5" W e altitude de 991 m), com trigo, irrigado por pivô central, nos anos de 2017

(área 1 = 60 ha) e 2018 (área 2 = 50 ha). Em 2017, a cultivar BRS 264 foi semeada em 22/06; em 2018, a cultivar BRS 394 foi semeada em 09/05, ambas em espaçamento entre linhas de 0,17 m e população final de 400 mil plantas ha⁻¹, em sistema de cultivo convencional.

A umidade do solo foi monitorada com estações de campo, contendo sensores de matriz granular, tipo Watermark (Irrometer, Califórnia, USA), modelo 200SS, instalados a 0-0.10 e 0.10-0.30 e 0.30-0.70 m de profundidade, sendo realizadas leituras automáticas diárias do potencial de água no solo. A estação ainda continha um pluviômetro automático, tipo balança. As leituras eram enviadas ao banco de dados do Sistema Irriga®, via Serviços Gerais de Pacote por Rádio (GPRS), em escala diária. As medidas da umidade em potencial foram convertidas para conteúdo volumétrico de água no solo (θ) através da equação proposta por Van Genuchten (1980). As práticas de manejo foram realizadas pelo produtor, seguindo as recomendações técnicas para a cultura do trigo.

O modelo SIMDualKc foi aplicado para simular o balanço hídrico de solo, sendo calibrado com dados de 2017 e validado com os de 2018. Dados de solo (conteúdo de água na capacidade de campo e ponto de murcha, número e espessura das camadas, características e espessura da camada evaporativa), planta (área foliar, fração de cobertura, altura de plantas e profundidade do sistema radicular), meteorológicos (precipitação, umidade relativa mínima, velocidade do vento a 2 m de altura, temperatura máxima e mínima do ar e ET_o), datas e lâminas de irrigação aplicadas, fator de depleção para que não ocorra stress e valores iniciais dos K_{cb} 's. Os parâmetros de escoamento (RO) e percolação profunda (DP) também foram usados para adequadamente calibrar o modelo.

A altura de plantas foi realizada por técnicos do Sistema Irriga®, em intervalos de 14 dias. A fração de cobertura (f_c) foi calculada a partir dos VI's derivados de dados de reflectância obtidas do satélite Sentinel 2, através da ferramenta Google Earth Engine. Utilizou 15 imagens em 2017 e 19 em 2018, calculando-se o VI pixel a pixel, fazendo-se a média para toda a área de estudo. No SIMDualKc, o K_{cb} foi computado usando o coeficiente de densidade (K_d) e $K_{c\ min}$ propostos por Allen e Pereira (2009). A fração de cobertura (f_c), necessária para calcular o K_d , foi calculada a partir do VI conforme Pôças et al. (2015), utilizando os dados da altura de planta observados a campo.

Indicadores estatísticos como o coeficiente de regressão forçado à origem (b_0) e coeficiente de determinação (R^2) foram usados para comparar os dados simulados pelo modelo e aqueles obtidos pelo VI. Para a estimativa dos erros, utilizou-se a raiz quadrada do erro médio (RMSE). A magnitude da variância residual e a tendência a superestima ou

subestima foi calculada através da eficiência de modelação (EF) e porcentagem de viés (PBIAS), respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se boa concordância entre a água disponível no solo (ASW) observada e simulada pelo modelo SIMDualKc, com b_0 igual a 1.0 na calibração e 0.99 na validação, um R^2 variando de 0.99 a 1.0 para ambas as áreas, indicando que maior parte das observações da água no solo podem ser explicadas pelo modelo. O RMSE foi baixo (4.57 mm em 2017 e 4.09 mm em 2018), que representa menos de 4% do total de água disponível (TAW). O monitoramento do conteúdo de água no solo em tempo real, através do uso de sensores de resistência elétrica com transmissão de dados em tempo real, possibilita que se mantenha a umidade do solo, de forma controlada, acima de valores que evitem stress. Associando essas medições a modelos de balanço hídrico do solo, de acordo com Garrido-Rubio et al. (2018), tem-se condições de obter a evapotranspiração atual da cultura ($ET_{c \text{ act}}$), a partir dos ajustes dos coeficientes de cultivo e demais componentes do balanço hídrico, como o RO e DP.

Os resultados do K_c e K_{cb} simulados pelo modelo e aqueles derivados por sensoriamento remoto são apresentados na Figura 1. Maiores valores do coeficiente de evaporação (K_e) foram observados nos estádios iniciais, devido a ausência de resíduos culturais e índice de área foliar incipiente (<3) que, somado às condições climáticas favoráveis (elevada radiação, umidade relativa do ar baixa e presença constante de ventos) e irrigações frequentes, resultaram em K_e entre 0.82 e 1.11. No cerrado brasileiro, quase a totalidade dos cultivos são em plantio convencional (sobretudo quando sucedem a cultura do algodão) ou semeadura direta sem palha, fazendo com que uma larga fração de solo seja constantemente exposta aos fatores atmosféricos, elevando as perdas por evaporação. Na área 1 (Figura 1a), quando ocorreu estresse hídrico no solo, o valor do K_{cb} foi corrigido pelo coeficiente de stress (K_s), computado através do balanço de água no solo, indicando considerável depleção de água no solo. O $K_{cb \text{ act}}$ foi ligeiramente superior na área 2 (2018) no período de máximo consumo ($K_{cb \text{ act}}=1,0$), em relação a área 1, em 2017, quando o valor máximo do $K_{cb \text{ act}}$ foi de 0.9. O $K_{cb \text{ act}}$ é influenciado pela disponibilidade de água no solo (Pereira et al., 2015), podendo se distanciar dos valores padrão (Allen et al., 1998) pelas condições meteorológicas e manejo, como sistema de cultivo, datas de semeadura e cultivares utilizadas. A ausência de déficit hídrico no ano de 2018 pode estar relacionado a dois fatores:

a antecipação da semeadura em aproximadamente 30 dias, em relação a 2017 e aos fatores meteorológicos mais amenos. A antecipação da semeadura para o mês de maio propiciou que a cultura usasse melhor a água armazenada no solo, uma vez que, a temporada das chuvas se encerra em abril.

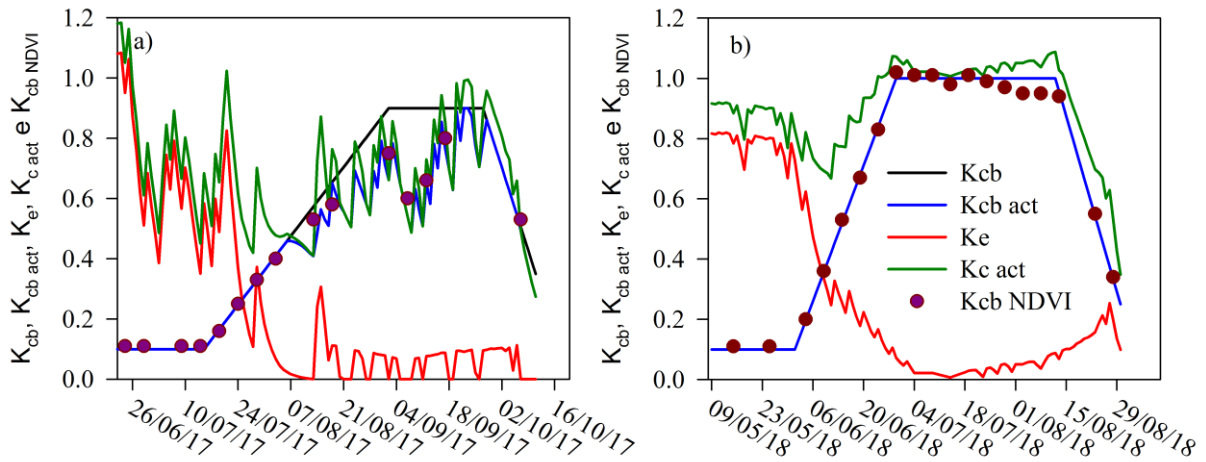


Figura 1. Variação diária do coeficiente de cultura basal (K_{cb} , —), coeficiente de cultura basal atual ($K_{cb\ act}$, —), coeficiente de evaporação (K_e , —), coeficiente de cultura atual ($K_{c\ act}$, —), coeficiente basal por $VI(K_{cb\ VI})$, ao longo do ciclo da cultura do trigo, para a área 1 (a) e 2 (b).

No modelo SIMDualKc, o K_{cb} é ajustado à fração da cobertura (fc) do solo pelo dossel ou do coeficiente de densidade (K_d). No ano de 2017 (Figura 1a), o trigo propiciou menor cobertura do solo, resultando em menor $K_{cb\ act}$. El-Raki et al. (2007) estimaram o K_{cb} para a cultura do trigo em clima semiárido usando o NDVI, encontrando valores de 0.9 para o período intermediário, consideravelmente mais baixo que o recomendado pelo FAO56, atestando a necessidade de associar a fc do dossel para melhorar essa estimativa. Observou-se ainda que, mesmo com a grande variação no K_e durante o ciclo, devido aos muitos eventos de irrigação, o $K_{cb\ VI}$ acompanhou bem a curva do K_{cb} simulado pelo modelo. O mesmo ocorreu com o $K_{c\ act}$, a partir do momento em que o dossel da cultura, indicando que esses parâmetros podem ser úteis para avaliar a gestão de irrigação em áreas irrigadas.

Em ambas às áreas avaliadas, o $K_{cb\ VI}$ acompanhou a variação do $K_{cb\ act}$ simulado pelo modelo, com uma superestimativa desse coeficiente na área 1 e leve subestimativa na área 2 (Tabela 1). Na área 2 (Figura 1b e Tabela 1), pode-se observar um leve déficit a partir da metade do período intermediário, através do $K_{cb\ VI}$, stress esse que não foi observado na simulação. Isso pode ter sido devido a heterogeneidade da área, indicando que o SR pode ser útil para detectar a ocorrência de stress em áreas irrigadas. O $K_{c\ act}$, que é a obtido pela soma do $K_{cb}+K_e$, foi inferior aos valores relatados na literatura para o período intermediário (K_c

$_{med}$), como os encontrados por Rosa et al. (2012b), que obtiveram um K_c $_{med}$ de 1.05 em Aleppo, na Síria. A EF foi próxima de 1.0, indicando que essa metodologia pode ser usada para melhorar a estimativa dos coeficientes de cultivo, pois a porcentagem de viés associada às estimativas foi baixa.

Tabela 1. Comparação do coeficiente de base atual simulado pelo modelo ($K_{cb\ act\ SIMDual}$) e o $K_{cb\ VI}$ derivado por sensoriamento remoto, em trigo irrigado no Cerrado, em 2017 e 2018.

Área	b_0	R^2	RMSE	EF	PBIAS
1	1,05	0,97	0,05	0,96	-5.29
2	0.99	1.00	0,02	1.00	0.68

Na figura 2 são apresentados os resultados da partição da ET_c em E_s e T_c . A ET_c foi menor em 2017 (324 mm), em relação a 2018 (263 mm). Menor E_s foi observada na área 1 (76 mm), provavelmente devido a presença de resíduos culturais de milho, com densidade superior a 3 Mg/ha, contribuindo para a menor E_s . Na área 2 a E_s foi maior (105 mm), principalmente devido a ausência de resíduos em superfície, com perdas por superiores a 3 mm dia^{-1} no início do ciclo. A razão E_s/ET_c para culturas densas, como o trigo ou cevada, geralmente é da ordem de 30-40%, com alta variabilidade entre os valores (KOOL et al., 2013). No estudo em questão, na área 1 foram encontrados valores abaixo dos relatados na literatura (23%), enquanto que, na área 2, a razão E_s/ET_c foi de 30%. Em estudo com cevada malteira na região do Ribatejo, em Portugal, Pereira et al. (2015) aplicaram a aproximação dos coeficientes duais, encontrando 21% (ano seco) e 23% (ano úmido), de razão E_s/ET_c .

O processo de evaporação da água no solo, é influenciado por diversos fatores que atuam sobre a superfície do solo, tais como o manejo e preparo do solo para a semeadura, que acaba alterando a rugosidade da superfície, remoção da cobertura vegetal, desestruturação dos agregados, influência do sombreamento pela cultura que vai depender da densidade e da altura das plantas, além da umidade da superfície do solo e disponibilidade de energia sobre a superfície do solo (ALLEN et al., 1998, 2005; ALLEN e PEREIRA, 2009).

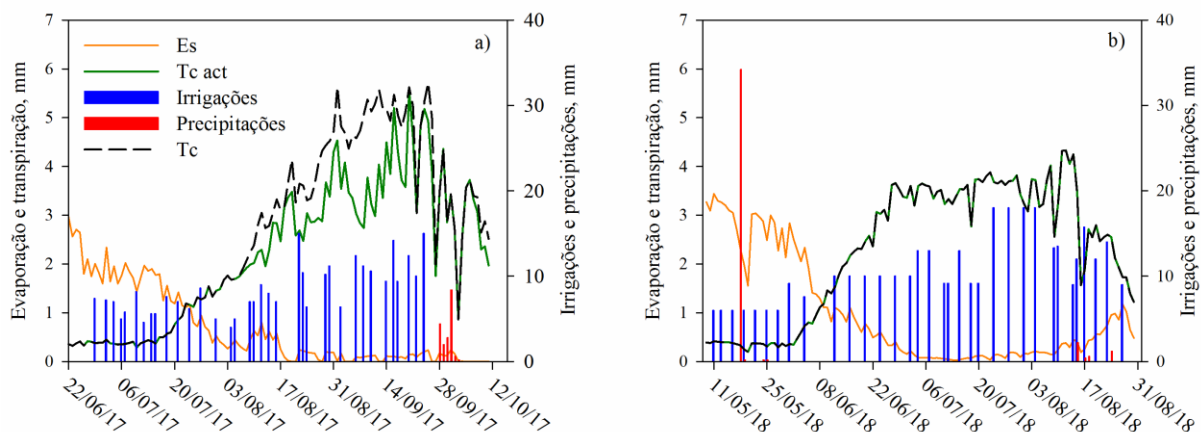


Figura 2. Variação diária da evaporação do solo (E_s , mm, —) e transpiração atual ($T_{c\ act}$, mm, —) e potencial (T_c , mm, - -) do trigo, simulado pelo modelo SIMDualKc nas áreas 1(a) e 2(b), ao longo do ciclo da cultura. As colunas representam (■) irrigações, (mm) e (■), precipitação, (mm).

CONCLUSÕES

O estudo demonstrou a habilidade do uso de índices de vegetação do sensoriamento remoto para estimar os coeficientes de cultura basal do trigo, em associação com um modelo de balanço hídrico, mostrando-se uma metodologia possível de ser utilizada no suporte ao manejo da irrigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, R. G. et al. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements, **FAO irrigation and drainage paper 5**. Rome, Italy: FAO, 300 p. 1998.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., HOWELL, T.A. & JENSEN, M.E. Evapotranspiration information reporting: I: factors governing measurement accuracy. **Agric. Water Manage.** V.98, p.899-920, 2015.

Allen, R.G. & Pereira, L.S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. **Irrig. Sci.** v.28, p.17-34, 2009.

- Calera, A. et al. Remote sensing for crop water management: from ET modelling to services for the end users. *Sensors.*, v.17, 1104–1129, 2017.
- Campos, I. et al. Combining a water balance model with evapotranspiration measurements to estimate total available soil water in irrigated and rainfed vineyards. *Agric. Water Manag.*, 165, 141–152, 2016.
- Er-Raki, S. et al. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agric. Water Manag.*, 87, 41–54, 2007.
- KOOL, D. et al. **A review of approaches for evapotranspiration partitioning.** *Agricultural and Forest Meteorology*, vol.184, p.56– 70, 2014.
- Mateos, L. et al. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. *Agric. Water Manag.*, 125, 81–91, 2013
- Miao, Q. et al. Modeling water use, transpiration and soil evaporation of spring wheat-maize and spring wheat-sunflower relay intercropping using the dual crop coefficient approach. *Agric. Water Manag.*, v.165. p.211-229, 2016.
- Pereira, L, S. et al. Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years, Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. *Agric. Water Manag.*, 159, 239–254, 2015.
- Pocês, I et al. Estimation of Actual Crop Coefficients Using Remotely Sensed Vegetation Indices and Soil Water Balance Modelled Data. *Remote Sens.*, 7, p.2373-2400, 2015.
- Rosa, R. D. et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software, 1, Background and computational strategy. *Agric. Water Manag.*, v.103, p.8-24, 2012a.
- Rosa, R. D. et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 2. Model testing. *Agric. Water Manag.*, 103, p.62 -77, 2012b.
- Van Genuchten, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 44, p. 892-898, 1980.

Mirra T. Petry et al.

Viña, A. et al. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sens. Environ.*, 115, 3468–3478, 2011.

Garrido-Rubio, J. et al. Remote sensing-based soil water balance for irrigation water accounting at the Spanish Iberian Peninsula. Proc. IAHS, 380, p.29-35, 2018.

Wright, J.L. New evapotranspiration crop coefficients. J. Irrig. Drain. Div. 108, 57–74, 1982.