

Funções de estimativa do armazenamento de água no solo sob diferentes níveis de capacidade de água disponível

Daniela Jerszurki¹, Jorge Luiz Moretti Souza¹, Jesse Gomes Adamuchio¹

¹ Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Curitiba, PR, Brasil. E-mail: danijerszurki@gmail.com (ORCID: 0000-0002-3997-1934); jmoretti@ufpr.br (ORCID: 0000-0001-8702-5697); jesse@ufpr.br (ORCID: 0000-0002-0834-6976)

RESUMO: A estimativa do armazenamento de água no solo é essencial para fins de planejamento agrícola no Brasil. Teve-se por objetivo avaliar o desempenho de cinco funções utilizadas para estimar o armazenamento de água no solo, nas simulações de um balanço hídrico diário nas localidades de Goiânia-GO e Ponta Grossa-PR, considerando diferentes níveis de capacidade de água disponível no solo. Para tanto, foram utilizados dados diários de precipitação pluviométrica, evapotranspiração de referência, coeficiente de cultivo, fração p e armazenamento inicial de água no solo, considerando-se a capacidade de água disponível variando de 20 mm a 320 mm, em intervalos de 30 mm. As funções Potenciais de Primeira e Segunda Ordem apresentaram resultados similares aos apresentados pela função Cossenoidal, considerando ou não irrigações complementares ao longo do ano para as regiões estudadas. A função Exponencial não foi adequada para a estimativa do armazenamento. A função de Braga não foi adequada para as análises que consideraram a realização de irrigações complementares. Recomenda-se o aprimoramento das funções de estimativa do armazenamento de água a partir da substituição do “negativo acumulado” por variáveis capazes de representar a variação do armazenamento de água disponível para as plantas.

Palavras-chave: modelagem; relações hídricas; simulação

Soil water storage functions under different levels of total available water

ABSTRACT: The estimative of soil water storage is essential for representation of soil water relations for Brazil agricultural planning purposes. We had to aim evaluate the performance of five equations used to estimate soil water storage, through simulations of a daily water balance to the cities of Goiânia-GO and Ponta Grossa-PR, considering different amounts of total available water in the soil. For that purpose, were used daily data series of precipitation, reference evapotranspiration, crop coefficient, p fraction and initial soil water storage. It was considered total available water from 20 mm to 320 mm, with an interval of 30 mm. Potential functions of First and Second Order were approximately equal to the Cosine function in a daily water balance simulations, under conditions of supplementary irrigation and non-irrigation over the year. The Exponential function was not adequate in the estimative of soil water storage. Braga function was not adequate when considering additional irrigations in a daily water balance. We recommend the improvement of the functions to estimate soil water storage from replacement of “negative cumulative” function by other parameters, which could better explain the variation of soil water storage available for plants.

Key words: modeling; water relations; simulation

Introdução

O armazenamento de água no solo para as culturas é um dos componentes do ciclo hidrológico mais importante para o estudo da resposta ecofisiológica das plantas sob condições de deficiência hídrica, bem como para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de um sistema de irrigação (Frizzone et al., 2005).

Nas últimas décadas houve melhoria significativa dos sistemas de aquisição de dados climáticos em estações meteorológicas (Pereira et al., 2008). Por outro lado, séries de longo prazo de dados físico-hídricos do solo para todas as regiões brasileiras ainda são indisponíveis. Assim, devido à falta de dados físico-hídricos do solo, o monitoramento do armazenamento de água no solo teve sua estimativa cientificamente popularizada com a geração e utilização de modelos de balanços hídricos agrícolas a partir da utilização de séries históricas de dados climáticos. O mais conhecido e citado modelo para a estimativa do armazenamento de água no solo em balanços hídricos para finalidade agrícola foi descrito por Thornthwaite & Mather (1955), o qual tem sido utilizado e adaptado por diversos autores ao longo do tempo (Andrade Junior et al., 2006; Leivas et al., 2006; Souza et al., 2006; Bruno et al., 2007; Souza & Gomes, 2007; Sparovek et al., 2007; Souza Filho & Gomes, 2008; Araujo et al., 2009; Dourado-Neto et al., 2010; Campos et al. 2016; Souza et al., 2016).

Paralelamente, outros modelos com maior fundamentação física e fisiológica vêm sendo desenvolvidos de modo a promover maior acurácia e precisão nas estimativas do armazenamento de água no solo em balanços hídricos. Dentre eles, destacam-se os modelos *Hydrus* (Simunek et al., 2011), *Soil Water Assessment Tool* (SWAT) e *Soil Water Atmosphere and Plant* (SWAP) (Van Dam et al., 2008), os quais baseiam-se, principalmente, em propriedades físicas do solo. Geralmente, modelos com maior embasamento físico e fisiológico apresentam ótimo desempenho de estimativa, mas esbarram na dificuldade de obtenção dos dados necessários e no grau de complexidade para a sua utilização, limitando a sua implementação às áreas com maior disponibilidade de dados e mão-de-obra mais técnica. Portanto, para fins de planejamento e zoneamento agrícola nas condições brasileiras, o emprego de modelos mais simples que se baseiam em dados meteorológicos, bem como na capacidade de água disponível do solo, além de constantes da cultura, como o coeficiente de cultivo e a fração de água disponível, são uma alternativa barata e eficiente para representar as condições hídricas do solo, além de facilitar os cálculos e permitir a programação e realização de simulações.

De modo geral, os modelos baseados em dados meteorológicos podem ser classificados em dois grupos, conforme a função que estima o armazenamento da água no solo que considera o conceito de fração de água disponível (fração p) e água disponível (AD) (Rijtema & Aboukhaled, 1975): (i) nas funções que não adotam o conceito de fração

p , qualquer retirada de água no solo constitui deficiência hídrica, como é o caso da função de Thornthwaite & Mather; e, (ii) para as funções que consideram a fração p e água disponível (AD), somente ocorre deficiência hídrica quando o armazenamento da água no solo for menor que $CAD \cdot (1 - p)$. Nessas funções, verificam-se duas situações acerca da condição hídrica do solo, uma úmida e outra seca, como é o caso das funções de Rijtema & Aboukhaled (1975), Braga (1982), Potencial de Segunda Ordem e Cossenoidal (Dourado Neto & Jong Van Lier, 1993; Souza & Gomes, 2007).

Nesse sentido, dada a variação contínua da disponibilidade de água no solo às plantas (Pereira et al., 1997) e sua influência sobre a estimativa do armazenamento de água no solo (ARM), a avaliação do desempenho e recomendação das funções de estimativa devem ser realizadas baseando-se em diferentes faixas de disponibilidade de água no solo, possibilitando verificar sua aplicação a diferentes tipos de solos e culturas, sendo essencial para o estabelecimento dos limites de utilização das funções de estimativa do ARM.

Na literatura são encontrados alguns trabalhos que analisaram o desempenho de funções para a estimativa do armazenamento de água no solo (Dourado-Neto & Jong Van Lier, 1993; Souza & Gomes, 2007), mas ainda são escassos estudos que analisam o desempenho dessas funções para diferentes condições de clima e níveis de capacidade de água disponível no solo. Dourado-Neto & Jong Van Lier (1993) comparando 11 funções concluíram que a função Cossenoidal foi mais eficiente na estimativa do armazenamento, sendo mais recomendada para cálculos em modelos de balanço hídrico. Souza & Frizzone (2003) utilizando a função exponencial de Thornthwaite & Mather e Potencial de Primeira Ordem de Rijtema & Aboukhaled (1975) verificaram que a função Exponencial não se mostrou adequada para condição irrigada e períodos decendiais. Souza & Gomes (2007) realizando um balanço hídrico sequencial decendial observaram que as funções Potenciais de Primeira e Segunda Ordem apresentaram ajuste nas simulações semelhante aos obtidos com a função Cossenoidal, considerada padrão. Portanto, dada a inexistência de dados físicos de solo para o ajustamento das melhores funções, o emprego de um método considerado padrão para a comparação e determinação do melhor método de estimativa é essencial para cada região de estudo, justificando a realização de trabalhos dessa natureza.

No presente trabalho se objetivou avaliar o desempenho de cinco funções utilizadas para estimar o armazenamento de água no solo, considerando diferentes níveis de capacidade de água disponível no solo, em um balanço hídrico diário nas localidades de Goiânia-GO e Ponta Grossa-PR, regiões em que o estudo das relações hídricas é importante para o planejamento agrícola.

Material E Métodos

O presente trabalho consistiu na simulação de uma série de balanços hídricos baseando-se na metodologia de

Thornthwaite & Mather (1955) modificada (Figura 1; Souza, 2008). As estimativas das componentes do balanço hídrico (evapotranspiração da cultura – ETC, evapotranspiração real – ER; água disponível – AD; armazenamento de água no solo – ARM; excedente hídrico – EXC; deficiência hídrica – DEF e irrigação – I) foram realizadas com o auxílio de rotinas computacionais e um programa desenvolvido especialmente para essa finalidade. Os dados utilizados foram: precipitação diária (P), evapotranspiração de referência diária (ETo), armazenamento inicial, coeficiente de cultivo (kc), capacidade de água disponível (CAD) e fração de água disponível (p), sendo esta última necessária para calcular a água disponível no solo (AD).

Os dados meteorológicos precipitação pluviométrica (mm), temperatura máxima, mínima e média do ar (°C), umidade relativa média (%), radiação solar incidente acumulada ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), insolação diária (h d^{-1}) e velocidade do vento a dois metros de altura (m s^{-1}) foram obtidos no período de janeiro de 2007 a dezembro de 2008, para as localidades de Ponta Grossa e Goiânia. Os dados de Ponta Grossa-PR foram provenientes da estação climatológica automática do campo demonstrativo e experimental da Fundação ABC, situada à latitude de $25^{\circ} 12' 59''$ S, longitude $50^{\circ} 00' 59''$ W e altitude de 885,59 m. Os dados de Goiânia-GO foram provenientes da estação evaporimétrica de Goiânia, localizada na Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Goiás, situada na latitude $16^{\circ} 41' \text{ S}$, longitude $49^{\circ} 16' \text{ W}$ e altitude de 741,48 metros. Segundo a classificação de Köppen (Peel et al., 2007) o clima de Ponta Grossa classifica-se como Cfb, subtropical úmido sem estação seca. O clima de Goiânia classifica-se como Aw, clima tropical com verões secos (Álvares et al., 2013).

A estimativa da ETo (mm d^{-1}) foi realizada com o método de Penman-Monteith, parametrizado pela Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO (Allen et al., 1998).

Os valores de ETC (Eq. 1) foram obtidos pela multiplicação dos respectivos valores de ETo e kc. Os valores de kc foram considerados iguais a unidade ($\text{kc} = 1$) ao longo de todo o ano, representando um cultivo hipotético de uma cultura em fase intermediária de crescimento, obtendo-se $\text{ETc} = \text{ETo}$ (Allen et al., 1998), possibilitando a eliminação das fontes de variação vindas de outras variáveis e a comparação das equações para estimativa de armazenamento de água no solo.

$$\text{ETc} = \text{ETo} \cdot \text{kc} \quad (1)$$

sendo: ETC – evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}); ETo – evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); kc – coeficiente de cultivo (adimensional).

A ER foi estimada a partir dos seguintes critérios (Eq. 2 e 3):

– Se $(P - \text{ETc}) \geq 0$ então

$$\text{ER} = \text{ETc} \quad (2)$$

– Se $(P - \text{ETc}) < 0$ então

$$\text{ER} = P - \text{ALT} \quad (3)$$

onde $\text{ALT} = \text{ARM}_i - \text{ARM}_{i-1}$

sendo: P – precipitação (mm dia^{-1}), ETC – evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}), ER – evapotranspiração real (mm dia^{-1}); ALT – alteração da umidade do solo (mm dia^{-1}); ARM_i – armazenamento água no solo no dia i (mm); ARM_{i-1} – armazenamento água no solo no dia $i-1$ (mm).

Baseando-se nos resultados apresentados por Souza & Gomes (2007) e Scopel et al. (2013), foram considerados valores de CAD de 20, 50, 80, 110, 140, 170, 200, 230, 260, 290 e 320 mm. O valor de água disponível (AD) resultou do produto da CAD pela fração p (Eq. 4). Nas análises considerou-se a fração p igual a 0,5 ao longo de todo o ano (Souza & Gomes, 2007), representando um cultivo hipotético de uma

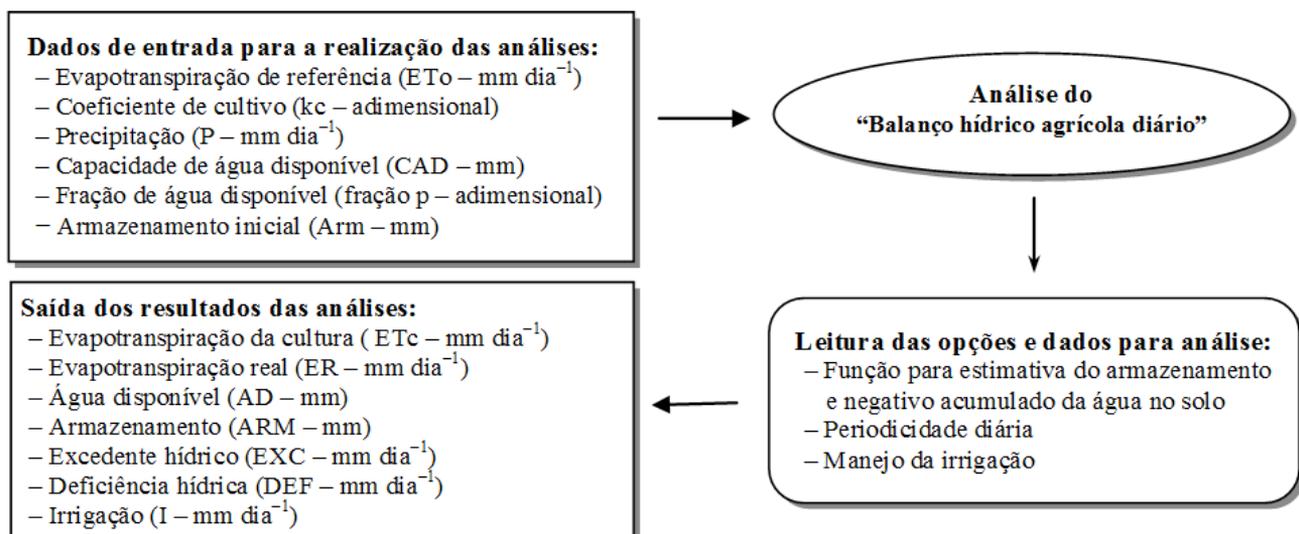


Figura 1. Fluxograma contendo a estrutura lógica para a estimativa do Balanço Hídrico Agrícola de periodicidade diária, segundo metodologia de Thornthwaite & Mather (1955) modificada (Souza, 2008).

cultura perene, possuindo 50 cm de profundidade efetiva do sistema radicular, e resultando em valores de AD de 10, 25, 40, 55, 70, 85, 100, 115, 130, 145 e 160 mm nas simulações.

$$AD = CAD \cdot p \quad (4)$$

sendo: AD – água disponível no solo para a cultura (mm); CAD – capacidade de água disponível no solo (mm); p – fração água disponível no solo para uma determinada cultura (adimensional).

Os balanços hídricos foram realizados para o ano de 2008, sendo o valor inicial do armazenamento da água no solo (ARM) considerado igual ao valor do ARM do dia 31/12/2007, após o cálculo do balanço hídrico do período de 01/01/2007 à 31/12/2007, com as mesmas opções do ano de 2008, considerando o valor inicial de armazenamento para o dia 01/01/2007 igual à CAD, a qual variou de 20 mm a 320 mm para a duas localidades analisadas.

A estimativa do ARM e/ou negativo acumulado (L) para o cálculo do balanço hídrico foi realizada com as funções de Thornthwaite & Mather (1955) (Eq. 5), Braga (1982) (Eq. 6), Potencial de Primeira Ordem Rijtema & Aboukhaled (1975) (Eq. 7) Potencial de Segunda Ordem (Eq. 8 e 9) e cossenoidal (Eq. 10).

$$ARM = CAD \cdot e^{\left(-\frac{L}{CAD}\right)} \quad (5)$$

Na zona úmida, condição na qual o armazenamento é superior a $CAD \cdot (1 - p)$, que conceitualmente não constitui restrição hídrica para a cultura, as estimativas do armazenamento (ARM) e negativo acumulado (L) foram obtidas com as equações: $ARM = CAD - L$, para $0 \leq L < AD$. Para a zona seca, ou seja, quando o armazenamento de água no solo é menor que $CAD \cdot (1 - p)$, considerou-se as funções:

$$ARM = CAD \cdot (1 - p) \cdot e^{\left(p \cdot \frac{L}{CAD}\right)} \quad (6)$$

$$ARM = CAD \cdot (1 - p) \cdot e^{\left[\left(\frac{p \cdot L}{CAD}\right) \cdot \left(\frac{1}{(1-p)}\right)\right]} \quad (7)$$

$$ARM = \frac{2 \cdot (1 - p) \cdot CAD \cdot e^Y}{(1 + e^Y)} \quad (8)$$

$$Y = \left(\frac{|L|}{CAD} - p\right) \cdot \left(\frac{-2}{1 - p}\right) \quad (9)$$

$$ARM = (1 - p) \cdot CAD \cdot \left\{1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left[\frac{\pi \left(\frac{|L|}{CAD} - p\right)}{2 \left(\frac{1}{(1-p)}\right) \cdot CAD} \right] \right\} \quad (10)$$

sendo: L – negativo acumulado (mm); ARM – armazenamento de água no solo (mm); CAD – capacidade de água disponível no solo (mm); p – fração de água disponível no solo.

A função Cossenoidal foi considerada padrão para comparação com as outras funções, conforme indicação de Dourado Neto & Jong Van Lier (1993). Nas simulações onde foram consideradas as irrigações complementares, as irrigações ocorreram toda vez que o valor de ARM foi inferior à $CAD \cdot (1 - p)$. A lâmina de irrigação foi calculada conforme Eq. 11:

$$I = CAD - ARM \quad (11)$$

sendo: I – irrigação (mm); CAD – capacidade de água disponível no solo (mm); ARM – armazenamento de água no solo no dia em que foi observada a necessidade de irrigação (mm).

A DEF e o EXC foram calculados a partir das equações 12 e 13. O EXC foi calculado apenas quando $(P - ETc) > 0$ e $ARM = CAD$.

$$DEF = ETc - ER \quad (12)$$

$$EXC = (P - ETc) - ALT \quad (13)$$

sendo: DEF – deficiência hídrica ($mm \text{ dia}^{-1}$); EXC – excedente hídrico ($mm \text{ dia}^{-1}$); P – precipitação ($mm \text{ dia}^{-1}$), ETc – evapotranspiração da cultura ($mm \text{ dia}^{-1}$), ER – evapotranspiração real ($mm \text{ dia}^{-1}$); ALT – alteração da umidade do solo ($mm \text{ dia}^{-1}$).

Os resultados das componentes do balanço hídrico (evapotranspiração real – ER, deficiência hídrica – DEF, excedente hídrico – EXC e irrigação – I), realizado para Goiânia-GO e Ponta Grossa-PR foram contrastados estatisticamente por meio de análises de regressão linear, seu respectivo coeficiente de correlação (r) e índices “d” de concordância de Willmott et al. (1985). Adotou-se também o índice “c” de Camargo & Sentelhas (1997), que considera: “c” > 0,85 – ótimo, $0,76 \leq “c” \leq 0,85$ – muito bom, $0,66 \leq “c” \leq 0,75$ – bom, $0,61 \leq “c” \leq 0,65$ – mediano, $0,51 \leq “c” \leq 0,60$ – sofrível, $0,41 \leq “c” \leq 0,50$ – mau e “c” ≤ 0,40 – péssimo.

Resultados e Discussão

As simulações desconsiderando ou considerando a realização de irrigações complementares evidenciaram consistência nos resultados obtidos com a função Cossenoidal (Tabela 1).

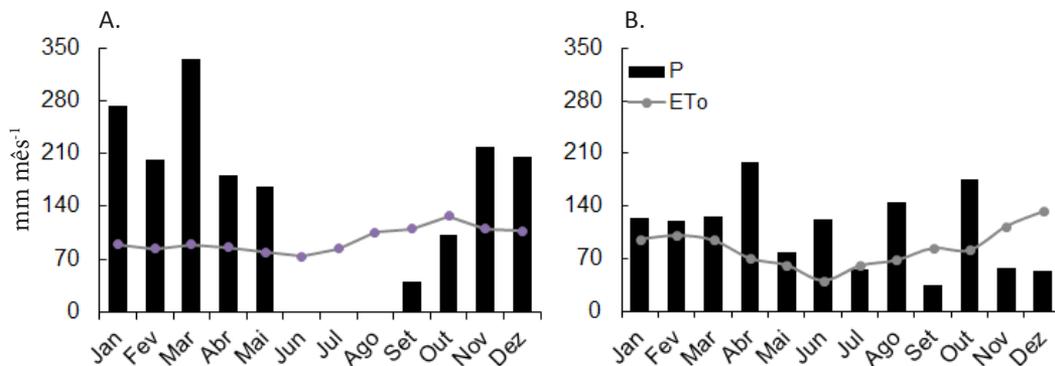
Observou-se que Goiânia e Ponta Grossa tiveram precipitação anual 51,1% e 28,3%, respectivamente, superior a ETc anual ($k_c = 1$). Embora tenha chovido mais em Goiânia, os valores de DEF obtidos nas simulações com AD variando de 10 mm a 160 mm evidenciaram que as precipitações em Goiânia foram mais concentradas ao longo do ano (Figura 2a).

O município de Ponta Grossa apresentou situação menos limitante (Figura 2b). Os valores de ER e DEF, obtidos com a variação dos valores de AD nas simulações, evidenciaram que os períodos de seca ao longo do ano podem limitar decisivamente o cultivo de culturas agrícolas, mesmo para

Tabela 1. Componentes do balanço hídrico diário, para Goiânia-GO e Ponta Grossa-PR, no ano de 2008, utilizando a função Cossenoidal para estimar o armazenamento de água no solo, sendo $k_c = 1$ e $AD = 10$ a 160 mm.

AD (mm)	ETc (mm ano ⁻¹)	P (mm)	Sem irrigação				Com irrigação				F.I **	
			ARM* (mm)	ER (mm ano ⁻¹)	DEF (mm ano ⁻¹)	EXC (mm ano ⁻¹)	ARM* (mm)	ER (mm ano ⁻¹)	DEF (mm ano ⁻¹)	EXC (mm ano ⁻¹)		I
Goiânia – GO												
10	1143,0	1727,1	20,0	647,3	495,7	1069,5	20,0	1137,7	5,3	1263,6	678,5	59
25	1143,0	1727,1	50,0	752,5	390,5	963,5	50,0	1142,6	0,4	1132,5	559,1	21
40	1143,0	1727,1	80,0	773,5	369,5	942,5	80,0	1142,9	0,1	1034,6	461,6	11
55	1143,0	1727,1	110,0	794,6	348,4	921,4	110,0	1143,0	0,0	1024,8	451,8	8
70	1143,0	1727,1	140,0	815,9	327,1	900,1	140,0	1143,0	0,0	930,1	357,1	5
85	1143,0	1727,1	170,0	837,5	305,5	878,5	170,0	1143,0	0,0	923,9	350,9	4
100	1143,0	1727,1	200,0	859,4	283,7	856,6	200,0	1143,0	0,0	981,7	408,7	4
115	1143,0	1727,1	230,0	881,4	261,6	826,3	230,0	1143,0	0,0	923,9	350,9	3
130	1143,0	1727,1	260,0	903,6	239,4	781,7	260,0	1143,0	0,0	968,0	395,0	3
145	1143,0	1727,1	290,0	925,7	217,3	737,1	290,0	1143,0	0,0	864,8	291,8	2
160	1143,0	1727,1	320,0	947,5	195,5	714,2	320,0	1143,0	0,0	895,0	322,0	2
Ponta Grossa – PR												
10	1004,8	1289,2	11,4	620,1	384,7	671,5	16,3	999,9	4,9	896,1	603,1	52
25	1004,8	1289,2	15,7	800,8	204,0	513,5	46,3	1004,4	0,4	737,1	457,8	17
40	1004,8	1289,2	21,3	887,0	117,8	451,7	67,5	1004,7	0,1	746,5	458,8	11
55	1004,8	1289,2	28,0	930,8	74,0	431,1	106,3	1004,8	0,0	506,1	227,2	4
70	1004,8	1289,2	37,2	963,6	41,2	419,2	136,3	1004,8	0,0	494,9	216,0	3
85	1004,8	1289,2	50,1	983,8	21,0	416,1	119,0	1004,8	0,0	500,9	174,6	2
100	1004,8	1289,2	68,3	995,6	9,2	416,1	152,3	1004,8	0,0	423,9	101,0	1
115	1004,8	1289,2	92,0	1001,9	2,9	416,1	182,3	1004,8	0,0	439,3	116,4	1
130	1004,8	1289,2	119,6	1004,3	0,5	290,3	252,1	1004,8	0,0	372,6	133,0	1
145	1004,8	1289,2	149,1	1004,7	0,1	269,6	286,3	1004,8	0,0	382,1	146,7	1
160	1004,8	1289,2	179,1	1004,4	0,4	249,2	179,1	1004,8	0,0	372,6	0,0	0

*ARM – armazenamento da água no solo no dia 31 de dezembro de 2008; **F.I – Frequência de irrigação (irrigações ano⁻¹).

**Figura 2.** Precipitação e evapotranspiração de referência para o período mensal para (a) Goiânia-GO e (b) Ponta Grossa-PR, no ano de 2008.

uma situação com $AD = 160$ mm ($DEF = 195,5$ mm ano⁻¹), especialmente para culturas mais exigentes em água, como as de ciclo curto.

A combinação de solos/culturas obtida com diferentes valores de CAD e fração p , promovendo $AD = 70$ mm, possibilitou a obtenção de DEF menor que $41,2$ mm ano⁻¹ em Ponta Grossa. O cultivo de culturas de alta exigência hídrica, como olerícolas (Allen et al., 1998), pode apresentar sérias limitações na região de Goiânia, para condição sem irrigação, visto que a DEF variou entre $195,5$ mm ano⁻¹ e $495,7$ mm ano⁻¹ para a condição de AD caindo de 160 mm para 10 mm.

Considerando a realização de irrigações complementares nas duas localidades, mesmo para uma condição de baixíssimo valor de AD (10 mm), verificou-se, com a função

Cossenoidal que Goiânia apresentou valor de DEF de $5,3$ mm ano⁻¹ e Ponta Grossa ficou com $4,9$ mm ano⁻¹ (Tabela 1). Com a mesma função, Souza & Gomes (2007) obtiveram resultados inconsistentes quando trabalharam com um solo arenoso ($AD = 12,5$ mm) na região de Ponta Grossa, em simulações com um balanço hídrico de periodicidade decenal. Combinando os resultados do presente trabalho aos obtidos na literatura, observou-se que o desempenho da função Cossenoidal para estimar o armazenamento de água no solo está condicionado ao tipo de solo analisado. Nesse sentido, dada a menor capacidade de retenção de água e alto negativo acumulado em solos arenosos, a identificação de diferenças entre as funções de estimativa do armazenamento de água é dificultada. Devido aos baixos valores de DEF, quando houve irrigação

complementar, os valores de ER ficaram muito próximos ou iguais a ETC verificada, respectivamente, nas duas regiões. Valores de AD = 160 mm tornam a irrigação desnecessária em Ponta Grossa.

Utilizando a função Cossenoidal como padrão (Tabela 2), observou-se para a condição sem irrigação complementar, com exceção da função Exponencial de Thornthwaite & Mather (1955) para Ponta Grossa, que todas as funções obtiveram desempenho “ótimo” na estimativa das componentes do balanço hídrico (ER, DEF e EXC) para Goiânia e Ponta Grossa.

A função Exponencial apresentou desempenho “muito bom” nas estimativas da ER, DEF e EXC em Ponta Grossa. O motivo do desempenho mais baixo deveu-se a ausência do conceito da fração p na função, que não permitiu estimar as componentes ER, DEF e EXC, devido à alternância dos períodos secos e úmidos que ocorrem na região de Ponta Grossa (Figura 2b). Os resultados encontrados concordam com os obtidos por Souza & Gomes (2007) para Ponta Grossa, em análises semelhantes para solo argiloso (AD = 32,5 mm) e arenoso (AD = 12,5 mm), com balanço hídrico de periodicidade decendial. Comparativamente às demais funções avaliadas, as análises do presente trabalho permitiram verificar que o uso da função Exponencial foi inferior para a condição de simulação com irrigação na localidade de Ponta Grossa.

Considerando a ocorrência ou não da irrigação, verificou-se que a função Potencial de Primeira Ordem (Rijtema & Aboukhaled, 1975) foi a única que apresentou desempenho “ótimo” na estimativa das componentes do balanço hídrico (ER, DEF e EXC) para Goiânia e Ponta Grossa. A função Potencial de Segunda Ordem apresentou resultado semelhante à de Primeira Ordem, porém com

desempenho “muito bom” para a estimativa da ER e DEF, quanto está realizando irrigações complementares (Tabela 2). Os resultados obtidos concordam com os encontrados por Souza & Gomes (2007), em um solo de textura argilosa possuindo AD = 32,5 mm. Os mesmos autores não obtiveram resultados conclusivos sobre o desempenho das funções para o solo arenoso (AD = 12,5 mm) com o balanço hídrico decendial. No presente trabalho evidenciou-se, tanto para Goiânia como Ponta Grossa, que as funções Cossenoidal e Potencial de Primeira Ordem (Rijtema & Aboukhaled, 1975) apresentam estimativas muito parecidas, até para uma condição de AD = 10 mm.

Considerando a ocorrência de irrigação complementar, as equações Exponencial de Thornthwaite & Mather (1955) e Braga (1982) obtiveram os piores desempenhos, sendo “péssimo” para estimativa da ER e DEF em Goiânia e Ponta Grossa (Tabela 2).

Apesar de algumas funções terem apresentado bom desempenho na estimativa do armazenamento, observou-se a ocorrência de inconsistências em suas estimativas, as quais estão associadas ao fato das funções basearem-se na quantificação do negativo acumulado para a obtenção do armazenamento de água no solo. Nesse sentido, a estimativa do armazenamento é limitada sob condições de alto negativo acumulado (Souza & Gomes, 2007). Além disso, as funções estudadas consideram apenas o efeito da profundidade efetiva do sistema radicular sobre o intervalo de disponibilidade hídrica às plantas (Zhang et al., 2009). Quando tais funções são utilizadas sob condições de baixa retenção de água no solo e com culturas com sistema radicular pouco profundo resultam em estimativas incoerentes.

Os resultados obtidos no presente trabalho indicam a necessidade do aprimoramento das funções de estimativa

Tabela 2. Correlação (r), índice “d” de Willmott et al. (1985) e índice de desempenho de Camargo & Sentelhas (1997), obtidos nas análises contrastando as componentes do balanço hídrico (ER, DEF, EXC), simulados para AD variando entre 10 mm e 160 mm (intervalos de 15 mm), sem e com irrigação complementar, utilizando cinco funções de estimativa do armazenamento de água no solo para Goiânia-GO e Ponta Grossa-PR, no ano de 2008.

Funções	Goiânia – GO								Ponta Grossa – PR							
	Sem irrigação				Com irrigação				Sem irrigação				Com irrigação			
	R	"d"	"c"*	O	r	"d"	"c"*	P	r	"d"	"c"*	O	r	"d"	"c"*	P
Evapotranspiração Real (ER)																
Cossenoidal vs Exponencial	0,99	0,88	0,88	O	0,74	0,01	0,01	P	1	0,78	0,78	MB	0,68	0,02	0,01	P
Cossenoidal vs Potencial 1 ^a	1	1	1	O	1	0,86	0,86	O	1	1	1	O	1	0,85	0,85	O
Cossenoidal vs Potencial 2 ^a	1	0,99	0,99	O	1	0,85	0,85	MB	1	1	1	O	1	0,85	0,85	MB
Cossenoidal vs Braga (1982)	0,99	0,95	0,95	O	0,96	0,27	0,26	P	0,99	0,98	0,98	O	0,95	0,27	0,26	P
Deficiência hídrica (DEF)																
Cossenoidal vs Exponencial	0,99	0,88	0,88	O	0,74	0,01	0,01	P	1	0,78	0,78	MB	0,68	0,02	0,01	P
Cossenoidal vs Potencial 1 ^a	1	1	1	O	1	0,86	0,86	O	1	1	1	O	1	0,85	0,85	O
Cossenoidal vs Potencial 2 ^a	1	0,99	0,99	O	1	0,85	0,85	MB	1	1	1	O	1	0,85	0,85	MB
Cossenoidal vs Braga (1982)	0,99	0,95	0,95	O	0,96	0,27	0,26	P	0,99	0,98	0,98	O	0,95	0,27	0,26	P
Excedente hídrico (EXC)																
Cossenoidal vs Exponencial	1	0,92	0,92	O	0,89	0,92	0,81	MB	0,94	0,9	0,84	MB	0,93	0,95	0,89	O
Cossenoidal vs Potencial 1 ^a	1	1	0,99	O	1	1	1	O	0,95	0,96	0,91	O	1	1	1	O
Cossenoidal vs Potencial 2 ^a	1	1	0,99	O	1	1	1	O	0,95	0,96	0,91	O	1	1	1	O
Cossenoidal vs Braga (1982)	1	0,97	0,97	O	1	1	1	O	0,93	0,96	0,90	O	1	1	1	O

*"c" > 0,85 – ótimo (O); 0,76 ≤ "c" ≤ 0,85 – muito bom (MB); 0,66 ≤ "c" ≤ 0,75 – bom (B); 0,61 ≤ "c" ≤ 0,65 – mediano (MD); 0,51 ≤ "c" ≤ 0,60 – sofrível (S); 0,41 ≤ "c" ≤ 0,50 – mau (M); e, "c" ≤ 0,40 – péssimo (P).

do armazenamento de água no solo a partir da substituição da função “negativo acumulado” por parâmetros que verdadeiramente representem a dinâmica de disponibilidade de água no solo às plantas. Portanto, a utilização dos parâmetros relacionados à curva de retenção de água no solo é promissora, pois são capazes de representar a variação do armazenamento de água disponível para as plantas, pelo estabelecimento de um nível de umidade crítica no solo, a partir do qual a planta efetivamente absorve água sem prejuízos para o seu desenvolvimento (Feddes et al., 1978; Novak & Havrila, 2006).

Em relação aos resultados apresentados na literatura, o presente estudo avançou nos seguintes pontos quanto à avaliação do desempenho das funções: (i) Goiânia e Ponta Grossa possuem características climáticas bem distintas e a aferição do desempenho das funções nas duas condições permitiu a obtenção de um intervalo maior de resultados e possibilidades; (ii) a utilização do balanço hídrico diário permitiu a obtenção de resultados sobre o desempenho das funções que não foram suficientemente conclusivos no trabalho de Souza & Gomes (2007), principalmente para os valores de água disponível do solo arenoso (AD = 12,5 mm). Com exceção da função Exponencial, as frequências de irrigação complementar com as demais funções testadas foram iguais (Tabela 3).

Verificou-se que Goiânia apresentou frequência de irrigação complementar variando de 2 (AD = 160 mm) a 59

(AD = 10 mm) irrigações ano⁻¹, e Ponta Grossa frequência variando entre zero (AD = 160 mm) a 52 (AD = 10 mm) irrigações ano⁻¹. Desta forma, a função Exponencial também não se mostrou adequada para simular o número de irrigações necessárias em determinado período. Para a condição mais restritiva de armazenamento de água no solo (AD = 10 mm) verificou-se a contabilização, a menos, de 18 irrigações ano⁻¹ para Goiânia e 17 irrigações ano⁻¹ para Ponta Grossa (Tabelas 2 e 3).

Os resultados de frequência de irrigação complementar concordam com os obtidos por Souza & Gomes (2007). No entanto, o modelo de balanço hídrico utilizado pelos autores (simulação seguindo a metodologia de Monte Carlo), não permitiu a obtenção de um único valor, mas sim, um intervalo de variação das frequências de irrigação complementar para Ponta Grossa, ficando entre 10 e 20 irrigações ano⁻¹, para o solo argiloso (AD = 32,5 mm), e de 20 a 31 irrigações ano⁻¹, para o solo arenoso (AD = 12,5 mm). Os valores encontrados diferem bastante dos obtidos no presente trabalho (Tabela 3) para AD = 10 mm (52 irrigações ano⁻¹) e 32,5 mm (14 irrigações ano⁻¹ – obtido por interpolação). No entanto, é importante observar que o modelo de balanço hídrico utilizado no presente trabalho é de periodicidade diária, enquanto o utilizado por Souza & Gomes (2007) foi decendial.

Os totais de irrigação complementar aplicada ao longo do ano em Goiânia e Ponta Grossa foram similares,

Tabela 3. Irrigação (I: mm ano⁻¹), frequência de irrigação (F.I: irrigações ano⁻¹) e armazenamento da água no solo (ARM: mm), obtidos nas análises de balanço hídrico utilizando cinco funções de estimativa do armazenamento de água no solo, para as cidades de Goiânia-GO e Ponta Grossa-PR, no ano de 2008, com valores de AD variando entre 10 mm e 160 mm.

AD (mm)	Funções de estimativa do armazenamento da água no solo														
	Exponencial			Cossenoidal			Potencial 1ª ordem			Potencial 2ª ordem			Braga (1982)		
	I	F.I	ARM*	I	F.I	ARM*	I	F.I	ARM*	I	F.I	ARM*	I	F.I	ARM*
Goiânia – GO															
10	439,7	41	20,0	678,5	59	20,0	672,9	59	20,0	681,4	59	20,0	634,0	59	20,0
25	335,5	13	50,0	559,1	21	50,0	557,7	21	50,0	559,3	21	50,0	541,7	21	50,0
40	327,6	8	80,0	461,6	11	80,0	460,9	11	80,0	461,6	11	80,0	450,6	11	80,0
55	278,0	5	110,0	451,8	8	110,0	451,6	8	110,0	451,8	8	110,0	445,8	8	110,0
70	283,1	4	140,0	357,1	5	140,0	356,9	5	140,0	357,1	5	140,0	353,5	5	140,0
85	256,8	3	170,0	350,9	4	170,0	350,7	4	170,0	350,9	4	170,0	345,4	4	170,0
100	201,9	2	200,0	408,7	4	200,0	408,6	4	200,0	408,7	4	200,0	404,3	4	200,0
115	231,6	2	230,0	350,9	3	230,0	350,8	3	230,0	350,9	3	230,0	347,9	3	230,0
130	262,3	2	260,0	395,0	3	260,0	395,0	3	260,0	395,0	3	260,0	392,5	3	260,0
145	291,3	2	290,0	291,8	2	290,0	291,8	2	290,0	291,8	2	290,0	290,9	2	290,0
160	160,8	1	320,0	322,0	2	320,0	322,0	2	320,0	322,0	2	320,0	321,0	2	320,0
Ponta Grossa – PR															
10	376,5	35	16,6	603,1	52	16,3	597,9	52	16,3	605,8	52	16,3	561,3	52	16,3
25	282,6	11	42,4	457,8	17	46,3	456,4	17	46,3	458,1	17	46,3	441,1	17	46,3
40	120,8	3	74,2	458,8	11	67,5	458,3	11	67,5	458,8	11	67,5	449,2	11	67,5
55	110,5	2	73,9	227,2	4	106,3	227,0	4	106,3	227,2	4	106,3	223,5	4	106,3
70	70,7	1	103,8	216,0	3	136,3	215,9	3	136,3	216,0	3	136,3	213,0	3	136,3
85	85,9	1	166,4	174,6	2	119,0	174,5	2	119,0	174,6	2	119,0	172,3	2	119,0
100	0,0	0	115,1	101,0	1	152,3	101,0	1	152,3	101,0	1	152,3	100,5	1	152,3
115	0,0	0	139,8	116,4	1	182,3	116,4	1	182,3	116,4	1	182,3	115,7	1	182,3
130	0,0	0	165,4	133,0	1	252,1	133,0	1	252,1	133,0	1	252,1	131,5	1	252,1
145	0,0	0	191,7	146,7	1	286,3	146,7	1	286,3	146,7	1	286,3	145,8	1	286,3
160	0,0	0	218,6	0,0	0	179,1	0,0	0	179,1	0,0	0	179,1	0,0	0	179,1

*ARM – armazenamento da água no solo no dia 31 de dezembro de 2008.

considerando-se as simulações de balanço hídrico com as funções Cossenoidal e Potenciais de Primeira e Segunda Ordem. Em relação à função Cossenoidal, para AD = 10 mm, o maior desvio total verificado para a função Potencial de Primeira Ordem, em Goiânia e Ponta Grossa, foi de $-5,6 \text{ mm ano}^{-1}$ e $-5,2 \text{ mm ano}^{-1}$. Para a mesma condição, a função Potencial de Segunda Ordem apresentou desvio de apenas $2,9 \text{ mm ano}^{-1}$, para Goiânia, e $2,7 \text{ mm ano}^{-1}$, para Ponta Grossa. A função de Braga (1982) sempre subestimou a quantidade de irrigação complementar, apresentando desvios médios de $-10,9 \text{ mm ano}^{-1}$ e $-8,9 \text{ mm ano}^{-1}$ para os valores de AD testados, em Goiânia e Ponta Grossa, respectivamente. Desta forma, mesmo empregando o conceito da fração p, a função de Braga (1982) mostrou-se limitada para estimar os valores de irrigação complementar. Em contrapartida, os desvios médios nos valores de irrigação obtidos com a função Exponencial, em relação à função Cossenoidal, para os valores de AD testados (Tabela 3) foram altos: $-155,2 \text{ mm ano}^{-1}$ para Goiânia; e, $-160,1 \text{ mm ano}^{-1}$ para Ponta Grossa. Nesse sentido, recomenda-se não utilizar a função Exponencial para estimar a irrigação nas regiões de Goiânia e Ponta Grossa. Silva et al. (2005) relatam que a utilização de irrigação complementar pode introduzir grande variabilidade dos cálculos do balanço hídrico, aumentando a probabilidade da ocorrência de erros nos resultados finais.

Conclusões

As funções Potenciais de Primeira e Segunda Ordem apresentaram resultados similares aos apresentados pela função Cossenoidal, considerando ou não irrigações complementares ao longo do ano para as regiões estudadas.

A função Exponencial não foi adequada para a estimativa do armazenamento de água no solo.

A função de Braga não foi adequada para análises considerando a realização de irrigações complementares.

Recomenda-se o aprimoramento das funções de estimativa do armazenamento de água a partir da substituição do “negativo acumulado” por variáveis capazes de representar a variação do armazenamento de água disponível para as plantas.

Literatura Citada

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper 56, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300p. <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>. 03 Mar. 2017.
- Álvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.J.; Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. “Koppen’s climate classification map for Brazil”. Meteorologische Zeitschrift, v.22, n.6, p.711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Andrade Júnior, A.S.; Silva, F.A.M.; Ribeiro, J.L.; Lima, M.G.; Amaral, J.A.B. Zoneamento de risco climático para a cultura do algodão no Estado do Piauí. Embrapa, Teresina, Brasil, 2006. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Araujo, M.A.; Souza, J.L.M.; Brondani, G.E.; Pauletti, V. Sistemas de manejo e relações hídricas do solo na produtividade da cultura da soja, em Ponta Grossa - Paraná. Scientia Agraria, v.10, n.1, p.403-412, 2009. <https://doi.org/10.5380/rsa.v10i5.15199>.
- Braga, H. J. Caracterização da seca agrônômica através de novo modelo de balanço hídrico, na região de Laguna, litoral sul do Estado de Santa Catarina. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1982. 157p. Dissertação Mestrado.
- Bruno, I.P.; Silva, A.L.; Reichardt, K.; Dourado-Neto, D.; Bacchi, O.O.S.; Volpe, C.A. Comparison between climatological and field water balances for a coffee crop. Scientia Agricola, v.64, n. 3, p.215-220, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000300001>.
- Camargo, A.P.; Sentelhas, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.5, n. 1, p.89-97, 1997. https://www.researchgate.net/profile/Paulo_Sentelhas/publication/284194031. 22 Fev. 2017.
- Campos, I.; Balbontín, C.; González-Piqueras, J.; González-Dugo, M.P.; Neale, C.M.U.; Calera, A. Combining a water balance model with evapotranspiration measurements to estimate total available soil water in irrigated and rainfed vineyards. Agricultural Water Management, v.165, p.141-152, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.11.018>.
- Dourado Neto, D.; Jong Van Lier, Q. Estimativa do armazenamento de água no solo para realização de balanço hídrico. Revista Brasileira Ciência do Solo, v.17, n. 1, p.9-15, 1993.
- Dourado-Neto, D.; Jong Van Lier, Q.; Metselaar, K.; Reichardt, K.; Nielsen, D.R. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by Thornthwaite and Mather method. Scientia Agricola, v.67, n. 1, p.87-95, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000100013>.
- Feddes, R.A.; Kowalik, P.J.; Zaradny, H. Water uptake by plant roots. In.: Feddes, R.A.; Kowalik, P.J.; Zaradny, H. (Eds.). Simulation of field water use and crop yield. New York: John Wiley and Sons, 1978. p.16–30.
- Frizzone, J. A.; Andrade Júnior, A. S.; Souza, J. L. M.; Zocoler, J. L. Planejamento de irrigação: análise e decisão de investimento. Brasília: Embrapa, 2005. 627p.
- Leivas, J.F.; Berlato, M.A.; Fontana, D.C. Risco de deficiência hídrica decedial na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n. 2, p. 397-407, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000200022>.
- Novak, V.; Havrila, J. Method to estimate the critical soil water content of limited availability for plants. Biologia, v.61, supplement 19, p.289-293, 2006. <https://doi.org/10.2478/s11756-006-0175-9>.
- Peel, M.C.; Finlayson, B.L.; McMahon, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology Earth Systems Science, v.11, n.1, p.1633-1644, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.

- Pereira, A.R.; Vila Nova, N.A.; Sedyama, G.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: ESALQ, 1997. 183p.
- Pereira, L.M.P.; Caramori, P.H.; Ricce, W.S.; Caviglione, J.H. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática em Londrina. *Semina*, v.29, n.2, p.299–306, 2008. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2008v29n2p299>.
- Rijtema, P. E.; Aboukhaled, A. Crop water use. In: Aboukhaled, A. (Org.). Research on crop water use, salt affected soils and drainage in the Arab Republic of Egypt. Rome: FAO Regional Office for the Near East, 1975. p.5-61.
- Scopel, I.; Sousa, M.S.; Martins, A.P. Infiltração de água e potencial de uso de solos muito arenosos nos Cerrados (Savanas) do Brasil. *Boletim Goiano de Geografia*, v.33, n. 2, p.45-61, 2013. <https://doi.org/10.5216/bgg.v33i2.25556>.
- Silva, M. A. S.; Mafra, A. L.; Albuquerque, J. A.; Bayer, C. & Mielniczuk, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. *Ciência Rural*, v.35, n.3, p.544-552, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000300009>.
- Simunek, J.; van Genuchten, M.T.; Sejna, M. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Technical Manual, Version 2.0. Prague PC Progress, 2011. 258p. http://www.pc-progress.com/en/..%5Cdownloads%5CPgm_Hydrus3D2%5CHYDRUS3D%20Technical%20Manual.pdf. 12 Jan. 2017.
- Souza Filho, J.L.M.; Gomes, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.30, n.2, p.153-163, 2008. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v30i2.1721>.
- Souza, J. L. M. Programa MORETTI – Módulo: Balanço hídrico sequencial (periodicidade: 1, 5, 7, 10, 15 e 30 dias). Versão 1.0. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2008 (Programa computacional).
- Souza, J. L. M.; Gomes, S. Avaliação e desempenho de equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.29, n.4, p.433-443, 2007. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v29i4.383>.
- Souza, J.L.M.; Fezer, K.F.; Gurski, B.C.; Jerszurki, D.; Pachechenik, P.E. Soil water balance in diferente densities of Pinus taeda in Southern Brazil. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.38, n. 2, p.265–271, 2016. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v38i2.26607>.
- Souza, J.L.M.; Frizzone, J.A. Modelo aplicado ao planejamento da cafeicultura irrigada: I. Simulação do balanço hídrico e do custo da água. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.25, n.2, p.103-112, 2003. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v25i2.2049>.
- Souza, M.J.H.; A. Ribeiro, H.G. Leite; F.P. Leite, R.B. Minuzzi. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da bacia do Rio Doce. *Revista Árvore*; v.30, n.3, p.399–410, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000300010>.
- Sparovek, G.; Jong Van Lier, Q.; Dourado-Neto, D. Computer assisted Köppen climate classification for Brazil. *International Journal of Climatology*, v.27, n.2, p.257-266, 2007. <https://doi.org/10.1002/joc.1384>.
- Thornthwaite, C. W.; Mather, J. R. The water balance. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p. (Drexel Institute of Technology. Publications in Climatology, v.8, n.1).
- Van Dam, J.C., P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks and J.G. Kroes, 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, v.7, n.2, p.1-10, 2008. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0060>.
- Willmott, C. J.; Rowe, C. M.; Mintz, Y. Climatology of terrestrial seasonal water cycle. *Journal of Climatology*, v.5, n.6, p.589-606, 1985. <https://doi.org/10.1002/joc.v5:6>.
- Zhang, X.; Chen, S.; Sun, H.; Wang, Y.; Shao, L. Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors. *Field Crops Research*, v.114, n. 1, p.75–83, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.07.006>.