



Acta Scientiarum. Agronomy

ISSN: 1679-9275

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá

Brasil

Moretti de Souza Filho, Jorge Luiz; Gomes, Siguifrid
Avaliação e desempenho de equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um
balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista
Acta Scientiarum. Agronomy, vol. 29, núm. 4, 2007, pp. 433-443
Universidade Estadual de Maringá
Maringá, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303026575001>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe , Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Avaliação e desempenho de equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um balanço hídrico climatológico decadal irrigacionista

Jorge Luiz Moretti de Souza Filho^{1*} e Siguifrid Gomes²

¹Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Rua dos Funcionários, 1540, 80035-050, Curitiba, Paraná, Brasil. ²Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: *Autor para correspondência.

RESUMO. O objetivo do presente trabalho é comparar a dinâmica do armazenamento de água em duas classes de textura do solo (arenoso e argiloso), na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná, utilizando um programa que permite a simulação do balanço hídrico climatológico decadal para fins de irrigação agrícola com cinco equações de estimativa do armazenamento de água no solo. Os melhores resultados foram obtidos para os valores de armazenamento simulados para o solo argiloso ($CAD = 65$ mm) com as equações Potenciais de Primeira e Segunda Ordem e Co-senoidal. As equações de Braga (1982) e de Thornthwaite e Mather (1955) não apresentaram bons resultados, considerando irrigações ao longo do ano. Os cinco modelos não apresentaram diferenças significativas para balanços hídricos simulados sem irrigação. A simulação dos balanços hídricos para o solo arenoso ($CAD = 25$ mm) resultou em valores inconsistentes.

Palavras-chave: balanço hídrico, irrigação, armazenamento, modelagem, simulação.

ABSTRACT. Evaluation and performance of soil water storage equations in a decadal climatic water balance for irrigation. The objective of this work was to compare the dynamic of soil water storage in two soil texture classes (sandy and clayey), in Ponta Grossa, state of Paraná , Brazil, using a program that allows the simulation of decadal climatic water balance for agricultural irrigation with five equations to estimate the soil water storage. The best results were obtained for the soil water storage values simulated for the clayey soil ($AWC = 65$ mm) with First and Second Order Potential and Co-senoidal equations. The equations of Braga (1982) and Thornthwaite and Mather (1955) did not present good results considering irrigations along the year. The five models did not present significant differences for water balance simulated without irrigation. The water balance simulation for sandy soil ($AWC = 25$ mm) resulted in inconsistent values.

key words: water balance, irrigation, storage, mathematical model, simulation.

Introdução

A quantidade de água necessária ao perfeito desenvolvimento das culturas é um parâmetro importante para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de um sistema de irrigação (Frizzone *et al.*, 2005). Neste sentido, a literatura tem mostrado que o balanço hídrico constitui-se em uma ferramenta interessante para estimar a lâmina de irrigação ideal, pois se baseia na dinâmica do armazenamento de água no solo e ainda pode ser realizado considerando apenas dados climáticos básicos, tais como a chuva e a temperatura do ar (Pereira *et al.*, 1997).

O armazenamento da água no solo pode ser determinado diretamente no campo, empregando-se os métodos tensiométrico, elétrico, dispersão de nêutrons,

secagem, entre outros (Bernardo, 1989), ou ainda pode ser estimado com o auxílio de modelos matemático-estatísticos (Dourado Neto e Jong Van Lier, 1993).

A medição da umidade do solo no campo tem a vantagem de refletir a realidade pontual, mas é trabalhosa e geralmente apresenta grande variabilidade, demandando maior número de amostras e o encarecimento da avaliação. Dessa forma, a estimativa do teor de umidade de um solo, no decorrer do tempo, por modelos matemático-estatísticos, pode ser considerada uma alternativa barata e eficiente, além de facilitar os cálculos e permitir a programação e a realização de simulações.

Dentre os modelos matemático-estatísticos existentes, o de Thornthwaite e Mather (1955) é um dos mais utilizados e citados na literatura para

monitoramento da água no solo. Segundo Pereira (2005), esse modelo foi proposto primeiramente por Mendonça (1958), a partir de uma simplificação, quando uma série de Tabelas de água retida em função do negativo acumulado, apresentadas por Thornthwaite e Mather (1957), para valores de capacidade de água disponível (*CAD*), variando entre 25 e 400 mm, puderam ser resumidas e substituídas por uma equação exponencial adimensional (Equação 4). Assim, no desenvolvimento do balanço hídrico com essa equação, as saídas e as entradas de água no solo ocorrem exponencialmente, e qualquer valor de umidade do solo abaixo da *CAD* constitui deficiência para as culturas (Souza e Frizzone, 2003). É importante observar que a desconsideração desse aspecto da equação Thornthwaite e Mather (1955) tem levado muitos autores a obterem valores de deficiência hídrica inconsistentes em seus trabalhos, quando realizam a simulação de balanços hídricos e irrigações de culturas agrícolas para um determinado intervalo de tempo.

Existem modelos matemático-estatísticos que consideram que uma fração da *CAD* fica prontamente disponível para as plantas absorverem sem prejuízo para o seu crescimento (Rijtema e Aboukhaled, 1975; Dourado Neto e Jong Van Lier, 1993). Essa porção é denominada água disponível (*AD*), e o seu valor é obtido multiplicando-se a *CAD* por um fator água disponível (*p*) que considera o tipo de cultura e seu estádio de desenvolvimento. Com esse conceito, Rijtema e Aboukhaled (1975) desenvolveram um modelo que considera que a perda de água no solo segue uma função linear para a zona úmida (Equação 5), ou seja, na região onde ocorre a porção *AD* (*CAD · p*), e exponencial para o restante da curva (Equação 6), ou seja, na zona seca $[(1-p) \cdot CAD]$.

O trabalho de Rijtema e Aboukhaled (1975) influenciou uma série de autores. Braga (1982), por exemplo, trabalhando com um balanço hídrico modificado destinado a caracterizar a seca agronômica na região de Laguna, Estado de Santa Catarina, também considerou e desenvolveu uma equação em que a perda de água ocorre linearmente na zona úmida e exponencialmente na zona seca (Equação 5 e 7). Esse modelo encontra-se citado e utilizado em uma série de trabalhos científicos.

Dourado Neto e Jong Van Lier (1993), visando a identificar os melhores modelos de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado e vice-versa, realizaram um estudo matemático de comparação de 11 modelos matemático-estatísticos. São eles: Braga (1982); Co-senoidal; Cúbico; Logarítmico; Potencial de primeira ordem (Rijtema

e Aboukhaled, 1975); Potencial de segunda ordem; Potencial de terceira ordem; Potencial de primeira ordem-senoidal; Potencial de segunda ordem-senoidal; Senoidal-logarítmico; Senoidal-quadrático e Thornthwaite e Mather (1955). Baseando-se em 14 condições formuladas a partir do conhecimento empírico do processo de evapotranspiração na camada explorada pelo sistema radicular, os autores recomendaram o modelo Co-senoidal para cálculos de balanço hídrico, pois concluíram que o método é matematicamente mais preciso na estimativa do armazenamento de água no solo (cumpriu as 14 condições).

Souza (2001) e Souza e Frizzone (2003) baseando-se nos resultados de simulação com um balanço hídrico irrigacionista decendial para a cultura do cafeeiro, utilizaram as equações Exponencial e Potencial de primeira ordem (Linear Exponencial) para fazer a estimativa do armazenamento de água no solo para duas regiões no Estado de Minas Gerais. Os autores verificaram para cinco variações de manejo de irrigação suplementar que a equação Exponencial de Thornthwaite e Mather (1955) sempre apresentou simulações de deficiências hídricas inconsistentes. Devido a essas constatações, Souza (2001) recomendou como considerações para aperfeiçoamento do módulo "Balanço hídrico irrigacionista decendial" do seu programa a necessidade de disponibilizar outras equações que permitam estudar e melhorar as estimativas do armazenamento em função do negativo acumulado e vice-versa. Essas considerações são interessantes, pois Dourado Neto e Jong Van Lier (1993) recomendaram o modelo Co-senoidal (Equação 5 e 9) baseando-se em condições matemáticas, porém, o teste de modelos matemático-estatísticos, dentro de um balanço hídrico simulado, pode contribuir na caracterização das qualidades, limitações e diferenças dos mesmos quanto à dinâmica do armazenamento da água no solo para diferentes condições de solo e manejo da irrigação ao longo do tempo.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho consistiu em comparar a dinâmica do armazenamento e da deficiência de água em dois tipos de solo (arenoso e argiloso), na região de Ponta Grossa, utilizando cinco equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um balanço hídrico climatológico decendial simulado, para fins de irrigação agrícola.

Material e métodos

O presente trabalho foi realizado a partir de uma série de simulações de balanços hídricos, realizadas com auxílio de um programa denominado "Moretti –

Módulo: Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista, Versão 2.0”, que foi extraído do modelo original realizado por Souza (2001) – Modelo para a análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para a cultura do cafeiro (*Moretti*). A nova versão do programa foi implementada com mais três equações de armazenamento de água no solo (Braga, 1982; Co-senoidal e Potencial de Segunda Ordem) e rotinas para a obtenção de parâmetros estatísticos das variáveis decenciais e anuais dos balanços hídricos simulados e da freqüência das irrigações.

O módulo “Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista” do *Moretti*, assim como qualquer outro programa que se destina à realização de balanços hídricos, necessita ser alimentado com uma série de dados e opções. A Figura 1 apresenta um fluxograma simplificado contendo a estrutura lógica de algumas partes do programa, sendo possível verificar: os dados de entrada para identificação do local e realização das análises; opções de realização do balanço hídrico; leitura das opções e dos dados para análise; lógica do processo de simulação; resultados que são obtidos na saída.

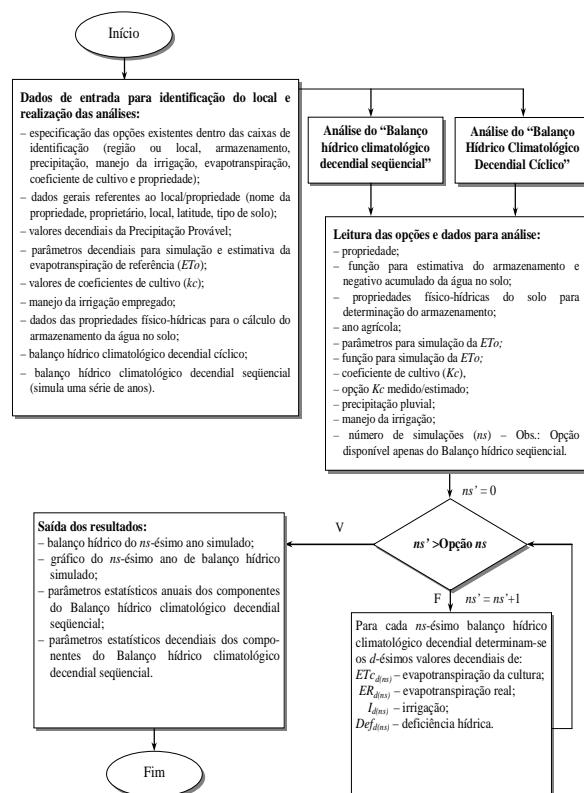


Figura 1. Fluxograma contendo a estrutura lógica de algumas partes do módulo “Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista” do *Moretti*.

Os parâmetros climáticos de entrada no modelo foram obtidos a partir de uma seqüência de 50 anos de dados climáticos diários de temperatura média do ar e da chuva, coletados na estação climatológica da região de Ponta Grossa, Estado do Paraná, apresentados na Tabela 1. Maiores detalhes sobre a metodologia para tratamento dos dados, cálculo da evapotranspiração de referência decendial, cálculo da chuva provável, obtenção dos parâmetros estatísticos e processo de simulação, podem ser verificados no trabalho de Gomes (2005), e complementados em Souza (2001) e Frizzone *et al.* (2005).

Sendo assim, as análises de simulação foram realizadas a partir da seguinte série de dados de entrada e dos seguintes procedimentos de cálculo disponíveis nas rotinas do modelo:

(a) Valores decenciais de chuva provável

Os valores decenciais de chuva utilizados como entrada no programa foram prováveis a 75% (Tabela 1), estimados em planilha eletrônica *Microsoft Excel* 2000, considerando-se os parâmetros estatísticos da distribuição de probabilidade que melhor se ajustou aos dados observados (Gomes, 2005). Os parâmetros estatísticos foram obtidos com auxílio do programa “*Moretti* – Módulo: Distribuição de freqüência e teste de aderência, Versão 2.0”, extraído do modelo *Moretti* original, realizado por Souza (2001). O programa realiza testes de aderência com as distribuições Gama, Normal, Exponencial, Triangular e Uniforme, empregando o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância.

(b) Parâmetros decenciais para simulação e estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀)

Os valores decenciais de evapotranspiração de referência (ET₀), utilizados na entrada do modelo (Tabela 1), foram simulados pelo método de Thornthwaite (1948), considerando a temperatura média decendial do ar. Empregou-se a distribuição de probabilidade normal para simular os valores de ET₀ da região de Ponta Grossa, Estado do Paraná, nos decêndios de cada ano de balanço hídrico simulado. Assumir que a ET₀ segue esta distribuição foi necessário porque o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista” não possibilita a escolha de diferentes distribuições de probabilidade para cada um dos decêndios ao longo do ano. Essa limitação não causa maiores problemas nas análises, conforme pode ser verificado em Gomes (2005), que constatou que a distribuição normal apresentou melhor ajuste em 26 decêndios ao longo do ano em Ponta Grossa. Nos 11 decêndios restantes, a distribuição normal também apresentou ajustamento estatístico, porém o ajuste da distribuição Gama foi melhor.

Tabela 1. Parâmetros estatísticos de entrada no balanço hídrico para a região de Ponta Grossa, Estado do Paraná: média e desvio padrão da ET_o estimada e chuva a 75% de probabilidade (Gomes, 2005).

Decêndios	ET_o média (mm)	Desvio padrão (mm)	Chuva 75% (mm)	Decêndios	ET_o média (mm)	Desvio padrão (mm)	Chuva 75% (mm)
1 (01/01 a 10/01)	34,12	3,76	23,9	20 (10/07 a 19/07)	12,20	3,46	2,0
2 (11/01 a 20/01)	33,52	3,63	16,1	21 (20/07 a 29/07)	12,82	3,69	2,1
3 (21/01 a 30/01)	34,02	3,10	26,1	22 (30/07 a 08/08)	13,97	3,44	1,8
4 (31/02 a 09/02)	33,07	2,83	30,8	23 (09/08 a 18/08)	14,85	3,34	0,0
5 (10/02 a 19/02)	32,68	3,19	24,7	24 (19/08 a 28/08)	16,86	3,42	1,5
6 (20/02 a 01/03)	31,16	3,11	21,1	25 (29/08 a 07/09)	17,50	4,52	7,0
7 (02/03 a 11/03)	29,62	2,91	20,1	26 (08/09 a 17/09)	18,87	3,94	8,3
8 (12/03 a 21/03)	27,89	2,82	19,6	27 (18/09 a 27/09)	19,86	3,93	15,1
9 (22/03 a 31/03)	26,47	3,01	9,5	28 (28/09 a 07/10)	21,24	3,26	16,2
10 (01/04 a 10/04)	23,76	3,31	7,1	29 (08/10 a 17/10)	23,38	4,61	19,9
11 (11/04 a 20/04)	21,82	3,46	10,9	30 (18/10 a 27/10)	24,53	3,71	32,8
12 (21/04 a 30/04)	18,95	3,39	4,6	31 (28/10 a 06/11)	26,26	3,64	25,4
13 (01/05 a 10/05)	16,56	3,38	1,6	32 (07/11 a 16/11)	28,41	4,28	15,2
14 (11/05 a 20/05)	15,11	3,12	5,0	33 (17/11 a 26/11)	29,47	3,67	11,3
15 (21/05 a 30/05)	13,02	3,06	3,0	34 (27/11 a 06/12)	31,11	3,23	21,2
16 (31/05 a 09/06)	12,44	3,57	5,6	35 (07/12 a 16/12)	32,80	3,57	9,8
17 (10/06 a 19/06)	12,52	2,95	11,0	36 (17/12 a 26/12)	32,34	3,39	20,6
18 (20/06 a 29/06)	12,32	2,67	6,4	37 (27/12 a 31/12)	17,07	2,32	6,1
19 (30/06 a 09/07)	12,72	2,71	3,2				

Fonte: Gomes (2005).

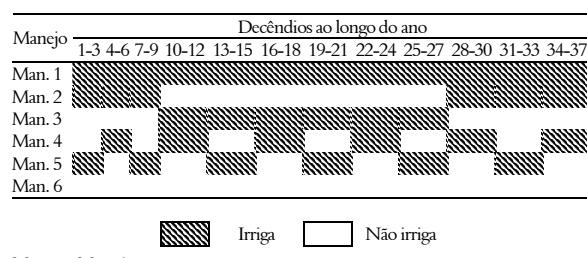
(c) Valores de coeficientes de cultivo (K_c)

Para transformar a ET_o em Evapotranspiração da Cultura (ET_c) ao longo dos decêndios do ano, considerou-se o cultivo hipotético de uma cultura perene possuindo coeficiente de cultivo (K_c) igual a 1,0 ao longo de todo o ano.

(d) Manejo da irrigação utilizado

O programa utilizado sempre considera que o manejo da irrigação decendial é suplementar. Desta forma, a irrigação em um determinado decêndio ao longo do ano somente é realizada se duas condições forem satisfeitas: se a irrigação no decêndio foi habilitada (opção – Tabela 2); e se o armazenamento e a fração água disponível no solo acusarem a necessidade de irrigação (verificada na simulação do balanço hídrico).

Tabela 2. Manejos de irrigação suplementar utilizados nas análises de simulação.



Man. = Manejo.

A Tabela 2 apresenta os seis manejos de irrigação suplementar que foram utilizados como opção nas análises de simulação. É importante observar que os manejos de irrigação foram estruturados visando a testar a eficiência e a resposta das equações de armazenamento de água no solo utilizadas nas análises, dentro de um balanço hídrico seqüencial e irrigacionista.

(e) Dados das propriedades físico-hídricas para o cálculo do armazenamento da água no solo

A Tabela 3 relaciona as percentagens de areia, silte e argila para os dois solos considerados nas análises (arenoso e argiloso). Os teores de umidade do solo, com base em volume, na condição de capacidade de campo (θ_{CC} – 100 cm.c.a) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP} – 15.000 cm.c.a), foram determinados com o modelo de Van Genuchten (1980), citado por Reichardt (1996), empregando a Equação 1. Os parâmetros α , n e m de ajuste da curva de retenção de água no solo e as umidades de saturação (θ_s) e residual (θ_r) foram estimados com o auxílio do programa *Splintex*, desenvolvido por Prevedelo (2002).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot |\phi_m|)^n]^m} \quad (1)$$

sendo, θ a umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); $|\phi_m|$ o potencial mátrico da água no solo (cm); θ_r a umidade residual ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_s a umidade de saturação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); e α , m , n são parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo (adimensional).

Os valores da capacidade de água disponível no solo (CAD) e água disponível do solo (AD) são estimados no programa a partir das Equações 2 e 3,

$$CAD = 0,01 \cdot (U_{CC} - U_{PMP}) \cdot d \cdot z \quad (2)$$

$$AD = CAD \cdot p \quad (3)$$

sendo, CAD capacidade de água disponível (mm); U_{CC} a umidade do solo na capacidade de campo,

Tabela 3. Parâmetros físi-co-hídricos estimados pelo programa *Splintex*, capacidade de água disponível (*CAD*) e água disponível (*AD*), estimada para dois solos possuindo classes de textura argilosa e arenosa, considerando a densidade de solo igual a 1,3 g cm⁻³, densidade de partícula igual a 2,65 g cm⁻³ e 50 cm de profundidade efetiva do sistema radicular.

Textura	Argila (%)	Siltc (%)	Arcia (%)	α (cm ⁻¹)	N	m	θ_s	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_{CP}	θ_{PMP}	CAD_{50} (mm)	AD_{50} (mm)
Argilosa	61	23	16	0,00892	2,9681	0,6631	0,5124	0,3193	0,45	0,32	65,0	32,5
Arenosa	20	10	70	0,05679	2,2520	0,5560	0,5340	0,1071	0,16	0,11	25,0	12,5

com base em peso (%); U_{PMP} a umidade do solo no ponto de murcha permanente, com base em peso (%); d a densidade aparente do solo (g cm⁻³); z a profundidade do volume de controle ou profundidade efetiva do solo (mm); AD água disponível no solo (mm); p fração água disponível para uma determinada cultura (adimensional).

Nas análises de simulação realizadas, considerou-se o cultivo hipotético de uma cultura perene, tendo 50 cm de profundidade efetiva do sistema radicular e disposição de uma fração água disponível (p) igual a 0,5 ao longo de todo o ano.

A estimativa do armazenamento de água no solo e/ou, “negativo acumulado” para o cálculo do balanço hídrico no programa pode ser realizada com cinco equações, denominadas: Co-senoidal, Exponencial (Thornthwaite e Mather, 1955), Potencial de Primeira Ordem (Rijtema e Aboukhaled, 1975), Braga (1982) e Potencial de segunda ordem. Outras equações de estimativa do armazenamento são encontradas na literatura, no entanto não foram utilizadas por não permitem a sua inversão, ou seja, dispor a equação do armazenamento em função do negativo acumulado e vice-versa. Esse fato dificulta consideravelmente a programação e o processo de simulação dos balanços hídricos. Os modelos adotados para a simulação dos balanços hídricos estão relacionados abaixo:

Para a equação Exponencial de Thornthwaite e Mather (1955), que não considera a fração p ,

$$ARM = CAD \cdot e^{\left(-\frac{L}{CAD}\right)} \quad (4)$$

Para as equações Co-senoidal, Potencial de Primeira Ordem (Rijtema e Aboukhaled, 1975), Braga (1982) e Potencial de segunda ordem, que consideram a fração p , tem-se as condições,

- Quando $CAD \cdot (1 - p) < ARM \leq CAD$, ou seja, na zona úmida,

$$ARM = CAD - L \quad (5)$$

- Quando $0 < ARM \leq CAD \cdot (1 - p)$, ou seja, na zona seca,

– Equação Potencial de Primeira Ordem (Rijtema e Aboukhaled, 1975),

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

– Equação de Braga (1982)

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

– Equação Potencial de segunda ordem,

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

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

– Equação Co-senoidal,

$$ARM = (1 - p) \cdot CAD \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{|L| - CAD \cdot p}{(1 - p) \cdot CAD} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

sendo, CAD a capacidade de água disponível (mm); ARM o armazenamento de água do solo (mm); L o valor do negativo acumulado no decêndio (mm); p a fração de água disponível no solo no decêndio (adimensional).

(f) Outras opções

– As simulações foram realizadas com a opção “Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista seqüencial” (simula uma série de anos).

– Número de simulações: as análises de cada um dos 60 cenários de balanço hídrico, ou seja, cenários constituídos a partir da consideração dos dois tipos de solo, seis manejos de irrigação e cinco funções de armazenamento de água no solo, foram realizadas empregando-se 10.000 simulações.

– Considerou-se a equação Co-senoidal como padrão para avaliar as semelhanças e as diferenças entre os valores das componentes do balanço hídrico simulado, seguindo as considerações de Dourado Neto e Jong Van Lier (1993).

Resultados e discussão

As Tabelas 4 e 5 e as Figuras 2 e 3 apresentam os valores médios anuais de irrigação (I), evapotranspiração real (ER) e deficiência (DEF), encontrados em 10.000 anos simulados, aplicando: cinco equações de armazenamento de água no solo, seis manejos de irrigação no “Balanco hídrico climatológico decendial irrigacionista” e dois tipos de solo (argiloso e arenoso). Para as mesmas condições, as Tabelas 4 e 5 também apresentam o excedente (EXC) e a freqüência de irrigação (F_i), obtidos conforme os respectivos manejos de irrigação.

(a) Considerações sobre os resultados alcançados no balanço hídrico para o solo argiloso

As lâminas de irrigação estimadas com as equações Potenciais de Primeira e Segunda Ordem apresentaram valores similares àqueles encontrados com a equação Co-senoidal para manejos de irrigação 1 a 5. Para esses mesmos manejos de irrigação, as equações Exponencial e Braga (1982) apresentaram lâminas de irrigação subestimadas em relação à equação Co-senoidal (Figura 2a).

O maior desvio (-27,43%) com relação ao valor de irrigação estimado com a equação Co-senoidal foi observado empregando-se a equação Exponencial e o manejo da irrigação o ano todo (manejo 1). A equação Potencial de Segunda Ordem superestimou a lâmina de irrigação para todos os manejos de irrigação, sendo que o maior desvio (6,78%) foi observado para o manejo 5.

Considerando o manejo 1 de irrigação e os valores estimados com a equação Co-senoidal, verificou-se que todas as equações de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado subestimaram a lâmina de irrigação, exceto a equação Potencial de Segunda Ordem. A menor lâmina de irrigação no manejo 1, 261,27 mm ano⁻¹ ($s = 26,65$ mm ano⁻¹), foi estimada com a equação Exponencial, e a maior lâmina, 364,08 mm ano⁻¹ ($s = 27,11$ mm ano⁻¹), foi obtida com a equação Potencial de Segunda Ordem (Tabela 4).

A ER estimada com a equação Co-senoidal e manejo de irrigação o ano todo (manejo 1) foi de 816,38 mm ano⁻¹ ($s = 21,18$ mm ano⁻¹). A ER simulada com essa mesma equação para o manejo 6 (sem irrigação) correspondeu a 57,15% da ER estimada para o manejo 1. O valor máximo da ER média anual foi de 820,56 mm ano⁻¹ ($s = 21,52$ mm ano⁻¹), estimada com a equação Potencial de Segunda Ordem, considerando o manejo 1 de irrigação. O menor valor de ER para o manejo 1 foi

de 713,09 mm ano⁻¹ ($s = 18,00$ mm ano⁻¹), simulado com a Equação Exponencial.

Tabela 4. Valores médios de irrigação (I), evapotranspiração real (ER), deficiência (DEF), excedente (EXC) e freqüência de irrigações no ano (F_i), obtidos de 10.000 simulações do “Balanco hídrico climatológico decendial irrigacionista” do Moretti, para as localidade de Ponta Grossa, considerando solo com textura ARGILOSA ($CAD = 65,0$ mm), fração p igual a 0,5, coeficiente de cultivo igual a 1,0, seis manejos de irrigação (Tabela 2) e cinco equações de armazenamento de água no solo.

Manejo Irrigação	Co- senoidal	Exponencial	Potencial de 1 ^a ordem	Braga (1982)	Potencial de 2 ^a ordem
Irrigação (I) em mm·ano ⁻¹					
1 – Irrigação todo	360,00	261,27	354,76	318,96	364,08
2 – Verão sim/ Inverno não	199,69	158,97	198,74	178,92	204,38
3 – Inverno sim/ Verão não	225,67	173,60	225,99	210,74	229,35
4 – Mês não/ Mês sim	309,14	225,50	306,23	259,46	327,80
5 – Mês sim/ Mês não	287,27	213,75	287,25	243,00	306,75
6 – Sem irrigação	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evapotranspiração da Real (ER) em mm·ano ⁻¹					
1 – Irrigação todo	816,38	713,09	810,79	770,70	820,56
2 – Verão sim/ Inverno não	655,61	610,79	654,56	630,64	660,66
3 – Inverno sim/ Verão não	692,25	640,18	692,57	677,32	695,94
4 – Mês não/ Mês sim	770,14	683,76	767,33	719,43	788,81
5 – Mês sim/ Mês não	748,81	674,42	748,56	703,39	767,98
6 – Sem irrigação	466,60	466,60	466,60	466,60	466,58
Deficiência (DEF) em mm·ano ⁻¹					
1 – Irrigação todo	18,73	122,28	24,64	64,63	14,45
2 – Verão sim/ Inverno não	179,83	224,76	180,68	204,78	174,82
3 – Inverno sim/ Verão não	143,46	195,48	142,40	157,64	139,51
4 – Mês não/Mês sim	65,17	151,47	67,83	115,92	46,60
5 – Mês sim/ Mês não	86,37	160,78	86,95	131,66	67,60
6 – Sem irrigação	369,13	368,90	368,37	368,67	368,76
Excedente (EXC) em mm·ano ⁻¹					
1 – Irrigação todo	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
2 – Verão sim/ Inverno não	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04
3 – Inverno sim/ Verão não	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
4 – Mês não/Mês sim	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05
5 – Mês sim/ Mês não	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
6 – Sem irrigação	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Freqüência da irrigação (F_i)					
1 – Irrigação todo	12 a 17	10 a 14	13 a 20	11 a 18	12 a 17
2 – Verão sim/ Inverno não	7 a 12	5 a 10	8 a 13	7 a 13	7 a 11
3 – Inverno sim/ Verão não	5 a 7	4 a 5	5 a 7	5 a 7	5 a 7
4 – Mês não/Mês sim	8 a 12	7 a 10	8 a 11	8 a 12	8 a 13
5 – Mês sim/ Mês não	7 a 11	6 a 8	6 a 11	8 a 10	7 a 10
6 – Sem irrigação	0	0	0	0	0

Tabela 5. Valores médios de irrigação (I), evapotranspiração real (ER), deficiência (DEF), excedente (EXC) e frequência de irrigações no ano (F_i), obtidos de 10.000 simulações do “Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista” do modelo Moretti, para as localidade de Ponta Grossa, considerando solo com textura ARENOSA ($CAD = 25,0$ mm), fração p igual a 0,5, coeficiente de cultivo igual a 1,0, seis manejos de irrigação (Tabela 2) e cinco equações de armazenamento de água no solo.

Manejo Irrigação	Co-senoidal	Exponencial	Potencial de 1 ^a ordem	Braga (1982)	Potencial de 2 ^a ordem
Irrigação (I) em mm ano ⁻¹					
1 – Irrigação ano todo	244,89	215,58	252,89	220,31	267,34
2 – Verão sim/ Inverno não	83,85	77,22	91,71	78,25	98,22
3 – Inverno sim/ Verão não	180,40	163,76	179,88	167,73	185,31
4 – Mês não/ Mês sim	160,58	151,98	169,72	153,77	175,13
5 – Mês sim/ Mês não	143,45	132,89	148,53	134,11	154,16
6 – Sem irrigação	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evapotranspiração da Real (ER) em mm ano ⁻¹					
1 – Irrigação ano todo	614,20	590,39	618,22	594,02	628,48
2 – Verão sim/ Inverno não	495,33	496,05	498,82	496,11	500,07
3 – Inverno sim/ Verão não	595,67	572,72	595,66	576,57	603,57
4 – Mês não/ Mês sim	576,95	569,66	583,66	571,10	588,48
5 – Mês sim/ Mês não	563,81	555,97	567,48	557,33	571,30
6 – Sem irrigação	466,59	466,60	466,55	466,60	466,55
Deficiência (DEF) em mm ano ⁻¹					
1 – Irrigação ano todo	220,99	245,07	217,18	241,05	207,11
2 – Verão sim/ Inverno não	340,22	339,41	336,65	339,25	335,02
3 – Inverno sim/ Verão não	239,71	262,64	239,29	258,84	231,79
4 – Mês não/ Mês sim	258,03	265,42	252,04	264,23	247,16
5 – Mês sim/ Mês não	271,19	279,17	267,93	278,21	264,13
6 – Sem irrigação	368,61	368,78	368,73	368,73	368,84
Excedente (EXC) em mm ano ⁻¹					
1 – Irrigação ano todo	0,07	0,11	0,08	0,11	0,07
2 – Verão sim/ Inverno não	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05
3 – Inverno sim/ Verão não	0,05	0,10	0,05	0,09	0,04
4 – Mês não/ Mês sim	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04
5 – Mês sim/ Mês não	0,04	0,10	0,05	0,08	0,04
6 – Sem irrigação	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Frequência da irrigação (F_i)					
1 – Irrigação ano todo	23 a 28	20 a 26	22 a 29	20 a 27	22 a 31
2 – Verão sim/ Inverno não	10 a 13	09 a 13	09 a 14	10 a 13	11 a 14
3 – Inverno sim/ Verão não	12 a 17	10 a 15	12 a 16	12 a 16	12 a 17
4 – Mês não/ Mês sim	12 a 16	12 a 16	13 a 16	12 a 16	13 a 17
5 – Mês sim/ Mês não	12 a 16	10 a 16	12 a 15	11 a 16	13 a 15
6 – Sem irrigação	0	0	0	0	0

A ER observada para o manejo 6 (sem irrigação) foi de 466,6 mm·ano⁻¹ para todas as equações de estimativa do armazenamento de água em função do negativo acumulado. O máximo desvio padrão foi de 1,8 mm

ano⁻¹, obtido com a equação de Braga (1982).

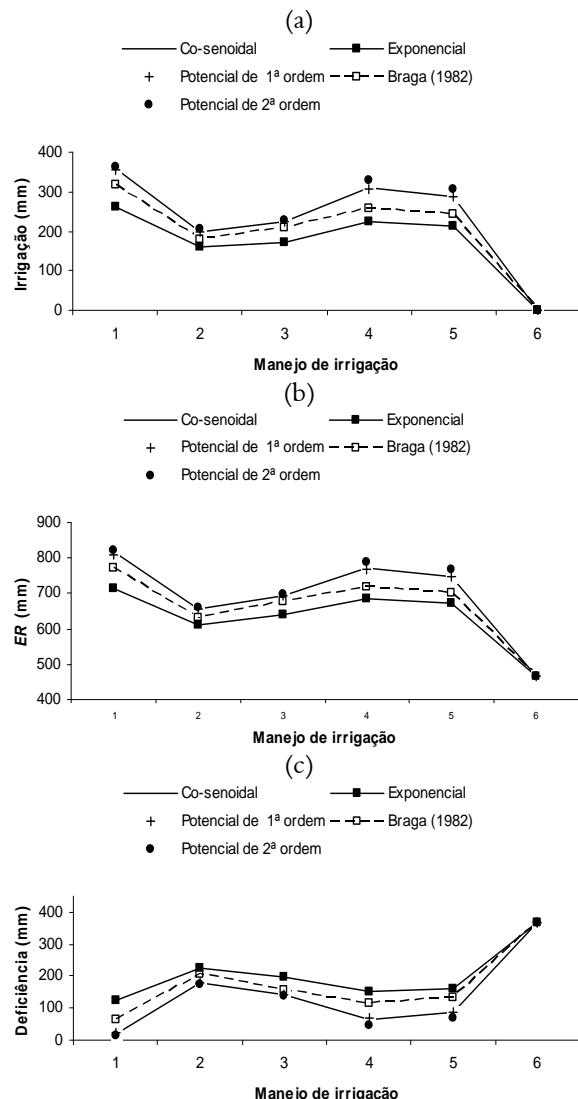


Figura 2. Valores médios de irrigação (I), evapotranspiração real (ER) e deficiência (DEF), obtidos de 10.000 simulações do “Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista” do modelo Moretti, para a localidade de Ponta Grossa, considerando solo com textura ARGILOSA ($CAD = 65,0$ mm), fração p igual a 0,5, coeficiente de cultivo igual a 1,0, seis manejos de irrigação (Tabela 2), e cinco equações de armazenamento de água no solo.

Os valores médios de ER anual obtidos nos 10.000 anos de balanços hídricos simulados com as equações Potenciais de Primeira e Segunda Ordem acompanham a tendência dos valores anuais obtidos, considerando a equação Co-senoidal para os seis manejos de irrigação (Figura 2b). Essa mesma tendência foi observada para os valores de DEF anual, devido ao relacionamento das variáveis no balanço hídrico (Figura 2c). A ER anual média resultante da simulação com as equações Exponencial e Braga (1982), apresentaram a mesma

tendência, porém subestimando os valores obtidos com a equação Co-senoidal (Figura 2b). Essas equações também apresentaram para os manejos de irrigação 1 a 5 valores anuais de *DEF* simulada maiores do que os obtidos com a equação Co-senoidal (Figura 2c).

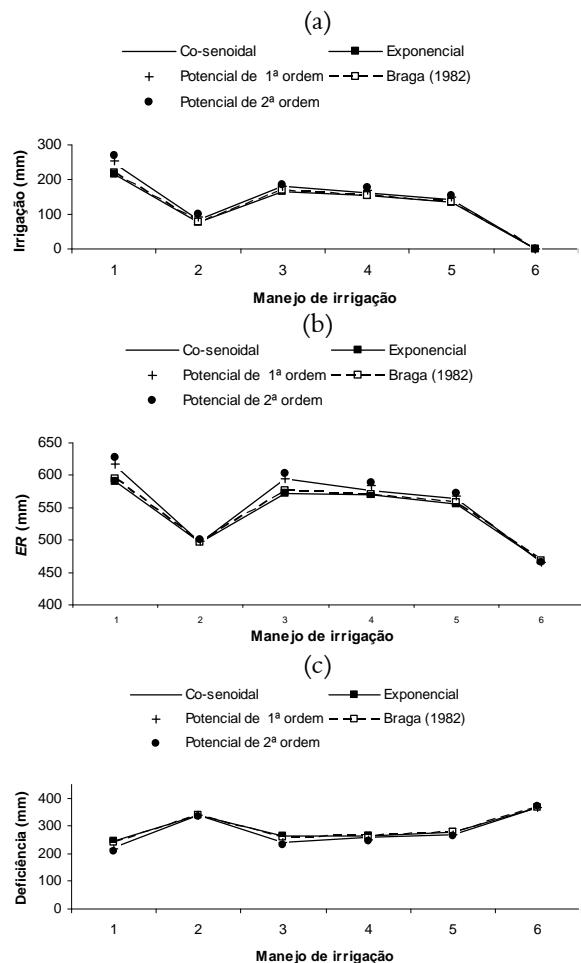


Figura 3. Valores médios de irrigação (*I*), evapotranspiração real (*ER*) e deficiência (*DEF*), obtidos de 10.000 simulações do “Balanco hídrico climatológico decendial irrigacionista” do modelo Moretti, para a localidade de Ponta Grossa, considerando solo com textura ARENOSA ($CAD = 25,0$ mm), fração *p* igual a 0,5, coeficiente de cultivo igual a 1,0, seis manejos de irrigação (Tabela 2), e cinco equações de armazenamento de água no solo.

A equação Exponencial apresentou maiores valores de *DEF* para todos os manejos de irrigação testados (manejos 1 a 5). Em comparação aos valores estimados com a equação Co-senoidal para o manejo de irrigação o ano todo (manejo 1), a equação exponencial superestimou a *DEF* em 552,86%. A equação Potencial de Segunda Ordem subestimou a deficiência hídrica para os seis manejos de irrigação simulados. Os menores desvios entre a *DEF* estimada, adotando equação Co-senoidal e as demais

equações, foram observados para o manejo 6 de irrigação (sem irrigação).

A deficiência estimada com a equação Co-senoidal para o manejo 1 de irrigação foi de 18,73 mm ano⁻¹ ($s = 12,6$ mm·ano⁻¹) ou 0,51 mm decêndio⁻¹, em média. Avaliando-se os dados decenciais dos balanços hídricos, observou-se que não ocorreram decêndios com irrigação e *DEF* para esta equação, pois a água disponível ($AD = 32,5$ mm decêndio⁻¹) foi suficiente para atender a demanda de evapotranspiração média da cultura hipotética no período (média = 22,58 mm decêndio⁻¹; $s = 7,8$ mm decêndio⁻¹). O maior valor médio de *DEF* de água no solo para o manejo 1 foi de 122,28 mm ano⁻¹ ($s = 14,22$ mm ano⁻¹) e ocorreu com a equação Exponencial. O menor valor de deficiência para o mesmo manejo foi de 14,45 mm ano⁻¹ ($s = 12,75$ mm ano⁻¹) e foi estimado com a equação Potencial de Segunda Ordem (Tabela 4).

Os valores de *EXC* estimados para o solo argiloso ($CAD = 65$ mm) foram menores do que 0,11 mm·ano⁻¹ para todas as equações de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado e dos manejos de irrigação. Esses resultados mostraram-se coerentes com os dados climáticos da região de Ponta Grossa, Estado do Paraná, que demonstram não haver a formação de excessos de água no solo mediante a consideração da chuva provável e evapotranspiração média na escala decendial, conforme apresentado por Gomes (2005).

As equações Co-senoidal e Potencial de Segunda Ordem apresentaram em média 12 a 17 irrigações decenciais por ano simulado. A equação Exponencial apresentou a menor freqüência de irrigações (10 a 14 irrigações anuais), influenciando a ocorrência de maior deficiência de água no solo.

Os valores anuais de *I*, *ER* e *DEF*, obtidos com a simulação do balanço hídrico para o manejo 6 (sem irrigação), demonstraram que não houve diferenças entre as equações de estimativa do *ARM* em função do negativo acumulado, quando desconsiderou-se a realização de irrigação (manejo 6), como pode ser observado na Figura 2. Dessa forma, verifica-se que qualquer uma das cinco equações de estimativa do *ARM* pode ser utilizada para fazer a simulação do balanço hídrico para fins climatológicos ou outro que não considere a realização de irrigação suplementar.

Considerando um solo argiloso ($CAD = 65$ mm) e os parâmetros climáticos da região de Ponta Grossa, os valores anuais simulados de *I*, *ER* e *DEF* permitiram estabelecer dois grupos de equações de estimativa do armazenamento de água no solo em função do negativo acumulado para fins de

planejamento da irrigação, definidos conforme os resultados da equação Co-senooidal: um grupo formado pelas equações Potencial de Primeira Ordem, Potencial de Segunda Ordem e Co-senooidal (Grupo A), que retornaram valores semelhantes e consistentes para fins de planejamento da irrigação; e outro formado pelas equações Exponencial e Braga (1982) (Grupo B), que não apresentaram resultados com a mesma consistência que a equação Co-senooidal, porém podem ser empregadas para finalidades de planejamento onde a irrigação não é considerada.

A escolha de uma equação de estimativa do armazenamento pertencente ao Grupo A ou B irá determinar a qualidade dos dados para o planejamento da irrigação, que, por sua vez, influenciará outras variáveis de interesse. Programas como o *Moretti* (Souza, 2001), *Tobruk* (Castro, 2001), *Brasdhc* (Affholder *et al.*, 1997), entre outros, não têm como objetivo determinar somente as componentes do balanço hídrico, mas sim utilizar seus resultados como parâmetro para determinar ou estimar outras variáveis de interesse. No caso do modelo *Moretti*, desenvolvido por Souza (2001), os valores de irrigação e deficiência simulados do balanço hídrico servem de base para calcular a lâmina de irrigação e custo com energia e água em função do sistema de irrigação, bem como estimar o rendimento da cultura, a partir de uma função de produção. Dessa forma, resultados inconsistentes do balanço hídrico podem gerar dados finais incoerentes com a realidade.

(b) Considerações sobre os resultados alcançados no balanço hídrico para o solo arenoso ($CAD = 25$ mm)

A magnitude dos valores de DEF para o solo arenoso ($CAD = 25$ mm) aponta para um significativo grau de deficiência de água no solo, mesmo empregando-se o manejo de irrigação o ano todo (manejo 1), para todas as equações de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado. Esperava-se que o solo arenoso apresentasse, para o manejo 1, armazenamento de água no solo oscilando entre a CAD e o armazenamento crítico [$CAD \cdot (1 - AD)$] para todos os decênios do ano, o que resultaria em valores de DEF tendendo a zero. No entanto, os valores anuais simulados de DEF ficaram entre 207,11 mm ano^{-1} (equação Potencial de Segunda Ordem) e 245,07 mm ano^{-1} (equação Exponencial).

Observou-se, também, a ocorrência de irrigação (I) e deficiência (DEF) em um mesmo decênio do ano, demonstrando que a CAD do solo arenoso foi insuficiente para suprir as demandas da ET_c , bem

como manter a fração mínima de água disponível (AD) armazenada no solo para a cultura. É importante observar que os resultados encontrados na simulação com o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista” servem de advertência para qualquer programa de simulação ou cálculo do balanço hídrico que adote o conceito de reservatórios para o armazenamento da água no solo e apenas uma irrigação por período (decêndio).

A freqüência média anual de irrigações decenciais, obtida para o solo arenoso, foi sempre superior àquela simulada para o solo argiloso, considerando todas as equações de estimativa do armazenamento e os manejos de irrigação, exceto para o manejo 6. A freqüência de irrigação para o solo arenoso ($CAD = 25$ mm), obtida com a equação Co-senooidal e o manejo de irrigação 1, foi 52,17% maior do que a encontrada para o solo argiloso ($CAD = 65$ mm).

Em 10.000 anos simulados, a seleção da equação Co-senooidal resultou em freqüências oscilando entre 23 e 28 irrigações decenciais ano^{-1} com o manejo de irrigação o ano todo. A maior (22 a 31 irrigações ano^{-1}) e menor (20 a 26 irrigações ano^{-1}) freqüência de irrigação, empregando o manejo 1, foram observadas para a Equação Potencial de Segunda Ordem e Exponencial, respectivamente (Tabela 5).

Contrastando-se os valores simulados de Fi e DEF , observou-se que os mesmos reforçam a inconsistência dos resultados obtidos para o solo arenoso, pois o aumento da Fi não resultou na redução da DEF , como foi observado nas simulações com o solo argiloso.

Os valores médios anuais simulados de I e ER , apresentados na Tabela 5, não foram consistentes, pois a metodologia e as opções selecionadas para a simulação dos balanços hídricos não apresentaram resultados coerentes para os dados climáticos da região de Ponta Grossa, Estado do Paraná, CAD e AD .

Assim, os valores médios anuais de I , ER e DEF , obtidos com a simulação do balanço hídrico, considerando um solo arenoso na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná, não permitiram a identificação de diferenças entre as equações de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado, como pode ser observado na Figura 3.

Os resultados obtidos nas simulações das irrigações decenciais com o solo arenoso da região de Ponta Grossa evidenciam que se deve ter cuidado e atenção na execução de trabalhos científicos e no desenvolvimento de atividades ligadas à agricultura irrigada, em áreas que apresente essa mesma

condição. Balanços hídricos simulados para regiões/locais em que os solos não possuam armazenamento compatível com o período de realização das irrigações do modelo (diárias, pêntadas, semanas, decênios, quinzenas) podem resultar em valores totalmente inconsistentes de *ER*, *I* e *DEF*, comprometendo também os valores estimados de produtividades, a partir de funções de produção, volume de água utilizado nas irrigações, contabilização dos custos com bombeamento, energia, agricultura irrigada, entre outros. Uma consideração mais aprofundada sobre os problemas que estimativas erradas de *ER*, *I* e *DEF* podem promover no planejamento da irrigação pode ser encontrada em exemplos e análises apresentadas em Frizzzone et al. (2005).

Conclusão

Baseando-se nos resultados médios dos balanços hídricos simulados para o solo ARGILOSO da região de Ponta Grossa, Estado do Paraná, as equações Potenciais de Primeira e Segunda Ordem obtiveram os menores desvios em relação aos dados simulados com o modelo Co-senoidal de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado. As equações de Thornthwaite e Mather (1955) e Braga (1982) não apresentam bons resultados de estimativa de irrigação ao longo do ano. O solo ARENOSO da mesma região não permite a obtenção de resultados consistentes com as equações de armazenamento testadas.

A simulação do balanço hídrico para fins climatológicos ou outro fim que não considere a irrigação suplementar, tanto para o solo ARGILOSO como para o ARENOSO, pode ser realizada adotando qualquer uma das equações testadas para a estimativa do armazenamento de água no solo.

Agradecimento

Agradeço ao Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar) e ao Instituto agronômico do Paraná (Iapar); por disponibilizarem dados climáticos essenciais para a realização deste trabalho.

Referências

- AFFHOLDER, F. et al. Modelo agroclimático para avaliação do comportamento do milho na região dos cerrados. *Pesq. Agropecu. Bras.*, Brasília, n. 10, v. 32, p. 993-1002, 1997.
- BERNARDO, S. *Manual de irrigação*. 5. ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1989.
- BRAGA, H.J. *Caracterização da seca agronômica através de novo modelo de balanço hídrico, na região de Laguna, litoral sul do Estado de Santa Catarina*. 1982. Dissertação (Mestrado)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1982.
- CASTRO, M.C. *Sistema computacional para a determinação da lâmina econômica ótima em irrigação pressurizada*. 2001. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.
- DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. Estimativa do armazenamento de água no solo para realização de balanço hídrico. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v. 17, n. 1, p. 9-15, 1993.
- FRIZZONE, J.A. et al. *Planejamento da Irrigação: análise de decisão de investimento*. Brasília: Embrapa, 2005.
- GOMES, S. *Ajuste e avaliação de um modelo de balanço hídrico decendial e estudo dos limites de sua utilização em algumas localidades no Estado do Paraná*. 2005. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- MENDONÇA, P.V. Sobre o novo método de balanço hidrológico do solo de Thornthwaite-Mather. In: CONGRESSO LUSO-ESPAÑOL PARA O PROGRESSO DAS CIÊNCIAS, 24., 1958, Madri. *Anais...* Madri: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1958. p. 271-282.
- PEREIRA, A.R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. *Bragantia*, Campinas, v. 64, n. 2, p. 311-313, 2005.
- PEREIRA, A.R. et al. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: Esalq, 1997.
- PREVEDELLO, C.L. Programa Splintex para estimar a curva de retenção de água a partir da granulometria (composição) do solo – Versão 1.0, 2002. *Comunicação pessoal* (Publicação em meio magnético), 2002.
- REICHARDT, K. *Dinâmica da matéria e energia em ecossistemas*. 6. ed. Piracicaba: USP/Esalq. Depto. Física e Meteorologia, 1996.
- RJTEMA, P.E.; ABOUKHALED, A. Crop water use. In: ABOUKHALED, A. et al. *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.
- SOUZA, J.L.M. *Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeíro*. 2001. Tese (Doutorado)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, 2001.
- SOUZA, J.L.M.; FRIZZONE, J.A. Modelo aplicado ao planejamento da cafeicultura irrigada: I. Simulação do balanço hídrico e do custo com água. *Acta Sci. Agron.*, Maringá, n. 1, v. 25, p. 103-112, 2003.
- THORNTWHAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Rev.*, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.
- THORNTWHAITE, C.W.; MATHER, J.R. *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Centerton: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1957. (Publications in Climatology, v. 10, n. 3).
- THORNTWHAITE, C.W.; MATHER, J.R. *The water*

balance. Centerton: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. (Publications in Climatology, v. 8, n. 1).

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

Received on April 28, 2006.

Accepted on April 17, 2007.