



Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de Green-Ampt¹



Roberto A. Cecílio², Demetrius D. Silva³, Fernando F. Pruski⁴ & Mauro A. Martinez⁵

¹ Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor, apresentada à UFV

² DEA/UFV. CEP 36571-000, Viçosa, MG. Fone: (31) 3891-6739. E-mail: rcecilio@vicosa.ufv.br (Foto)

³ DEA/UFV. E-mail: david@ufv.br

⁴ DEA/UFV. E-mail: ffpruski@ufv.br

⁵ DEA/UFV. E-mail: mmauro@ufv.br

Protocolo 128 - 1/9/2002 - Aprovado em 17/10/2003

Resumo: A infiltração de água no solo é um dos mais significantes processos do ciclo hidrológico. A equação de Green-Ampt (GA) é bastante utilizada na modelagem da infiltração; entretanto, diversos autores alertam para a necessidade de adequação de seus parâmetros de entrada (umidade de saturação (θ_s); condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) e potencial matricial na frente de umedecimento (ψ). Neste sentido, avaliou-se a aplicabilidade do modelo de GA, assim como as diversas proposições de adequação de K_0 e ψ , em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob condições de estratificação. Determinaram-se a infiltração acumulada (I), a taxa de infiltração (Ti) e as características físicas do perfil necessárias para a aplicação do modelo. Foram feitas simulações com base na combinação de seis metodologias para a determinação de ψ e três para a condutividade hidráulica da zona de transmissão (K_w), verificando-se que as combinações seguintes simularam bem o processo de infiltração: K_w igual a $0,5 K_0$ associado a ψ determinado com base na umidade inicial do solo ($\psi(\theta_i)$); K_w igual à taxa de infiltração estável (T_{ie}) associado a ψ igual à média entre $\psi(\theta_i)$ e ψ relativo à umidade de saturação de campo ($\psi(\theta_w)$); e K_w igual a K_0 associado a ψ calculado com base na textura e porosidade do solo ($\psi(\text{textura})$) e K_w igual a T_{ie} associado a $\psi(\text{textura})$.

Palavras-chave: simulação hidrológica, infiltração, Green-Ampt

Modeling of water infiltration in soil under stratified conditions using the Green-Ampt equation

Abstract: Soil water infiltration is one of the most important processes of the hydrological cycle. The Green and Ampt equation (GA) is quite used to simulate the infiltration process, however, several authors showed the necessity of some adaptations in the GA parameters: saturation moisture (θ_s), hydraulic conductivity (K_0) and mean suction in the wetting front (ψ). An evaluation was made of the GA model and of the several correction propositions of K_0 and ψ , applied in a stratified Red-Yellow Latosol. A soil box filled with soil material belonging to three horizons of the studied soil was used. The accumulated infiltration (I), infiltration rate (Ti), as well as the physical characteristics of the profile needed for the application of the model were determined. Simulations based on the combination among six methodologies for the determination of ψ was made and three for the determination of hydraulic conductivity in the transmission zone (K_w). The following combinations simulated well the infiltration process: K_w equal to $0,5 K_0$ associated to ψ relative to the initial moisture content ($\psi(\theta_i)$); K_w equals to the stable infiltration rate (T_{ie}) associated to ψ equal to the mean among $\psi(\theta_i)$ and ψ relative to the saturation field moisture ($\psi(\theta_w)$); K_w equal to K_0 associated to ψ calculated with base in the texture and porosity of the soil and K_w equal to T_{ie} associated to ψ calculated on the basis of texture and porosity of the soil.

Key words: hydrologic simulation, infiltration, Green-Ampt

INTRODUÇÃO

A infiltração é definida como a passagem de água da superfície para o interior do solo, constituindo-se num dos mais importantes processos que compõem o ciclo hidrológico por ser fator determinante da disponibilização de água para as culturas, da recarga dos aquíferos subterrâneos, da ocorrência

e magnitude do escoamento superficial e do manejo do solo e da água.

Segundo Skaggs & Khaleel (1982) uma boa modelagem do movimento de água no solo só pode ser conseguida a partir de uma modelagem adequada do processo de infiltração. O mesmo ocorre com a modelagem do excesso de água precipitada em uma bacia hidrográfica, que é convertido em escoamento superficial.

Caracterizar todas as variáveis que influenciam na infiltração é um processo demorado e difícil. A intensidade com que algumas variáveis afetam o processo de infiltração ainda hoje, não é bem definida. Sendo assim, diversos modelos têm sido propostos visando simplificar o estudo da infiltração da água no solo. Os solos apresentam grande variabilidade espacial, ainda que dentro de pequenas áreas. Como resultado disto e também das variações temporais das propriedades do solo, a infiltração é um processo muito complexo, que pode ser descrito apenas de forma aproximada, mediante o uso de equações matemáticas.

De acordo com Rodrigues & Pruski (1997), dentre os vários modelos disponíveis para estimar a infiltração da água no solo, o de Green-Ampt (GA) é um dos que apresentam maior potencial de utilização, devido à sua simplicidade e por estar fundamentado no processo físico da infiltração. Este modelo, proposto por Green & Ampt (1911), exprime a infiltração em função da condutividade hidráulica do solo saturado, do potencial matricial na frente de umedecimento e das umidades inicial e de saturação do solo, e não do tempo de ocorrência do processo, conforme apresentado na Eq. 1.

$$Ti = K_0 \left(1 + \frac{\Psi(\theta_s - \theta_i)}{I} \right) \quad (1)$$

em que:

- Ti - taxa de infiltração da água no solo, mm h⁻¹
- K₀ - condutividade hidráulica do solo saturado, mm h⁻¹
- Ψ - potencial matricial médio na frente de umedecimento, mm
- θ_s - umidade do solo na saturação, cm³ cm⁻³
- θ_i - umidade inicial do solo, cm³ cm⁻³
- I - infiltração acumulada, mm

A infiltração acumulada (I) é dada por

$$I = L(\theta_s - \theta_i) \quad (2)$$

em que L é a profundidade da frente de umedecimento, expressa em mm.

No desenvolvimento da equação, Green & Ampt (1911) basearam-se na equação de Darcy e assumiram que durante o processo de infiltração existe uma carga hidráulica constante na superfície do solo e, ainda, que a frente de umedecimento é bem nítida e precisamente definida, acima da qual o solo se encontra uniformemente saturado com condutividade hidráulica K₀, e que o valor de Ψ nesta frente permanece igual ao valor do potencial matricial relativo à umidade inicial do solo (Ψ(θ_i)). Assumiu-se, também, que a água penetra no solo abruptamente, o que resulta na formação de duas regiões bem definidas, sendo a primeira completamente saturada e a segunda com conteúdo de umidade inicial.

Uma desvantagem da utilização do modelo de Green-Ampt na simulação do processo de infiltração reside no fato de que seus parâmetros de entrada não representam fielmente as condições reais de ocorrência da infiltração. Diversos autores

propõem metodologias para a adequação desses parâmetros, a fim de melhorar a simulação tanto da taxa de infiltração (Ti) como da infiltração acumulada (I), as quais são apresentadas na seqüência.

Considerações teóricas

O modelo de Green-Ampt foi derivado considerando-se que a região acima da frente de umedecimento se encontra saturada; entretanto, devido ao aprisionamento de ar nos poros do solo, a umidade de saturação não é atingida, sendo recomendável a utilização da umidade de saturação de campo (θ_w), que é menor que a umidade de saturação do solo (θ_s). Diversos pesquisadores (Onstad et al., 1973; Brakensiek & Onstad, 1977; Slack, 1980; Zirbel et al., 1982; Cecílio, 2002) recomendam a utilização de valores de θ_w que variam entre 0,79 e 1,00 θ_s.

Também em virtude do aprisionamento de ar nos poros do solo, alguns pesquisadores sugerem a utilização da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_w) em lugar de K₀. Bouwer (1969) recomenda um valor de K_w igual a 0,5 K₀; já Silva & Kato (1998) utilizam a taxa de infiltração estável de água no solo (T_{ie}) no lugar de K₀.

Dos parâmetros de entrada da equação de Green-Ampt, o valor de Ψ é o de mais difícil determinação. Devido à desuniformidade da umidade do solo no início do processo de infiltração e das propriedades físicas do mesmo ao longo do seu perfil, a frente de umedecimento não é abrupta, como pressuposto no desenvolvimento do modelo (Rodrigues, 1999) e, assim sendo, diversos autores indicam alternativas para o cálculo de Ψ. Bouwer (1969) recomenda a utilização de 0,5 P_b, sendo P_b a pressão de borbulhamento do solo ("bubbling pressure"), definida por Brooks & Corey (1964).

Brakensiek (1977) aconselha a utilização da Eq. 3, que calcula Ψ a partir do índice de distribuição do tamanho de poros (λ) e de P_b, sendo Ψ e P_b expressos em mm:

$$\Psi = \frac{2 + 3\lambda}{1 + 3\lambda} \frac{P_b}{2} \quad (3)$$

As constantes P_b e λ são determinadas graficamente a partir da curva de retenção de água no solo, sendo que o valor de λ corresponde à declividade da equação da reta da relação S_e (Eq. 4) x Ψ na escala log-log, enquanto o valor de P_b corresponde ao intercepto do prolongamento da reta até o valor de S_e = 1.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \quad (4)$$

em que:

- S_e - saturação efetiva, adimensional
- θ_r - umidade residual do solo, cm³ cm⁻³
- φ - porosidade do solo, cm³ cm⁻³

As constantes θ_r, λ e P_b são obtidas por intermédio da metodologia proposta por Brooks & Corey (1964).

Rawls & Brakensiek, citados por Rawls et al. (1996), recomendam o cálculo de ψ (expresso em mm) com base na textura e porosidade do solo, de acordo com a equação

$$\psi = 0,01e^{(6,531-7,326\phi+15,8C^2+3,809\phi^2+3,44SC-4,989S\phi+16,1S^2\phi^2+16C^2\phi^2-13,6S^2C-34,8C^2\phi-7,99S^2\phi)} \quad (5)$$

em que:

- S - teor de areia, kg kg⁻¹
- C - teor de argila, kg kg⁻¹
- ϕ - porosidade, cm³ cm⁻³

Van Mullem, citado por Rawls et al. (1996), sugere que o valor de ψ (expresso em cm) seja calculado com base em K_0 (expresso em cm h⁻¹), a partir da Eq. 6.

$$\psi = 4,903 (K_0 + 0,02)^{-0,4932} \quad (6)$$

Hachum & Alfaro (1980) apresentaram uma adaptação no modelo de Green-Ampt a fim de descrever a taxa de infiltração em solos com vários estratos para qualquer tempo maior ou igual ao tempo em que ocorre a saturação da superfície.

$$Ti = K^* \left(1 + \frac{\bar{\psi}}{L} \right) \quad (7)$$

em que:

- K^* - condutividade hidráulica equivalente, LT⁻¹
- ψ - potencial matricial médio na frente de umedecimento, L

Para a situação de redução do valor da condutividade hidráulica das camadas de solo ao longo da profundidade do perfil, caso a frente de umedecimento esteja na interface entre duas camadas sucessivas, o valor do potencial matricial deverá ser tomado como a média dos valores de ψ de ambas as camadas; caso contrário, será tomado como o valor de ψ da camada na qual a mesma estiver passando.

A variável K^* é tomada como a média harmônica das j camadas situadas acima da frente de umedecimento, sendo definida como:

$$K^* = \frac{L}{\sum_{i=1}^j \left(\frac{H_i}{K_i} \right)} \quad (8)$$

em que:

- H_i - espessura da camada i , L
- K_i - condutividade hidráulica da camada i , LT⁻¹
- j - número de camadas situadas acima da frente de umedecimento

A maioria dos modelos que se propõem a descrever o processo de infiltração, incluindo-se o modelo de Green-Ampt,

parte da pressuposição de que o perfil de solo no qual se processa a infiltração é homogêneo, o que, na grande maioria dos casos, não se constitui em uma verdade. A variabilidade, tanto espacial quanto temporal, das características físicas do solo, é muito grande, causando heterogeneidade ao longo de sua profundidade; portanto, o estudo do processo de infiltração da água em solos estratificados torna-se essencial para uma predição mais correta, tanto da quantidade de água infiltrada no solo como da taxa com que se dá o processo.

Tendo em vista a necessidade de elaboração de estudos de infiltração de água em solos estratificados e a carência de pesquisas envolvendo a aplicação da equação de Green-Ampt para os solos brasileiros, é que se desenvolveu o presente trabalho, que teve por objetivo:

- avaliar o comportamento da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em Latossolo Vermelho-Amarelo, sob condições de estratificação;

- verificar, entre as diversas proposições existentes na literatura para adequação dos parâmetros de entrada (K_0 e ψ) do modelo de Green-Ampt, aquelas que apresentam melhor desempenho na representação da infiltração de água no solo estudado.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Utilizou-se uma caixa de solos com dimensões de 0,69 x 1,00 m e 0,90 m de altura (Figura 1), preenchida com material de solo pertencente aos horizontes A, B e C de Latossolo Vermelho-Amarelo, cuja análise textural é apresentada na Tabela 1. Uma das extremidades da caixa tinha altura de 0,85 m e era dotada de uma pequena calha destinada a conduzir o escoamento superficial; o fundo da caixa se compunha de furos destinados a promover a drenagem da água. A fim de minimizar a ocorrência de caminho preferencial da infiltração entre as paredes metálicas e o material de solo, procedeu-se à colagem de areia grossa nas mesmas, aumentando sua rugosidade e, com a mesma finalidade, uma das paredes da caixa, construída com acrílico, recebeu frisos horizontais feitos com cola de silicone; enfim, no fundo da caixa colocou-se uma camada de areia com 0,04 m de espessura para facilitar a drenagem da água aplicada durante a condução do experimento.

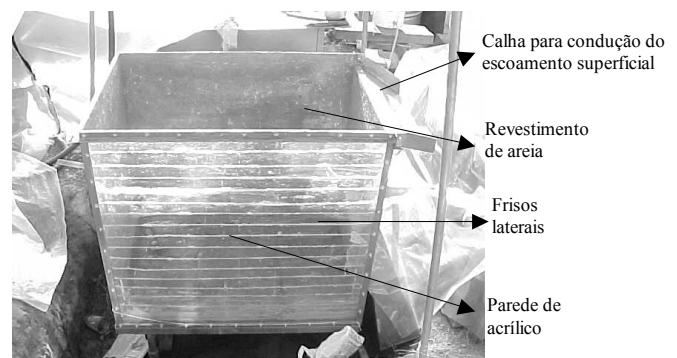


Figura 1. Vista lateral da caixa de solo utilizada na condução do experimento

Tabela 1. Análise textural do solo utilizado no experimento

Horizonte	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Classe Textural
	dag kg ⁻¹				
A	13	9	7	71	Muito argilosa
B	13	9	4	74	Muito argilosa
C	25	29	34	12	Franco

O solo utilizado foi passado em peneira de malha 0,0045 m e, posteriormente, acomodado dentro da caixa, em 18 camadas de 0,045 m cada uma, sendo seis camadas para o material de solo pertencente a cada um dos três horizontes. O material de solo destinado à formação das camadas, após ser umedecido visando atingir umidade próxima à capacidade de campo, foi compactado, individualmente, a partir de uma carga exercida com a queda de um peso de 10 kg, de uma altura de 0,60 m, em uma chapa de aço colocada sobre o solo. A compactação foi feita de forma que a densidade do solo na caixa se aproximasse da densidade em condições de campo. Ao final da compactação, obteve-se o seguinte perfil de solo: camada de areia com 0,040 m de espessura no fundo da caixa; camada de material de solo pertencente ao horizonte C, com 0,27 m de espessura; camada de material de solo pertencente ao horizonte B, com 0,27 m de espessura e camada de solo pertencente ao horizonte A, com 0,243 m de espessura.

Determinou-se a umidade inicial do perfil do solo pelo método padrão de estufa retirando-se, antes do início de cada teste, amostras de solo por intermédio de um furo de trado. As amostras foram retiradas nas profundidades de 0,018, 0,108, 0,198, 0,288, 0,378, 0,468, 0,558, 0,648 e 0,738 m. Após a retirada destas, o furo era fechado com uma massa de solo previamente calculada a fim de se obter a mesma densidade de compactação do perfil de solo na caixa. Devido a este procedimento, apenas dois testes foram feitos, pois mais furos comprometeriam a confiabilidade do experimento.

Após a realização dos testes foram retiradas amostras indeformadas de solo nas mesmas profundidades em que foram determinadas as umidades iniciais do perfil. Tais amostras foram utilizadas para a determinação da densidade do solo (d_s) e da K_0 ao longo do perfil. Desta maneira, pôde-se considerar o perfil como sendo constituído por nove camadas com diferentes valores de d_s e K_0 . Determinaram-se, para o material de solo pertencente a cada horizonte, as curvas de retenção da água no solo (Figura 2) e a densidade de partículas. A Tabela 2 apresenta as características físicas determinadas para cada camada de solo.

Tabela 2. Características físicas das camadas do perfil de solo

Horizonte	Camada	K_0 ¹ mm h ⁻¹	d_s ² g cm ⁻³	d_p ³ g cm ⁻³	θ_s ⁴ m ³ m ⁻³	θ_i ⁵ (m ³ m ⁻³)	
						Teste 1	Teste 2
A	Superior	74,40	0,88	2,66	0,669	0,327	0,305
	Intermediária	52,50	0,84	2,66	0,684	0,314	0,308
	Inferior	42,20	0,92	2,66	0,654	0,350	0,339
B	Superior	33,60	1,00	2,69	0,628	0,368	0,366
	Intermediária	33,60	1,00	2,69	0,628	0,375	0,364
	Inferior	33,60	0,99	2,69	0,632	0,373	0,366
C	Superior	13,70	1,08	2,65	0,592	0,440	0,447
	Intermediária	14,90	1,05	2,65	0,604	0,446	0,443
	Inferior	8,40	1,06	2,65	0,600	0,465	0,488

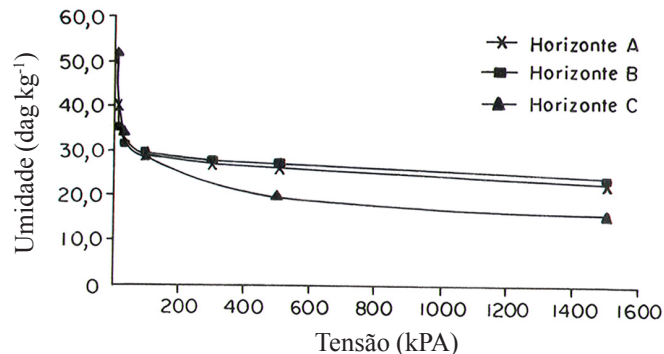
¹ Condutividade hidráulica do solo saturado (Método do permeômetro de carga constante)² Densidade do solo (Método do anel volumétrico)³ Densidade de partículas (Método do balão volumétrico)⁴ Umidade de saturação = porosidade ($1-d_p/d_s$)

Figura 2. Curva de retenção de água no solo para os três horizontes

Para o início dos testes, fez-se necessário cobrir a superfície do solo com uma lona impermeável e estabelecer uma lâmina de água sobre esta, retirando-a no exato momento de início de cada teste.

Devido às dificuldades de se medir diretamente a infiltração, a mesma foi determinada de forma indireta, por meio da coleta do escoamento superficial. Aplicava-se água na superfície do solo, a uma taxa constante e conhecida, e se coletava o escoamento superficial produzido em uma caixa de coleta. Um aparelho medidor de nível, denominado Thalimedes, registrava, a cada minuto, o nível de água dentro da caixa de coleta. Os dados registrados eram depois descarregados em um computador. As variações de nível a cada minuto foram convertidas em volume escoado, multiplicando-se pela área da caixa de coleta. O volume de água infiltrado foi obtido, portanto, através da diferença entre o volume aplicado e o volume escoado; posteriormente, este volume foi convertido em lâmina, dividindo-o pela área da caixa de solo obtendo-se, para cada minuto de realização do teste, o valor da lâmina de água infiltrada no perfil.

Determinou-se a taxa de infiltração estável da água no solo (T_{ie}) deixando-se que os testes continuassem a ser realizados após a saída de água pelos drenos localizados na parte inferior da caixa de solo. A T_{ie} foi obtida após verificar-se que a taxa de variação do nível d'água dentro da caixa de coleta do escoamento superficial fosse constante. No presente trabalho, o valor de T_{ie} foi igual a 31,2 mm h⁻¹.

Para fins de acompanhamento do deslocamento da frente de umedecimento ao longo do perfil de solo, foram instaladas,

na lateral da caixa, nove sondas de TDR paralelas à superfície do solo, posicionadas nas mesmas profundidades em que se retiraram as amostras de solo para determinação de θ_i . As sondas foram construídas com duas varetas de aço inoxidável, paralelas e distanciadas 0,05 m, cada uma com comprimento de 0,25 m. Utilizou-se um aparelho medidor de umidade com base no princípio da reflectometria no domínio do tempo (TDR) desenvolvido por Pereira (2001). Na primeira sonda foram feitas leituras de umidade de minuto em minuto, até que se percebesse a estabilização da umidade, passando-se então a fazer leituras na sonda localizada imediatamente abaixo, repetindo-se o mesmo procedimento para as sondas subseqüentes. Todas as leituras foram gravadas em um microcomputador, utilizado na captura dos dados, para posterior determinação do tempo gasto para que a frente de umedecimento atingisse as profundidades onde as sondas estavam inseridas. Considerou-se que a frente de umedecimento atingiu a profundidade da sonda no primeiro valor de tempo lido a partir do momento em que houve repetições da leitura de umidade feita pelo aparelho de TDR. Com base no tempo gasto para que a frente de umedecimento atingisse cada uma das profundidades em que estavam instaladas as sondas de TDR e nas lâminas de água escoada e aplicada na superfície, determinou-se a lâmina que se infiltrara no perfil de solo.

A lâmina acumulada em cada camada (H_i) foi calculada a partir da utilização da Eq. 9. A infiltração total acumulada (I) foi obtida a partir do somatório da lâmina acumulada em cada camada (I_i) situada a uma profundidade menor que a profundidade da frente de umedecimento.

$$I_i = H_i (\theta_w - \theta_i) \quad (9)$$

em que:

- I_i - lâmina acumulada na camada i, L
- θ_w - umidade na saturação de campo da camada, $L^3 L^{-3}$
- θ_i - umidade inicial da camada, $L^3 L^{-3}$

Na Eq. 9 consideraram-se os valores de θ_w determinados por Cecílio (2002) para o Latossolo Vermelho-Amarelo: 0,79 θ_s para o material de solo pertencente aos horizontes A e B e 0,86 θ_s para o material de solo pertencente ao horizonte C.

A taxa de infiltração (Ti) foi calculada com a utilização da Eq. 7, sendo K^* calculado pela Eq. 8.

Consideraram-se as seguintes condições para adequação de K_w :

- $K_w = K_0$
- $K_w = 0,5 K_0$
- $K_w = T_{ic}$

Para a adequação de ψ foram consideradas cinco proposições existentes na literatura mais uma sexta proposição, que é a consideração de ψ como a média entre os potenciais matriciais relativos à umidade inicial ($\psi(\theta_i)$) e à umidade de saturação de campo ($\psi(\theta_w)$). Assim sendo, considerou-se:

- $\psi = \psi(\theta_i)$, obtido a partir da curva de retenção
- $\psi = \psi(P_b, \lambda)$, obtido com base na Eq. 3
- $\psi = 0,5 P_b$
- $\psi = \psi(\text{textura})$, obtido com base na Eq. 5

- $\psi = \psi(K_0)$, obtido com base na Eq. 6
- $\psi =$ média entre $\psi(\theta_i)$ e $\psi(\theta_w)$, obtidos a partir da curva de retenção

Foram feitas todas as combinações entre as metodologias para adequação de K_w e de ψ , totalizando 18 simulações. Como algumas dessas combinações apresentaram bons resultados para a simulação de um parâmetro de saída (Ti, I ou L) e ruins para a simulação dos outros, as análises foram realizadas em conjunto, de modo a permitir a escolha daquelas que melhor simularam os valores desses parâmetros, ao longo do tempo.

Procurou-se selecionar as combinações que melhor simularam a infiltração da água no solo, a partir da análise dos gráficos gerados por cada combinação, e de coeficientes estatísticos obtidos a partir da comparação dos dados simulados com os dados experimentais, a saber: coeficiente de variação (Chu et al., 1986), erro médio percentual (Chong et al., 1982) e coeficiente de correlação de Pearson (Crespo, 1999); entretanto, devido ao fato dos coeficientes estatísticos serem calculados utilizando-se a média dos erros totais ou das variações totais, estes não apresentaram resultados satisfatórios quando comparados com os resultados da análise visual do ajuste das curvas aos dados experimentais, determinante na escolha das combinações que melhor simularam o processo de infiltração.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como a visualização de todas as curvas simuladas de infiltração acumulada, da taxa de infiltração e da profundidade da frente de umedecimento, para cada uma das 18 combinações de proposições de correção dos parâmetros de entrada do modelo de Green-Ampt, é muito difícil, são apresentadas no trabalho apenas as curvas que melhor se ajustaram aos dados experimentais. Deste modo, as combinações que melhor simularam a infiltração de água no solo são vistas na Tabela 3.

Tabela 3. Combinações entre proposições que melhor simularam a infiltração de água no solo

Combinações	K_w	ψ
1	0,5 K_0	$\psi(\theta_i)$
2	K_0	$\psi(\text{textura})$
3	T_{ic}	$\psi(\text{textura})$
4	T_{ic}	média entre $\psi(\theta_w)$ e $\psi(\theta_i)$

Na seqüência, tem-se os valores experimentais e as curvas simuladas da variação da taxa de infiltração (Figura 3), da infiltração acumulada (Figura 4) e da profundidade da frente de umedecimento (Figura 5) ao longo do tempo, considerando-se apenas as combinações selecionadas como mais representativas do processo. Em todas as figuras também são apresentadas as curvas representativas dos valores simulados pela equação de Green-Ampt, sem as modificações nos valores de K_0 e ψ .

Verifica-se, na Figura 3, que os valores simulados de Ti para os primeiros minutos do processo foram superestimados por todas as proposições, sendo que a combinação 3 foi a que apresentou menor superestimativa; entretanto, esta combina-

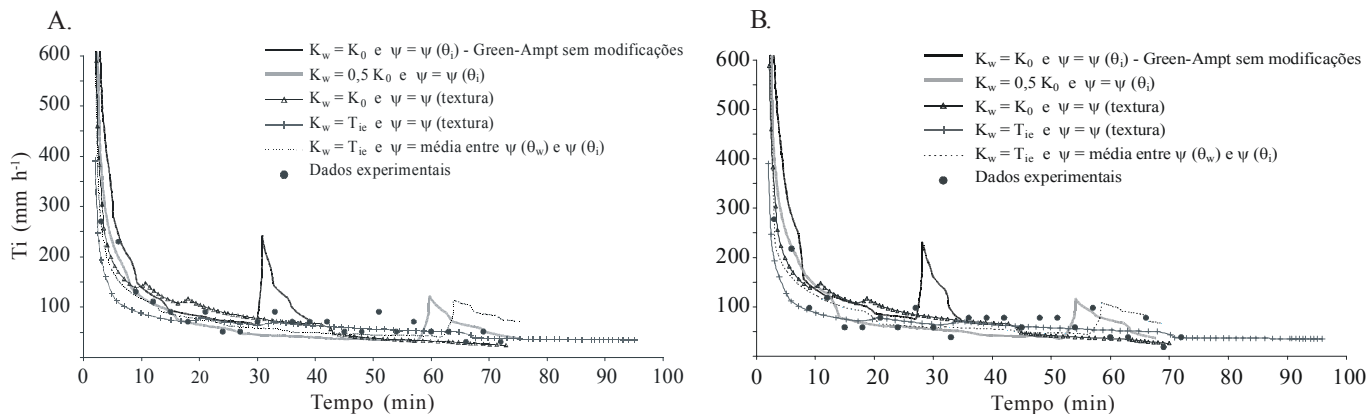


Figura 3. Taxas de infiltra\u00e7\u00e3o obtidas experimentalmente e simuladas para o primeiro (A) e segundo (B) testes experimentais

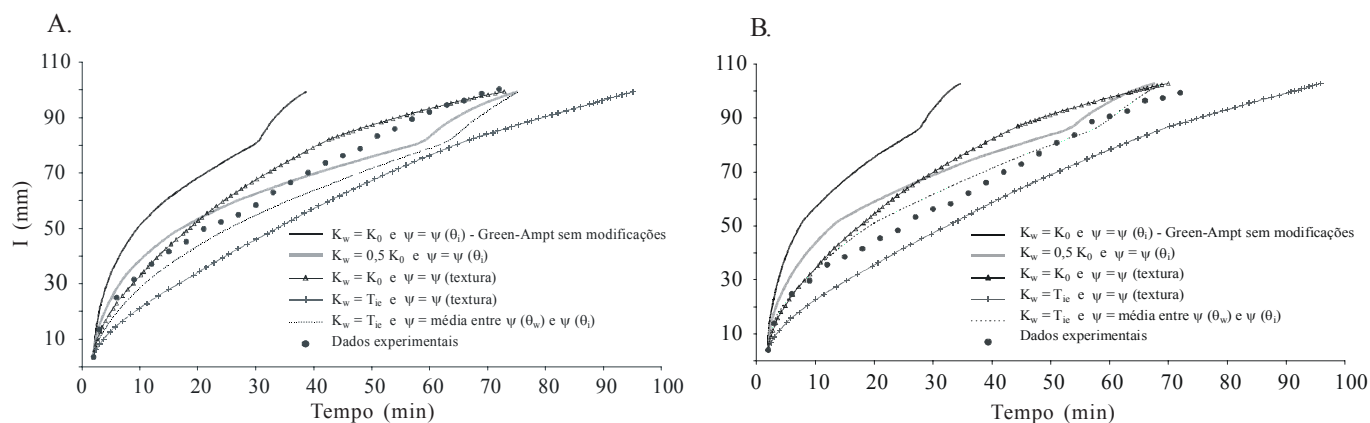


Figura 4. Infiltra\u00e7\u00e3o acumulada obtida experimentalmente e simulada para o primeiro (A) e segundo (B) testes experimentais

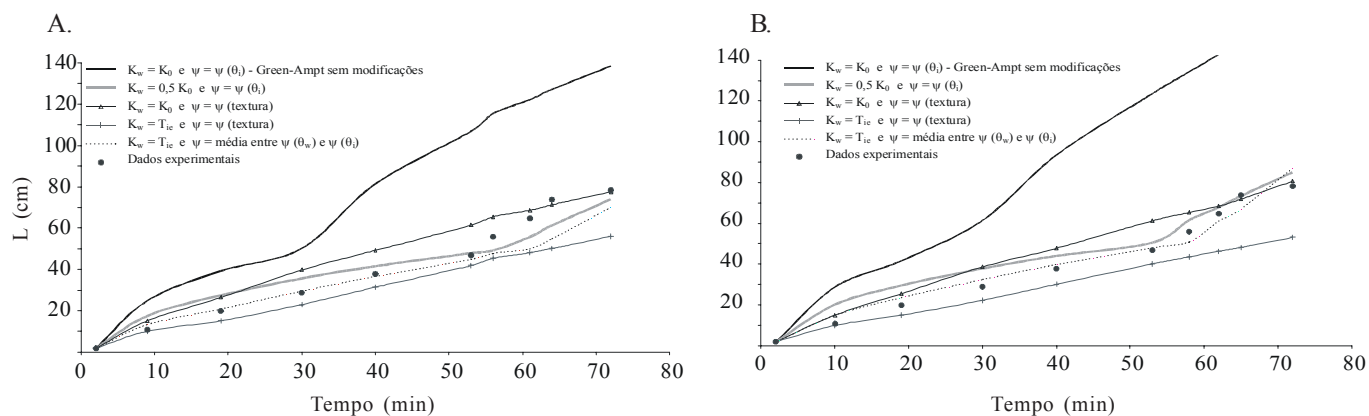


Figura 5. Profundidade da frente de umedecimento obtida experimentalmente e simulada para o primeiro (A) e segundo (B) testes experimentais

\u00e7\u00e3o simulou um tempo de dura\u00e7\u00e3o do teste maior que o real. As combina\u00e7\u00f5es 1 e 4 superestimaram um pouco a taxa de infiltra\u00e7\u00e3o, quando da entrada da frente de umedecimento no horizonte C, sendo que o mesmo n\u00e3o ocorreu para as combina\u00e7\u00f5es 2 e 3, pois o valor de ψ foi calculado com base na textura do solo, e n\u00e3o na umidade inicial. A combina\u00e7\u00e3o 1, comparativamente \u00e0 4, simulou melhor os valores de T_i quando da entrada da frente de umedecimento no horizonte C; entretanto, subestimou os valores de T_i no horizonte B, valores estes que s\u00e3o melhor simulados pela combina\u00e7\u00e3o 4. Ainda com rela\u00e7\u00e3o \u00e0s combina\u00e7\u00f5es 1 e 4, que consideram o valor de θ_i no c\u00e1lculo de ψ , percebe-se, no final do processo, a ocorr\u00eancia de

um pico da taxa de infiltra\u00e7\u00e3o, o que se deve \u00e0 passagem da frente de umedecimento do estrato de solo pertencente ao horizonte B para o estrato de solo pertencente ao horizonte C pois, para uma mesma umidade, o potencial matricial do solo do horizonte C \u00e9 muito maior que o potencial matricial do solo do horizonte B.

Analisando-se a infiltra\u00e7\u00e3o acumulada (Figura 4), percebe-se que a combina\u00e7\u00e3o 2 acaba por superestimar o seu valor ao longo de praticamente todo o processo de infiltra\u00e7\u00e3o da \u00e1gua no solo, com exce\u00e7\u00e3o dos minutos iniciais; ao contr\u00e1rio da combina\u00e7\u00e3o 2, a combina\u00e7\u00e3o 3 subestimou esses valores ao longo do processo. De modo geral, as combina\u00e7\u00f5es simularam

bem a infiltração acumulada ao longo do tempo, com destaque para as combinações 1 e 4, mostrando que considerando-se a umidade inicial no cálculo de ψ constatar-se-á um ajuste melhor da curva aos dados experimentais, pois as combinações 2 e 3 não levam em conta o valor de θ_i no cálculo de ψ .

Com relação à profundidade da frente de umedecimento (Figura 5), percebe-se que a combinação 3 sempre subestima esta profundidade, enquanto a combinação 2 superestima a maior parte dos valores deste parâmetro. Mais uma vez o destaque fica por conta das mesmas combinações que se sobressairam na simulação de T_i e I , isto é, as combinações 1 e 4.

O potencial matricial (ψ) relativo a θ_i associado ao uso de K_w como sendo $0,5 K_0$ simulou bem a infiltração de água no solo. A proposição de que o valor de ψ fosse calculado pela média dos potenciais matriciais relativos a θ_i e θ_w , associado a T_{ic} do solo, também se apresentou como boa proposição para representar o processo de infiltração.

A utilização da T_{ic} como o valor da condutividade hidráulica foge à física do processo de infiltração em solos estratificados, pois esta só se estabelece algum tempo após a entrada da frente de umedecimento no horizonte C; entretanto, esta solução pode ser considerada um simplificador muito grande da equação de Green-Ampt para solos estratificados, visto que dispensa a determinação da condutividade hidráulica de cada estrato ou horizonte do solo, justamente um dos pontos onde ocorre a maior dificuldade da aplicação desta equação. A utilização de K_w igual a $0,5 K_0$, conforme indicação de Bouwer (1969), se encaixa mais na física do processo de infiltração descrito por Green-Ampt, sendo uma solução um pouco mais trabalhosa devido à necessidade da determinação de K_0 para todos os estratos.

A utilização da Eq. 5 (Rawls & Brakensiek, citados por Rawls et al., 1996), no cálculo de ψ , também facilita a utilização da equação de Green-Ampt para solos estratificados, de vez que dispensa o conhecimento da curva de retenção de água no solo, fazendo-se necessário apenas o conhecimento da textura e da porosidade do solo, que são parâmetros mais fáceis de serem obtidos; percebe-se, porém, que uma simulação melhor do processo é obtida quando se considera o valor da umidade inicial do solo no cálculo de ψ , o que não ocorre com o uso da equação de Rawls & Brakensiek.

CONCLUSÕES

1. A equação de Green-Ampt, sem modificações nos seus parâmetros de entrada, não descreveu satisfatoriamente o processo de infiltração de água no solo quando aplicada no Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado estudado.

2. As combinações entre proposições de adequação dos parâmetros de entrada da equação de Green-Ampt que melhor simularam a infiltração da água no solo, foram: K_w igual a $0,5 K_0$ associado a ψ determinado com base na umidade inicial do solo ($\psi(\theta_i)$); K_w igual à taxa de infiltração estável (T_{ic}) associado a ψ igual à média entre $\psi(\theta_i)$ e ψ relativo à umidade de saturação de campo ($\psi(\theta_w)$); K_w igual a K_0 associado a ψ calculado com base na textura e porosidade do solo ($\psi(\text{textura})$) e K_w igual a T_{ic} associado a $\psi(\text{textura})$.

LITERATURA CITADA

- Bouwer, H. Infiltration of water into nonuniform soil. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, v.95, n.4, p.451-462, 1969.
- Brakensiek, D.L. Estimating the effective capillary pressure in the Green and Ampt infiltration equation. Water Resources Research, Washington, v.13, n.3, p.680-682, 1977.
- Brakensiek, D.L.; Onstad, C.A. Parameter estimation of the Green and Ampt infiltration equation. Water Resources Research, Washington, v.13, n.6, p.1009-1012, 1977.
- Brooks, R.H.; Corey, A.T. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper N° - , Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1964. 27p.
- Cecílio, R.A. Aplicação da Equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado. Viçosa: UFV, 2002. 119p. Dissertação Mestrado
- Chong, S.K., Green, R.E., Ahuja, L.R. Infiltration prediction based on estimation of Green-Ampt wetting front pressure head from measurements of soil water redistribution. Soil Science Society of America Journal, Madison, n.46, p.235-239, 1982.
- Chu, S.T.; Onstad, C.A.; Rawls, W.J. Field evaluation of layered Green-Ampt model for transient crust conditions. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.29, n.5, p.1268-1272, 1986.
- Crespo, A.A. Estatística fácil. 17 ed., São Paulo, SP: Ed. Saraiva 1999.
- Green, W.H.; Ampt, G.A. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Science, Cambridge, v.4, n.1, p.1-24, 1911.
- Hachum, A.Y.; Alfaro, J.F. Rain infiltration into layered soils: prediction. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.106, n.4, p.311-319, 1980.
- Onstad, C.A.; Olson, T.C.; Stone, L.R. An infiltration model tested with monolith moisture measurements. Soil Science, Baltimore, v.116, n.1, p.13-17, 1973.
- Pereira, S. Tecnologia da reflectometria no domínio do tempo para a medição da umidade do solo. Viçosa: UFV, 2001. 86p. Dissertação Mestrado
- Rawls, W.J.; David, G.; van Mullen, J.A.; Ward, T.J. Infiltration. In: ASCE. Hydrology Handbook. 2.ed. New York. (ASCE Manuals and Report on Engineering Practice, 28), 1996. p.75-124
- Rodrigues, L.N. Modelo para dimensionamento e para simulação do desempenho de pivô central. Viçosa, MG: UFV, 1999. 145p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- Rodrigues, L.N., Pruski, F.F. Otimização do desempenho de sistemas de irrigação do tipo pivô central com o uso da equação de Green-Ampt. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 26, 1997, Campina Grande. Resumos... Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997. CD-Rom

- Silva, C.L.; Kato, E. Avaliação de modelos para previsão da infiltração de água em solos sob cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.33, n.7, 1998.
- Skaggs, R.W.; Khaleel, R. Infiltration. In: Haan, C.T.; Johnson, H.P.; Brakensiek, D.L. *Hydrologic modeling of small watersheds*. ASAE Monograph n°5, St. Joseph, Michigan, 1982. p. 121-166.
- Slack, D.C. Modeling infiltration under moving sprinkler irrigation systems. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.23, n.3, p.596-600, 1980.
- Zirbel, M.L.; Larson, C.L.; Slack, D.C. Laboratory method for evaluation Green-Ampt infiltration parameters. St. Joseph, ASAE, 1982. 12p. (ASAE Paper 82-2033).