

AVALIAÇÃO DE MODELOS PARA PREVISÃO DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS SOB CERRADO¹

CÍCERO LOPES DA SILVA² e EIYTIKATO³

RESUMO - Os objetivos deste trabalho foram testar sob condições de solo nu e com cobertura vegetal morta o modelo de GAML, e apresentar a idéia de velocidade de infiltração básica variável em função da energia cinética das chuvas, a ser aplicada no modelo original de Green-Ampt no caso de solo nu. Usaram-se dez infiltrômetros e um simulador de chuvas, instalados em Latossolo Vermelho-Amarelo da Fazenda Água Limpa, Distrito Federal. Comparando os resultados encontrados nos testes de campo com os simulados, verificou-se que o modelo GAML simulou bem os valores de velocidade de infiltração e de infiltração acumulada nos infiltrômetros com cobertura vegetal, porém na condição de solo nu as simulações foram prejudicadas. Verificou-se também que em condições de solo nu a proposta de adotar a velocidade de infiltração básica variável em função do selamento superficial melhorou a performance do modelo de Green-Ampt, em comparação com o modelo GAML na previsão da infiltração de água.

Termos para indexação: energia cinética das chuvas, selamento superficial, velocidade de infiltração básica variável, Green-Ampt, GAML, cobertura vegetal morta.

EVALUATION OF MODELS FOR THE PREVISION OF WATER INFILTRATION IN THE SOIL UNDER SAVANNA

ABSTRACT - The objective of this work was to evaluate, in bare savanna soil, the Green-Ampt infiltration model, a proposal of variable saturated hydraulic due to superficial sealing. The Green-Ampt modified by Mein & Larson (GAML) was also tested on bare soil and with dead vegetation cover. Ten infiltrometers and a rain simulator, installed in a Red-Yellow Latosol on the Fazenda Água Limpa, Federal District, were used. Comparing the results, the GAML model simulated well the rate infiltration and accumulated infiltration values in the infiltrometers with dead vegetation cover but with naked soil the simulations were prejudiced. With naked soil, using the proposal to adopt the variable saturated hydraulic conductivity due to superficial sealing, the Green-Ampt model had a better performance compared with the GAML model in the prevision of water infiltration.

Index terms: rain kinetic energy, superficial sealing, variable saturated hydraulic conductivity, Green-Ampt, GAML dead vegetation cover.

INTRODUÇÃO

Infiltração é o processo pelo qual a água penetra no perfil do solo. Inicialmente, seu valor é elevado, diminuindo com o tempo, até se tornar constante a partir do momento em que o solo fica saturado. Nessa condição, a infiltração continua, porém a uma taxa

constante denominada velocidade de infiltração básica.

A infiltração depende de muitos fatores, entre os quais se destacam a textura e a estrutura dos solos, a cobertura vegetal e a umidade inicial.

Entre os diversos parâmetros componentes do ciclo hidrológico, pode-se afirmar que a infiltração é dos mais importantes pois, junto com a precipitação, determina a quantidade de água que fica disponível para as plantas, o escoamento superficial e o abastecimento dos lençóis freáticos.

Melhorar as condições de infiltração de uma bacia hidrográfica resulta no aumento do escoamento básico e na diminuição das enchentes de seus cur-

¹ Aceito para publicação em 12 de maio de 1998.

² Eng. Agríc., Dr., Fac. de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília (UnB), Caixa Postal 04508, CEP 70910-970 Brasília, DF. E-mail: cicero@guarany.cpd.unb.br

³ Eng. Agr., M.Sc., Dep. Engenharia Agrônômica, UnB.

sos d'água. O preparo do solo para a agricultura e os tratamentos culturais provocam a compactação, diminuindo a macroporosidade dos solos e, conseqüentemente, a capacidade de infiltração. O contrário, entretanto, é verificado quando o solo permanece com cobertura vegetal, pois dificulta o escoamento e, em decorrência, facilita a infiltração.

Existem diversos modelos que podem ser usados para descrever o processo de infiltração de água no solo. Fisicamente um dos mais bem fundamentados, segundo a literatura especializada, é o modelo de Richard's; porém neste o fluxo de água no perfil do solo é regido principalmente pelo gradiente de potencial matricial (ψ), com relação à profundidade do solo (Z). Sabe-se que ψ é uma função da umidade (θ) e que essa função, pelo fenômeno da histerese, não é unívoca, dificultando, portanto, o seu uso em estudos hidrológicos.

Um exemplo de modelo embasado fisicamente e na suposição de que o solo assemelha-se a um feixe de microtubos, é o de Green-Ampt, o qual fornece a velocidade de infiltração instantânea em função de parâmetros físicos do solo e do total infiltrado. Mein & Larson (1973) integraram a equação proposta por Green-Ampt, nos limites de integração próprios, conforme a duração da chuva. A partir desta data, o modelo de Green-Ampt passou a ser conhecido na literatura como modelo de Green-Ampt modificado por Mein & Larson (GAML), o qual fornece o total infiltrado, de acordo com a intensidade das chuvas e sua duração. Na década passada, numerosos pesquisadores o usaram em seus estudos, destacando os trabalhos de Idike et al. (1980), Slack (1980), Wilson et al. (1982), Ramos (1986) e, mais recentemente, Silva et al. (1994).

Um fator que contribui para diminuir a capacidade de infiltração de água no solo é o selamento superficial. McIntyre (1958) e Edwards & Larson (1969), após estudos com amostras desestruturadas submetidas à chuva simulada, detectaram significantes decréscimos na velocidade de infiltração básica. Jennings et al. (1988) em experiência semelhante, verificaram que a condutividade hidráulica saturada (K_o) reduziu-se a 10% do seu valor original, quando amostras de solo foram submetidas à chuva artificial de 436 J/m² de energia de chuva acumulada. Silva & Kato (1997), estudando amostras indeformadas de

solos sob cerrado, verificaram que a K_o reduziu-se a 17% do valor original, quando tais amostras foram submetidas à chuva artificial de 915 J/m² de energia acumulada.

Eliminar os efeitos nocivos que a agricultura e as intempéries naturais provocam nos solos é praticamente impossível, porém cabe aos técnicos e pesquisadores da área quantificá-los, para adequadamente minimizá-los. No caso específico da infiltração, algumas tentativas de incluir o efeito do selamento superficial nos modelos usados para sua previsão foram feitas, entre outros, por Moore (1981), Reichert et al. (1988) e Chaves et al. (1993). Esses estudos diferem entre si quanto ao modelo usado e o tipo de solo em que foram testados. Concluíram que a inclusão do efeito do selamento superficial nos modelos usados na previsão da infiltração melhoram a sua performance.

A literatura destaca a aplicação dos modelos de Green-Ampt e GAML, na previsão da infiltração em outros tipos de solos, porém nota-se a ausência de aplicação desses modelos em solos sob cerrados. Assim, os objetivos deste trabalho foram testar sob condições de solo nu e com cobertura vegetal morta o modelo de GAML, e apresentar a idéia de velocidade de infiltração básica variável em função da energia cinética das chuvas, a ser aplicada no modelo original de Green-Ampt no caso de solo nu.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Fazenda Água Limpa, da Universidade de Brasília, Distrito Federal. O solo usado foi um Latossolo Vermelho-Amarelo, textura argilosa, profundo, cuja cobertura original era a vegetação tipo cerrado, localizado no terço médio da rampa.

Para provocar chuvas artificiais, usou-se um simulador de chuvas cuja descrição hidráulica encontra-se em Kato (1995). Para medir a infiltração básica de água no solo, utilizaram-se 10 infiltrômetros de dimensões 2 m x 1 m. A altura desses infiltrômetros é de 0,25 m e foram inseridos no solo a uma profundidade de 12 cm. A Fig. 1 ilustra o esquema experimental utilizado. A orientação dos infiltrômetros objetivou manter sua maior dimensão perpendicular às curvas de nível. Um tubo de PVC de 32 mm inserido na parte mais baixa dos infiltrômetros conduzia o escoamento superficial aos coletores próprios.

Antes de inserir os infiltrômetros no solo, fez-se uma subsolagem na área para quebrar uma camada compactada que existia aos 25 cm de profundidade. As declividades dentro dos infiltrômetros foram de mais ou menos 5% no sentido longitudinal e 3% no sentido transversal, com as cotas dentro do infiltrômetro crescendo do centro para as extremidades, dando a impressão final de um pequeno vale de topografia suave e uniforme. Essa declividade transversal foi feita com ferramentas manuais (ancinho e enxada).

Antes de determinar a velocidade de infiltração básica do solo (f_0) procedeu-se uma chuva artificial de duas horas a uma intensidade média de 92 mm/h, cujo objetivo foi promover a saturação do solo, que já estava bastante úmido em virtude das chuvas abundantes ocorridas antes da realização do teste.

O controle do total precipitado em cada infiltrômetro foi feito por meio de quatro pluviômetros colocados próximos aos vértices de cada infiltrômetro. A lâmina de água infiltrada correspondeu ao total precipitado menos o total escoado. A duração do teste para determinar a f_0 foi de 30 minutos. Para sua realização cobriram-se todos os 10 infiltrômetros com cobertura vegetal morta, como forma de proteger o solo do selamento superficial.

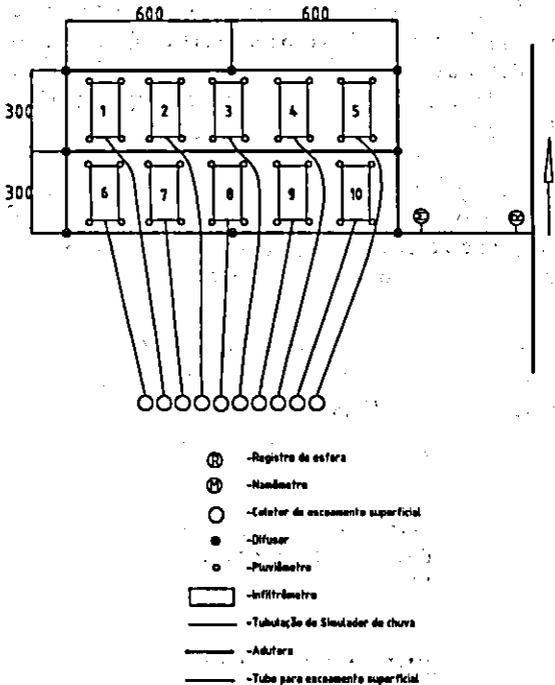


FIG. 1. Esquema experimental utilizado, destacando a posição dos infiltrômetros e coletores de escoamento superficial.

Um segundo teste foi realizado com o objetivo de detectar o efeito do selamento superficial na velocidade de infiltração (f) e no total infiltrado (I). Para tal, retirou-se a cobertura vegetal morta de cinco infiltrômetros, escolhidos aleatoriamente, para a comparação entre os solos com e sem cobertura. Este teste diferiu-se do primeiro, pois determinou-se a velocidade de infiltração em cada intervalo de tempo, além da precipitação e o escoamento simultâneo. Constatou-se também que a intensidade de precipitação (I_p) durante o teste, em cada infiltrômetro, foi próxima de uma constante e assim foi considerada.

Este trabalho teve como base teórica o modelo de infiltração de Green-Ampt, em sua forma original de 1911, que de acordo com Mein & Larson (1973) é dado por:

$$f = f_0 [1 + (Sm DU / I)] \tag{1}$$

em que:

- f = velocidade de infiltração instantânea, em mm/h;
- Sm = sucção média na frente de molhamento, em mm;
- DU = déficit de umidade, em mm³ de água por mm³ de solo.

Entende-se como sucção média o valor absoluto do potencial matricial médio na frente de molhamento. DU é a diferença entre a umidade de saturação (θ_s) e a umidade antes da realização do teste (θ_a).

Fazendo f igual a dI/dT , na eq. 1 e integrando-a com relação ao tempo (T), nos intervalos T e T_s , sendo T_s o tempo necessário para a completa saturação da superfície do solo, tem-se, segundo Mein & Larson (1973), a expressão:

$$f_0 (T - T_s) = I - Sm DU \ln [(I + Sm DU) / (Sm DU)] \tag{2}$$

A lâmina infiltrada necessária à completa saturação da superfície do solo é dada pela expressão:

$$F_s = \frac{Sm DU}{I_p / f_0 - 1} \tag{3}$$

em que:

- F_s = lâmina infiltrada correspondente à completa saturação da camada superficial do solo, em mm; e

$$T_s = \frac{F_s}{I_p} \tag{4}$$

em que:

- T_s = tempo necessário para saturação da camada superficial do solo, em minutos.

Segundo ainda os mesmos autores, a eq. 2 descreve a infiltração acumulada (I) na condição de $I_p > f_0$, depois da completa saturação da superfície do solo, isto é, em $T > T_s$. Introduziram também o parâmetro Tk na eq. 2, a qual passou a ter a seguinte apresentação:

$$f_0 (T - T_s + Tk) = I - Sm DU \ln [(I + Sm DU) / (Sm DU)] \tag{5}$$

em que:

T_k é o tempo necessário para infiltrar a lâmina F_s sob condições de saturação da camada superficial do solo, em minutos.

T_k foi calculado pela eq. 2, substituindo $(T-T_s)$ por T_k e I por F_s .

Neste trabalho usaram-se, no solo com cobertura, a eq. 5 para calcular I e a eq. 1 para calcular f respectivamente na condição $I_p > f_0$ e $T > T_s$. Nas condições de $I_p \leq f_0$ e $I_p > f_0$, porém com $T \leq T_s$, usaram-se as equações:

$$f = I_p \quad (6)$$

e

$$I = I_p T. \quad (7)$$

O intervalo de tempo (ΔT) em horas, foi dado pela divisão da duração da chuva pelo número de intervalos usados, que no presente trabalho foi de 20. O tempo T foi calculado mediante o acúmulo dos diversos ΔT .

O conjunto das eqs. 2, 3, 4 e 5 constitui na modificação proposta por Mein & Larson ao modelo original de Green-Ampt, sendo a solução da eq. 5 quando a incógnita é I possível somente por métodos numéricos; para tal, usou-se o processo iterativo de Newton-Raphson.

Na condição do solo nu, primeiramente apresentou-se o conceito de velocidade de infiltração básica variável em função da energia cinética das chuvas, usando-se a equação:

$$f_0^* = f_0 (1 + B EC) \quad (8)$$

em que:

f_0^* = velocidade de infiltração básica variável, em mm/h, influenciada pelo selamento superficial;

B = parâmetro de redução de f_0 em função do selamento superficial em mm/h/J/m^2 ; e

EC = energia cinética das chuvas, em J/m^2 .

O cálculo de EC foi feito por meio da equação de Wismeier e Smith, de 1958, a qual foi adaptada ao sistema métrico por Bertoni & Lombardi Neto (1990).

A velocidade de infiltração instantânea f também foi calculada pela eq. 1, substituindo f_0 por f_0^* , com a condição de contorno dada pela eq. 6 nas situações em que a eq. 1 permitia um $f > I_p$.

As porções de água infiltrada (ΔI) foram calculadas mediante a equação:

$$\Delta I = f \Delta T. \quad (9)$$

A infiltração acumulada (I) foi calculada pela equação:

$$I_{i+1} = I_i + \Delta I_i \quad (10)$$

em que i corresponde à ordem cronológica. Ao mesmo tempo que se calculava I_{i+1} , calculava-se também o próximo f .

O primeiro ΔI , foi considerado igual ao total precipitado nesse intervalo de tempo. Em seguida, calculava-se o primeiro valor de f , observando a condição de contorno dada pela eq. 6 nos casos em que f ficava maior que I_p .

A razão de se usar o modelo de Green-Ampt nas condições de solo nu e velocidade de infiltração básica variável em função de EC , é porque f_0^* é função de f_0 e EC , EC é função, entre outros parâmetros, de T , implicando f_0^* ser função também de T . Ao substituir f_0 por f_0^* na eq. 1, tornaria a integral dessa equação muito complexa, justificando nesse caso o uso do modelo de Green-Ampt em sua forma original.

Para a solução das equações 1 a 10, desenvolveu-se um programa de computador.

O parâmetro Sm foi calculado segundo as sugestões de Idike et al. (1980) e Slack (1980), pela equação:

$$Sm = \int_{0,01}^{1,0} \sigma dKr \quad (11)$$

em que:

σ = tensão da água no solo, para uma determinada umidade (θ), em mm; e

Kr = condutividade hidráulica relativa, adimensional.

A condutividade hidráulica relativa é a relação entre a condutividade hidráulica não saturada ($K(\theta)$), isto é, função de θ , e a condutividade hidráulica saturada (K_0) ou f_0 . Para calcular $K(\theta)$ usou-se a equação de Campbell (1974), dada por:

$$K(\theta) = K_0 \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad (12)$$

em que b é o expoente da equação característica do solo, a qual correlaciona σ com θ e pode ser expressa por:

$$\sigma = A \theta^{-b} \quad (13)$$

em que A é o intercepto da eq. 14 quando esta for linearizada.

Como Kr é a relação entre $K(\theta)$ e K_0 , conclui-se que pode-se expressar Kr por:

$$Kr = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad (14)$$

A solução da eq. 11 foi por aproximação numérica, a qual fez uso dos resultados encontrados na solução das eqs. 12, 13 e 14.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores da velocidade de infiltração básica (f_0) ou condutividade hidráulica saturada (K_0) encontrados no solo estudado e a intensidade de precipi-

tação (I_p) usada nas diversas simulações estão apresentados na Tabela 1. Verifica-se que I_p não é exatamente a mesma de quando realizou-se a determinação de f_o , provavelmente em razão do efeito diferenciado do vento, que nunca tem o efeito dominante em uma única direção.

A curva característica do solo estudado foi determinada por Kato (1995), e no presente trabalho foi expressa pela eq. 13, com os valores de A e b iguais a 0,12 e 9,46, respectivamente. De posse desses dados e outros, calculou-se o parâmetro S_m , encontrando um valor de 25,9 mm, conforme ilustra a Tabela 2.

De acordo com Kato (1995), a porosidade total do solo estudado é de $0,60 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$, e considerando a umidade no momento da realização do segundo teste, pode-se calcular o déficit de umidade (DU), conforme mostra a Tabela 3. Nos infiltrômetros desprovidos de cobertura vegetal (os de números 1, 2, 4, 5 e 8) foi simulada a velocidade de infiltração pelos

modelos GAML e de Green-Ampt, usando-se no modelo de Green-Ampt f_o^* no lugar de f_o . Tomando os valores da velocidade de infiltração final (f_f) observada, isto é, no momento de encerramento do segundo teste ($T=72$ minutos), verificam-se os erros relativos simulados pelos dois modelos em comparação com os valores observados, conforme mostra a Tabela 4. Observa-se que o modelo de Green-Ampt com a modificação proposta teve um desempenho superior ao de GAML, com desvios médios de 3,3% no de Green-Ampt e de 26,9% no de GAML, sendo os desvios máximos de -6,4% e 80,2%, respectivamente. Detectou-se também, quanto aos infiltrômetros, diferença estatística significativa a 5% de probabilidade pelo teste t entre os valores de velocidade de infiltração final observados e os simulados pelo modelo GAML.

Para calcular os valores das velocidades de infiltração básica influenciadas pelo selamento super-

TABELA 1. Valores da velocidade de infiltração básica (f_o) do Latossolo Vermelho-Amarelo para o solo estudado e intensidade de precipitação (I_p) nas simulações usadas.

Parâmetro	Infiltrômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_o (mm/hora)	71,6	68,4	94,2	70,4	86,8	59,6	72,0	89,4	61,0	95,8
I_p (mm/hora)	67,8	94,3	126,9	113,2	82,4	71,3	105,0	93,0	105,0	121,2

TABELA 2. Exemplificação da aproximação numérica usada no cálculo de S_m , em que j corresponde à ordem, e o somatório da última coluna à $S_m=25,9$ mm.

j	θ (mm^3/mm^3)	σ (mm)	Kr adimensional	$\bar{K}r$ adimensional	$\sigma_j - \sigma_{j-1}$ (mm)	$\bar{K}r(\sigma_j - \sigma_{j-1})$ (mm)
0	0,600	00	1,00	-	-	-
1	0,595	16	0,83	0,920	16	14,7
2	0,590	18	0,69	0,760	2	1,5
3	0,580	21	0,48	0,600	3	1,8
4	0,560	29	0,22	0,350	8	2,8
5	0,540	41	0,10	0,160	12	1,9
6	0,500	85	0,02	0,060	44	2,6
7	0,480	124	0,01	0,015	39	0,6

$S_m = 25,9$

ficial (f_o^*), conforme a eq. 8, foi necessário, primeiramente, determinar os valores dos parâmetros B , fazendo uso das velocidades de infiltração finais observadas (Tabela 4), dos valores de f_o (Tabela 1) e as respectivas EC de cada chuva. Os valores de B foram -7×10^{-5} , $-5,5 \times 10^{-5}$, $-4,2 \times 10^{-5}$, $-3,3 \times 10^{-5}$ e $-14,9 \times 10^{-5}$ mm/h/J/m², nos infiltrômetros 1, 2, 4, 5 e 8, respectivamente.

Pretendia-se, inicialmente, usar, para descrever os valores de f_o^* , uma equação semelhante às propostas por Silva & Kato (1997), ou seja, uma exponencial inversa ou potencial negativa. Mas neste trabalho, observou-se que o efeito do selamento superficial na redução da velocidade de infiltração básica foi muito menor do que aqueles verificados no trabalho anterior. Tal comportamento provavelmente deve-se ao fato de no presente estudo ter-se trabalhado no campo com presença de escoamento superficial nos infiltrômetros, o qual destruiu parcialmente o efeito do selamento superficial, razão de se usar uma equação linear para descrever os valores de f_o^* .

Valores observados da infiltração acumulada (I) e os simulados pelos modelos GAML e Green-Ampt, com a modificação proposta nos infiltrômetros desprovidos de cobertura vegetal, podem ser vistos na Tabela 5. Verifica-se que o modelo de Green-Ampt modificado também teve um desempenho ligeiramente superior ao de GAML, com desvios médios de 3,3% e 8,2%, respectivamente, e desvios máximos de 16% e 26,5%, respectivamente, quando comparado com os valores observados. Porém, nesse caso, não se detectou diferença estatística significativa entre os valores de I observados e os simulados pelos modelos propostos.

Nos infiltrômetros providos de cobertura vegetal (os de número 3, 6, 7, 9 e 10), portanto não sujeitos ao efeito do selamento superficial, só se usou o modelo GAML para simular a velocidade de infiltração final e a infiltração acumulada, cujos resultados podem ser vistos nas Tabelas 6 e 7. Verifica-se que os desvios médios foram de 5,2% e 0,9%, e os desvios máximos de 12,9% e 13,7%, respectivamente, quanto

TABELA 3. Umidade (θ_a), em mm³/mm³, no momento da realização do segundo teste e déficit de umidade (DU), em mm³/mm³, nos diversos infiltrômetros.

Parâmetro	Infiltrômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
θ_a	0,39	0,40	0,38	0,39	0,39	0,39	0,40	0,40	0,38	0,38
DU	0,21	0,20	0,22	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,22	0,22

TABELA 4. Valores observados e simulados pelo modelo GAML e pelo modelo de Green-Ampt da velocidade de infiltração final (f_f), em mm/hora, nos infiltrômetros desprovidos de cobertura vegetal.

Infiltrômetro	Velocidade de infiltração final (mm/hora)			Porcentagem de erro em relação aos valores observados	
	Observado	GAML	Green-Ampt	GAML	Green-Ampt
1	60,7	67,8	64,2	11,7	6,1
2	57,6	71,9	59,5	24,8	3,3
4	58,5	74,1	62,0	26,7	6,0
5	78,0	82,4	82,4	5,6	5,6
8	51,6	93,0	48,3	80,2	-6,4
Média	61,3	77,8	63,3	26,9	3,3

à velocidade de infiltração final e infiltração acumulada. Os resultados não diferem estatisticamente quando comparam-se valores observados e simulados pelo modelo GAML, e os desvios ocorridos são pequenos, o que evidencia a boa performance do modelo na previsão da infiltração de água em solos protegidos do selamento superficial.

Para melhor visualização entre os valores simulados da velocidade de infiltração e da infiltração acumulada, em um solo desprovido de cobertura vegetal, são apresentadas as Figs. 2 e 3, que mostram curvas simuladas pelos modelos GAML e de Green-Ampt com a modificação proposta, e valores observados durante o teste, referentes ao infiltrômetro 2. Na Fig. 2, verifica-se que as curvas das velocidades de infiltração com valores simulados em ambos os modelos ficaram bastante distantes dos pontos observados no campo, causadas principalmente pelos erros nos valores simulados de T_s . Porém, observa-se que a velocidade de infiltração final (f_f) simulada

pelo modelo de Green-Ampt com a modificação proposta ficou bem próxima do valor observado no campo. Na Fig. 3, verifica-se também a superioridade do modelo de Green-Ampt com a modificação proposta na simulação da infiltração acumulada (I). Em relação ao solo provido de cobertura vegetal, as Figs. 4 e 5 ilustram o que ocorreu no infiltrômetro 10, onde plotou-se também os valores observados durante o teste bem como as curvas originárias de dados simulados pelo modelo GAML. Na Fig. 5, verifica-se o bom desempenho do modelo na simulação da infiltração acumulada (I), em solo provido de cobertura vegetal. Nas Figs. 2 e 4, o trecho reto representa a condição de contorno dada pela eq. 6, ou seja, até o momento em que a velocidade de infiltração é igual à intensidade de precipitação.

O modelo de Green-Ampt original de 1911 com a modificação proposta neste trabalho pode ser usado na previsão da infiltração de água na condição de solos com cobertura vegetal; basta fazer $EC = 0$.

TABELA 5. Valores observados e simulados pelos modelos GAML e Green-Ampt para a infiltração acumulada (I), em mm, nos infiltrômetros desprovidos de cobertura vegetal morta.

Infiltrômetro	Infiltração acumulada (mm)			Porcentagem de erro em relação aos valores observados	
	Observado	GAML	Green-Ampt	GAML	Green-Ampt
1	76,4	81,4	80,0	6,5	4,7
2	88,7	100,9	87,4	13,8	-1,5
4	107,5	103,7	90,3	-3,5	-16,0
5	98,4	98,9	98,9	0,5	0,5
8	88,2	111,6	87,6	26,5	-0,7
Média	91,8	99,3	88,8	8,2	-3,3

TABELA 6. Valores observados e simulados pelo modelo GAML da velocidade de infiltração final (f_f), em mm/hora, nos infiltrômetros providos de cobertura vegetal morta.

f_f (mm/hora)	Infiltrômetro					Média
	3	6	7	9	10	
Observado	96,0	56,0	70,8	65,0	93,6	76,3
GAML	98,1	63,2	75,6	64,7	99,7	80,3
Perc. de erro	2,2	12,9	6,8	-0,5	6,5	5,2

TABELA 7. Valores observados e simulados pelo modelo GAML da infiltração acumulada (I), em mm, nos infiltrômetros providos de cobertura vegetal morta.

I (mm)	Infiltrômetro					Média
	3	6	7	9	10	
Observado	131,8	91,6	122,5	91,5	125,5	112,6
GAML	134,5	89,5	105,7	92,0	136,3	111,6
Perc. de erro	2,1	2,3	-13,7	0,5	8,6	-0,9

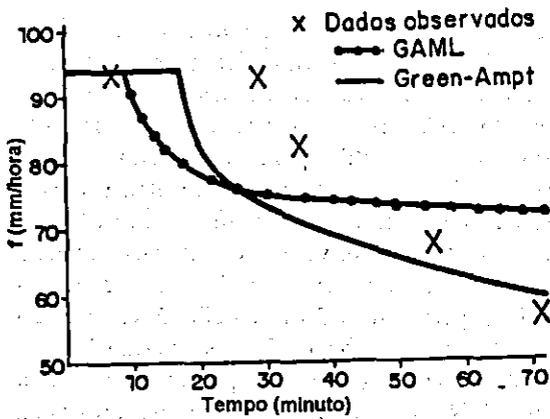


FIG. 2. Valores observados e curvas de velocidade de infiltração (f) simuladas pelos modelos GAML e Green-Ampt, em um solo desprovido de cobertura vegetal, referentes ao infiltrômetro 2.

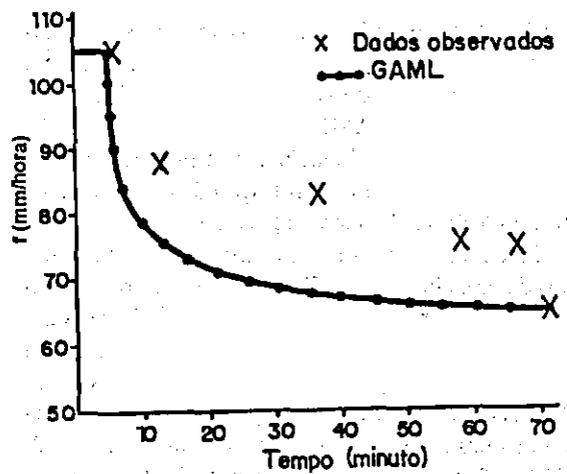


FIG. 4. Valores observados e curva de velocidade de infiltração (f) simulada pelo modelo GAML, em um solo provido de cobertura vegetal morta, referentes ao infiltrômetro 10.

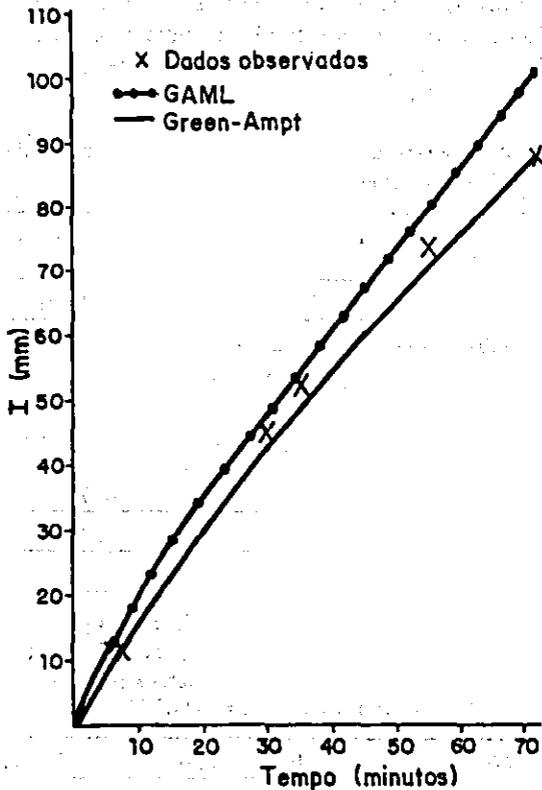


FIG. 3. Valores observados e curvas de infiltração acumulada (I) simuladas pelos modelos GAML e Green-Ampt, em um solo desprovido de cobertura vegetal, referentes ao infiltrômetro 2.

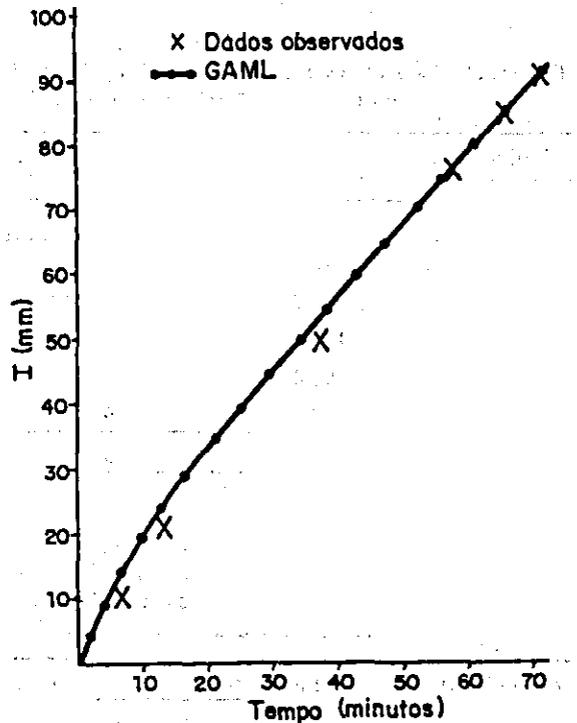


FIG. 5. Valores observados e curva de infiltração acumulada (I) simulada pelo modelo GAML, em um solo provido de cobertura vegetal morta, referentes ao infiltrômetro 10.

Nesta condição, o modelo GAML poderia levar vantagem, pois prevê o momento do início do escoamento superficial (T_s), ou seja, o momento em que f torna-se menor que I_p nas condições de $I_p > f_0$. Mas como pode ser visto na Tabela 8, mesmo na condição de solo com cobertura vegetal morta, os valores de T_s simulados pelo modelo GAML são bastante discrepantes quando comparados com os valores observados.

No modelo de Green-Ampt, mesmo com a modificação proposta, não é possível simular T_s , mas pode-se dizer em qual intervalo de tempo situa-se o valor de T_s , tendo como base a listagem de computador dos valores de f simulados. Por exemplo, no infiltrômetro 2 verificou-se que f torna-se menor que I_p no intervalo de tempo 18,0 a 21,6 minutos.

TABELA 8. Valores observados e simulados pelo modelo GAML do tempo necessário para completa saturação da camada superficial do solo (T_s), nos infiltrômetros providos de cobertura vegetal.

T_s (minuto)	Infiltrômetro					Média
	3	6	7	9	10	
Observado	14,0	17,0	22,0	6,0	10,0	13,8
GAML	7,8	23,4	6,6	4,8	10,2	10,6
Perc. de erro	20,2	-37,6	70,0	20,0	-2,0	23,2

CONCLUSÕES

1. Na condição de solo nu, o modelo de Green-Ampt com a modificação proposta, melhora os valores simulados, tanto em velocidade de infiltração, quanto em infiltração acumulada.

2. O modelo GAML simula bem os valores da velocidade de infiltração e da infiltração acumulada nos infiltrômetros providos de cobertura vegetal morta, porém na condição de solo nu as simulações são apenas razoáveis.

REFERÊNCIAS

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. 3.ed. São Paulo: Icone, 1990. 355p.

CAMPBELL, G.S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, Baltimore, v.117, n.2, p.311-313, 1974.

CHAVES, H.M.L.; ORLOWISK, W.E.; ROLOFF, G. Previsão da infiltração sob condições dinâmicas de selamento superficial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.17, p.141-147, 1993.

EDWARDS, W.M.; LARSON, W.E. Infiltration of water into soils as influenced by surface seal development. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.12, n.4, p.463-465, 1969.

IDIKE, F.I.; LARSON, C.L.; SLACK, D.C.; YOUNG, R.A. Experimental evaluation of two infiltration models. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.23, n.6, p.1428-1432, 1980.

JENNINGS, G.O.; JARRET, A.R.; HOOVER, J.R. Evaluating the effect of puddling on infiltration using the Green and Ampt equation. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.31, n.3, p.761-768, 1988.

KATO, E. *Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da camada superficial de solo sob cerrado, em três condições de manejo*. Brasília: UnB, 1995. 39p. Dissertação de Mestrado.

McINTYRE, D.S. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. *Soil Science*, Baltimore, v.85, n.4, p.185-189, 1958.

MEIN, R.G.; LARSON, C.L. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research Center*, Minnesota, v.9, n.2, p.384-394, 1973.

MOORE, I.D. Infiltration equations modified for surface effects. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, New York, v.107, n.1R1, p.71-86, 1981.

RAMOS, M.M. *Modelagem da demanda de água para planejamento de irrigação suplementar*. São Carlos: USP, 1986. 156p. Tese de Doutorado.

REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.16, p.289-298, 1988.

SILVA, C.L.; RAMOS, M.M.; FERREIRA, P.A.; SEDIYAMA, G.C.; LOUREIRO, B.T. Modelagem da precipitação efetiva na cultura do milho. *Pesqui-*

- sa *Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.29, n.6, p.929-937, 1994.
- SILVA, C.L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.32, n.2, p.213-220, 1997.
- SLACK, D.C. Modeling infiltration under moving sprinkler irrigation systems. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.23, n.4, p.596-600, 1980.
- WILSON, B.N.; SLACK, D.C.; YOUNG, R.A. A comparison of the three infiltration models. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.25, n.2, p.349-356, 1982.