

LUIS TOMÁS AZEVEDO DE MELLO

**AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DOS
PARÂMETROS DO MODELO DE GREEN-AMPT MODIFICADO POR
MEIN E LARSON**

Tese apresentada à **Universidade
Federal de Viçosa**, como parte das
exigências do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Agrícola, para obtenção do
título de “**Magister Scientiae**”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2003

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

M527a
2003

Mello, Luis Tomás Azevedo de, 1976-

Avaliação de metodologias para obtenção dos parâmetros do modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson / Luis Tomás Azevedo de Mello. – Viçosa : UFV, 2003.

77p. : il.

Orientador: Mauro Aparecido Martinez
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa

1. Solos - Umidade. 2. Infiltração. 3. Hidrologia - Modelos. 4. Green-Ampt, Modelo de. 5. Física do solo.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 631.7

CDD 20.ed. 631.7

LUIS TOMÁS AZEVEDO DE MELLO

**AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DOS
PARÂMETROS DO MODELO DE GREEN-AMPT MODIFICADO POR
MEIN E LARSON**

Tese apresentada à **Universidade
Federal de Viçosa**, como parte das
exigências do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Agrícola, para obtenção do
título de “**Magister Scientiae**”.

Aprovada: 11 de agosto de 2003.

Prof. Rubens Alves de Oliveira

Prof. Antônio Teixeira de Matos

Prof. Demetrius David da Silva
(Conselheiro)

Prof. Carlos Ernesto G. Reynaud
Schaefer

Prof. Mauro Aparecido Martinez
(Orientador)

Dedico este trabalho

À Deus.

Aos meus pais Luiz e Ana Régia

Às minhas irmãs Ana Luisa e Regina Helena

Aos meus sobrinhos Luís Gustavo e Ana Beatriz, meu cunhado Gustavo

Aos meus avós

À Sandrine.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus pais Ana Régia e Luiz, minhas irmãs Regina Helena e Ana Luisa, minhas avós Ondina e Sinhazinha, meu cunhado Gustavo, meus sobrinhos Ana Beatriz e Luís Gustavo, tias, tios e primos, pelo amor, apoio e orações.

À Sandrine, pelo amor, confiança e presença ao meu lado nos momentos felizes e difíceis.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao CNPq, pela bolsa de estudo concedida.

Aos professores Mauro Aparecido Martinez, Demetrius David da Silva e Fernando Falco Pruski, pela orientação, amizade, dedicação e confiança demonstrados durante a realização deste trabalho. Ao Roberto, pela experiência passada de seu trabalho anterior.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho: os vários estagiários, Fernando, Glécio, Sadyr, Wendy, Juliana, Leônidas, que foram de grande importância para a condução do experimento, pelo apoio e dedicação; aos funcionários do laboratório Chicão e Sr. Antônio pela ajuda e paciência; Marcelo, pela amizade e ajuda de quando precisei do Laboratório de Mecanização; Lucimar, pela ajuda na parte de laboratório; Gil e Luciano, pela ajuda; Viviane, Guilherme e Herony, pela companhia na condução dos experimentos, conselhos e idéias.

Ao Galinari, Edna, Marcus, José Mauro, e a todos os técnicos e funcionários do DEA.

Adriano, Alessandro, Café, Herony, José Márcio, Flávio, Lineu, Luciano, Luís Gustavo, Márcio, Nori, Ricardo, Sílvio, Viviane, e todo o pessoal do GPRH, pela amizade, convivência e conselhos.

Ao Édison, Fúlvio, Geraldo, Camboin, Raline, José Alberto, Patrícia, Marconi, Gustavo, Guilherme, Marcelo, Chiquinho, Rafael, Dolores, Solon, Paola, Ferreira, “Cristianos”, Dalmarcio, Susana, Felizardo, Édio, Élio, Delfran, Gessoney e a toda a turma do cafezinho da Hidráulica.

Aos companheiros de república: Fião, Sumido, Luiz Gustavo, Givanildo, Jubão, Saci, Manolo, Marco Fábio, Suáio, Carlos, Leozinho e Leandro.

Aos amigos: Juliano, Giovano e Carla, Dudu e Alessandra, Fernando, Christiano, Zé Coco, Inácio, Bindão, Teco, Marcinho, Higino, Cassiano, Valdecir, Gleisson, Mococa, Luizinho, etc.

À turma do futebol e aos Tranqueiras, pelos momentos de descontração.

Aos professores e a todo pessoal do programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho.

BIOGRAFIA

Luis Tomás Azevedo de Mello, filho de Luiz Rocha de Mello e Ana Régia Vilela Azevedo Mello, nasceu em Brasília, DF, em 28 de julho de 1976.

Concluiu o segundo grau em 1994 no Colégio Sigma, em Brasília, DF.

No primeiro semestre de 1995, ingressou na Universidade Federal de Viçosa, tendo concluído o curso de Engenharia Agrícola em março de 2001.

Em abril de 2001, iniciou o curso de mestrado em Engenharia Agrícola, área de Recursos Hídricos, na Universidade Federal de Viçosa.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUÇÃO.....	1
REVISÃO DE LITERATURA.....	4
MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
Preparação das colunas de solo.....	18
Testes de infiltração.....	20
Caracterização físico-hídrica dos solos das colunas.....	24
Simulação do processo de infiltração.....	28
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
Umidade de saturação de campo.....	34
Início do escoamento superficial.....	36
RESUMO E CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
APÊNDICES.....	65
APÊNDICE A.....	66
APÊNDICE B.....	70

RESUMO

MELLO, Luis Tomás Azevedo de, M.S. Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2003. **Avaliação de metodologias para obtenção dos parâmetros do modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson.** Orientador: Mauro Aparecido Martinez. Conselheiros: Demetrius David da Silva e Fernando Falco Pruski.

Os modelos de infiltração embasados em princípios físicos são uma importante ferramenta a ser utilizada na modelagem hidrológica. O modelo de Green-Ampt é uma dessas ferramentas que vem sendo usada em diversas áreas relacionadas ao assunto. Entretanto, a adequação de seus parâmetros a solos brasileiros ainda precisa ser melhor estudada. Este trabalho teve por objetivo avaliar diferentes proposições de determinação dos parâmetros (umidade de saturação, θ_s ; condutividade hidráulica, K e potencial matricial na frente de umedecimento, ψ_f) do modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson (GAML) e sua aplicabilidade a diferentes condições de perfis homogêneo e heterogêneo de solo. O experimento foi conduzido em oito colunas de solo montadas com combinações distintas de horizontes (A, B e C) e massa específica ($1,03 \text{ g/cm}^3$ e $1,23 \text{ g/cm}^3$), sendo seis colunas com perfil homogêneo e duas com perfil estratificado, sob condições de precipitação constante. Determinaram as características físico-hídricas dos solos das colunas necessárias à aplicação do modelo de GAML e, por meio da técnica chamada de “Time Domain Reflectometry” (TDR), foi possível determinar o avanço da frente de umedecimento a partir da qual foram determinadas a infiltração acumulada (I_a) e a taxa de infiltração (T_i). Os valores da umidade na zona de transmissão (θ_w), determinada ao final dos testes de infiltração, variaram de 0,76 a 0,94 da porosidade, dependendo da textura e da

massa específica em questão. Esses valores foram usados como um dos parâmetros de entrada no modelo GAML. Curvas de avanço da frente de umedecimento, de infiltração acumulada e de taxa de infiltração foram simuladas usando o modelo GAML com 36 combinações de proposições para correção de K_w e ψ_f . Os resultados simulados e experimentais foram comparados, usando-se coeficientes estatísticos e análise gráfica. Também foram comparados os tempos correspondentes ao início do escoamento superficial determinados experimentalmente e simulados. Não foi encontrada uma única combinação de proposições que melhor representasse todos os casos. No entanto, o uso da condutividade hidráulica (K_w) sendo igual a taxa de infiltração básica (T_{ib}) e o do potencial matricial (ψ_f) calculado em função da textura e da porosidade do solo, fez com que o modelo GAML simulasse bem o processo de infiltração em solos com perfil de massa específica homogênea. Outra combinação que merece destaque é o uso de K_w igual à condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), determinada pelo método do permeâmetro de carga constante, associado ao potencial matricial (ψ_f) correspondente à umidade na zona de transmissão, que representou muito bem as curvas de infiltração obtidas nas colunas com perfil homogêneo dos horizontes A e B, para as duas condições de compactação. De modo geral, quando os parâmetros de entrada do modelo de GAML são bem determinados, o mesmo pode ser usado para a estimativa do processo de infiltração, em solos homogêneos. Em solos heterogêneos, o modelo foi sensível às variações físico-hídricas do perfil do solo, mas não foi preciso em estimar o tempo de ocorrência das mudanças na taxa de infiltração devido à estratificação do solo.

ABSTRACT

MELLO, Luis Tomás Azevedo de, M.S. Federal University of Viçosa, August, 2003. **Methodologies evaluation for the obtention of parameters of the Green-Ampt model modified by Mein and Larson.** Adviser: Mauro Aparecido Martinez. Committee members: Demetrius David da Silva and Fernando Falco Pruski.

The infiltration models based on physical principles are important tools to be used on the hydrological modeling. The Green-Ampt model is one of these tools that has been being used in different areas related to the subject. However, the adequacy of its parameters to Brazilian soils still needs to be better studied. This work's objective is to evaluate the different propositions of parameters determination (saturation humidity, q_s ; hydraulic conductivity, K and matrix potential before humidification, y_f) of the Green-Ampt model modified by Mein and Larson (GAML) and its applicability to different conditions of homogeneous and heterogeneous soil profiles. The experiment was carried out in eight columns of soil mounted with different horizons combinations (A, B and C) and specific mass (1.03 g/cm^3 and 1.23 g/cm^3), being six of the columns with homogeneous profile and two of them with stratified profile, under constant precipitation conditions. The physical-hydric characteristics of the columns soils needed to the GAML model application were determined, and through the technique called "Time Domain Reflectometry" (TDR), it was possible to determine the advancement of the humidification front from which the accumulated infiltration (I_a) and the infiltration rate (T_i) were determined. The humidity value on the transmission zone (θ_w), determined at the end of the infiltration tests, varied from 0.76 to 0.94 of porosity,

depending on the texture and on the specific mass in question. These values were used as one of the entrance parameters into the GAML model. Advancement curves of the humidification front, of the accumulated infiltration, and of the infiltration rate were simulated using the GAML model with 36 propositions combinations for the correction of K_w and ψ_f . The simulated and experimental results were compared using statistic coefficients and graphic analyses. The times correspondent to the beginning of the superficial drainage experimentally determined and simulated were also compared. A sole combination of proposition that better represented all the cases was not found. However, the use of hydraulic conductivity (K_w) as being equals to the basic infiltration rate (T_{ib}) and to the matrix potential (ψ_f) calculated in relation to the texture and porosity of the soil, made the GAML model simulate well the infiltration process on soils with profile of homogeneous specific mass. Another combination that deserves to be highlighted is the use of K_w equals to the hydraulic conductivity of the saturated soil (K_0), determined by the constant charge permeameter method, associated to the matrix potential (ψ_f) correspondent to the transmission zone humidity, that represented very well the infiltration curves obtained on the columns with homogeneous profile of the A and B horizons, for both compactness conditions. In general, when the entrance parameters of the GAML model are well determined, it can be used for the estimate of the infiltration process in homogenous soils. In heterogeneous soils the model was sensitive to the physical-hydric variations of the soil profile, but it was not necessary to estimate the occurrence time of changes on the infiltration rate due to the soil stratification.

INTRODUÇÃO

Infiltração é o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo e que depende, fundamentalmente, da carga hidráulica disponível na superfície do solo, da textura e estrutura do solo, da massa específica, da condutividade hidráulica e da umidade do solo, quando do início do processo. É de grande importância a prática no estudo hidrológico, na conservação de água e solo e em projetos de irrigação e drenagem, disponibilizando água na zona radicular das culturas e ao abastecimento do lençol freático.

A taxa, na qual a água penetra no solo, é variável e é expressa em termos de lâmina d'água por unidade de tempo. Inicia com taxas altas e progressivamente vai diminuindo até atingir valores constantes. A taxa de infiltração da água no solo é um dos fatores que mais influencia o escoamento superficial, o qual é responsável por processos como a erosão e as inundações que ocorrem, quando da incidência de chuvas intensas (PRUSKI et al., 1997). A estimativa da taxa de infiltração de água no solo é condicionante para determinar a repartição da precipitação em lâmina infiltrada e escoada superficialmente, possibilitando a previsão das vazões de enchente dos cursos d'água.

Devido à complexidade e à grande importância prática da infiltração, diversos autores desenvolveram trabalhos de modelagem desse processo, que podem ser caracterizados como empíricos ou teóricos.

Os modelos empíricos requerem informações simples, porém exigem calibração para cada condição de solo, sendo os mais utilizados o de Kostiakov, Kostiakov modificado, Horton e Holtan.

Por outro lado, os modelos teóricos ou físicos resultam de detalhada descrição física do processo, exigindo parâmetros de entrada relacionados às características do solo. Os modelos de infiltração mais difundidos foram desenvolvidos a partir das equações de Darcy e de Richards, sendo os mais usados os modelos de Philip, desenvolvido a partir da equação de Richards, e de Green-Ampt, desenvolvido a partir da equação de Darcy.

PHILIP (1957) resolveu analiticamente a equação de Richards e propôs como solução uma série do tipo potencial, para a condição de saturação permanente na superfície do solo.

GREEN-AMPT (1911) desenvolveram um modelo, derivado da equação de Darcy, considerando simplificações no processo de propagação da frente de umedecimento no interior do solo. Esse modelo assume que, no início da infiltração, existe uma lâmina de água na superfície, situação tal que ocorre somente após o início do empoçamento de água. MEIN e LARSON (1973) modificaram a equação de Green-Ampt (1911) e obtiveram um novo modelo com o qual se calcula a lâmina infiltrada antes e depois do empoçamento. O modelo representa os dois estágios da infiltração que ocorrem quando a intensidade de precipitação é menor ou maior do que a capacidade de infiltração. Esse modelo ficou conhecido como GREEN-AMPT modificado por MEIN-LARSON (GAML).

A equação de GAML é, hoje, um dos modelos mais utilizados para a simulação da infiltração, porém ela utiliza parâmetros físicos de obtenção complexa como o potencial matricial (ψ), condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) e umidade de saturação (θ_s). Para o desenvolvimento do modelo, os autores idealizaram o processo de infiltração visando simplificar os cálculos. No entanto, esse processo idealizado não acontece na prática, pois a variabilidade das características físicas do solo, tanto espacial quanto temporal, é muito grande, causando distorção do perfil de umedecimento do solo. Por causa disso, vários autores propuseram correções nos parâmetros físicos utilizados na equação.

Apesar da grande aceitação do modelo GAML, pouca pesquisa tem sido feita visando à definição da melhor proposição de determinação de seus parâmetros físicos sob condições de solos brasileiros. Há, também, escassez de trabalhos que utilizam o

modelo em solos estratificados. Em vista deste problema, o presente trabalho teve por objetivos a avaliação de diferentes proposições de determinação dos parâmetros do modelo GAML e sua aplicabilidade a diferentes condições de perfis homogêneo e heterogêneo de solo.

REVISÃO DE LITERATURA

No processo de infiltração, o solo umedece de cima para baixo e, após um determinado período de tempo, a distribuição do conteúdo de água com a profundidade é decrescente. Segundo PREVEDELLO (1996), este processo pode ser caracterizado por quatro zonas: saturada, de transição, de transmissão e de umedecimento (Figura 1).

A zona saturada é normalmente uma fina camada localizada imediatamente abaixo da superfície do solo. A zona de transição é uma região de decréscimo de umidade situada logo abaixo da zona saturada. É uma zona mais estreita que a saturada e ocupa apenas poucos milímetros. Essas duas zonas nem sempre são claramente distinguíveis e ocorrem em razão de variações estruturais na superfície do solo ou por presença de ar ocluso. Abaixo delas ocorre a zona de transmissão, cuja umidade está próxima à da saturação, que é a mais representativa do processo, e cresce continuamente com a ininterrupta aplicação de água na superfície. A zona de umedecimento fica localizada abaixo da zona de transmissão e apresenta grandes variações de umidade, desde a umidade inicial do perfil até o valor da zona anterior. A frente de umedecimento é o limite entre as regiões umedecida e seca do solo é o limite onde o gradiente de pressão é muito grande, principalmente em solos com umidade muito baixa.

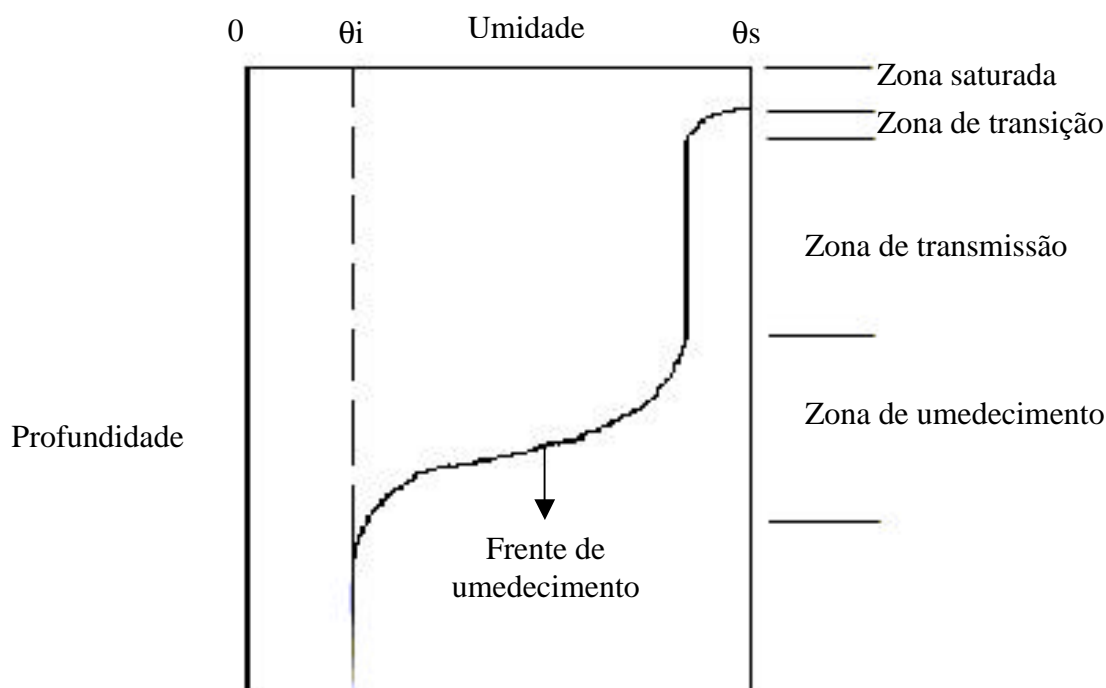


Figura 1 – Esquema representativo do perfil de umidade no solo durante o processo de infiltração

Segundo REICHERT, VEIGA e CABEDA (1992), RAWLS et al. (1996) e BRANDÃO, PRUSKI e SILVA (2002), os fatores que afetam a capacidade infiltração de água estão relacionados às características de solo, tais como textura, tamanho dos agregados, propriedades químicas, condutividade hidráulica, retenção de água no solo e umidade; à superfície, tais como cobertura vegetal, profundidade do sistema radicular, resíduos culturais, atividade biológica, declividade, rugosidade, histórico de uso e manejo; à processos relacionados ao clima, impacto das gotas de chuva, mudança de temperatura e umidade; e às características da água, tais como viscosidade e a presença de carga hidráulica na superfície do solo.

A capacidade de infiltração (CI) é a lâmina de água por unidade de tempo que infiltra no solo enquanto há disponibilidade de água para isso. Em um solo inicialmente seco, a CI é bastante elevada e diminui com a aplicação de água até atingir um valor aproximadamente constante, Tib (Taxa de infiltração básica), que tende à condutividade hidráulica do solo saturado (K_0).

Segundo SILVEIRA, LOUZADA e BELTRAME (2000), ocorrendo uma precipitação com intensidade menor que a CI, toda a água que atingir o solo irá infiltrar-se provocando uma diminuição da CI. A taxa de infiltração (Ti), nesse caso, é controlada pela intensidade de precipitação (i_p). Se a precipitação continuar, haverá um

momento em que a CI igualará à i_p , ocorrendo empocamento e iniciando o escoamento superficial. A partir desse momento, a taxa de infiltração será governada pela CI (Figura 2).

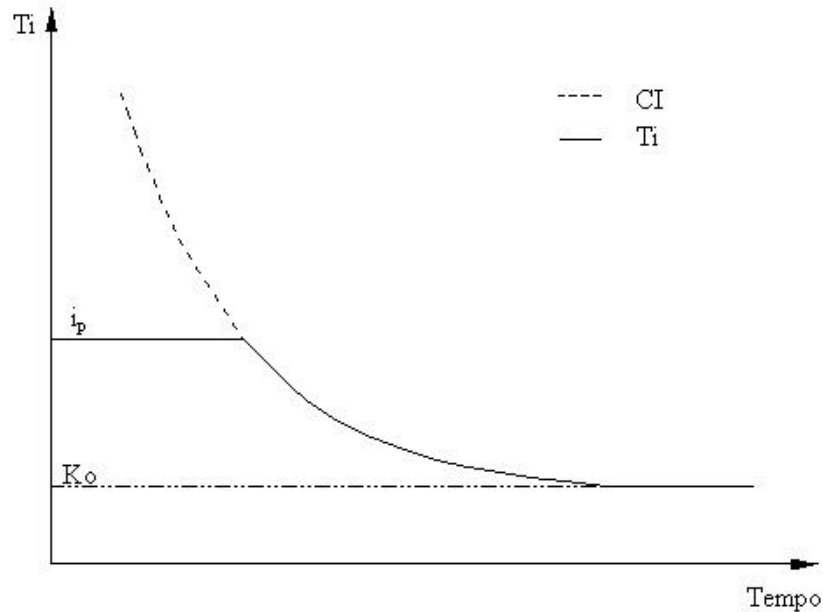


Figura 2 – Curva representativa da taxa de infiltração ao longo do tempo considerando uma intensidade de precipitação constante

A curva da capacidade de infiltração, na fase em que a T_i é menor do que a intensidade de precipitação, tem sido estudada por vários pesquisadores.

Kostiakov, Horton e Holtan, entre outros pesquisadores, desenvolveram modelos empíricos para a predição da infiltração, enquanto que modelos com fundamentação física foram desenvolvidos a partir das equações de Darcy e Richards. Dentre estes, os mais conhecidos são os de Philip, Green-Ampt e Green-Ampt modificado por Mein e Larson.

GREEN-AMPT (1911) desenvolveram um modelo a partir da equação de Darcy, considerando simplificações no processo de propagação da frente de umedecimento no interior do solo. Os autores assumiram as hipóteses de que, já no início do processo de infiltração, existe uma carga hidráulica constante na superfície do solo (H_0) e uma frente de umedecimento bem nítida e precisamente definida, acima da qual o solo se encontra saturado, com condutividade hidráulica K_0 , e que o potencial matricial nesta frente (ψ_f) permanece igual ao valor do potencial matricial antes da infiltração (Figura 3).

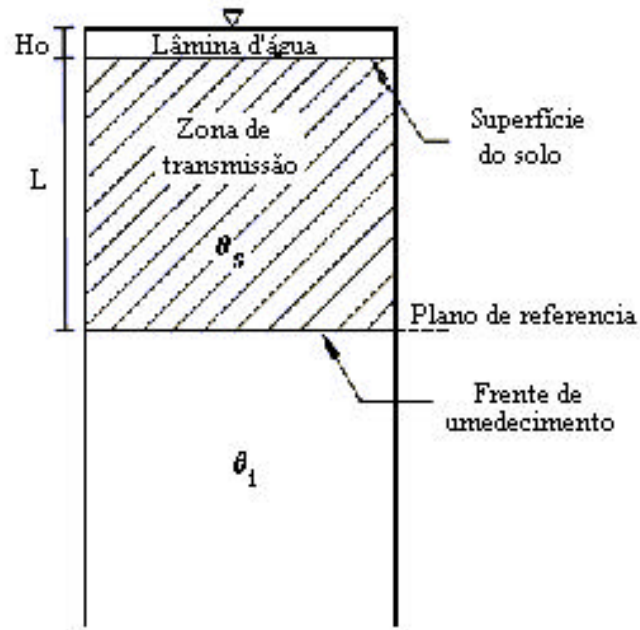


Figura 3 – Esquema representativo das simplificações feitas por Green-Ampt

Aplicando a equação de Darcy entre um ponto situado na superfície do solo e outro na frente de umedecimento e, considerando H_0 muito pequeno quando comparado ao $|\psi_f|$, a taxa de infiltração pode ser calculada por:

$$T_i = K_0 \left(1 + \frac{|\psi_f|}{L_f} \right) \quad (1)$$

em que

K_0 = condutividade hidráulica do solo saturado, L T⁻¹;

ψ_f = potencial matricial do solo na frente de umedecimento, L; e

L_f = profundidade da frente de umedecimento, L.

Durante o processo de infiltração, nas condições propostas por Green-Ampt, a infiltração acumulada pode ser calculada por:

$$I_a = L_f (\theta_s - \theta_i) \quad (2)$$

em que

I_a = infiltração acumulada, L;

θ_s = umidade do solo correspondente à saturação, $L^3 L^{-3}$; e

θ_i = umidade do solo no início do processo de infiltração, $L^3 L^{-3}$.

Explicitando-se L_f na equação 2 e substituindo-o na equação 1, obtém-se a equação 3 que é conhecida como equação de Green-Ampt

$$T_i = K_0 \left(1 + \left| \theta_f \right| \frac{(\theta_s - \theta_i)}{I_a} \right) \quad (3)$$

A premissa da existência de uma lâmina H_0 na superfície do solo não corresponde às condições iniciais de infiltração que ocorrem sob efeito da precipitação. Para considerar a infiltração que ocorre até a formação da lâmina H_0 na superfície do solo, MEIN e LARSON (1973) modificaram o modelo de Green-Ampt, e este novo modelo passou a ser denominado de Green-Ampt modificado por Mein e Larson (GAML).

No modelo GAML, os autores consideram o comportamento da infiltração a partir da individualização de três estágios distintos (Figura 4). Considerando que uma precipitação de intensidade i_p é aplicada a um solo com condutividade hidráulica K_0 e capacidade de infiltração CI , os três estágios podem ser assim caracterizados:

Estágio A: $i_p < K_0$. Para esta condição não há ocorrência de escoamento superficial, pois toda a água precipitada infiltra no solo, portanto $T_i = i_p$. Este estágio é representado na Figura 4 pela linha A.

Estágio B: $K_0 < i_p \leq CI$. Durante este estágio toda a água infiltra no solo, ocorrendo elevação do conteúdo de água próximo à superfície. Este estágio é representado pelo trecho retilíneo B da curva, em que $T_i = i_p$.

Estágio C: $K_0 < CI \leq i_p$. A taxa de infiltração da água no solo ocorre conforme a capacidade de infiltração do solo e diminui com o tempo, portanto $T_i = CI$. Corresponde a situação na qual o escoamento superficial começa a ocorrer. Este estágio é representado pelo trecho C (Figura 4).

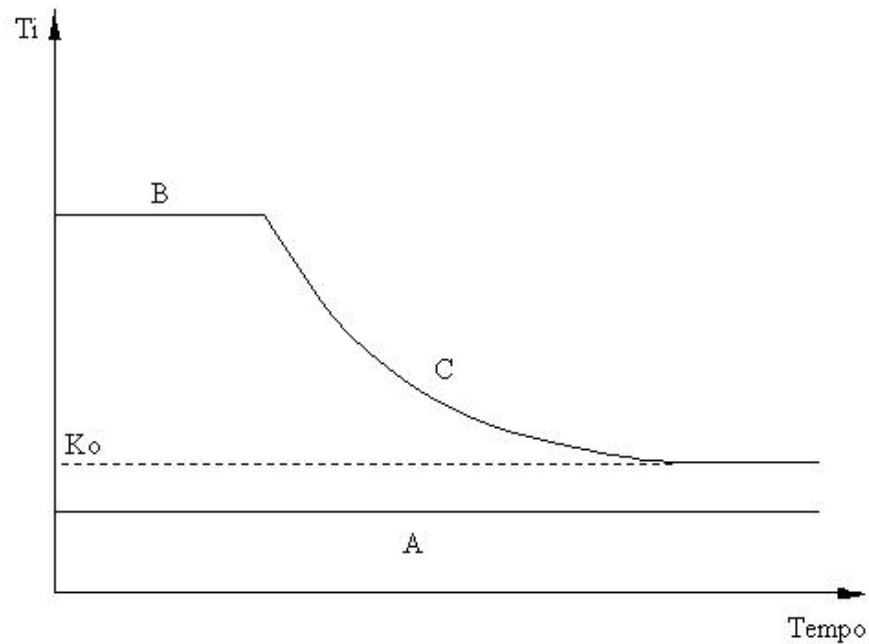


Figura 4 – Diferentes estágios da infiltração sob condições de chuva

O modelo GAML permite a descrição da infiltração da água no solo considerando as condições e a influência dos estágios A e B em todo o processo de infiltração subsequente, enquanto que a maioria dos modelos descreve apenas o estágio C da infiltração.

Considerando que durante a precipitação o conteúdo de água junto à superfície aumenta até que a camada de solo, situada próxima à superfície, atinja a saturação. A lâmina infiltrada até que inicie o empoçamento de água sobre a superfície do solo pode ser calculada por:

$$I_s = \frac{|\theta_r|}{\frac{i_p}{K_0} - 1} (\hat{e}_s - \hat{e}_i) \quad (4)$$

em que

I_s = lâmina infiltrada até que inicie o empoçamento de água na superfície do solo, L;

i_p = intensidade de precipitação; LT^{-1} .

O tempo decorrido entre o início da infiltração e o empoçamento de água na superfície do solo é dado por:

$$t_p = \frac{I_s}{i_p} \quad (5)$$

em que

t_p = tempo de início do empoçamento da água na superfície do solo, T.

Com o início do empoçamento, a taxa de infiltração passa a ser igual à capacidade de infiltração, ou seja

$$T_i = K_0 \left(1 + \frac{|\psi_f|(\theta_s - \theta_i)}{I_a} \right) \quad (6)$$

CHOW, MAIDMENT e MAYS (1995) apresentam a equação de GAML para solos estratificados (Figura 5). Os autores consideram uma carga hidráulica H_0 na superfície do estrato superior, sendo este representado por uma espessura H_1 , condutividade hidráulica K_{01} e déficit de umidade $(\theta_{s1} - \theta_{i1}) = \Delta\theta_1$. Da mesma forma, o estrato inferior é representado por uma espessura H_2 , condutividade hidráulica K_{02} e déficit de umidade $\Delta\theta_2$. A profundidade da frente de umedecimento se encontra a uma distância L_2 abaixo do estrato superior.

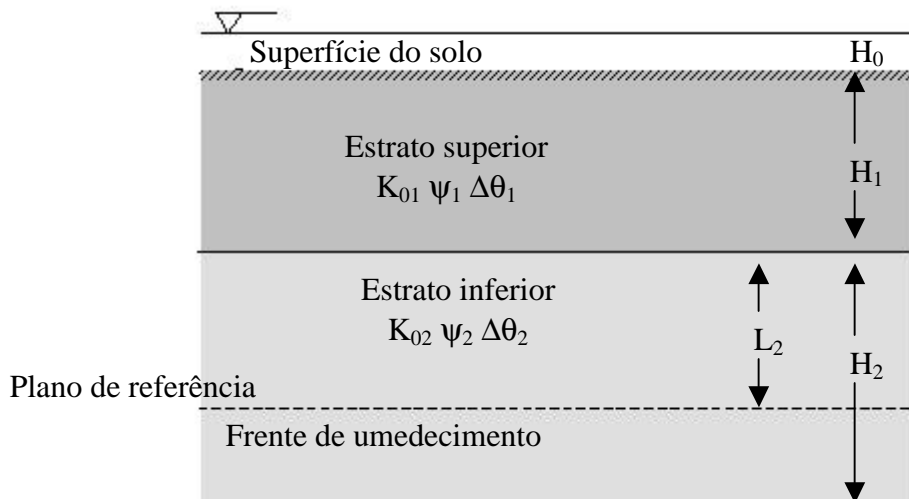


Figura 5 – Esquema de um perfil de solo com dois estratos para o modelo de GAML

A condutividade hidráulica equivalente (K_{eq}) da região saturada pode ser expressa por:

$$K_{eq} = \frac{H_1 + L_2}{\frac{H_1}{K_{01}} + \frac{L_2}{K_{02}}} \quad (7)$$

Aplicando a equação de Darcy entre a superfície do solo e a profundidade da frente de umedecimento (Figura 5) e considerando H_0 bem menor do que $|\psi_{f2}|$, tem-se:

$$T_i = K_{eq} \frac{(|\psi_{f2}| + H_1 + L_2)}{(H_1 + L_2)} \quad (8)$$

Substituindo 7 em 8 e fazendo as simplificações necessárias, chega-se à seguinte equação para solos com dois estratos:

$$T_i = \frac{K_{01}K_{02}}{H_1K_{02} + L_2K_{01}} (|\psi_{f2}| + H_1 + L_2) \quad (9)$$

A infiltração acumulada é obtida com o uso da expressão

$$I_a = H_1 \ddot{A} \ddot{e}_1 + L_2 \ddot{A} \ddot{e}_2 \quad (10)$$

Quando da existência de uma lâmina de água na superfície do solo, as equações 1 e 2 são utilizadas, caso a profundidade da frente de umedecimento seja menor ou igual à profundidade do estrato superior ($L \leq H_1$). Caso a profundidade da frente de umedecimento seja maior que a profundidade do estrato superior ($L > H_1$), usam-se as Equações 9 e 10. A infiltração acumulada calculada antes do empoçamento de água na condição ($L \leq H_1$) é calculada pela Equação 4, e na condição ($L > H_1$) é calculada pela seguinte equação:

$$I_s = \frac{\Delta\theta_2(H_1 + \psi_{f2}) - H_1\Delta\theta_2\left(\frac{K_2}{K_1}\right)\frac{i_p}{K_2}}{\left(\frac{i_p}{K_2}\right) - 1} + H_1\Delta\theta_1 \quad (11)$$

O raciocínio é equivalente ao se trabalhar com um perfil de solo estratificado, composto por n camadas de espessura H_1, H_2, \dots, H_n , com condutividades hidráulicas $K_{01}, K_{02}, \dots, K_{0n}$, déficits de umidade inicial $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \dots, \Delta\theta_n$ e potenciais matriciais na frente de umedecimento $\psi_{f1}, \psi_{f2}, \dots, \psi_{fn}$.

A aplicação do modelo de Green-Ampt para simular a infiltração em condições reais de campo não tem apresentado resultados satisfatórios devido à forma idealizada do perfil de infiltração usado no desenvolvimento do modelo. Isso fez com que vários autores propusessem modificações na forma de determinação dos parâmetros do modelo. O primeiro autor a propor correções nos parâmetros do modelo de Green-Ampt foi Bouwer (1966). Desde então, várias proposições foram apresentadas, e isso fez com que diversos autores (CHU, 1995; LIMA, SILANS, 1999; CECÍLIO, 2002; PARLANGE, BARRY, HAVERKAMP, 2002; SULEIMAN, SWARTZENDURUBER, 2002) estudassem os parâmetros físicos do modelo de Green-Ampt.

A umidade do solo na zona de transmissão (θ_w), de um modo geral, é menor do que a umidade de saturação propriamente dita (θ_s), a qual corresponde ao valor da porosidade (ϕ). Isso acontece devido ao aprisionamento de ar nos poros no momento do umedecimento do solo, impedindo a completa saturação da zona de transmissão. A observação desse fato fez com que diversos autores propusessem o uso de θ_w no cálculo do déficit de umidade.

SLACK et al (1988) encontraram valores de θ_w igual a 0,79 θ_s para solos com textura grossa, 0,73 θ_s para solos com textura média e 0,91 θ_s para solos com textura fina. Zirbel et al (1982) citado por RODRIGUES (1999) constatou que θ_w varia de 0,79 θ_s para um solo arenoso a 0,84 θ_s para um solo argiloso. CECÍLIO (2002) trabalhou com um Latossolo Vermelho-Amarelo e sugeriu valores entre 0,81 e 0,86 θ_s , estando o valor de θ_w mais próximo do limite superior.

A condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_w) é menor do que a condutividade hidráulica de um solo saturado (K_0) devido à menor umidade naquela zona. Bouwer (1966 citado por RAWLS et al., 1983), propõe o valor de K_w correspondente a 0,5 K_0 . SILVA e KATO (1998) e PRUSKI et al. (1997) sugerem o uso

da Tib no lugar de K_0 na equação de GAML. SLACK et al. (1988) usou na equação GAML a condutividade hidráulica obtida com o modelo de Campbell (1974).

Devido a mudança gradativa da umidade na frente de umedecimento, o valor correto do potencial matricial é de difícil determinação. BRAKENSIEK (1977), trabalhando com cinco tipos de solo, propôs a determinação do potencial matricial a partir dos parâmetros do modelo de Brooks e Corey associado ao modelo de Morel-Seytoux e Khanji:

$$\psi = \int_0^{\psi_b} K_r d\psi \quad (12)$$

em que

K_r = condutividade hidráulica relativa, K_w/K_0 ; e

ψ_b = potencial matricial de entrada de ar, L.

e obteve um valor aproximado de $0,76 \psi_b$. O autor cita o trabalho de Bouwer que recomenda o valor do potencial matricial ψ_f sendo igual $0,5 \psi_b$.

AGGELIDES e YOUNGS (1978), estudando o efeito da histerese, indicaram que o potencial matricial (ψ_f), tanto para o processo de umedecimento quanto para o processo de secagem, pode ser estimado como $0,5 \psi_b$. Em função disso, McCUEN, RAWLS e BRAKENSIEK (1981) propuseram a determinação do potencial matricial a partir da equação:

$$\psi_f = \frac{2 + 3\lambda}{1 + 3\lambda} \left(\frac{\psi_b}{2} \right) \quad (13)$$

em que λ é o índice de distribuição do tamanho de poros.

Nos solos estudados por McCUEN, RAWLS e BRAKENSIEK (1981), substituindo-se o valor de $\lambda = 1/3$ na Equação 13, chega-se ao resultado de $\psi_f = 0,75 \psi_b$, que é próximo do valor encontrado por BRAKENSIEK (1977).

RISSE, NEARING e ZHANG (1995) e RAWLS et al. (1996) recomendam, para o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento (ψ_f), a utilização da Equação 14, atribuída a Rawls e Brakensiek (1985).

$$\theta_f = e^{\left(\frac{6,5309 - 7,3256\phi + 0,001583C^2 + 3,809479\phi^2 + 0,000344SC - 0,049837S\phi +}{0,001608S^2\phi^2 + 0,001602C^2\phi^2 - 0,000014S^2C - 0,00348C^2\phi - 0,0008S^2\phi} \right)} \quad (14)$$

em que

Ψ_f = potencial matricial na frente de umedecimento, cm;

S = teor de areia, decimal;

C = teor de argila, decimal; e

ϕ = porosidade, decimal.

MEIN e LARSON (1973) e MEIN e FARREL (1974) propuseram que o potencial matricial na frente de umedecimento (Ψ_f) fosse obtido a partir da curva que relaciona o potencial matricial com a condutividade hidráulica relativa

$$\Psi_f = \int_{0,01}^{1,0} \Psi dK_r \quad (15)$$

Segundo SLACK (1980), a condutividade hidráulica do solo saturado corresponde ao limite superior da integral, podendo a equação 15 ser escrita na forma

$$\theta_f = \int_{\frac{K(\theta_i)}{K_0}}^{\frac{K_w}{K_0}} \frac{\theta dK_r}{\left(\frac{K_w}{K_0} - \frac{K(\theta_i)}{K_0} \right)} \quad (16)$$

Moore (1979) solucionou a integral da Equação 16 considerando as simplificações de Campbell (1974), obtendo o seguinte resultado:

$$\Psi_f = \frac{|\Psi_b| \left[\left(\frac{K_w}{K_0} \right)^a - \left(\frac{K(\theta_i)}{K_0} \right)^a \right]}{a \left(\frac{K_w}{K_0} - \frac{K(\theta_i)}{K_0} \right)} \quad (17)$$

em que

$$a = \left(\frac{\frac{1}{\lambda} + 3}{\frac{2}{\lambda} + 3} \right)$$

Van Muallem (1989 citado por RAWLS et al., 1996), sugere a determinação do valor do potencial matricial a partir da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0).

$$\psi = 4,903 (K_0 + 0,02)^{-0,4932} \quad (18)$$

Nesta equação, o valor de K_0 é em cm/h e o potencial matricial em cm.

CECÍLIO (2002) sugere o uso do potencial matricial na equação de Green-Ampt como sendo a média entre os potenciais matriciais do solo correspondentes às umidades inicial e de saturação.

KING, ARNOLD e BINGNER (1999) usaram a equação apresentada por Raws e Brakensiek (1985) (Equação 14) que calcula o potencial matricial com base na textura do solo. Os autores concluíram que o modelo GAML simulou muito bem a taxa de infiltração.

MOHAMOUD (1991) estudou valores para os parâmetros da equação de Green-Ampt. O autor trabalhou com simulador de chuvas para a determinação da infiltração, sob diferentes condições de manejo do solo e de encrostamento superficial, concluindo que o modelo de Green-Ampt foi satisfatório na predição da infiltração acumulada. No entanto, alerta para a variabilidade dos parâmetros em diferentes condições de manejo e superfície do solo.

WANG, SHAO e HORTON (1999) trabalharam com infiltração em colunas de solo estratificado, utilizando água turva. Os autores propuseram uma alteração no modelo de Green-Ampt em que a infiltração em solos estratificados é composta de dois estágios. No primeiro estágio, a infiltração é governada pelo estrato superior, e no segundo, ela é governada pelo estrato inferior. Concluíram que o potencial matricial de entrada de ar na interface dos dois estratos é afetada pela textura do estrato inferior e que a concentração de sedimentos na superfície do solo afeta bastante a infiltração.

YOUNGS, LEEDS-HARRISON e ALGHUSNI (1998) usaram a equação de Green-Ampt para prever a curva de infiltração em projeto de irrigação, utilizando gotejadores em solos de textura arenosa.

CECÍLIO (2002) trabalhou com canal e colunas de solo, sob condições de alta e baixa umidade inicial, a fim de encontrar a melhor combinação entre as diversas proposições para a correção dos parâmetros usados na equação de Green-Ampt. Segundo ele, as combinações que apresentaram melhores resultados foram K_w igual 0,5

K_0 associado ao ψ_f igual a $\psi(\theta_i)$, K_w igual K_0 associado à média entre $\psi(\theta_i)$ e $\psi(\theta_s)$ e K_w igual a taxa de infiltração estável associado ao cálculo do potencial baseado na textura do solo (Equação 14).

McCUEN, RAWLS e BRAKENSIEK (1981) procuraram avaliar diferenças estatísticas entre os parâmetros K_w e ψ_f dos modelos de Brooks e Corey e Green-Ampt para diferentes tipos de solo. Os resultados indicaram diferenças estatísticas nos parâmetros com a mudança da textura do solo. Os autores concluíram, então, que os parâmetros são dependentes da textura e que o uso desses parâmetros é adequado na predição da taxa de infiltração.

RAWLS, BRAKENSIEK e SONI (1983) estudaram os parâmetros (ψ , θ_s , K) do modelo de Green-Ampt para uma ampla variedade de solos dos Estados Unidos e, segundo eles, os parâmetros do modelo variam conforme o tipo de solo, principalmente em função da sua textura.

SLACK (1980) avaliou o modelo de GAML para a predição do início do empoçamento em dois sistemas de irrigação com pivô central, em solos com e sem cobertura vegetal, concluindo que o modelo estimou bem o tempo em condições de cobertura vegetal; porém, foi prejudicado pela ocorrência do selamento superficial, no caso em que não houve cobertura vegetal.

IDIKE et al. (1980) utilizaram a equação de GAML com parâmetros K_w e ψ_f , determinados, usando o modelo de Campbell (1974). Segundo os autores, o modelo GAML previu muito bem o tempo de empoçamento e todo o processo de infiltração dos testes realizados.

SILVA e KATO (1998) avaliaram o modelo de Green-Ampt e GAML em solos do cerrado brasileiro, com e sem cobertura vegetal morta, e concluíram, de maneira semelhante a SLACK (1980), que as predições foram prejudicadas sob condições de solo nu. No entanto, em condições de cobertura morta, as predições relativas ao processo de infiltração foram boas.

O uso do TDR para a predição do avanço da frente de umedecimento tem-se tornado cada vez mais freqüente. Esta é uma ferramenta que pode indicar, com certa precisão, a umidade do solo instantaneamente, pois tem, como princípio de funcionamento, a reflexão de ondas magnéticas. A grande desvantagem deste processo está no custo do equipamento e na necessidade de se fazer a prévia calibração do equipamento, independente da condição ou característica do solo que se deseja trabalhar. Segundo SI et al. (1999), a constante dielétrica do solo varia com o teor de

argila, densidade, umidade e demais propriedades físicas. Os autores alertam que a frente de umedecimento não é abrupta e que a largura da zona de umedecimento aumenta com a profundidade e, por causa disso, consideraram o valor médio entre o início e o final da frente de umedecimento como o ponto de localização da mesma.

Diversos autores (NOBORIO, MCLNNES, HEILMAN, 1996; SI et al., 1999; CASTRO, 2001; TIMLIN, PACHEPSKY, 2002) instalaram sondas de TDR verticalmente no solo, para a medida do conteúdo de água, acompanhamento da profundidade da frente de umedecimento e quantificação da infiltração acumulada. Segundo os autores, mudanças no perfil de distribuição do solo afetam o sinal transmitido pelas sondas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Visando avaliar diferentes combinações de proposições dos parâmetros de entrada do modelo de GAML, foram realizados, no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Viçosa, testes de infiltração em colunas de solos com perfis homogêneos e heterogêneos.

O material de solo usado nos testes foi proveniente de um Latossolo Vermelho Amarelo cuja característica textural está apresentada no Quadro 1.

Preparação das colunas de solo

As colunas foram montadas (Figura 6) sobre estrutura de concreto armado, construída para servir de base. Esta estrutura consiste de um anel de PVC de 350 mm de diâmetro com cinco centímetros de altura, preenchido com quatro centímetros de concreto. Sobre o concreto, foi colocada uma manta de bidim e sobre esta uma camada de areia de um centímetro de espessura. Um tubo metálico de um centímetro de diâmetro, localizado no centro da base de concreto, foi utilizado para permitir a drenagem da água percolada. Essa estrutura foi acomodada sobre um suporte de madeira a fim de não obstruir o dreno e facilitar a observação do momento de início da drenagem.

Quadro 1 – Característica textural do Latossolo Vermelho Amarelo

Horizonte	Areia Grossa	Areia fina	Silte	Argila ¹	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 Arenoso

Nota: 1) Método da pipeta (EMBRAPA, 1997).

Sobre a base de concreto, foram colocados três módulos de PVC de 30 cm de altura e de 340 mm de diâmetro interno presos entre si com fita adesiva, ficando a coluna com uma altura útil de 90 cm. O módulo inferior foi fixado à base com auxílio de uma cinta feita com a bolsa do tubo de 350 mm. O interior do módulo foi revestido com papel impermeável, a fim de impedir a aderência do solo à parede do tubo de PVC e, então, facilitar a sua posterior retirada.

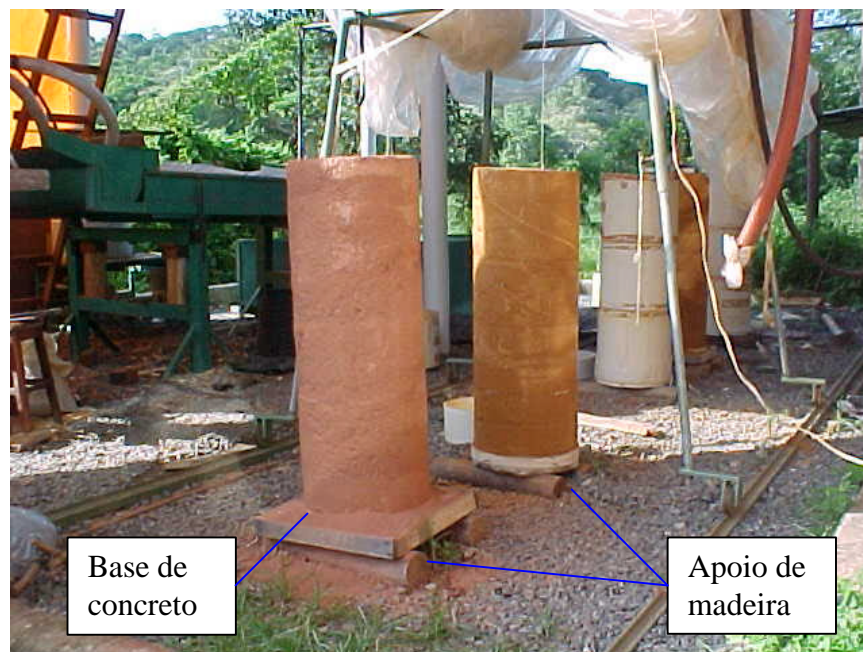


Figura 6 – Colunas de solo utilizadas no experimento

O material de solo utilizado na montagem das colunas foi peneirado em peneira de 4 mm, homogeneizado e guardado em sacos plásticos bem fechados, para evitar a perda de umidade. A massa de solo para preencher cada módulo, com a massa específica desejada, foi pesada em balança digital com duas casas decimais, e a ela acrescentada a quantidade de água necessária para se atingir a umidade de 30% em base gravimétrica. Após a homogeneização da umidade, o solo foi colocado nos módulos e compactado em camadas de 10 cm, utilizando, para isto, um disco de ferro com

diâmetro de 34 cm, um soquete e uma régua. Antes de se iniciar a compactação da camada seguinte, a superfície da camada compactada era escarificada com o objetivo de retirar o espelhamento formado pelo disco de compactação e minimizar as interferências que pudessem afetar a movimentação da água no solo causada pela mudança de camada. As massas específicas após a compactação foram iguais a $1,03 \text{ g/cm}^3$ (valor próximo da condição de campo) e $1,23 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente 20% maior que o valor de campo.

Após certo período de tempo, que dependia das condições climáticas locais, os módulos de PVC foram retirados, a fim de facilitar o processo de secagem das colunas de solo (Figura 6). O processo de secagem foi lento, sendo que as colunas ficaram expostas ao tempo, por um período mínimo de 1 mês. Visando acelerar o processo, foi colocado um ventilador com o fluxo de ar direcionado a elas.

Concluído o período de secagem, cada coluna foi revestida com aproximadamente 0,5 cm de massa de bentonita e envolvida com plástico de polietileno preso, com fita adesiva. Após este processo, foi recolocado o módulo de PVC a fim de proporcionar uma melhor sustentação à coluna. A bentonita foi utilizada por possuir uma condutividade hidráulica extremamente baixa minimizando assim o movimento preferencial de água por entre a coluna de solo e o molde de PVC. Um último módulo de PVC de 350 mm de diâmetro e 10 cm de altura foi colocado e fixado a coluna de solo com fita adesiva. Este módulo continha uma abertura de 2 x 7 cm, que servia para coletar e direcionar o escoamento superficial a uma calha feita com chapa de aço galvanizado. Esta calha, por sua vez, direcionou o escoamento superficial para um reservatório no qual estava instalado um Thalimedes, usado para registrar a altura da lâmina d'água contida no reservatório, a cada minuto (Figura 7).

A superfície da coluna foi escarificada e sobre ela colocada uma manta de bidim com o objetivo de minimizar o efeito do selamento superficial provocado pela energia de impacto das gotas no solo. A manta de bidim foi encharcada com água antes do início do teste, para evitar que a água retida por ela interferisse no início do escoamento superficial.

Testes de infiltração

A água foi aplicada em cada coluna, isoladamente, por meio de um simulador de chuvas desenvolvido por ALVES SOBRINHO (1997), montado sobre trilhos. A disposição dos trilhos e das colunas permitiu que o simulador pudesse ser movimentado e posicionado sobre o centro de cada coluna, quando da execução do teste (Figura 8). O

simulador foi regulado para aplicar uma precipitação com intensidade média de 141 mm/h, apresentando desvio-padrão de 6,8 mm/h. O valor de intensidade de precipitação utilizado nos cálculos foi 141 mm/h, exceto para a coluna 3, que foi 150 mm/h.

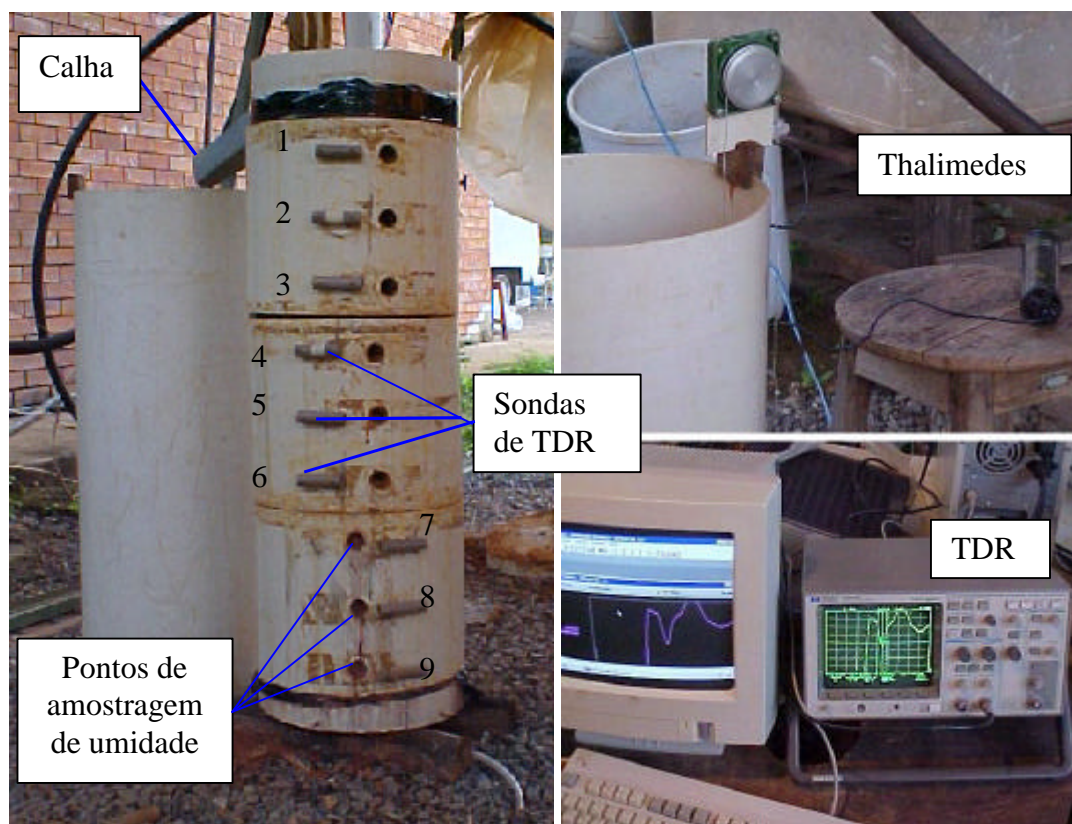


Figura 7 – Detalhes das sondas e dos pontos de retirada de umidade, do Thalimedes e do TDR

No início e ao final dos testes foram retiradas amostras de solo para a determinação das umidades inicial e de saturação, respectivamente. Para tal, foram feitos furos nas laterais das colunas (Figura 7), espaçados verticalmente de 10 cm, sendo o primeiro deles a 5 cm da superfície. As amostras de solo foram coletadas com um amostrador construído com tubulação de PVC de uma polegada capaz de uma penetração de 6 cm no interior da coluna. Os buracos formados em decorrência da amostragem foram preenchidos novamente com a quantidade de solo de massa conhecida, para se manter a mesma massa específica inicial. Após o preenchimento dos buracos com o solo, foi também colocada massa de bentonita, seguido por uma tampinha de PVC, massa de calafetar e fita adesiva. A umidade das amostras foi obtida pelo método padrão de estufa em que a amostra de solo permanece por 24h em uma temperatura de 105 °C. Os pontos amostrados para a determinação das umidades inicial

e final foram às mesmas profundidades, porém em lados opostos da coluna a fim de melhorar a confiabilidade dos resultados.

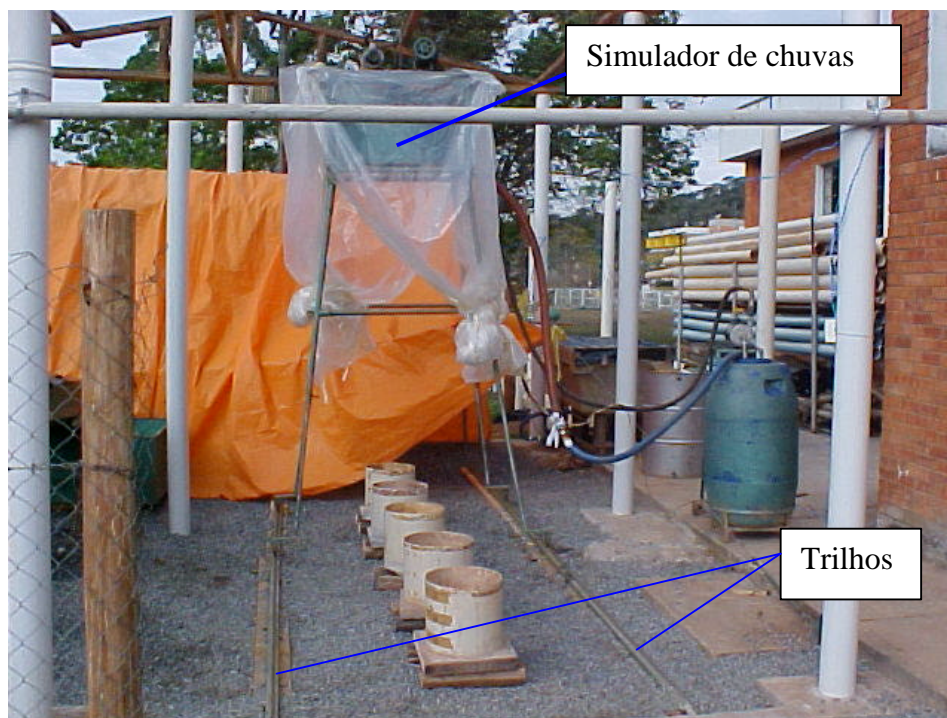


Figura 8 – Posição das colunas sob o simulador de chuvas montado sobre trilhos

O acompanhamento da movimentação da frente de umedecimento foi feito por leituras realizadas no TDR desenvolvido por PEREIRA (2001). Para tal, foram instaladas nove sondas, perpendiculares à lateral das colunas, localizadas na mesma altura em que foram retiradas as amostras de umidade (Figura 7). As leituras foram realizadas, em cada sonda, nas primeiras 10h, a intervalos de tempo de um minuto e, após esse tempo, o intervalo de leitura variou entre 10 e 30 min. As leituras no TDR indicaram o momento inicial e final da passagem da frente de umedecimento pelas sondas. O tempo de avanço da frente de umedecimento (Quadro 2) foi definido como a média entre o tempo inicial e final da passagem da frente.

As leituras nas sondas de TDR, ao longo da coluna de teste, foram conduzidas até o momento em que, na sonda de maior profundidade, na coluna (sonda 9), foi observada a estabilização da curva gerada pelo osciloscópio (aparelho usado para amplificar o sinal produzido pelo gerador de pulsos). Neste momento, foi caracterizado o final do teste. Em alguns casos, devido a problemas nos equipamentos ocorridos durante o andamento, o teste foi interrompido antes que a frente de umedecimento

atingisse a sonda 9. No caso das colunas 2 e 4, os testes cessaram quando a frente de umedecimento atingiu as sondas 5 e 8, respectivamente.

Quadro 2 – Tempo médio (min) gasto para que a frente de umedecimento atingisse a profundidade Z

Sonda	Z (cm)	Colunas							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	5	8,5	31,5	10,0	41,5	10,0	10,5	5,5	46,0
2	15	19,5	102	22,5	181,5	35,5	105,0	16,0	147,5
3	25	37,0	248,5	37,5	326,5	85,0	247,5	30,0	270,0
4	35	56,0	567,5	57,5	626,5	129,5	370,0	58,5	378,5
5	45	79,5	824	76,0	850,5	185,0	567,5	72,5	530,0
6	55	101,5		101,5	1314,5	234,5	821,5	103,0	623,0
7	65	119,0		125,5	1685,0	279,5	1079,5	121,5	785,5
8	75	144,0		153,0	1857,5	322,0	1302,0	144,5	908,5
9	85	165,0		180,0		362,5	1470,5	178,0	1023,5

A infiltração acumulada foi determinada pela diferença entre a lâmina de água aplicada pelo simulador de chuvas e a lâmina escoada superficialmente, medida usando o Thalimedes. A infiltração acumulada também foi determinada usando os dados obtidos com o TDR. Neste caso, a partir dos dados de avanço da frente de umedecimento e da umidade ao final do teste, a infiltração total acumulada foi obtida pelo somatório da lâmina acumulada (Ia) em cada camada situada a uma profundidade menor que a profundidade da frente de umedecimento. A taxa de infiltração, assim como a Tib, foram obtidas pela derivação da curva de infiltração acumulada.

A lâmina acumulada em cada profundidade foi obtida utilizando-se a Equação 19:

$$Ia = \sum_{k=1}^p L_k (\theta_{wk} - \theta_{ik}) \quad (19)$$

em que

Ia = lâmina acumulada, L;

p = número de camadas umedecidas até a profundidade da frente de umedecimento Z;

θ_{wk} = umidade da zona de transmissão da camada K, L^3L^{-3} ;

θ_{ik} = umidade inicial da camada K, L^3L^{-3} ;

L = espessura da camada K, L.

Caracterização físico-hídrica dos solos das colunas

Amostras de cada horizonte do solo, com massas específicas iguais às das colunas, foram utilizadas para a determinação das curvas de retenção (Figura 9) de água no solo (EMBRAPA, 1997).

Aos dados experimentais das curvas de retenção foram ajustados os modelos de Brooks e Corey e de Van Genuchten (TIMM et al., 1995), obtendo-se os parâmetros apresentados no Quadro 3. O ajuste desses modelos foi realizado com o uso do programa computacional RETC (LEIJ et al., 1993).

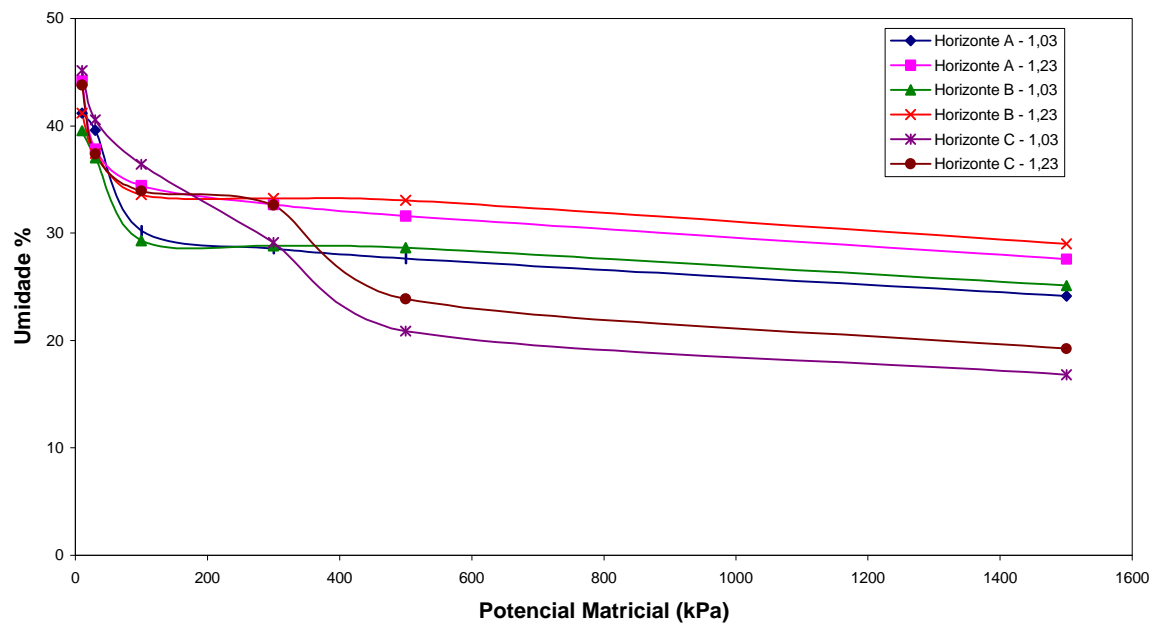


Figura 9 – Curvas de retenção de água no solo para os três horizontes e duas massas específicas utilizadas nas colunas de solo

Quadro 3 – Parâmetros dos modelos de Van Genuchten e de Brooks e Corey para os diferentes horizontes do Latossolo Vermelho Amarelo

Modelo	Van Genuchten					
Horizonte	A		B		C	
Ds ¹	1,03	1,23	1,03	1,23	1,03	1,23
θ _r ²	0,07000	0,14000	0,10000	0,07000	0,07000	0,07000
α ³	0,21617	0,05947	0,76294	0,76111	0,03169	0,02312
λ ⁴	1,14748	1,14481	1,13563	1,07842	1,23342	1,18726
Modelo	Brooks e Corey					
Horizonte	A		B		C	
Ds ¹	1,03	1,23	1,03	1,23	1,03	1,23
θ _r ²	0,07000	0,14000	0,10000	0,07000	0,07000	0,07000
ψ _b ³	4,42028	15,35627	1,29665	1,30247	23,59047	30,98853
λ ⁴	0,14644	0,14266	0,13545	0,07835	0,21827	0,17358

Notas: 1) massa específica; g/cm³;
 2) umidade residual, decimal;
 3) parâmetro de ajuste, decimal;
 4) potencial matricial de entrada de ar, cm;
 5) índice de distribuição de tamanho de poros, decimal.

O modelo de Brooks e Corey pode ser representado pela equação:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{|\psi_b|}{|\psi|} \right)^\lambda, \quad |\psi| > |\psi_b| \quad (20)$$

e

$$\theta = \theta_s, \quad |\psi| \leq |\psi_b| \quad (21)$$

em que

ψ_b = potencial matricial de entrada de ar, cm;

ψ = potencial matricial, cm;

λ = índice de distribuição de tamanho de poros, adimensional;

θ = umidade atual do solo, cm³/cm³;

θ_r = umidade residual do solo, cm³/cm³; e

θ_s = umidade do solo saturado, cm³/cm³.

O modelo de VAN GENUCHTEN (1980) é representado pela seguinte equação:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (\alpha|\psi|^n)} \right]^m, \psi < 0 \quad (22)$$

em que

α e n = parâmetros de ajuste do modelo relacionados com o solo; e

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

Ao final dos testes de infiltração, cada coluna foi serrada e separada em três módulos, com dimensões de 30 cm de altura e diâmetro interno de 340 mm. Os módulos foram colocados para saturar em reservatório com água, por um período de dois dias. No primeiro dia, a altura da lâmina de água no reservatório foi de 5 cm e no segundo dia foi de 25 cm, garantido a saturação de baixo para cima. Em seguida, os módulos foram colocados em um funil de latão que ficava apoiado sobre uma estrutura de madeira. Dentro do funil existia uma chapa furada, na qual foi apoiado o módulo. Sobre esse módulo foi fixado um anel de PVC de 10 cm de altura e 350 mm de diâmetro que continha uma calha. A fixação do anel ao módulo foi feita por meio de uma borracha de câmara de ar que garantiu uma ótima vedação. Uma mangueira aplicava água continuamente sobre o módulo e a calha permitia o escoamento do excesso de água garantindo uma lâmina constante. No fundo do funil, foi coletado o volume de água percolado e a partir daí foi calculada a condutividade hidráulica do solo saturado (Figura 10).

A caracterização físico-hídrica do material de solo de cada coluna está apresentada nos Quadros 4 e 5.

Quadro 4 – Características físico-hídricas das colunas de solo utilizadas nos testes

Coluna	Horizonte	Ds ¹ (g/cm ³)	Dp ² (g/cm ³)	K ₀ ³ (mm/h)	Tib (mm/h)	φ ⁴ (%)
1	A	1,03	2,67	41,95	62	61,38
2	A	1,23	2,67	2,87	5	53,88
3	B	1,03	2,78	75,87	74	62,92
4	B	1,23	2,78	5,73	5	55,72
5	C	1,03	2,74	24,64	40	62,41
6	C	1,23	2,74	4,99	8	55,11
7	A	1,03	2,67	27,96		61,38
	B	1,03	2,78	135,65	56	62,92
	C	1,03	2,74	3,00		62,41
8	A	1,23	2,67	13,52		53,88
	B	1,03	2,78	73,20	12	62,92
	C	1,03	2,74	7,93		62,41

Notas: 1) Massa específica do solo determinada no momento da construção das colunas

2) Massa específica das partículas (Método do balão volumétrico)

3) Condutividade hidráulica do solo saturado (obtido no próprio módulo da coluna)

4) Porosidade (1-Ds/Dp)

Quadro 5 – Umidade inicial (% volume) em diferentes profundidades das colunas de solo

Prof. (cm)	Colunas							
	1	2	3	4	5	6	7	8
5	18,69	20,15	10,84	8,12	7,31	17,88	12,66	14,06
15	25,05	23,25	10,84	9,35	9,61	20,05	15,10	16,79
25	27,64	25,25	10,92	10,41	11,23	22,26	14,73	19,40
35	26,01	27,32	11,03	10,83	10,12	22,49	12,63	12,65
45	27,16	28,55	12,32	11,56	11,58	23,42	13,62	13,75
55	27,26	29,50	11,18	11,44	12,62	26,66	15,28	14,52
65	27,89	28,53	13,22	12,93	14,05	27,63	9,12	9,77
75	27,79	31,00	13,46	12,90	13,86	27,85	10,12	10,39
85	27,12	30,44	13,14	12,74	14,31	27,89	9,86	10,16



Figura 10 – Saturação dos módulos das colunas de solo e a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado pelo método do permeâmetro de carga constante

Simulação do processo de infiltração

O processo de infiltração foi simulado usando a equação de Green-Ampt modificada por Mein e Larson, com diferentes combinações dos parâmetros K_0 e ψ_f .

Na proposição original de Green-Ampt, a umidade na zona de transmissão corresponde ao valor da porosidade. No entanto, a porosidade não corresponde à umidade de saturação que acontece na zona de transmissão durante o processo de infiltração. Por esse motivo, vários autores (BRAKENSIEK, 1977; SLACK, 1980; RODRIGES, 1999; CECÍLIO, 2002) recomendam a utilização da umidade de saturação menor que a porosidade na equação de Green-Ampt.

Ao final dos testes de infiltração, foram retiradas amostras de solo às mesmas profundidades a qual estavam instaladas as sondas de TDR, para a determinação do conteúdo de água na zona de transmissão. Os valores médios do conteúdo de água na zona de transmissão foram usados na realização das simulações.

Nas simulações, adotaram os seguintes valores para a condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_w):

- $K_w = K_0$, conforme a proposição original de Green-Ampt (1911);

- $K_w = 0,5 K_0$, segundo citações de RAWLS et al. (1983) e;
- $K_w = Tib$, conforme recomendações de SILVA e KATO (1998).

Os valores dos potenciais matriciais na frente de umedecimento (ψ_f), usados nas simulações, foram determinados usando as condições:

- o potencial matricial referente à umidade inicial, determinado usando o modelo de Van Genuchten;
- o potencial matricial referente à umidade inicial, determinado usando o modelo de Brooks e Corey;
- o potencial matricial referente à umidade na zona de transmissão (θ_w), calculado pelo modelo de Brooks e Corey (1964);
- o potencial matricial referente à umidade na zona de transmissão (θ_w), determinado usando o modelo de VAN GENUCHTEN (1980);
- a média entre os potenciais matriciais relativos à umidade inicial e à umidade de saturação, obtidos usando o modelo de Van Genuchten;
- a média entre os potenciais matriciais relativos à umidade inicial e à umidade de saturação, obtidos usando o modelo de Brooks e Corey;
- o potencial matricial como 0,5 do potencial matricial de entrada de ar, encontrada a partir do modelo de Brooks e Corey, conforme sugerido por Bouwer (1966);
- o potencial matricial sendo 0,76 do potencial matricial de entrada de ar, encontrada a partir do modelo de Brooks e Corey, conforme sugerido por BRAKENSIEK (1977);
- a Equação 13, com a qual se calcula o potencial matricial a partir do índice de distribuição de tamanho de poros e do potencial matricial de entrada de ar;
- a Equação 14, com a qual se calcula o valor do potencial matricial com base na textura e na porosidade do solo;
- a Equação 16, com a qual se calcula o valor do potencial matricial com base na integral da curva que relaciona a condutividade relativa em função do potencial matricial;
- a Equação 18, com a qual se calcula o potencial matricial com base na condutividade hidráulica do solo saturado (K_0).

As diferentes combinações de K_0 e ψ_f usadas nas simulações estão mostradas no Quadro 6.

Quadro 6 – Combinações das diferentes proposições de determinação da condutividade hidráulica da zona de transmissão (K_w) e do potencial matricial na frente de umedecimento (ψ_f)

Combinações	K_w	ψ_f
1	K_0	$f(\theta_i)$ – Van Genuchten
2	K_0	$f(\theta_i)$ – Brooks e Corey
3	K_0	$f(\theta_w)$ – Van Genuchten
4	K_0	$f(\theta_w)$ – Brooks e Corey
5	K_0	média dos potenciais $f(\theta_i)$ e $f(\theta_s)$ – Van Genuchten
6	K_0	média dos potenciais $f(\theta_i)$ e $f(\theta_s)$ – Brooks e Corey
7	K_0	$0,5 \psi_b$
8	K_0	$0,76 \psi_b$
9	K_0	$(2+3\lambda)/(1+3 \lambda)*(\psi_b/2)$
10	K_0	função da textura
11	K_0	$f(K_r)$
12	K_0	$4,903(K_0+0,02)^{-0,4932}$
13	$0,5 K_0$	$f(\theta_i)$ – Van Genuchten
14	$0,5 K_0$	$f(\theta_i)$ – Brooks e Corey
15	$0,5 K_0$	$f(\theta_w)$ – Van Genuchten
16	$0,5 K_0$	$f(\theta_w)$ – Brooks e Corey
17	$0,5 K_0$	média dos potenciais $f(\theta_i)$ e $f(\theta_s)$ – Van Genuchten
18	$0,5 K_0$	média dos potenciais $f(\theta_i)$ e $f(\theta_s)$ – Brooks e Corey
19	$0,5 K_0$	$0,5 \psi_b$
20	$0,5 K_0$	$0,76 \psi_b$
21	$0,5 K_0$	$(2+3\lambda)/(1+3 \lambda)*(\psi_b/2)$
22	$0,5 K_0$	função da textura
23	$0,5 K_0$	$f(K_r)$
24	$0,5 K_0$	$4,903(K_0+0,02)^{-0,4932}$
25	Tib	$f(\theta_i)$ – Van Genuchten
26	Tib	$f(\theta_i)$ – Brooks e Corey
27	Tib	$f(\theta_w)$ – Van Genuchten
28	Tib	$f(\theta_w)$ – Brooks e Corey
29	Tib	média dos potenciais $f(\theta_i)$ e $f(\theta_s)$ – Van Genuchten
30	Tib	média dos potenciais $f(\theta_i)$ e $f(\theta_s)$ – Brooks e Corey
31	Tib	$0,5 \psi_b$
32	Tib	$0,76 \psi_b$
33	Tib	$(2+3\lambda)/(1+3 \lambda)*(\psi_b/2)$
34	Tib	função da textura
35	Tib	$f(K_r)$
36	Tib	$4,903(K_0+0,02)^{-0,4932}$

Os valores de profundidade de avanço da frente de umedecimento, da infiltração acumulada e da taxa de infiltração, simulados e experimentais foram comparados, usando-se o coeficiente de correlação de Pearson, o coeficiente de variação e o desvio médio.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi calculado utilizando-se a Equação 23, apresentada por CRESPO (1999),

$$r = \frac{n \sum Y_0 Y_c - (\sum Y_0)(\sum Y_c)}{\left\{ \left[n \sum Y_0^2 - (\sum Y_0)^2 \right] \left[n \sum Y_c^2 - (\sum Y_c)^2 \right] \right\}^{1/2}} \quad (23)$$

em que

Y_c = valor simulado da variável Y;

Y_0 = valor medido da variável Y; e

n = número de dados medidos.

Os coeficientes de variação para a profundidade da frente de umedecimento, infiltração acumulada e taxa de infiltração foram calculados, utilizando-se a Equação 24, citada por CHU, ONSTAD e RAWLS (1986).

$$CV = \frac{\left[\frac{\sum (Y_c - Y_0)^2}{n} \right]^{1/2}}{\sum \frac{Y_0}{n}} \quad (24)$$

em que

CV = coeficiente de variação, decimal.

Também foi calculado o erro médio (e_m) entre os valores simulados e experimentais, usando-se a equação (Topping, citado por CHONG, GREEN, AHUJA, 1982):

$$e_m = 100 \left(\frac{1}{n} \right) \left[\sum \frac{|Y_0 - Y_c|}{Y_0} \right] \quad (25)$$

Além das análises usando os coeficientes estatísticos, foram feitas análises comparativas entre os valores observados e simulados, por meio dos gráficos de

profundidade da frente de umedecimento (Z), de infiltração acumulada (I_a) e da taxa de infiltração (T_i). Também foram analisados o tempo de início do escoamento, o tempo de duração total da infiltração e a taxa de infiltração básica. A escolha das melhores combinações de proposições foi feita com base na análise dos coeficientes estatísticos e por meio da concordância entre os valores simulados e experimentais, verificados na análise gráfica dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tentativa inicial de usar o Thalimedes para a obtenção da infiltração acumulada não foi satisfatória, em alguns casos, devido a problemas de vedação na calha que direcionava o escoamento para o reservatório. Nos testes em que não ocorreu este problema, foi verificada uma sobreposição entre as curvas de infiltração acumulada determinadas, usando os dados de avanço da frente de umedecimento obtidos com TDR e os do escoamento superficial obtidos com o Thalimedes (Figura 11). Em função disto, as curvas de infiltração acumulada obtidas experimentalmente, apresentadas a seguir, foram provenientes dos dados do TDR. Entretanto, como o vazamento surgia algum tempo após o início do escoamento superficial, os dados do Thalimedes foram utilizados para indicar com precisão o início do escoamento superficial.

A maioria das colunas (3, 4, 5, 7 e 8) apresentou umidade inicial (Quadro 5) bem abaixo do ponto de murcha e fora do intervalo de pontos para o qual foram traçadas as curvas de retenção de água no solo. Isso fez com que o potencial matricial calculado em função da umidade inicial pelo ajuste da curva de retenção ficasse com valores muito pequenos, como exemplificado no Quadro 7 para a coluna 1 (os dados para as colunas 2 a 8 estão apresentados no Apêndice A). Este potencial, quando usado na equação de GAML, resultou em valores de capacidade de infiltração (CI) extremamente elevados os quais em nenhum momento foram superados pela intensidade de precipitação (i_p), o que não foi observado experimentalmente. Esse fato indica que essa proposição não deve ser usada para condições de umidade inicial abaixo do ponto de murcha. As proposições, nas quais o potencial matricial do solo não depende da umidade inicial, representaram

melhor esse parâmetro, pois geram valores de tensão abaixo de 1 m.c.a. Ainda no Quadro 5, observa-se que a umidade inicial dos horizontes A e B nas colunas 7 e 8 foram, em média, maiores do que as do horizonte C, sob as mesmas condições de secagem.

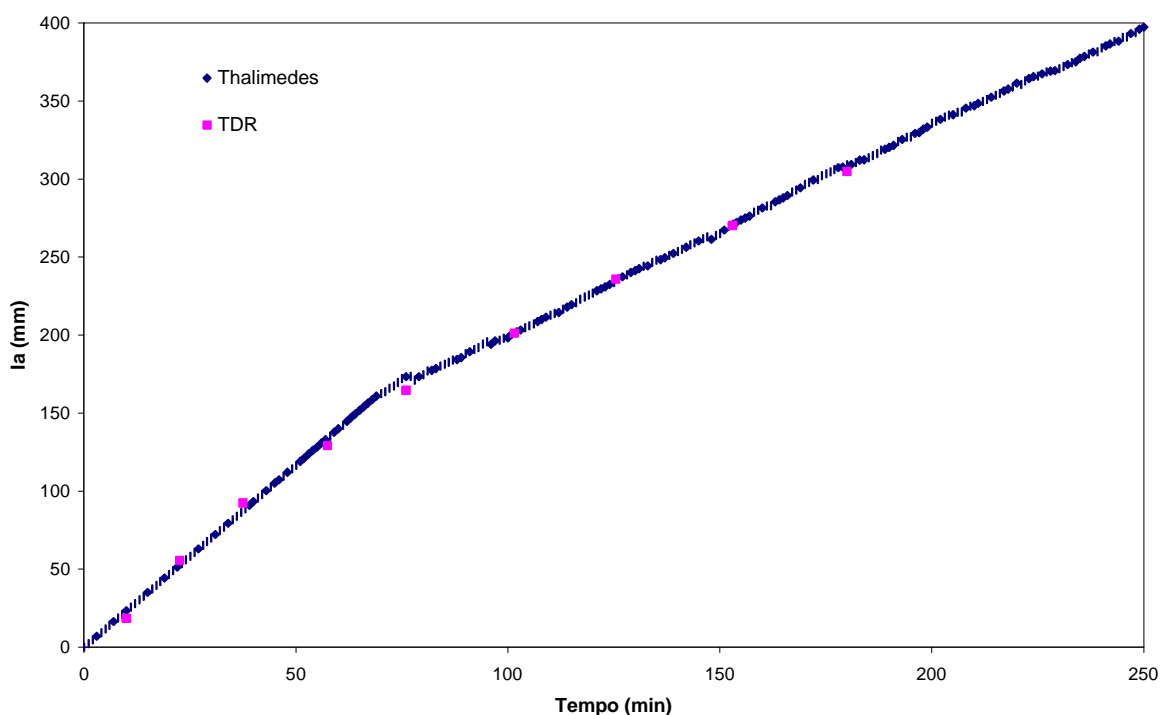


Figura 11 – Dados de infiltração acumulada obtidas a partir do escoamento superficial (Thalimedes) e do avanço da frente de umedecimento (TDR)

Umidade de saturação de campo

A umidade média da zona de transmissão (θ_w), o seu desvio-padrão e a sua relação com a porosidade ou umidade de saturação (θ_s), para cada horizonte do Latossolo Vermelho Amarelo, nas duas massas específicas, estão apresentados no Quadro 8.

Observa-se no Quadro 8 que o aumento na massa específica do solo provocou diminuição do desvio-padrão e aumento na relação θ_w/ϕ . Esse fato pode estar relacionado com a diminuição do volume de poros não interconectados e a dispersão de argilas. Os horizontes A e C, apesar de terem texturas diferentes, apresentaram, para a condição de massa específica igual a $1,03 \text{ g/cm}^3$, a mesma relação $\theta_w/\phi = 0,81\theta_s$. Esse valor está dentro da faixa de valores encontrado por CECÍLIO (2002), que trabalhou com o mesmo tipo de solo e massa específica na faixa de $1,03$ a $1,04 \text{ g/cm}^3$. O material

de solo do horizonte B, por sua vez, apresentou valores de θ_w/ϕ abaixo dos valores encontrados por RODRIGUES (1999) para um solo com textura muito argilosa.

Quadro 7 – Valores, em módulo, do potencial matricial, calculado usando as diferentes proposições analisadas, para a coluna 1 (A - 1,03 g/cm³)

Z cm	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
	(kPa)											
5	15576,4	16027,5	2,1	2,3	7789,2	8014,9	0,2	0,3	0,4	0,8	0,6	0,2
15	818,0	824,4	2,1	2,3	410,0	413,4	0,2	0,3	0,4	0,8	0,6	0,2
25	329,0	329,5	2,1	2,3	165,5	165,9	0,2	0,3	0,4	0,8	0,6	0,2
35	575,1	578,2	2,1	2,3	288,6	290,3	0,2	0,3	0,4	0,8	0,6	0,2
45	386,1	387,2	2,1	2,3	194,1	194,7	0,2	0,3	0,4	0,8	0,6	0,2
55	373,9	374,8	2,1	2,3	188,0	188,6	0,2	0,3	0,4	0,8	0,6	0,2
65	303,8	304,2	2,1	2,3	152,9	153,2	0,2	0,3	0,4	0,8	0,6	0,2
75	313,7	314,2	2,1	2,3	157,9	158,2	0,2	0,3	0,4	0,8	0,6	0,2
85	3912	392,3	2,1	2,3	196,6	197,3	0,2	0,3	0,4	0,8	0,6	0,2

Legenda:

- a) Calculado em função da θ_i pelo ajuste do modelo de Van Genuchten, $f(\theta_i)$ VG;
- b) Calculado em função da θ_i pelo ajuste do modelo de Brooks e Corey, $f(\theta_i)$ BC;
- c) Calculado em função da θ_w pelo ajuste do modelo de Van Genuchten, $f(\theta_w)$ VG;
- d) Calculado em função da θ_w pelo ajuste do modelo de Brooks e Corey, $f(\theta_w)$ BC;
- e) Média entre os potenciais relativos a θ_i e θ_w pelo ajuste do modelo de Van Genuchten, $f(\theta_i + \theta_w)/2$ VG;
- f) Média entre os potenciais relativos a θ_i e θ_w pelo ajuste do modelo de Brooks e Corey, $f(\theta_i + \theta_w)/2$ BC;
- g) $0,5 \psi_b$;
- h) $0,76 \psi_b$;
- i) $(2+3\lambda)/(1+3\lambda) * (\psi_b/2)$
- j) Função da textura
- k) Função da condutividade relativa, $f(K_r)$;
- l) Função de K_0 , $f(K_0)$.

Quadro 8 – Umidade na zona de transmissão para os materiais dos solos oriundos dos diferentes horizontes do Latossolo Vermelho Amarelo

Horizonte	Massa específica					
	1,03 g/cm ³			1,23 g/cm ³		
	θ_w	Dvp ¹	θ_w/ϕ^2	θ_w	Dvp ¹	θ_w/ϕ^2
A	49,99	4,61	81%	49,71	2,37	92%
B	47,94	5,85	76%	47,80	3,44	86%
C	50,28	7,17	81%	51,60	4,16	94%

Notas: 1) Desvio-padrão da média de θ_w .

2) Relação entre a umidade da zona de transmissão com a porosidade.

As proposições envolvendo o potencial matricial calculado a partir dos modelos de Brooks e Corey e de Van Genuchten (Quadro 7) geraram resultados muito próximos, o que já era esperado, em função da semelhança dos dois modelos em simularem a curva de retenção de água no solo.

As proposições de obtenção do potencial matricial sendo igual a $0,5\psi_b$, $0,76\psi_b$ e pela equação 13, a partir do índice de distribuição do tamanho de poros e do potencial matricial de entrada de ar, também geraram resultados próximos (Quadro 7), pois as duas primeiras foram obtidas a partir da equação 13.

Início do escoamento superficial

O tempo de início do escoamento superficial, determinado experimentalmente e simulado usando a equação 5, está apresentado no Quadro 9. Neste quadro estão também apresentadas as combinações de proposições que resultaram em melhor estimativa dos tempos de início do escoamento superficial. A seleção das melhores combinações foi feita pela comparação dos valores dos tempos determinados experimentalmente e simulados.

Quadro 9 – Tempo de início do escoamento superficial determinado experimentalmente e simulado

Coluna	Material de solo ¹	Observado (min)	Simulado (min)	Combinações ²
1	A – 1,03	17	21,5	27
2	A – 1,23	3	1,3	28
3	B – 1,03	64	28,5	4
4	B – 1,23	1	0,0	Todas
5	C – 1,03	17	16,6	33
6	C – 1,23	1	1,5	4; 11; 9; 31; 33; 32; 27
7	A – 1,03 B – 1,03 C – 1,03	8	8,0	3; 4; 34
8	A – 1,23 B – 1,03 C – 1,03	1	1,5	3; 10; 9; 16; 33; 32

Notas: 1) Horizonte e massa específica (g/cm³).

2) Combinação que melhor estimou o início do escoamento superficial (Quadro 6).

Observa-se neste quadro que, nas colunas contendo solos com massa específica $1,23 \text{ g/cm}^3$, o tempo de início do escoamento foi reduzido drasticamente quando comparado àqueles tempos obtidos nas colunas contendo solo com massa específica $1,03 \text{ g/cm}^3$. Isso foi, provavelmente, devido à redução na condutividade hidráulica (Quadro 4). A coluna 8, apesar de ter massa específica diferenciada ao longo do perfil, apresenta em sua parte superior massa específica elevada, a qual governa o início do processo de escoamento. Esse resultado enfatiza a preocupação com a magnitude do escoamento superficial em solos compactados ou adensados em superfície. Na coluna 4, todas as simulações resultaram em um tempo de início do escoamento superficial igual a zero, indicando que, em nenhum momento, a CI foi maior do que a i_p . Verifica-se também, no Quadro 9, que todas combinações selecionadas estimaram o tempo de início do escoamento com diferenças do valor experimental inferiores a 5 min, exceto no caso da coluna 3, em que a diferença entre o valor simulado e experimental foi de 36 min.

Apesar de o material de solo das colunas ter a mesma origem, os perfis em cada coluna foram diferentes, o que gerou resultados distintos para cada teste de infiltração. A escolha das melhores combinações que simularam o avanço da frente de umedecimento (Z), a infiltração acumulada (Ia) e a taxa de infiltração (Ti) foi feita, num primeiro momento, a partir da análise dos coeficientes estatísticos (r, CV e e_m), calculados usando-se as equações 23, 24 e 25, respectivamente.

Como os coeficientes de correlação de Pearson foram, para Z e Ia, superiores a 0,99, a análise se concentrou nos valores de coeficientes de variação (CV) e do erro médio percentual (e_m). Devido ao grande número de casos avaliados ($864 = 8$ colunas, 36 combinações de K_w e ψ_f e 3 parâmetros – Z, Ia e Ti), estão apresentadas apenas as quatro combinações (Quadro 10) que melhor representaram o avanço da frente de umedecimento, a infiltração acumulada e a taxa de infiltração. Os demais resultados estão apresentados no Apêndice B. A seleção foi feita pela ordenação das combinações em função da quantidade de vezes que cada combinação apresentou os melhores coeficientes CV e e_m , para os parâmetros Z, Ia e Ti.

Quadro 10 – Combinações de proposições que melhor representaram o avanço da frente de umedecimento (Z), infiltração acumulada (Ia) e taxa de infiltração (Ti) com base nos coeficientes de correlação de Pearson (r), Coeficiente de variação (CV), e erro médio (e_m)

A ¹	B ²	C ³	Z			Ia			Ti			
			r	CV	e_m	r	CV	e_m	r	CV	e_m	
1	A - 1,03	4	0,9993	0,0267	4,2%	0,9993	0,0251	3,9%	0,9095	0,1683	11,9%	
		3	0,9994	0,0378	4,1%	0,9994	0,0349	3,9%	0,8830	0,1832	12,1%	
		35	0,9988	0,0419	6,3%	0,9985	0,0393	5,8%	0,7286	0,2506	15,4%	
		34	0,9988	0,0815	8,1%	0,9986	0,0742	7,4%	0,7813	0,2344	17,6%	
		41	0,9980	0,0534	8,7%	0,9977	0,0508	7,9%	0,6406	0,2833	15,1%	
2	A - 1,23	4	0,9879	0,1420	6,7%	0,9865	0,1372	6,3%	0,9102	0,4244	12,0%	
		32	0,9799	0,2133	7,6%	0,9779	0,2062	7,1%	0,9110	0,4783	17,9%	
		33	0,9818	0,2388	7,9%	0,9807	0,2085	7,1%	0,8655	0,4637	18,4%	
		35	0,9853	0,3211	9,5%	0,9848	0,2585	8,5%	0,8931	0,4141	18,8%	
		34	0,9860	0,3710	9,9%	0,9856	0,2963	8,7%	0,8961	0,4128	20,2%	
3	B - 1,03	27	0,9986	0,0323	4,5%	0,9986	0,0315	4,5%	0,8196	0,1721	14,0%	
		28	0,9987	0,0339	4,4%	0,9987	0,0328	4,3%	0,8280	0,1705	14,2%	
		3	0,9986	0,0385	4,3%	0,9986	0,0370	4,2%	0,8265	0,1734	15,0%	
		4	0,9983	0,0480	4,7%	0,9983	0,0459	4,7%	0,8276	0,1751	15,4%	
		10	0,9968	0,1548	15,6%	0,9966	0,1513	15,4%	0,5368	0,2681	17,7%	
4	B - 1,23	10	0,9939	0,0801	6,8%	0,9940	0,0763	6,6%	0,9229	0,2512	23,7%	
		4	0,9933	0,1040	8,1%	0,9933	0,1014	7,9%	0,9180	0,2745	23,2%	
		34	0,9962	0,1121	8,5%	0,9963	0,1082	8,3%	0,9250	0,3041	23,4%	
		3	0,9936	0,1182	9,0%	0,9936	0,1150	8,7%	0,9168	0,2933	24,2%	
5	C - 1,03	28	0,9937	0,1991	14,7%	0,9937	0,1912	14,2%	0,9178	0,3424	23,5%	
		31	0,9986	0,0658	5,7%	0,9987	0,0619	5,3%	0,9603	0,1286	11,5%	
		11	0,9943	0,0726	6,3%	0,9944	0,0686	6,0%	0,9626	0,1762	17,2%	
		34	0,9994	0,0831	9,7%	0,9994	0,0778	9,4%	0,9365	0,1729	12,6%	
		9	0,9968	0,1570	8,1%	0,9971	0,1441	7,6%	0,9613	0,2018	19,9%	
6	C - 1,23	32	0,9944	0,1810	14,7%	0,9947	0,1690	13,8%	0,9666	0,1528	14,1%	
		9	0,9977	0,0559	6,8%	0,9977	0,0505	6,4%	0,9980	0,2557	15,8%	
		3	0,9981	0,0642	10,5%	0,9981	0,0623	10,1%	0,9973	0,4175	16,1%	
		11	0,9975	0,1101	8,6%	0,9980	0,0902	7,7%	0,9946	0,4280	19,7%	
		8	0,9978	0,1091	15,1%	0,9976	0,1011	14,2%	0,9973	0,5593	18,2%	
7	C - 1,03	34	0,9933	0,1183	18,9%	0,9933	0,1112	18,0%	0,9978	0,4635	26,3%	
		28	0,9964	0,1350	17,8%	0,9960	0,1404	17,8%	0,6166	0,3599	33,1%	
		A - 1,03	37	0,9963	0,1584	19,7%	0,9958	0,1655	19,8%	0,6441	0,3582	32,3%
		B - 1,03	34	0,9981	0,3350	32,4%	0,9977	0,3494	32,6%	0,8554	0,4048	29,5%
		35	0,9981	0,3786	35,5%	0,9980	0,3923	35,6%	0,8479	0,4386	32,7%	
8	C - 1,03	33	0,9969	0,4171	39,0%	0,9973	0,4292	39,0%	0,7930	0,4798	35,6%	
		36	0,9986	0,1507	10,3%	0,9981	0,1718	10,9%	0,4853	0,2683	19,3%	
		A - 1,23	7	0,9972	0,1358	13,1%	0,9979	0,1472	13,6%	0,6191	0,2377	19,1%
		B - 1,03	8	0,9981	0,0646	12,8%	0,9984	0,0673	12,7%	0,5686	0,2771	20,2%
		9	0,9979	0,0650	16,3%	0,9981	0,0629	15,8%	0,5579	0,2923	19,8%	
		31	0,9979	0,1325	14,9%	0,9978	0,1506	15,2%	0,5427	0,2929	22,4%	

Notas: 1) Coluna de solo;

2) Material de solo;

3) Número correspondente à combinação de proposições de K_w e ψ_f .

Analisando-se os dados apresentados no Quadro 10, pode-se observar que o uso da condutividade hidráulica na zona de transmissão igual a K_0 (GREEN-AMPT, 1911), combinações de 1 a 12, e igual à Tib (SILVA, KATO, 1998), combinações de 25 a 36, estiveram presentes em 18 e 22 vezes das 40 combinações selecionadas, respectivamente. As combinações 13 a 24 que usaram a proposição de Bouwer (1966), citado por RAWLS et al. (1996), que recomenda o uso da metade da condutividade hidráulica no modelo de GAML, não apareceram no Quadro 10, porque não deram bons resultados. Dos parâmetros analisados, a taxa de infiltração (Ti) apresentou, no geral, erro médio superior a 11% enquanto que, para o avanço da frente de umedecimento (Z) e para a infiltração acumulada (Ia), os erros médios foram inferiores a 19%, exceto para as colunas de perfil heterogêneo (7 e 8), cujos valores atingiram até 39%. Nas colunas de 1 a 5 observa-se, entretanto, que se tivessem sido selecionadas apenas as quatro melhores combinações, o erro médio para a profundidade da frente de umedecimento para Z e Ia seriam inferiores a 10%. Observa-se também no Quadro 10 que a compactação do solo aumentou, em geral, os valores de e_m e do CV. Não foi possível encontrar uma única combinação que representasse bem todos os casos individualmente. No entanto, a combinação que mais apareceu no Quadro 10 foi a de número 34, seguida pelas de número 3 e 4 e depois pelas 9, 28, 33 e 35. A infiltração de água nos horizontes A e B foi bem representada pelas proposições 3, 4 e 34. Já no horizonte C, a infiltração foi melhor simulada com as proposições 9, 11 e 34.

A combinação 34 representou bem a maioria dos casos, ficando a desejar apenas para as colunas 3 e 8. Na coluna 3, porém, os valores de K_0 e Tib ficaram muito próximos (Quadro 4) e, por isso, as combinações 10 e 34 podem ser considerados aproximadamente equivalentes. A coluna 8 é a única em que a massa específica não foi a mesma ao longo do perfil, podendo ser comparada, *grosso modo*, a um solo com encrostamento superficial. Na combinação 34, considerou-se a condutividade hidráulica igual à Tib (SILVA, KATO, 1998) e sendo o potencial matricial calculado em função da textura do solo (RAWLS et al., 1996). Essa consideração também apresentou bons resultados nos estudos de CECÍLO (2002).

As curvas de avanço da frente de umedecimento (Z), infiltração acumulada (Ia) e taxa de infiltração (Ti), experimentais e simuladas usando as combinações de K_w e ψ_f selecionadas, estão apresentadas nas Figuras 12 a 14, para a coluna 1.

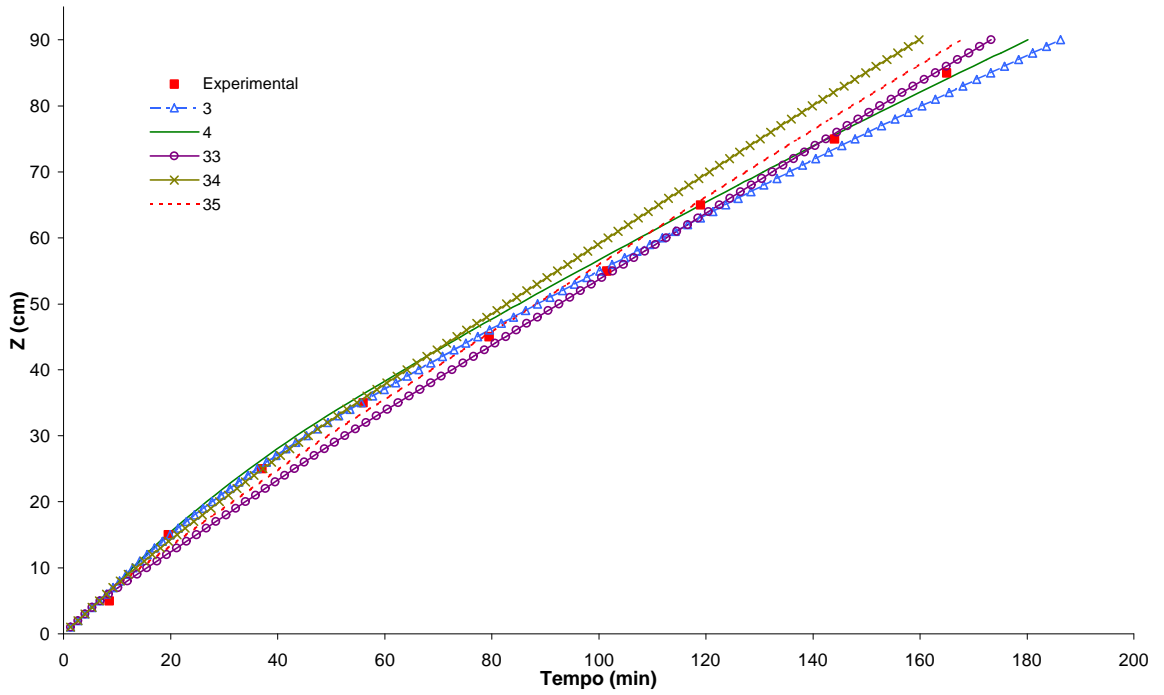


Figura 12 – Profundidade da frente de umedecimento (Z) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 1

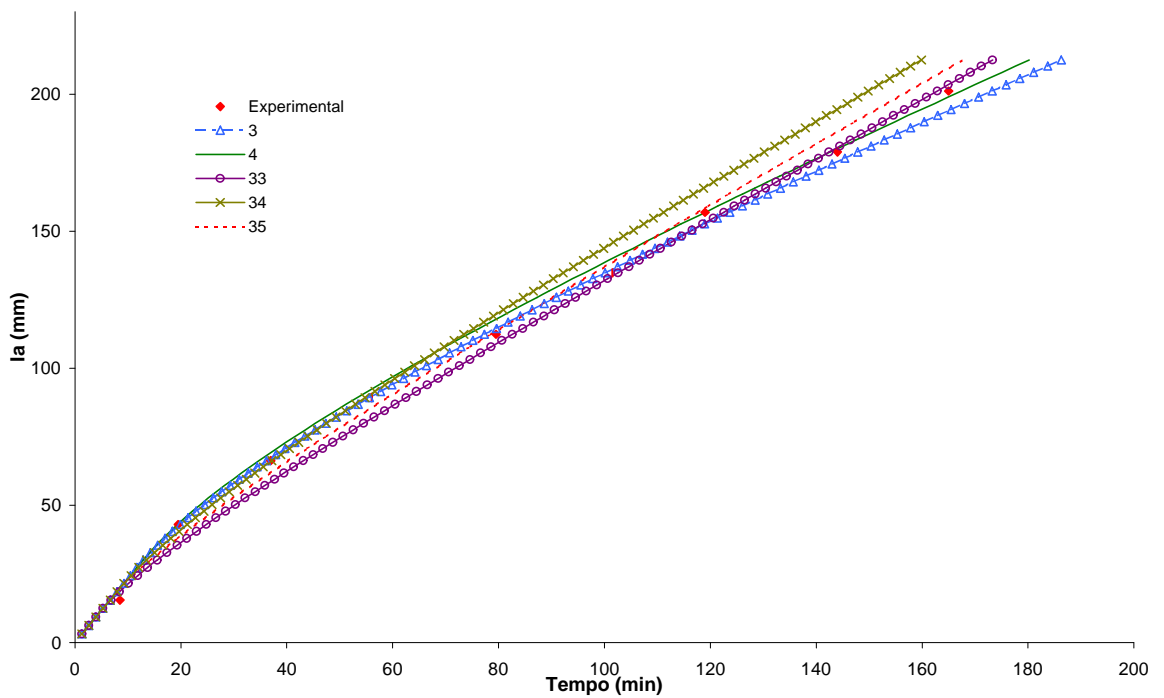


Figura 13 – Infiltração acumulada (I_a) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 1

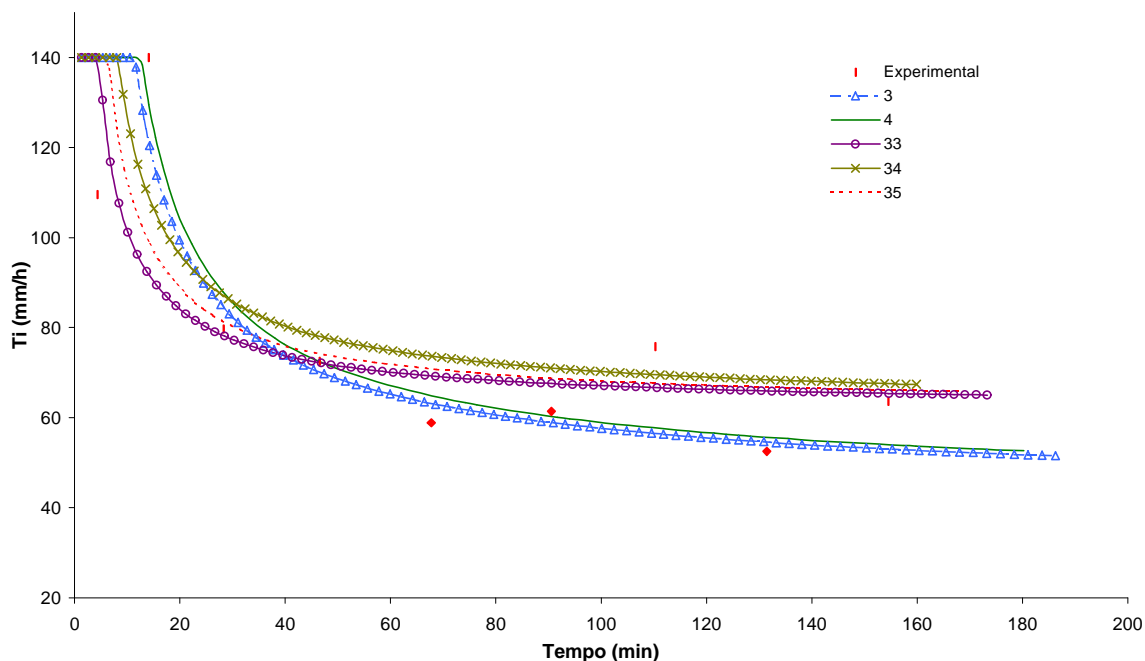


Figura 14 – Taxa de infiltração (Ti) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 1

Analisando as Figuras 12 a 14 observa-se que todas as curvas simuladas mostraram boa estimativa do avanço da frente de umedecimento e da infiltração acumulada até, aproximadamente, 110 min do início do teste. As combinações 33 e 35 superestimaram o tempo de avanço da frente de umedecimento até ela atingir 50 cm. A partir desta profundidade, a combinação 35 continua a superestimar o tempo e a combinação 33 passou a se ajustar bem. A combinação 34 subestimou o avanço da frente de umedecimento e a infiltração acumulada, a partir dos primeiros 110 min de início do teste. As combinações 4 e 3 (Quadro 6) foram as que melhor simularam o avanço da frente de umedecimento (Figura 12) e a infiltração acumulada (Figura 13).

Na Figura 14, observa-se que as combinações 3 e 4 tenderam a subestimar a taxa de infiltração para tempos maiores e superestimaram o tempo de início do escoamento. As combinações 33, 34 e 35 tenderam a subestimar a taxa de infiltração para maiores tempos e estimaram melhor, com exceção da 33, o início do escoamento superficial.

Do ponto de vista do cálculo do escoamento superficial, o uso das combinações 3, 4 e 33 tenderiam a superestimar o escoamento superficial enquanto que, com as combinações 34 e 35, seriam obtidos o inverso.

No caso da coluna 2 (Figuras 15 a 17), no início do processo, até a frente de umedecimento atingir a profundidade de 25 cm, as proposições superestimaram o tempo de avanço. Por outro lado, quando a frente de umedecimento atingiu profundidades

maiores, houve tendência a subestimativa do tempo de avanço, exceto para a combinação 4, que foi a que melhor representou o processo de infiltração. As combinações 35 e 34 representaram bem os primeiros 350 min de infiltração e, a partir daí, elas superestimaram a Ia. A proposição 32 foi a que mais subestimou a infiltração acumulada nos primeiros 550 min, entretanto, superestimou a Ia ao final do processo. Todas as combinações apresentaram uma boa estimativa da taxa de infiltração.

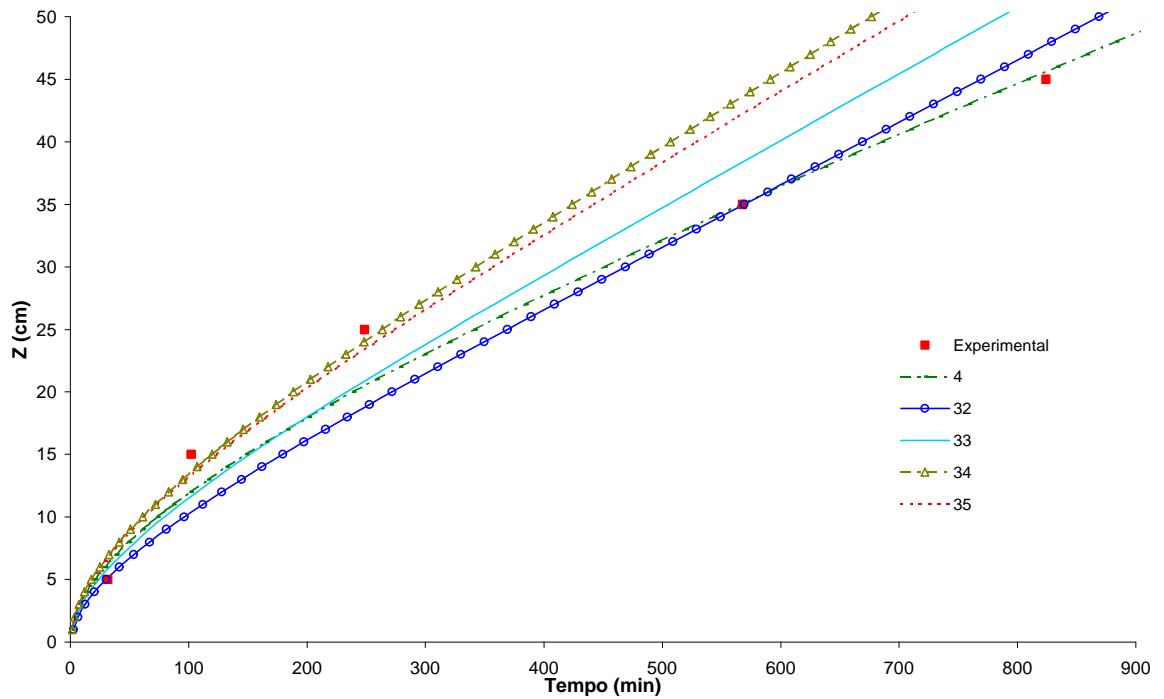


Figura 15 – Profundidade da frente de umedecimento (Z) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 2

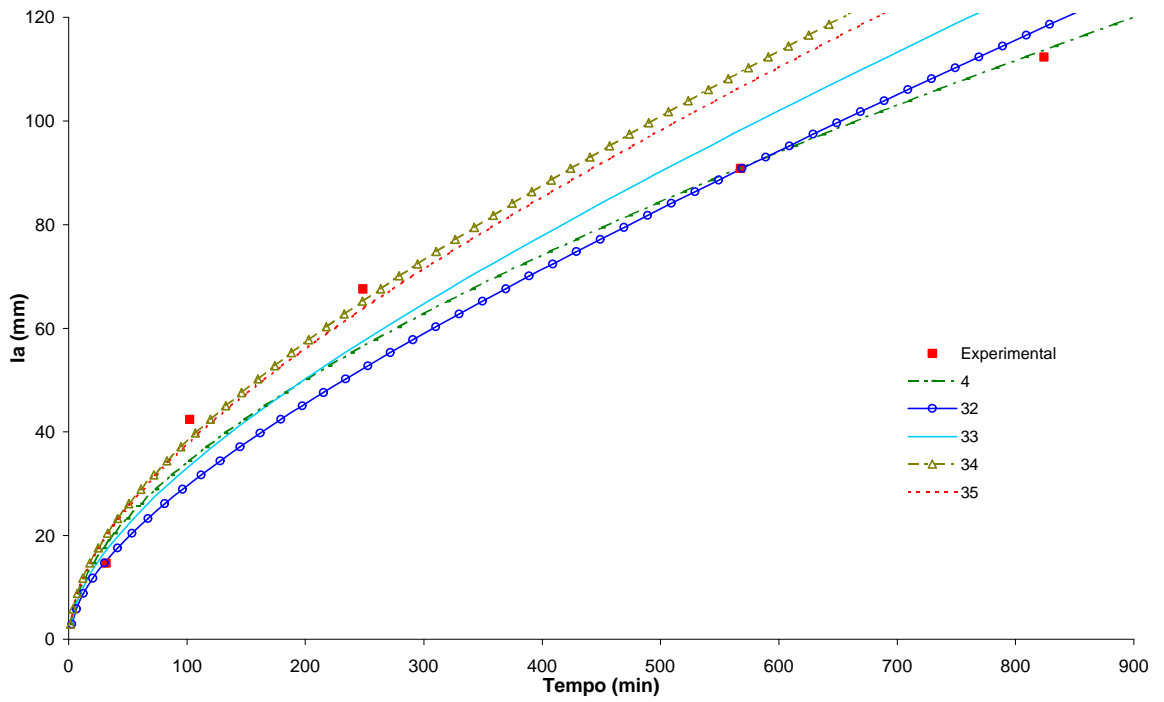


Figura 16 – Infiltração acumulada (I_a), obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 2

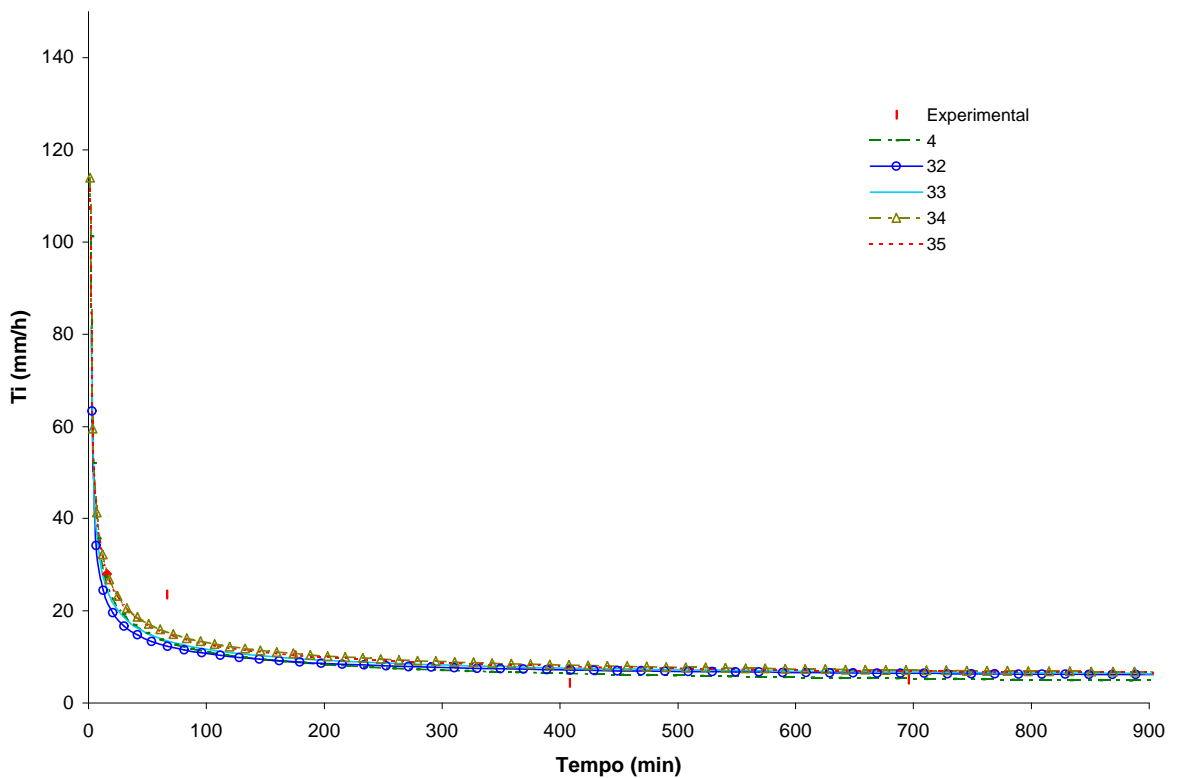


Figura 17 – Taxa de infiltração (T_i) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 2

No caso da coluna 3 (Figuras 18 a 20), como os valores de K_0 e T_{ib} estão muito próximos (Quadro 4), o parâmetro determinante do formato das curvas de infiltração simuladas foi o ψ_f .

Observando as Figuras 18 e 19 percebe-se que as combinações 3, 4, 27 e 28 representaram muito bem todo o processo de infiltração, porém apresentam uma tendência a subestimar o tempo de avanço ao final da simulação. A combinação 10 subestima a infiltração acumulada ao longo de todo o processo de infiltração.

Analisando a Figura 20, observa-se que as combinações 3, 4, 27 e 28 são as que melhor representam o início do empoçamento, porém, elas superestimam a T_{ib} . Por outro lado, a combinação 10 subestima o início do empoçamento e também superestima, embora menos que as outras, a T_{ib} .

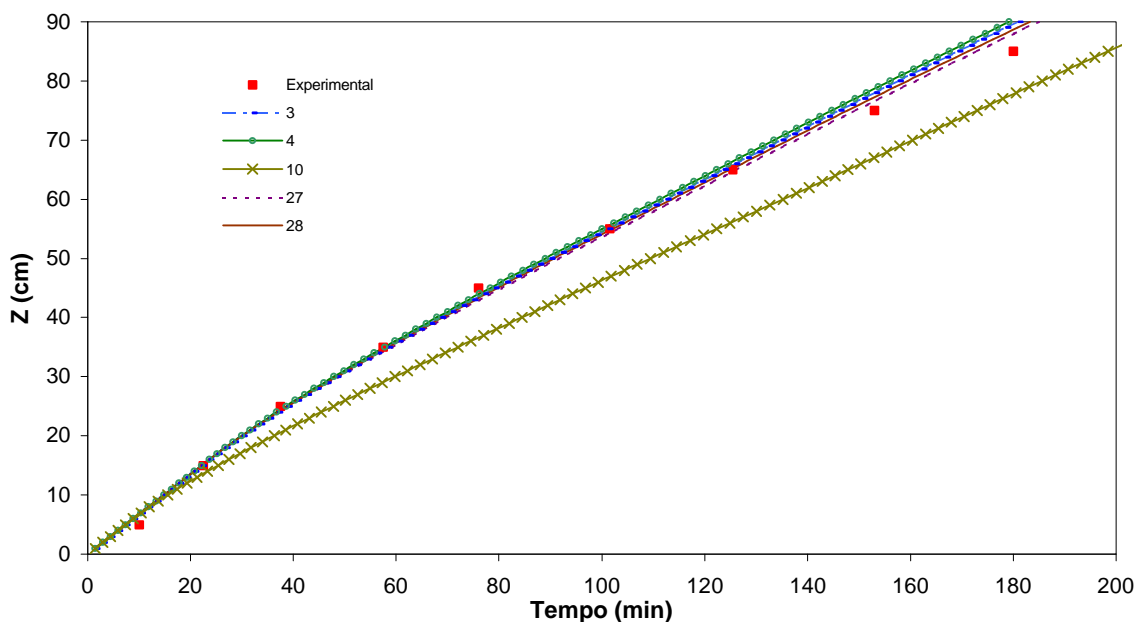


Figura 18 – Profundidade da frente de umedecimento (Z) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 3

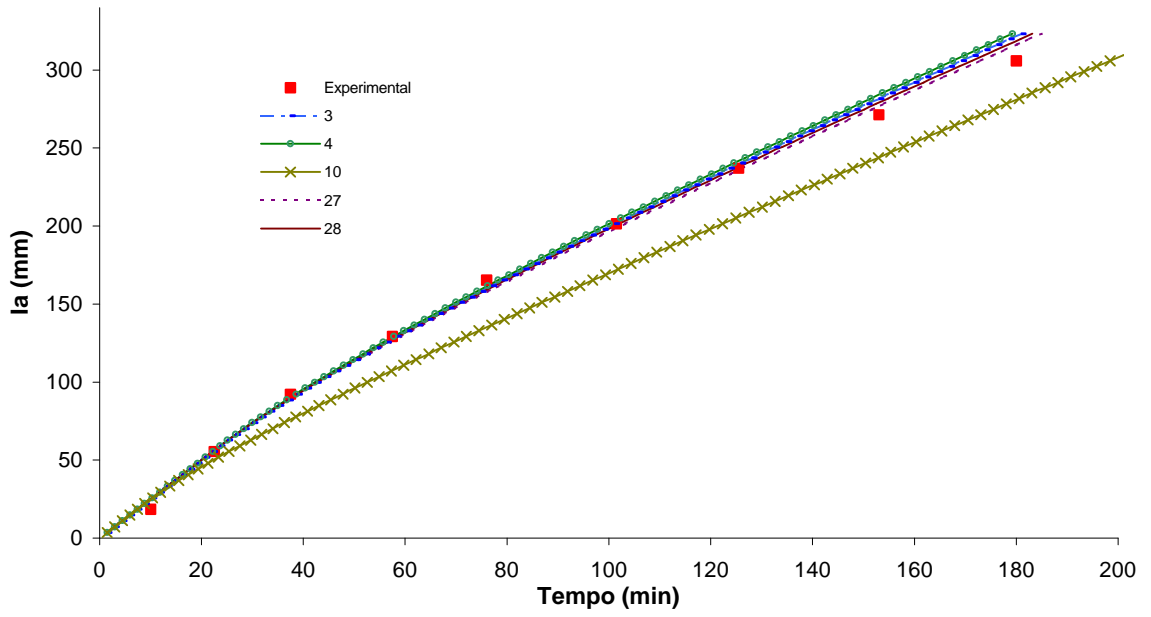


Figura 19 – Infiltração acumulada (I_a) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 3

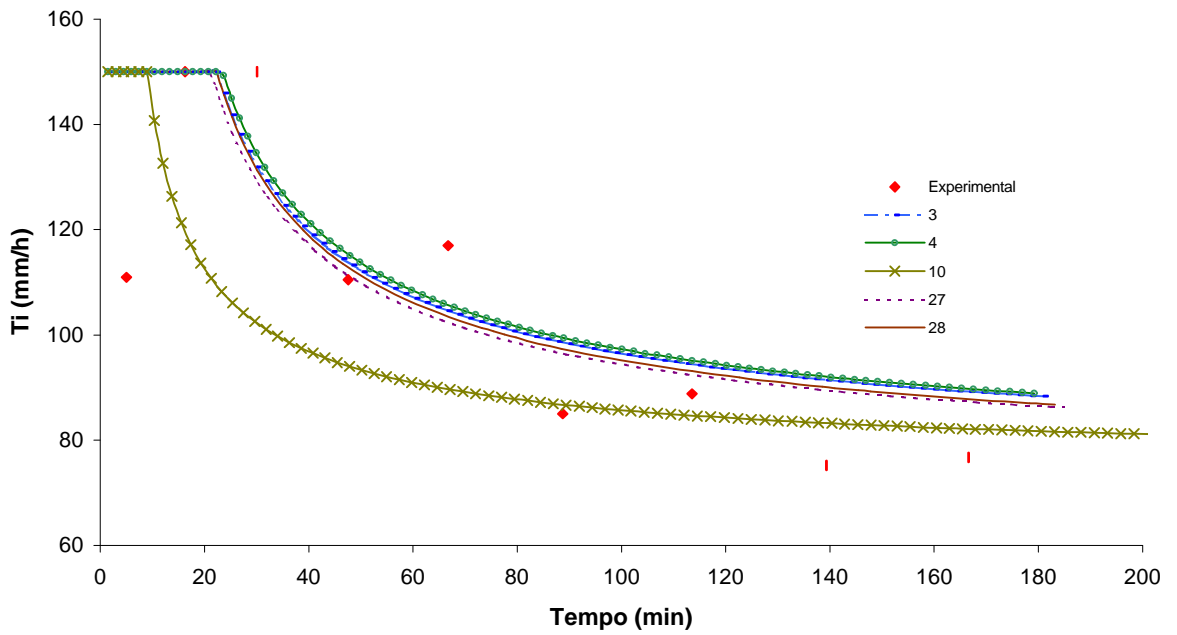


Figura 20 – Taxa de infiltração (T_i) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 3

Assim como na coluna 3, os valores de K_0 e da T_{ib} , para a coluna 4, ficaram muito próximos (Quadro 4). No entanto as curvas geradas (Figuras 21 a 23) para o mesmo valor de ψ_f não ficaram próximas, como no caso anterior. A diferença entre K_0 e a T_{ib} foi de 2,5 e 12,7% para as colunas 3 e 4, respectivamente. Com isso, pode-se dizer que uma pequena variação em K_w corresponde, para tempos muito grandes, a uma grande variação em Z e I_a . As combinações 3, 4 e 34 superestimaram o avanço da frente de umedecimento até 55 cm, representando bem os dados experimentais a partir deste ponto. A combinação 28 subestimou a infiltração acumulada para todo o período da simulação. A combinação 10 estimou bem, tanto o avanço da frente de umedecimento quanto a infiltração acumulada. Todas as combinações representaram muito bem a T_i e a T_{ib} .

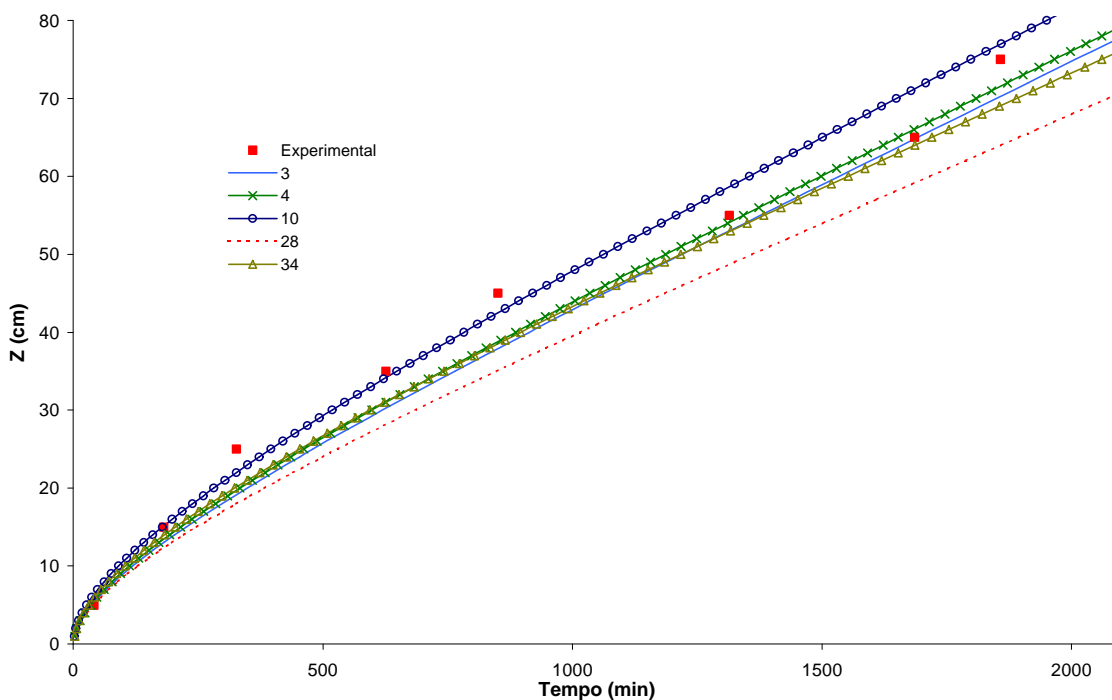


Figura 21 – Profundidade da frente de umedecimento (Z) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 4

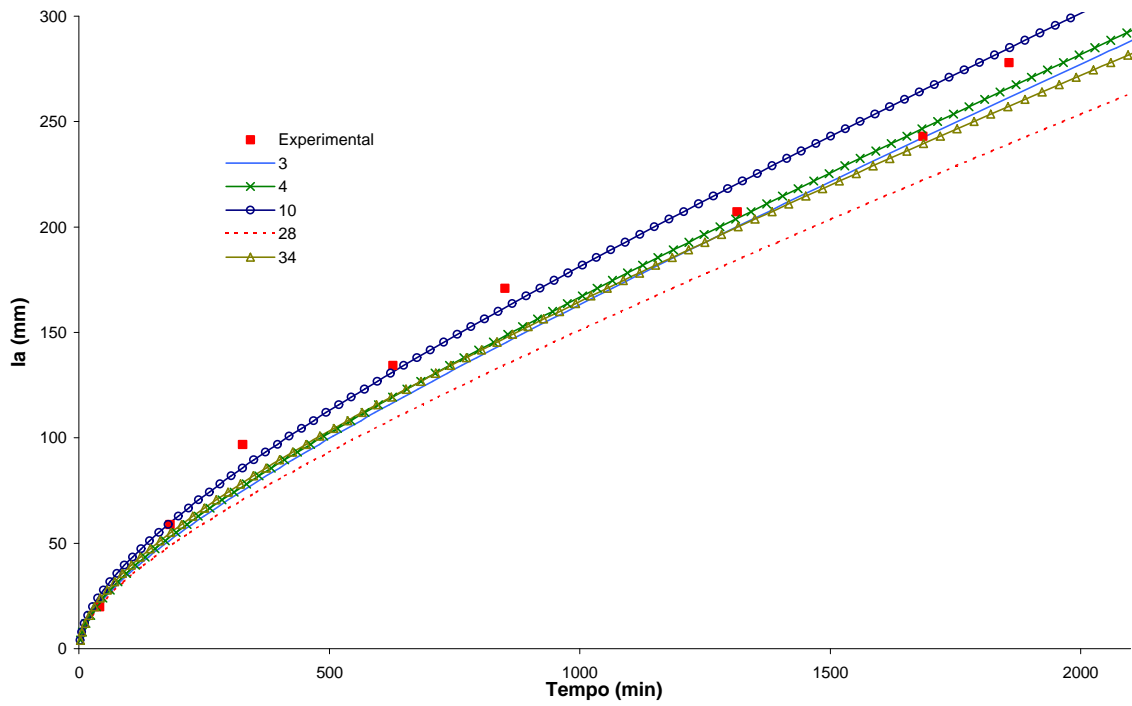


Figura 22 – Infiltração acumulada (I_a) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 4

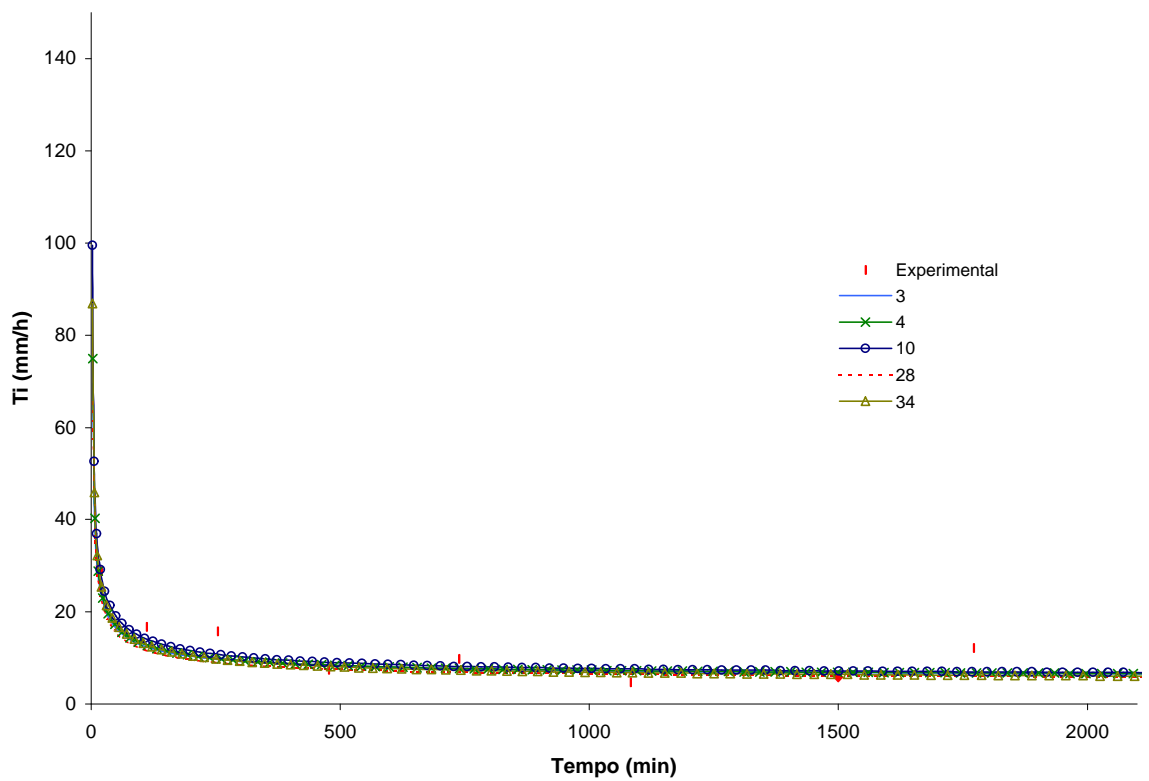


Figura 23 – Taxa de infiltração (T_i) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 4

Observando as curvas da coluna 5 (Figuras 24 a 26), verifica-se que a combinação 34 superestima o tempo de avanço da frente de umedecimento e, conseqüentemente, subestima a Ia. Ao contrário dela, as combinações 31 e 32 subestimam o tempo de avanço da frente de umedecimento e, conseqüentemente, superestimam a Ia.

A combinação 9 estima bem o tempo de avanço da frente de umedecimento até 45 cm, quando passa a superestimá-lo. A combinação 11 subestima o tempo de avanço da frente de umedecimento no intervalo de 15 a 65 cm, sendo que, a partir dessa profundidade, ela tende a superestimá-lo.

Todas as curvas representaram bem a T_i , entretanto, as combinações que usam K_w igual a T_{ib} (31, 32 e 34) são as que melhor representaram a T_{ib} .

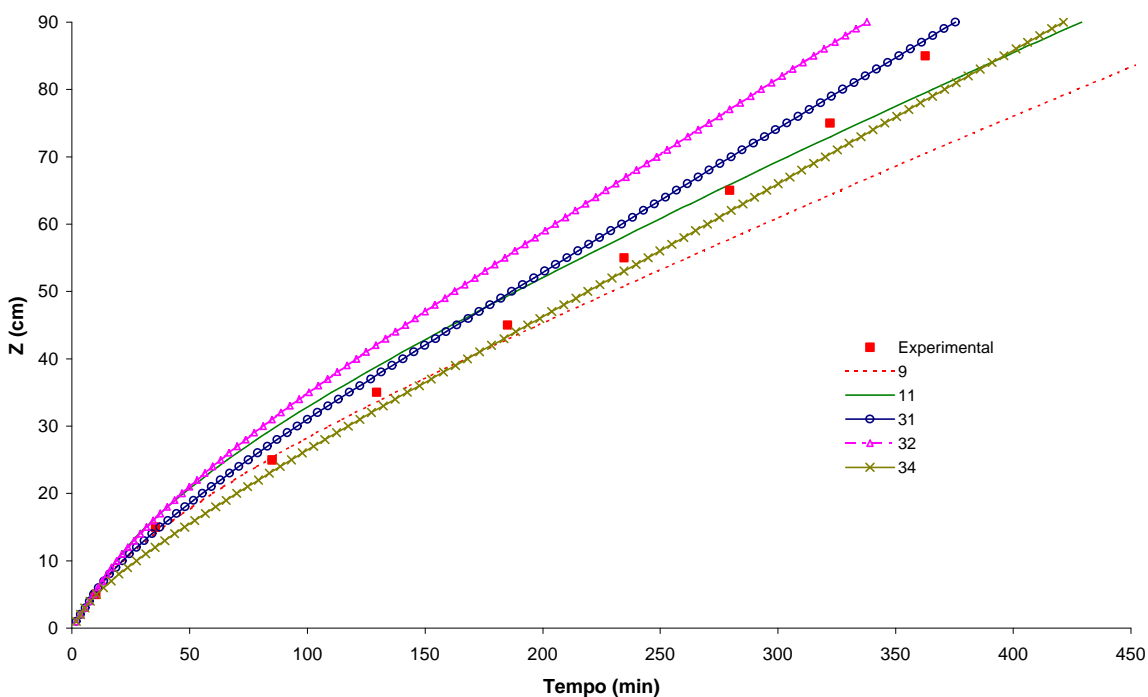


Figura 24 – Profundidade da frente de umedecimento (Z) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 5

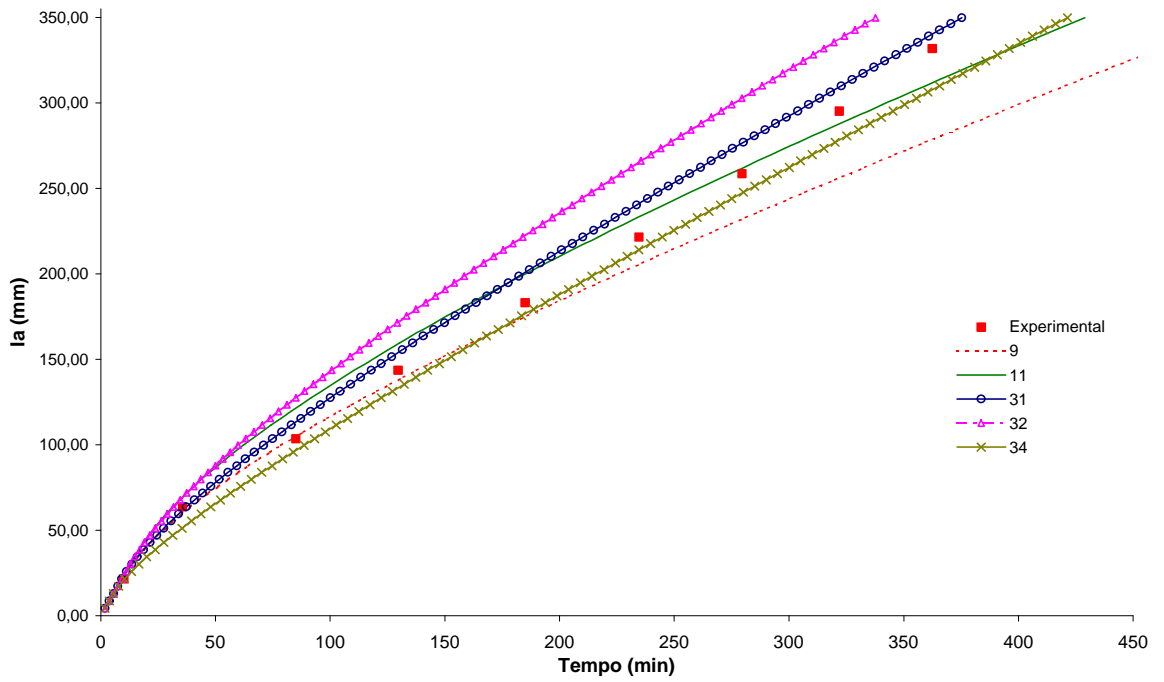


Figura 25 – Infiltração acumulada (I_a) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 5

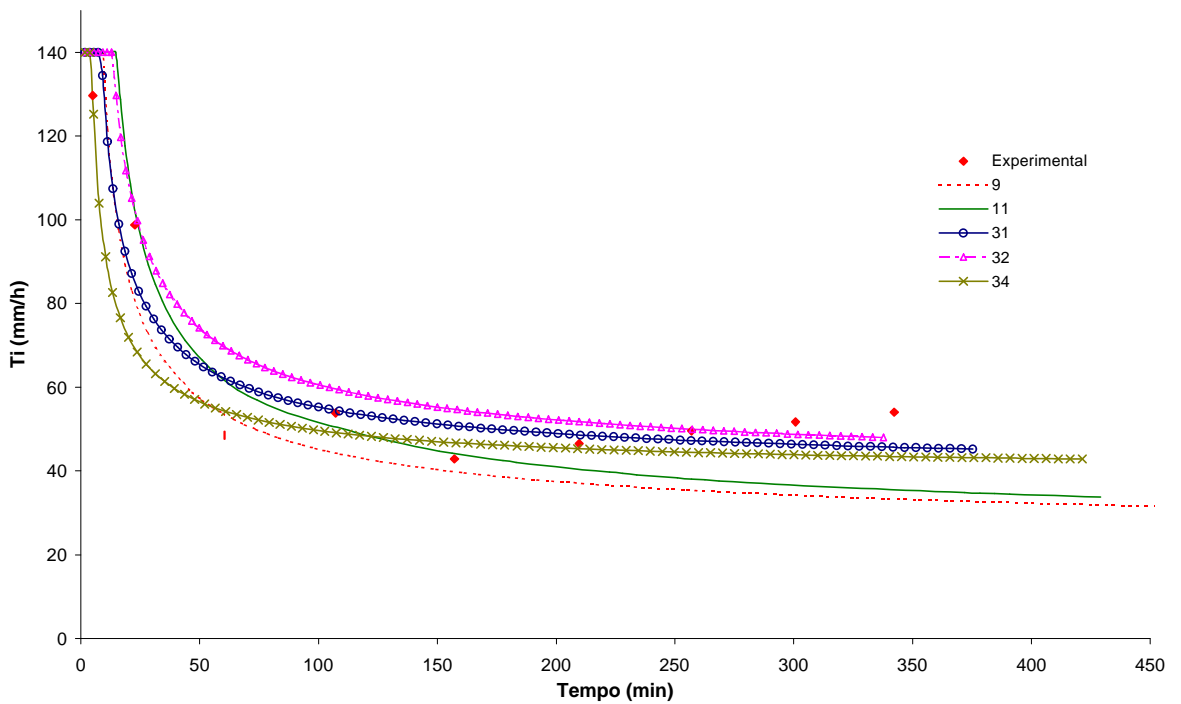


Figura 26 – Taxa de infiltração (T_i) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 5

Analisando as curvas de avanço da frente de umedecimento (Z) e taxa de infiltração (T_i) da coluna 6 (Figuras 27 e 28), observa-se que com a combinação 11 estima-se bem o tempo de avanço da frente de umedecimento até a profundidade de 45 cm, subestimando-o a partir deste tempo. Com a combinação 8 subestimou-se a infiltração acumulada ao longo de todo o processo. A combinação 34 também subestima a infiltração acumulada, porém somente até aproximadamente 900 min, e a partir daí ela passou a ser superestimada. Com as combinações 3 e 9 foram obtidas as melhores simulações do avanço da frente de umedecimento e a infiltração acumulada (Figuras 27 e 28), subestimando o início e se ajustando bem ao final do processo.

A T_i bem como a T_{ib} estão bem representadas por todas as combinações, no entanto, com as combinações 8 e 34 considera-se já no início do processo CI menor do que a intensidade de precipitação (Figura 29).

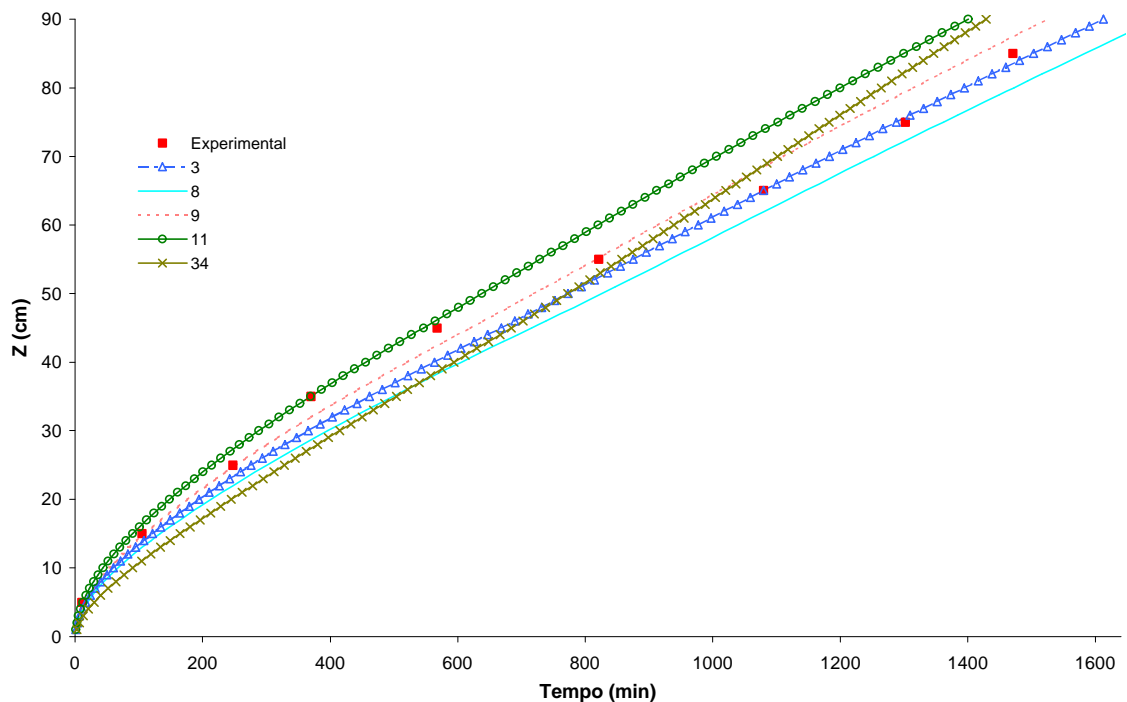


Figura 27 – Profundidade da frente de umedecimento (Z) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 6

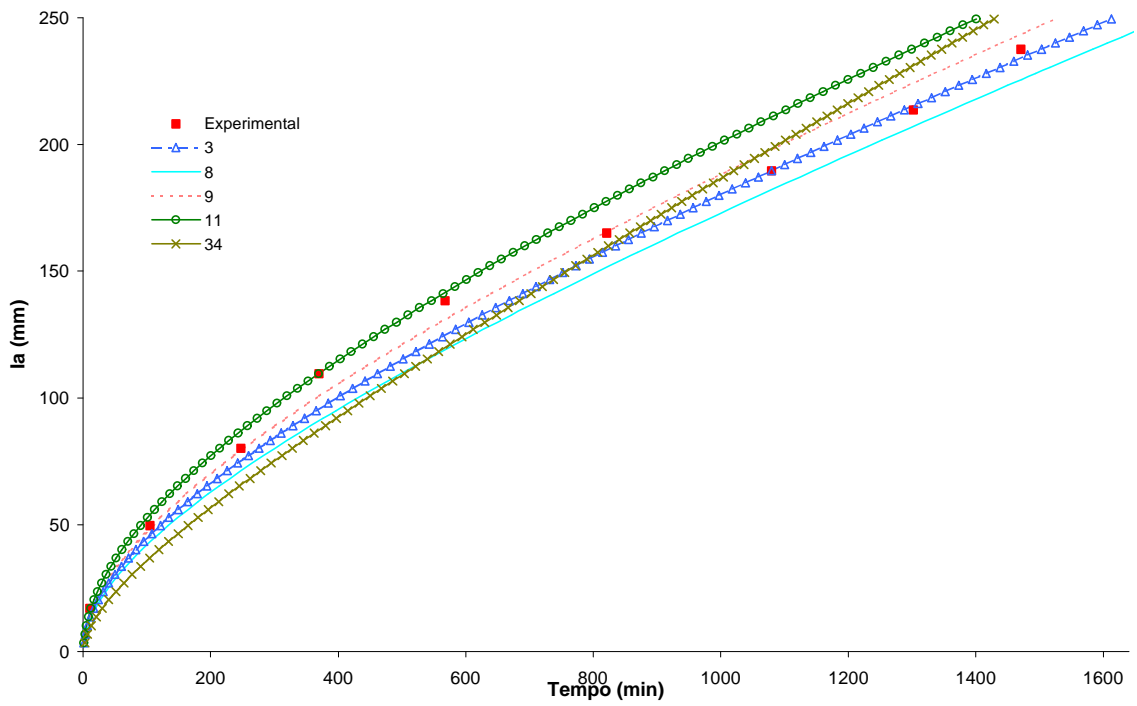


Figura 28 – Infiltração acumulada (I_a) obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 6

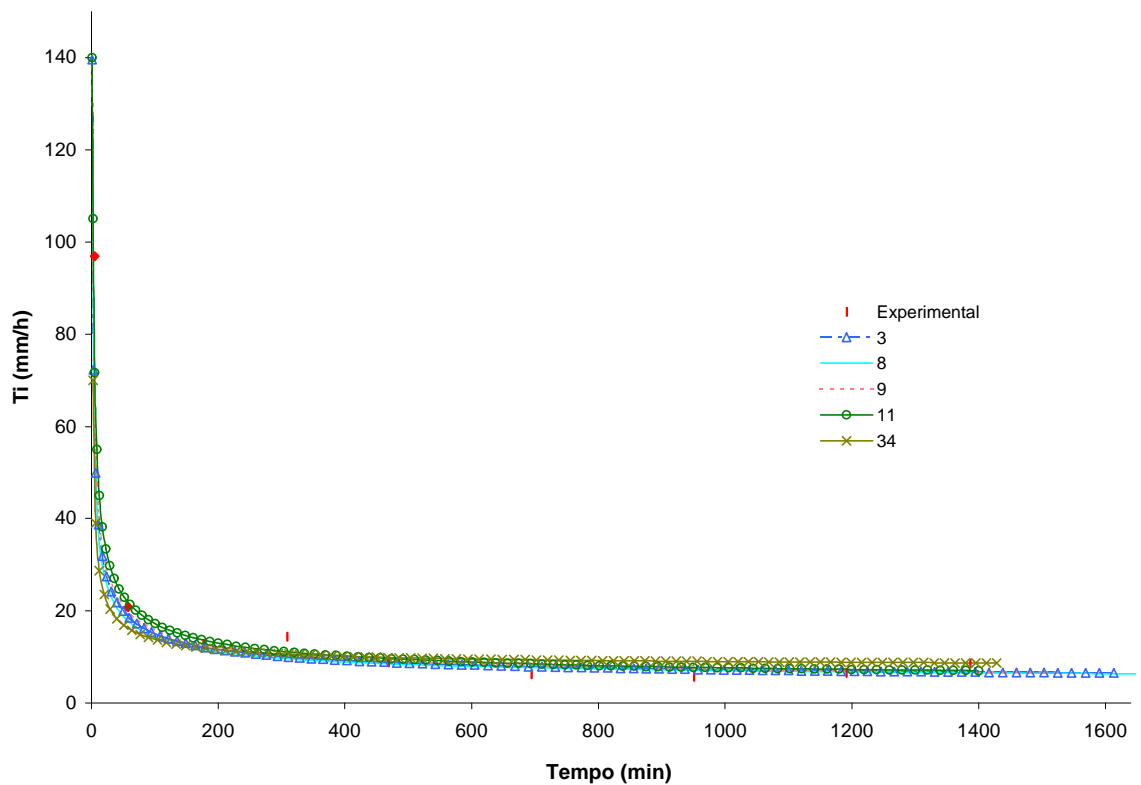


Figura 29 – Taxa de infiltração (T_i), obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 6

Para a coluna 7 só foram selecionadas proposições que usaram K_w igual a Tib provavelmente devido ao baixo valor de K_0 quando comparada à Tib , exceto para o horizonte B, (Quadro 4). A Tib , de certa forma, corresponde a uma média dos valores encontrados para K_0 . A mudança da inclinação e dos trechos que ligam os pontos experimentais é decorrente da mudança na textura e da condutividade hidráulica do solo.

Pelas Figuras 30 e 31 observa-se que as combinações 28 e 27 foram as que melhor representaram as curvas de Z e a Ia , respectivamente, embora tenham subestimado, assim como todas as outras combinações, todo o processo. De um modo geral, as simulações acompanharam as alterações da inclinação das curvas experimentais. Pela Figura 32 verifica-se que as combinações 27 e 28 também foram as que mais se aproximaram dos dados experimentais de Ti .

As discontinuidades das curvas Z , Ia e Ti (Figuras 30 a 32) foram provocadas pela mudança da textura e da curva de retenção de água do solo decorrente dos diferentes horizontes (Quadro 4). Isso produziu valores diferentes de potencial matricial e descontinuidade hidráulica ao longo do perfil da coluna. Comparando-se as curvas experimentais e as obtidas por simulação, principalmente a da taxa de infiltração (Figura 32) verifica-se que, qualitativamente, o modelo foi sensível às alterações nas características físico-hídricas do perfil da coluna. No entanto, observa-se uma defasagem entre os tempos experimentais e simulados, de ocorrência das mudanças bruscas na taxa de infiltração, decorrente da estratificação do perfil. Esta defasagem pode ser explicada pelo fato de o modelo considerar a existência de uma frente de umedecimento abrupta enquanto que, na situação real, isso não acontece.

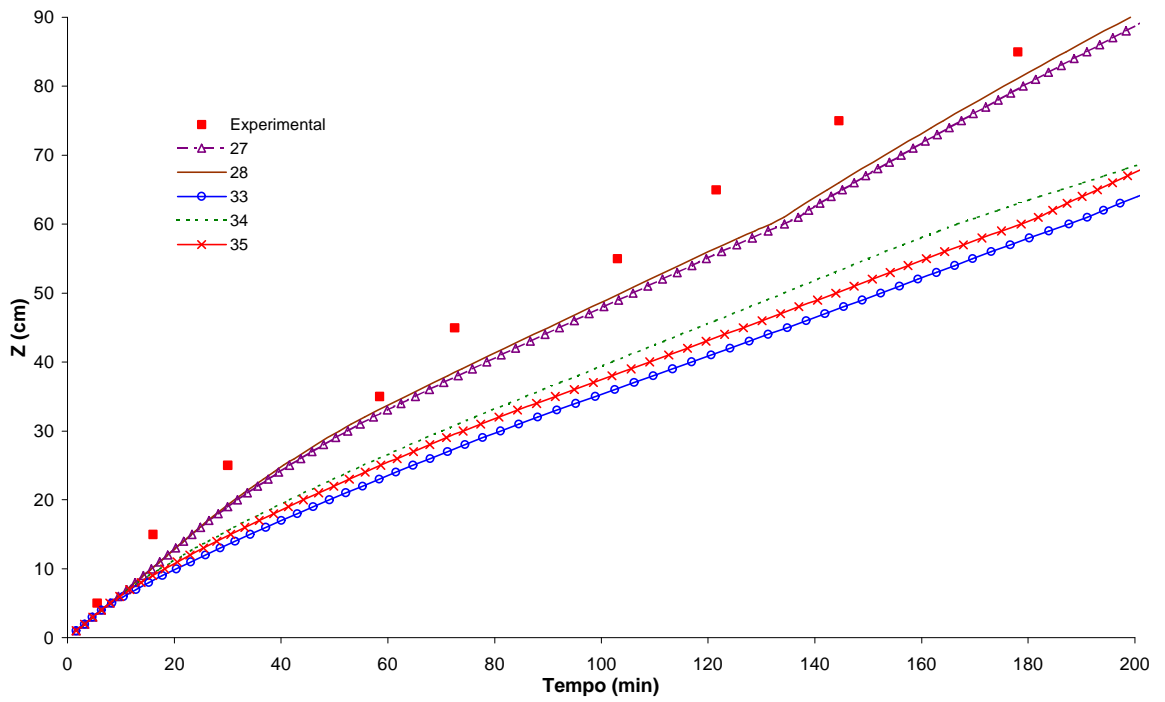


Figura 30 – Profundidade da frente de umedecimento (Z), obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 7

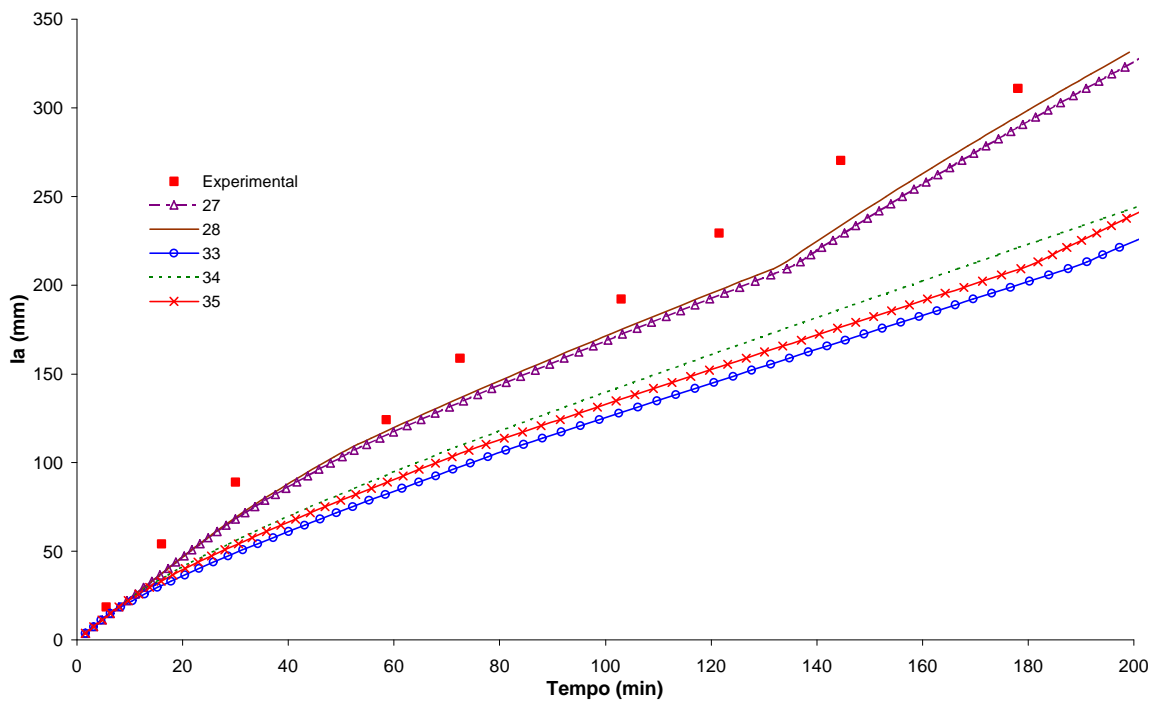


Figura 31 – Infiltração acumulada (I_a), obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 7

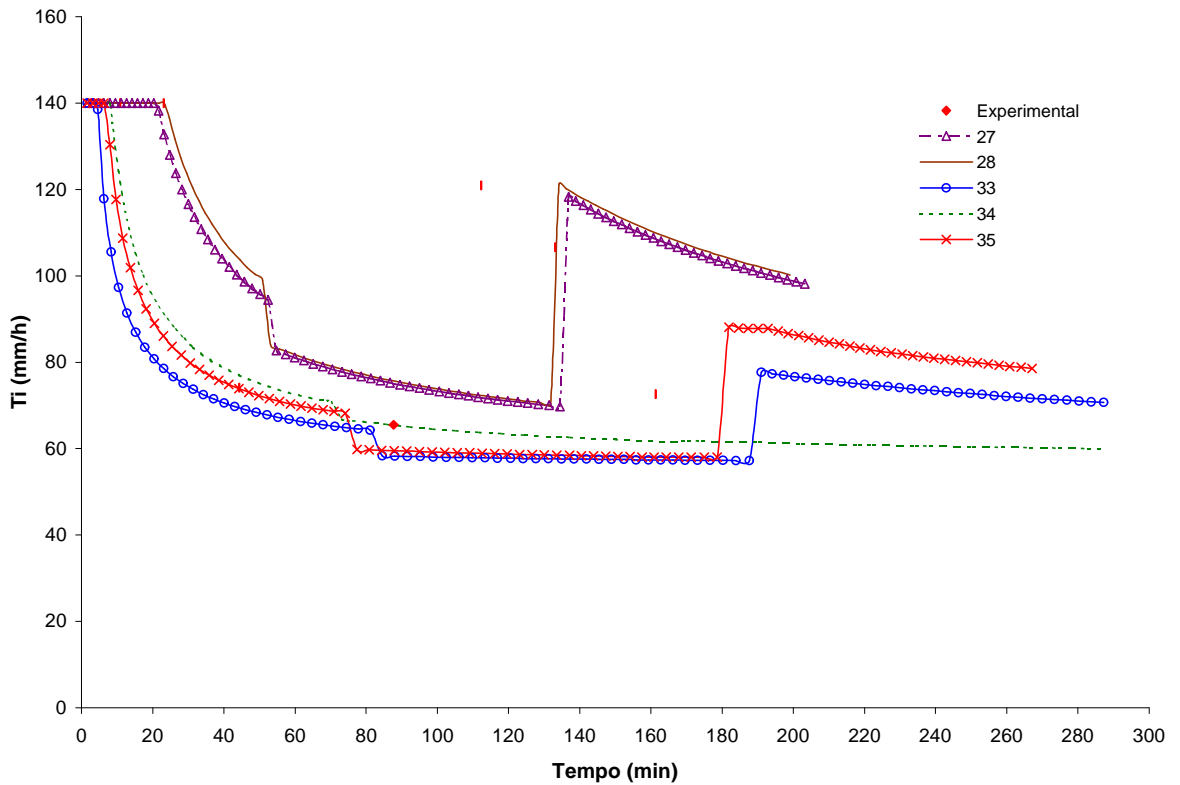


Figura 32 – Taxa de infiltração (Ti), obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 7

A combinação 8 referente à coluna 8 foi a que melhor representou o tempo de avanço da frente de umedecimento e a Ia (Figuras 33 e 34). As combinações 9 e 7 também representaram bem, porém a combinação 7 subestimou a infiltração acumulada. A combinação 36 representou bem a Ia enquanto a frente de umedecimento estava no horizonte superior. Ao passar para o horizonte seguinte, ela subestimou a Ia. Todas as combinações estimaram bem a Ti e a Tib. A combinação 31 subestimou o tempo de avanço da frente de umedecimento nos primeiros 35 cm e o superestimou a partir dos 45 cm.

Assim como na coluna 7, as discontinuidades nas curvas também apareceram no teste da coluna 8, porém menos acentuadas devido à menor diferença entre as condutividades hidráulicas entre os horizontes A, B e C (Quadro 4).

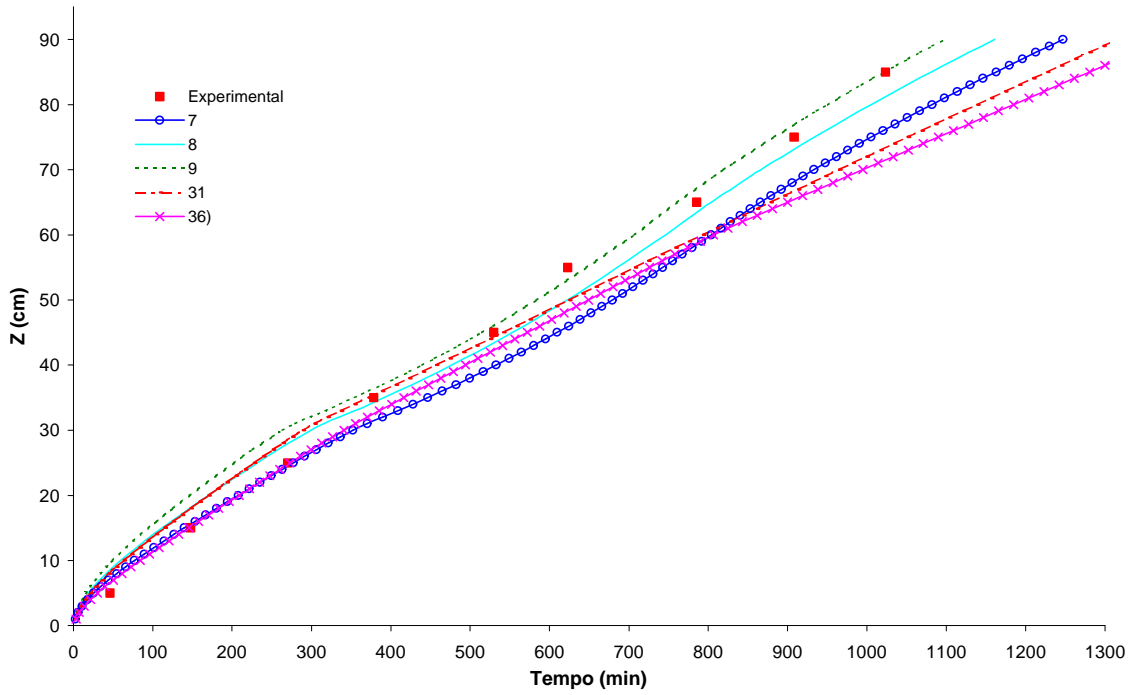


Figura 33 – Profundidade da frente de umedecimento (Z), obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 8

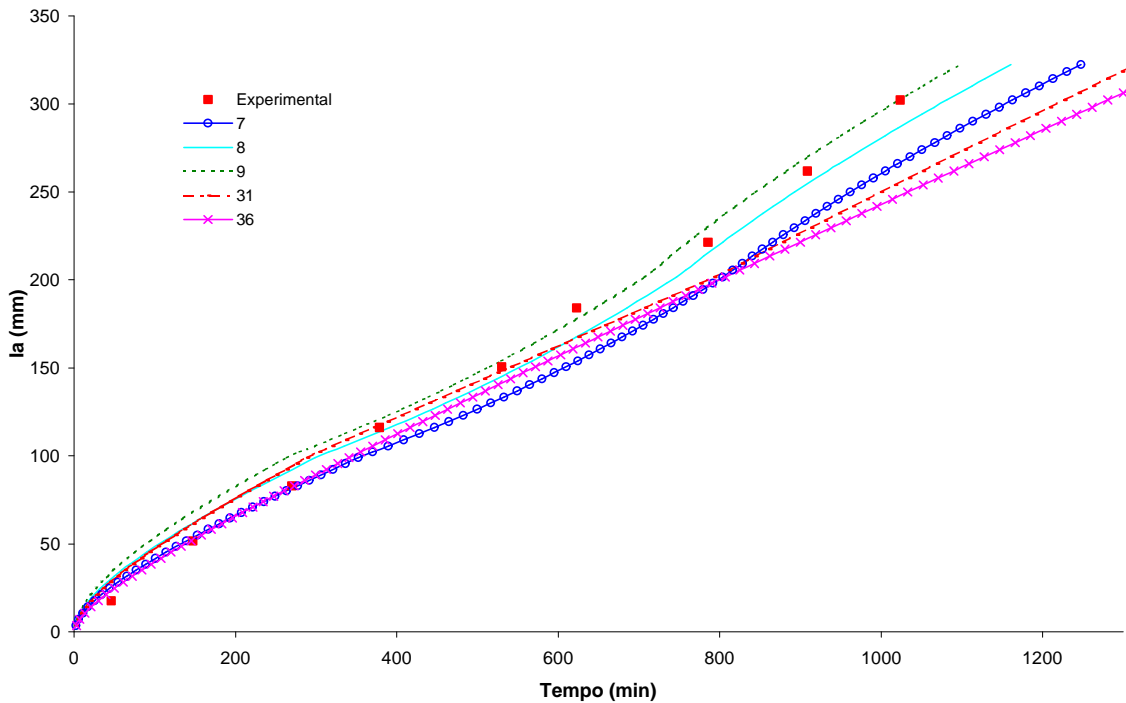


Figura 34 – Infiltração acumulada (I_a), obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 8

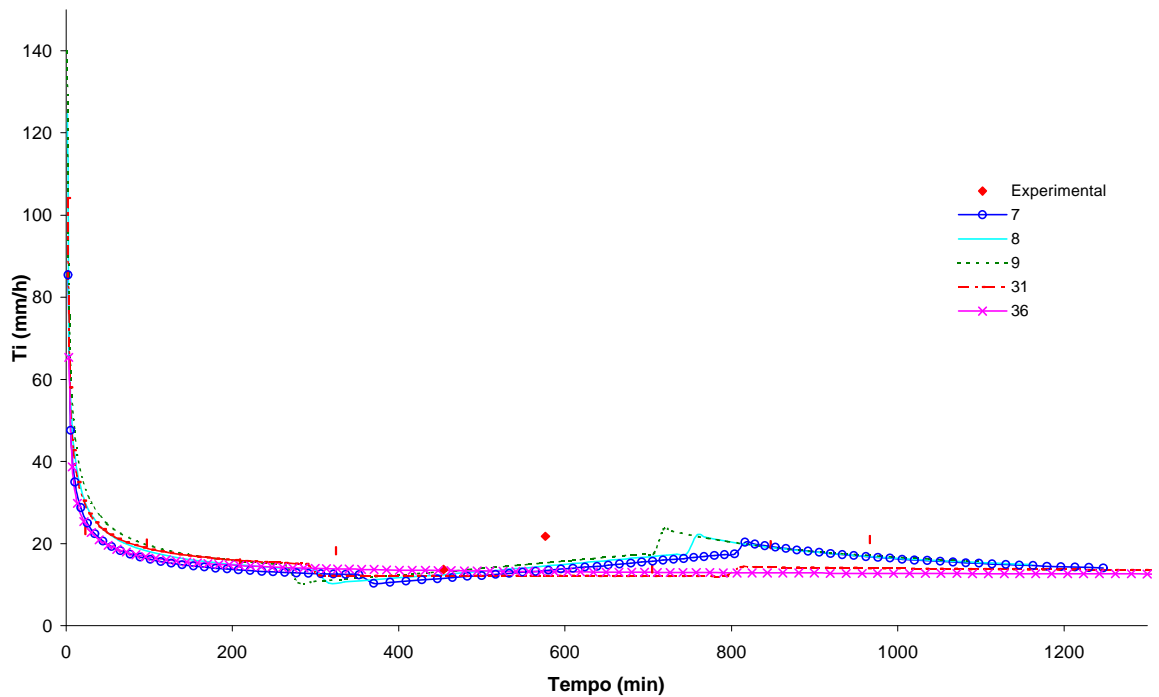


Figura 35 – Taxa de infiltração (Ti), obtida experimentalmente e por simulação utilizando de diferentes combinações de K_w e ψ_f , para a coluna 8

Analisando o Quadro 9 e as Figuras 12 a 35, verifica-se que os modelos que melhor representaram o início do escoamento não indicaram necessariamente uma boa estimativa do processo de infiltração.

Pelo Quadro 2, o tempo de avanço da frente de umedecimento é maior nos solos compactados. Essa diferença no tempo também pode ser notada nos gráficos (Figuras 12 a 35). Em alguns casos, a velocidade de avanço da frente diminui com o aumento de profundidade, chegando a ser doze vezes maior, no caso do horizonte B, quando a frente se encontra a 75 cm da superfície.

No geral, analisando as diferentes proposições para obtenção dos parâmetros da equação de GAML, observa-se que os potenciais matriciais na zona de transmissão estimados pelos modelos de Brooks e Corey e de Van Genuchten calculado em função da textura e da porosidade, combinados, tanto com a condutividade hidráulica igual a Tib como igual a K_0 , permitiram simular muito bem o processo de infiltração.

Com o aumento da massa específica ficou clara a redução no tempo de empocamento, o aumento no tempo da infiltração e a diminuição da taxa de infiltração básica. Este fato é decorrente da diminuição do tamanho de poros na matriz do solo. A coluna 8 apresentou estas características, indo de encontro às conclusões de WANG, SHAO e HORTON (1999) de que o estrato superior é o principal responsável pelo processo da infiltração.

O uso do ψ_f na equação GAML, sendo o potencial matricial referente a umidade na zona de transmissão, indicou bons resultados e está de acordo com a magnitude do potencial matricial sugerido por BRAKENSIEK (1977) e Bouwer de usar $0,76 \psi_b$ e $0,5 \psi_b$, respectivamente.

RESUMO E CONCLUSÕES

A modelagem do processo de infiltração é fundamental para a previsão do escoamento superficial, da umidade do solo, da recarga dos aquíferos, entre outros estudos hidrológicos. Dentre os modelos de previsão da infiltração, a equação de Green-Ampt modificada por Mein e Larson (GAML) se destaca como um método atrativo para aplicação em campo, devido à flexibilidade ao descrever o processo sob diferentes condições de solo.

Os parâmetros da equação (potencial matricial, condutividade hidráulica e umidade de saturação) são de caráter físico e podem ser determinados a partir das propriedades físicas do solo. Entretanto, o fato de esses parâmetros não representarem fielmente as condições reais de ocorrência da infiltração fez com que diversos autores propusessem diferentes metodologias para determiná-los, a fim de melhorar a simulação feita com a utilização deste modelo.

Tendo em vista a dificuldade de se escolher as melhores metodologias para a aplicação do modelo em campo, o objetivo deste trabalho consistiu em testar diversas combinações de proposições para a determinação dos parâmetros da equação de GAML, a fim de se selecionar aquelas que melhor representem as diferentes condições de solo.

Os testes de infiltração foram realizados em oito colunas com material de solo dos horizontes A, B e C de um Latossolo Vermelho Amarelo com duas condições de compactação ($1,03 \text{ g/cm}^3$ e $1,23 \text{ g/cm}^3$). As dimensões das colunas de solo foram de 35 cm de diâmetro e 90 cm de altura. Cada coluna foi montada com uma condição distinta (combinação de horizontes e massas específicas), sendo seis colunas com perfil

homogêneo e duas com perfil estratificado. A respeito delas foi aplicada uma precipitação constante por meio de um simulador de chuvas e o acompanhamento da frente de umedecimento no perfil de solo foi realizado com uso de sondas de TDR instaladas horizontalmente na lateral e em diferentes profundidades. A infiltração acumulada foi obtida pela variação do armazenamento multiplicado pela profundidade da frente de umedecimento. A condutividade hidráulica foi medida na própria coluna de teste. Os resultados simulados foram comparados aos dados experimentais usando-se coeficientes de correlação, coeficiente de variação e erro percentual médio para a profundidade da frente de umedecimento, infiltração acumulada e taxa de infiltração.

Pela análise dos resultados obtidos, foi possível concluir que:

- o uso do TDR foi satisfatório na predição da infiltração acumulada da chuva simulada em colunas de solo;
- a magnitude do potencial matricial na frente de umedecimento que resultou em melhores simulações do processo de infiltração foi inferior a 10 kPa (1 m.c.a.);
- a umidade na zona de saturação, determinada ao final do teste de infiltração, variou de 0,76 a 0,94 da porosidade, dependendo da textura e da massa específica do solo;
- não foi encontrada uma única combinação de proposição que melhor representasse todos os casos;
- o valor de condutividade hidráulica da zona de transmissão igual à taxa de aplicação básica considerada com o potencial matricial, calculado em função da textura e da porosidade, foi a proposição que resultou em melhores simulações do processo de infiltração para a maioria dos casos;
- a equação de GAML representou bem o processo de infiltração em solos homogêneos;
- em solos heterogêneos, o modelo GAML foi sensível às alterações físico-hídricas do perfil do solo, mas não foi preciso em estimar o tempo de ocorrência das mudanças na taxa de infiltração devido à estratificação do solo;
- a condutividade hidráulica do solo saturado determinada pelo método do permeâmetro de carga constante, considerado como o potencial matricial correspondente à umidade na zona de transmissão também permitiram, em grande número de casos, uma boa simulação do processo de infiltração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGELIDES, S.; YOUNGS, E.G. The dependence of the parameters in the Green and Ampt infiltration equation on the initial water content in draining and wetting states. **Water Resources Research**, v. 14, n. 5, p. 857-862, 1978.

ALVES SOBRINHO, T. **Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil**. 1997. 85 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

ARAÚJO FILHO, J.C.; RIBEIRO, M.R. Infiltração da água em cambissolos do baixo de Irecê (BA). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 363-370, 1996.

BRANDÃO, V.S.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. **Infiltração da água no solo**. 1. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002. 98 p.

BRAKENSIEK, D.L. Estimating the effective capillary pressure in the Green and Ampt infiltration equation. **Water Resources Research**, v. 13, n. 3, p. 680-682, 1977.

BRUTSAERT, W. Some methods of calculating unsaturated permeability. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 10, n. 3, p. 400-404, 1967.

CASTRO, L.G. **Dinâmica de água em terraços de infiltração**. 2001. 123 p., il. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

CECÍLIO, R.A. **Aplicação da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado**. 2002. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade de Viçosa, Viçosa, 2002.

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**, v. 46, p. 235-239, 1982.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Hidrología aplicada**. Santa Fé de Bogotá, Colômbia: McGraw-Hill, 1995.

CHU, S.T. Effect of initial water content on Green-Ampt parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 38, n. 3, p. 839-841, 1995.

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: Saraiva, 1999.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Manual de método e análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.

GREEN, W.H.; AMPT, G.A. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. **Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 1, p. 1-24, 1911.

IDIKE, F.I. et al. Experimental evaluation of two infiltration models. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 23, n. 6, p. 1428-1433, 1980.

KING, K.W.; ARNOLD, R.L.; BINGNER R.L. Comparison of Green-Ampt and Curve Number methods on goodwin creek watershed using SWAT. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 42, n. 4, p. 919-925, 1999.

LEIJ, F.J. et al. **RETC**: a computer program for analyzing soil water retention and hydraulic conductivity data. [S.l.], 1993. Proc. Int'l workshop "Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils". p. 263-272.

LIMA, C.A.G.; SILANS, A.P. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2311-2320, dez. 1999.

MEIN, R.G.; FARRELL, D.A. Determination of wetting front suction in the Green-Ampt equation. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 38, n. 6, p. 399-417, 1974.

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

McCUEN, R.H.; RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L. Statistical analysis of the Brooks e Corey e Green-Ampt parameters across soil textures. **Water Resources Research**, v. 17, n. 4, p. 1005-1013, 1981.

MOHAMOUD, Y.M. Evaluating the green and ampt infiltration parameter values for tilled and crusted soils. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n. 123, p. 25-38, 1991.

NEVES, R.; CHAMBEL-LEITÃO, P. Modelação numérica da circulação da água no solo: o modelo MOHID. **Pedologia**, Oeiras, n. 28, p. 46-55, 2000.

NOBORIO, K.; MCLNNES, K.J.; HEILMAN, J.L. Measurement of cumulative infiltration and wetting front location by time domain reflectometry. **Soil Science**, v. 161, n. 18, p. 480-483, Aug. 1996.

PARLANGE, J.Y.; BARRY, D.A.; HAVERKAMP, R. Explicit infiltration equations and the Lambert W-function. **Advances in Water Resources**, n. 25, p. 1119-1124, 2002.

PEREIRA, S. **Tecnologia da reflectometria no domínio do tempo para a medição da umidade do solo**. 2001. 86 p., il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade de Viçosa, Viçosa, 2001.

PHILIP, J.R. The theory of infiltration, part 1: the infiltration equation and its solution. **Soil Science**, v. 83, p. 345-357, 1957.

PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba, 1996. 446 p.

PRUSKI, F.F. et al. **Infiltração da água no solo**. Viçosa, MG: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais, 1997. 26 p. (Caderno didático, n. 25).

RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L.; SONI, B. Agricultural management effects on soil water process Part I: soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 26, n. 6, p. 1747-1752, 1983.

RAWLS, W.J. et al. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 109, n. 1, Jan. 1983.

_____. Infiltration. In: ASCE. **Hydrology Handbook**. 2. ed. New York, 1996. p. 75-124. (ASCE Manuals and Report on Engineering Practice, 28).

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: USP/ESALQ. Depto. Física e Meteorologia, 1996. 505 p.

REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da; CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração da água em solo do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, n. 16, p. 289-298, 1992.

RISSE, L.M.; NEARING, M.A.; ZHANG, X.C. Variability in Green-Ampt effective conductivity under fallow conditions. **Journal of Hydrology**, v. 169, p. 1-24, 1995.

RODRIGUES, L.N. **Modelo para dimensionamento e para simulação do desempenho de pivô central**. 1999. 145 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

SI, B. et al. Measurement of hydraulic properties during constant flux infiltration, field average. **Soil Science Society of America Journal**, n. 63, p. 793-799. 1999.

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.

SILVEIRA, A.L.; LOUZADA, J.A.; BELTRAME, L.F. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade: ABRH, EDUSP, 2000. p. 335-372.

SLACK, D.C. Modeling infiltration under moving sprinkler irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 23, n. 3, p. 596-600, 1980.

SLACK, D.C. et al. Application of the Green-Ampt-Mein-Larson infiltration model to taconite tailings. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 31, n. 5, p. 1455-1461, 1988.

SULEIMAN, K.A.; SWARTZENDRUBER, D. Measurement of saturated hydraulic conductivity of surface soil in the field with a small-plot sprinkling infiltrometer. **Journal of Hydrology**, xx (2002) xxx-xxx [Article in press]. Disponível em <<http://www.elsevier.com/locate/jhydrol>> Acessado em 2003.

TIMLIN, D.; PACHEPSKY, Y. Infiltration measurement using a vertical time-domain reflectometry probe and a reflection simulation model. **Soil Science**, v. 167, n. 1, Jan. 2002.

TIMM, L.C. et al. Avaliação de alguns modelos matemáticos para a determinação da condutividade hidráulica de solos não-saturados. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 4, n. 44, p. 1-19, 1995.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic properties of unsaturated soil. **Soil Science Society America Journal**, n. 44, p. 892-898, 1980.

YOUNGS, E.G.; LEEDS-HARRISON, P.B.; ALGHUSNI, A. Surface ponding of coarse-textured soils under irrigation with a line of surface emitters. **Journal of Agriculture Engineering Research**, n. 73, p. 95-100, 1999. Disponível em <<http://www.idealibrary.com>> Acessado em 2003.

WANG, Q.; SHAO, M.; HORTON, R. Modified Green and Ampt models for layered soil infiltration and muddy water infiltration. **Soil Science**, v. 164, n. 7, p. 445-453, 1999.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Quadro 1A – Valores do potencial matricial calculado pelas diferentes proposições analisadas, para a coluna 2 (A - 1,23 g/cm³)

Z	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
cm	(mca)											
5	6,80E+04	7,55E+04	0,24	0,34	3,40E+04	3,77E+04	0,08	0,12	0,15	0,22	0,21	0,09
15	4,07E+03	4,32E+03	0,24	0,34	2,03E+03	2,16E+03	0,08	0,12	0,15	0,22	0,20	0,09
25	1,05E+03	1,09E+03	0,24	0,34	5,25E+02	5,47E+02	0,08	0,12	0,15	0,22	0,20	0,09
35	3,26E+02	3,34E+02	0,24	0,34	1,63E+02	1,67E+02	0,08	0,12	0,15	0,22	0,19	0,09
45	1,77E+02	1,80E+02	0,24	0,34	8,88E+01	9,01E+01	0,08	0,12	0,15	0,22	0,19	0,09
55	1,15E+02	1,16E+02	0,24	0,34	5,75E+01	5,81E+01	0,08	0,12	0,15	0,22	0,19	0,09
65	1,79E+02	1,82E+02	0,24	0,34	8,98E+01	9,12E+01	0,08	0,12	0,15	0,22	0,19	0,09
75	6,04E+01	6,04E+01	0,24	0,34	3,03E+01	3,04E+01	0,08	0,12	0,15	0,22	0,18	0,09
85	7,62E+01	7,64E+01	0,24	0,34	3,82E+01	3,84E+01	0,08	0,12	0,15	0,22	0,19	0,09

Quadro 2A – Valores do potencial matricial calculado pelas diferentes proposições analisadas, para a coluna 3 (B - 1,03 g/cm³)

Z	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
cm	(mca)											
5	2,50E+11	2,57E+11	0,15	0,15	1,25E+11	1,29E+11	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02
15	2,52E+11	2,60E+11	0,15	0,15	1,26E+11	1,30E+11	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02
25	1,23E+11	1,27E+11	0,15	0,15	6,16E+10	6,34E+10	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02
35	5,36E+10	5,51E+10	0,15	0,15	2,68E+10	2,75E+10	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02
45	1,35E+08	1,38E+08	0,15	0,15	6,75E+07	6,88E+07	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02
55	1,92E+10	1,97E+10	0,15	0,15	9,58E+09	9,84E+09	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02
65	1,19E+07	1,21E+07	0,15	0,15	5,97E+06	6,07E+06	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02
75	7,16E+06	7,27E+06	0,15	0,15	3,58E+06	3,64E+06	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02
85	1,45E+07	1,47E+07	0,15	0,15	7,25E+06	7,37E+06	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02

Quadro 3A – Valores do potencial matricial calculado pelas diferentes proposições analisadas, para a coluna 4 (B - 1,23 g/cm³)

Z	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
cm	(mca)											
5	9,74E+18	1,01E+19	0,11	0,12	4,87E+18	5,04E+18	0,01	0,01	0,01	0,16	0,02	0,06
15	7,88E+14	8,09E+14	0,11	0,12	3,94E+14	4,04E+14	0,01	0,01	0,01	0,16	0,02	0,06
25	7,01E+12	7,17E+12	0,11	0,12	3,51E+12	3,58E+12	0,01	0,01	0,01	0,16	0,02	0,06
35	1,61E+12	1,65E+12	0,11	0,12	8,06E+11	8,23E+11	0,01	0,01	0,01	0,16	0,02	0,06
45	1,72E+11	1,75E+11	0,11	0,12	8,58E+10	8,74E+10	0,01	0,01	0,01	0,16	0,02	0,06
55	2,42E+11	2,47E+11	0,11	0,12	1,21E+11	1,23E+11	0,01	0,01	0,01	0,16	0,02	0,06
65	6,11E+09	6,21E+09	0,11	0,12	3,06E+09	3,10E+09	0,01	0,01	0,01	0,16	0,02	0,06
75	6,46E+09	6,56E+09	0,11	0,12	3,23E+09	3,28E+09	0,01	0,01	0,01	0,16	0,02	0,06
85	9,25E+09	9,40E+09	0,11	0,12	4,63E+09	4,70E+09	0,01	0,01	0,01	0,16	0,02	0,06

Quadro 4A – Valores do potencial matricial calculado pelas diferentes proposições analisadas, para a coluna 5 (C - 1,03 g/cm³)

Z	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
cm	(mca)											
5	1,31E+09	4,57E+09	0,68	0,71	6,57E+08	2,29E+09	0,12	0,18	0,24	0,06	0,40	0,03
15	1,52E+05	2,82E+05	0,68	0,71	7,60E+04	1,41E+05	0,12	0,18	0,24	0,06	0,36	0,03
25	1,92E+04	3,09E+04	0,68	0,71	9,61E+03	1,54E+04	0,12	0,18	0,24	0,06	0,35	0,03
35	7,13E+04	1,25E+05	0,68	0,71	3,56E+04	6,27E+04	0,12	0,18	0,24	0,06	0,36	0,03
45	1,37E+04	2,15E+04	0,68	0,71	6,85E+03	1,07E+04	0,12	0,18	0,24	0,06	0,35	0,03
55	5,73E+03	8,46E+03	0,68	0,71	2,86E+03	4,23E+03	0,12	0,18	0,24	0,06	0,34	0,03
65	2,16E+03	2,98E+03	0,68	0,71	1,08E+03	1,49E+03	0,12	0,18	0,24	0,06	0,34	0,03
75	2,43E+03	3,37E+03	0,68	0,71	1,21E+03	1,69E+03	0,12	0,18	0,24	0,06	0,34	0,03
85	1,86E+03	2,53E+03	0,68	0,71	9,28E+02	1,27E+03	0,12	0,18	0,24	0,06	0,33	0,03

Quadro 5A – Valores do potencial matricial calculado pelas diferentes proposições analisadas, para a coluna 6 (C - 1,23 g/cm³)

Z	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
cm	(mca)											
5	1,21E+03	1,62E+03	0,27	0,47	6,06E+02	8,11E+02	0,15	0,24	0,31	0,08	0,40	0,07
15	4,59E+02	5,69E+02	0,27	0,47	2,30E+02	2,85E+02	0,15	0,24	0,31	0,08	0,39	0,07
25	1,99E+02	2,32E+02	0,27	0,47	9,97E+01	1,16E+02	0,15	0,24	0,31	0,08	0,38	0,07
35	1,83E+02	2,12E+02	0,27	0,47	9,18E+01	1,06E+02	0,15	0,24	0,31	0,08	0,38	0,07
45	1,34E+02	1,52E+02	0,27	0,47	6,74E+01	7,60E+01	0,15	0,24	0,31	0,08	0,38	0,07
55	5,13E+01	5,37E+01	0,27	0,47	2,58E+01	2,71E+01	0,15	0,24	0,31	0,08	0,37	0,07
65	3,96E+01	4,07E+01	0,27	0,47	2,00E+01	2,06E+01	0,15	0,24	0,31	0,08	0,37	0,07
75	3,74E+01	3,83E+01	0,27	0,47	1,88E+01	1,94E+01	0,15	0,24	0,31	0,08	0,37	0,07
85	3,71E+01	3,79E+01	0,27	0,47	1,87E+01	1,92E+01	0,15	0,24	0,31	0,08	0,37	0,07

Quadro 6A – Valores do potencial matricial calculado pelas diferentes proposições analisadas, para a coluna 7 (A - 1,03 g/cm³, B - 1,03 g/cm³, C - 1,03 g/cm³)

Z	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
cm	(mca)											
5	2,13E+05	2,27E+05	0,21	0,23	1,06E+05	1,13E+05	0,02	0,03	0,04	0,08	0,07	0,03
15	1,88E+04	1,96E+04	0,21	0,23	9,38E+03	9,82E+03	0,02	0,03	0,04	0,08	0,06	0,03
25	2,57E+04	2,70E+04	0,21	0,23	1,29E+04	1,35E+04	0,02	0,03	0,04	0,08	0,06	0,03
35	5,39E+07	5,49E+07	0,15	0,15	2,70E+07	2,75E+07	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,03
45	5,06E+06	5,14E+06	0,15	0,15	2,53E+06	2,57E+06	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,03
55	3,15E+05	3,19E+05	0,15	0,15	1,58E+05	1,59E+05	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02
65	3,74E+05	7,38E+05	0,68	0,71	1,87E+05	3,69E+05	0,12	0,18	0,24	0,06	0,37	0,03
75	7,12E+04	1,25E+05	0,68	0,71	3,56E+04	6,26E+04	0,12	0,18	0,24	0,06	0,36	0,04
85	1,03E+05	1,85E+05	0,68	0,71	5,13E+04	9,25E+04	0,12	0,18	0,24	0,06	0,36	0,05

Quadro 7A – Valores do potencial matricial calculado pelas diferentes proposições analisadas, para a coluna 8 (A - 1,23 g/cm³, B - 1,03 g/cm³, C - 1,03 g/cm³)

Z	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
cm	(mca)											
5	3,70E+18	6,61E+18	0,24	0,34	1,85E+18	3,31E+18	0,08	0,12	0,15	0,22	0,27	0,05
15	1,58E+07	1,91E+07	0,24	0,34	7,92E+06	9,54E+06	0,08	0,12	0,15	0,22	0,23	0,05
25	1,67E+05	1,88E+05	0,24	0,34	8,37E+04	9,41E+04	0,08	0,12	0,15	0,22	0,22	0,05
35	5,13E+07	5,22E+07	0,15	0,15	2,56E+07	2,61E+07	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,05
45	3,94E+06	4,00E+06	0,15	0,15	1,97E+06	2,00E+06	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,04
55	9,88E+05	1,00E+06	0,15	0,15	4,94E+05	5,01E+05	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,04
65	1,18E+05	2,14E+05	0,68	0,71	5,89E+04	1,07E+05	0,12	0,18	0,24	0,06	0,36	0,04
75	4,96E+04	8,52E+04	0,68	0,71	2,48E+04	4,26E+04	0,12	0,18	0,24	0,06	0,36	0,04
85	6,70E+04	1,17E+05	0,68	0,71	3,35E+04	5,87E+04	0,12	0,18	0,24	0,06	0,36	0,04

APÊNDICE B

Quadro 1B – Coeficientes estatísticos (correlação de Pearson, r; coeficiente de variação, CV; e, erro percentual, e%) para a coluna 1

Combinação de proposições	Profundidade da frente de umedecimento			Infiltração acumulada			Taxa de infiltração		
	r	CV	E	r	CV	e	r	CV	e
3	0,9994	0,0378	4,1%	0,9994	0,0349	3,9%	0,8830	0,1832	12,1%
4	0,9993	0,0267	4,2%	0,9993	0,0251	3,9%	0,9095	0,1683	11,9%
7	0,9971	0,4410	39,6%	0,9974	0,4037	36,6%	0,6511	0,4500	31,8%
9	0,9975	0,3583	30,0%	0,9977	0,3264	27,4%	0,6630	0,3971	26,3%
8	0,9982	0,4004	35,8%	0,9985	0,3656	33,0%	0,6012	0,4142	27,7%
10	0,9992	0,2667	21,6%	0,9993	0,2419	19,6%	0,6580	0,3468	23,3%
11	0,9988	0,3202	26,0%	0,9989	0,2909	23,6%	0,6203	0,3784	25,5%
12	0,9968	0,4372	39,4%	0,9972	0,4003	36,5%	0,5990	0,4506	31,1%
15	0,9987	0,4660	33,9%	0,9988	0,4242	31,1%	0,6674	0,4649	41,9%
16	0,9988	0,4408	33,4%	0,9990	0,4006	30,8%	0,7043	0,4414	40,4%
19	0,9975	0,7895	68,8%	0,9985	0,7314	65,1%	0,5988	0,6838	61,0%
20	0,9965	0,7533	63,4%	0,9978	0,6966	59,7%	0,5325	0,6473	56,8%
21	0,9980	0,7230	60,9%	0,9980	0,6676	57,3%	0,7054	0,6431	57,7%
22	0,9987	0,6467	51,8%	0,9990	0,5946	48,2%	0,6402	0,5681	49,9%
23	0,9997	0,6916	57,8%	0,9996	0,6372	54,1%	0,6385	0,6117	54,4%
24	0,9965	0,7533	63,4%	0,9978	0,6966	59,7%	0,5325	0,6463	56,6%
27	0,9863	0,2530	20,9%	0,9876	0,2288	19,0%	0,8769	0,2912	29,2%
28	0,9829	0,2746	22,6%	0,9844	0,2482	20,6%	0,8640	0,3137	31,8%
31	0,9972	0,1270	14,3%	0,9971	0,1180	12,9%	0,6712	0,2964	13,2%
32	0,9982	0,0794	9,6%	0,9982	0,0745	8,6%	0,6327	0,2848	14,6%
33	0,9980	0,0534	8,7%	0,9977	0,0508	7,9%	0,6406	0,2833	15,1%
34	0,9988	0,0815	8,1%	0,9986	0,0742	7,4%	0,7813	0,2344	17,6%
35	0,9988	0,0419	6,3%	0,9985	0,0393	5,8%	0,7286	0,2506	15,4%
36	0,9968	0,1404	15,3%	0,9968	0,1300	13,8%	0,6711	0,3056	13,9%

Quadro 2B – Coeficientes estatísticos (correlação de Pearson, r; coeficiente de variação, CV; e, erro percentual, e%) para a coluna 2

Combinação de proposições	Profundidade da frente de umedecimento			Infiltração acumulada			Taxa de infiltração		
	r	CV	e	r	CV	e	r	CV	e
3	0,9876	0,3045	10,6%	0,9856	0,2793	9,8%	0,9064	0,4902	12,8%
4	0,9879	0,1420	6,7%	0,9865	0,1372	6,3%	0,9102	0,4244	12,0%
5	0,7071	2,9768	161,9%	0,7372	2,3647	129,7%	0,9666	10,9781	794,0%
6	0,7071	2,9768	161,9%	0,7372	2,3647	129,7%	0,9666	11,0034	796,5%
7	0,9795	0,7307	27,5%	0,9747	0,6714	26,1%	0,8313	0,6832	16,1%
8	0,9849	0,6029	24,0%	0,9817	0,5513	22,6%	0,8977	0,7086	17,2%
9	0,9858	0,4889	18,4%	0,9829	0,4447	17,2%	0,8660	0,5957	14,5%
11	0,9898	0,3780	15,1%	0,9879	0,3441	14,1%	0,9051	0,5611	14,5%
10	0,9836	0,3519	12,4%	0,9807	0,3241	11,4%	0,9061	0,5403	13,8%
12	0,9838	0,6914	26,5%	0,9796	0,6337	25,1%	0,8938	0,8676	20,1%
13	0,7071	2,9768	161,9%	0,7372	2,3647	129,7%	0,9666	10,8747	783,4%
14	0,7071	2,9768	161,9%	0,7372	2,3647	129,7%	0,9666	10,8901	785,0%
15	0,9905	0,7631	27,9%	0,9870	0,6976	26,5%	0,8905	0,7987	22,7%
16	0,9903	0,6128	21,1%	0,9877	0,5524	19,7%	0,8615	0,6248	16,2%
17	0,7237	2,9480	160,4%	0,7524	2,3434	128,7%	0,9666	7,9223	429,9%
18	0,7237	2,9480	160,4%	0,7524	2,3434	128,7%	0,9666	7,9306	431,2%
19	0,9892	1,0663	40,5%	0,9847	1,0007	39,3%	0,8618	1,0623	32,5%
20	0,9878	0,9567	35,7%	0,9830	0,8892	34,4%	0,8693	0,8578	27,4%
21	0,9925	0,8948	33,7%	0,9891	0,8267	32,3%	0,8241	0,7718	23,8%
22	0,9862	0,7898	28,6%	0,9824	0,7237	27,2%	0,8872	0,8420	23,4%
23	0,9895	0,8185	29,2%	0,9859	0,7502	27,7%	0,8896	0,8574	24,5%
24	0,9878	0,9567	35,7%	0,9830	0,8892	34,4%	0,8693	0,8432	27,0%
27	0,9823	0,4239	12,2%	0,9816	0,3381	10,9%	0,8970	0,4397	21,8%
28	0,9860	0,6972	20,3%	0,9855	0,5566	17,9%	0,9023	0,5661	27,5%
31	0,9800	0,3083	13,7%	0,9774	0,2967	12,9%	0,8713	0,5548	17,7%
32	0,9799	0,2133	7,6%	0,9779	0,2062	7,1%	0,9110	0,4783	17,9%
33	0,9818	0,2388	7,9%	0,9807	0,2085	7,1%	0,8655	0,4637	18,4%
35	0,9853	0,3211	9,5%	0,9848	0,2585	8,5%	0,8931	0,4141	18,8%
34	0,9860	0,3710	9,9%	0,9856	0,2963	8,7%	0,8961	0,4128	20,2%
36	0,9772	0,3411	14,7%	0,9743	0,3256	13,9%	0,8701	0,6189	18,8%

Quadro 3B – Coeficientes estatísticos (correlação de Pearson, r; coeficiente de variação, CV; e, erro percentual, e%) para a coluna 3

Combinação de proposições	Profundidade da frente de umedecimento			Infiltração acumulada			Taxa de infiltração		
	r	CV	e	r	CV	e	r	CV	e
3	0,9986	0,0385	4,3%	0,9986	0,0370	4,2%	0,8265	0,1734	15,0%
4	0,9983	0,0480	4,7%	0,9983	0,0459	4,7%	0,8276	0,1751	15,4%
7	0,9932	0,3448	32,8%	0,9925	0,3378	32,5%	0,2968	0,3857	21,6%
8	0,9935	0,3257	28,9%	0,9928	0,3187	28,6%	0,2617	0,3733	20,2%
9	0,9935	0,3101	27,2%	0,9928	0,3035	26,9%	0,3824	0,3617	19,7%
10	0,9968	0,1548	15,6%	0,9966	0,1513	15,4%	0,5368	0,2681	17,7%
11	0,9948	0,2638	23,0%	0,9942	0,2579	22,7%	0,3400	0,3381	20,3%
12	0,9943	0,2848	25,3%	0,9938	0,2785	24,9%	0,3444	0,3488	19,7%
15	0,9992	0,4307	32,9%	0,9989	0,4206	32,4%	0,4892	0,4396	39,7%
16	0,9995	0,4249	32,5%	0,9993	0,4148	32,1%	0,5005	0,4334	39,1%
19	0,9930	0,7386	65,6%	0,9916	0,7298	65,2%	0,2980	0,6706	58,4%
20	0,9957	0,7201	63,9%	0,9946	0,7109	63,6%	0,2240	0,6560	56,5%
21	0,9938	0,7071	61,0%	0,9925	0,6979	60,6%	0,2255	0,6403	54,6%
22	0,9980	0,5792	43,6%	0,9974	0,5687	43,2%	0,3794	0,5471	45,5%
23	0,9965	0,6716	57,2%	0,9955	0,6619	56,8%	0,3617	0,6189	53,3%
24	0,9966	0,6659	53,8%	0,9955	0,6560	53,4%	0,3625	0,6112	52,5%
27	0,9986	0,0323	4,5%	0,9986	0,0315	4,5%	0,8196	0,1721	14,0%
28	0,9987	0,0339	4,4%	0,9987	0,0328	4,3%	0,8280	0,1705	14,2%
31	0,9934	0,3633	33,9%	0,9926	0,3557	33,5%	0,3031	0,3977	23,0%
32	0,9948	0,3443	32,2%	0,9941	0,3368	31,8%	0,2608	0,3854	21,1%
33	0,9940	0,3280	28,3%	0,9933	0,3208	28,0%	0,3897	0,3735	20,9%
34	0,9963	0,1753	17,0%	0,9961	0,1711	16,8%	0,5202	0,2783	17,9%
35	0,9958	0,2826	24,0%	0,9954	0,2759	23,6%	0,3389	0,3484	20,6%
36	0,9949	0,3025	26,4%	0,9943	0,2957	26,0%	0,3426	0,3601	20,3%

Quadro 4B – Coeficientes estatísticos (correlação de Pearson, r; coeficiente de variação, CV; e, erro percentual, e%) para a coluna 4

Combinação de proposições	Profundidade da frente de umedecimento			Infiltração acumulada			Taxa de infiltração		
	r	CV	e	r	CV	e	r	CV	e
3	0,9936	0,1182	9,0%	0,9936	0,1150	8,7%	0,9168	0,2933	24,2%
4	0,9933	0,1040	8,1%	0,9933	0,1014	7,9%	0,9180	0,2745	23,2%
7	0,9880	0,4832	45,9%	0,9877	0,4696	45,1%	0,7496	0,4636	28,4%
8	0,9880	0,4633	43,8%	0,9879	0,4498	43,1%	0,7608	0,4560	28,0%
9	0,9866	0,4466	40,9%	0,9863	0,4336	40,1%	0,9047	0,6396	33,5%
10	0,9939	0,0801	6,8%	0,9940	0,0763	6,6%	0,9229	0,2512	23,7%
11	0,9896	0,3986	37,3%	0,9893	0,3866	36,6%	0,8943	0,5144	30,4%
12	0,9916	0,2496	21,9%	0,9914	0,2413	21,3%	0,9093	0,3702	25,4%
15	0,9951	0,5644	41,3%	0,9951	0,5452	40,4%	0,9174	0,5761	39,2%
16	0,9954	0,5447	40,2%	0,9955	0,5258	39,4%	0,9175	0,5442	37,5%
19	0,9937	0,8399	56,4%	0,9934	0,8204	55,6%	0,7630	0,6511	49,4%
21	0,9917	0,8145	63,6%	0,9911	0,7947	62,8%	0,7716	0,6232	47,5%
20	0,9922	0,8303	56,1%	0,9919	0,8109	55,3%	0,7604	0,6364	48,3%
23	0,9919	0,7778	60,8%	0,9915	0,7579	60,0%	0,7823	0,6080	46,0%
22	0,9961	0,4729	33,1%	0,9962	0,4552	32,3%	0,9066	0,4554	31,7%
24	0,9954	0,6010	44,1%	0,9953	0,5813	43,2%	0,9259	0,6469	42,6%
27	0,9954	0,2224	18,9%	0,9954	0,2137	18,4%	0,9243	0,3587	23,6%
28	0,9937	0,1991	14,7%	0,9937	0,1912	14,2%	0,9178	0,3424	23,5%
31	0,9881	0,5745	50,6%	0,9877	0,5581	49,8%	0,7654	0,5090	31,5%
32	0,9884	0,5580	49,8%	0,9879	0,5422	49,0%	0,7435	0,4942	30,8%
33	0,9891	0,5397	48,6%	0,9889	0,5240	47,7%	0,9073	0,7079	37,1%
34	0,9962	0,1121	8,5%	0,9963	0,1082	8,3%	0,9250	0,3041	23,4%
35	0,9903	0,4958	43,0%	0,9900	0,4805	42,2%	0,9050	0,5874	33,6%
36	0,9924	0,3328	29,2%	0,9924	0,3210	28,5%	0,9108	0,4342	26,8%

Quadro 5B – Coeficientes estatísticos (correlação de Pearson, r; coeficiente de variação, CV; e, erro percentual, e%) para a coluna 5

Combinação de proposições	Profundidade da frente de umedecimento			Infiltração acumulada			Taxa de infiltração		
	r	CV	e	r	CV	e	r	CV	e
3	0,9827	0,2828	25,6%	0,9836	0,2651	24,1%	0,9012	0,3106	24,5%
4	0,9796	0,3011	27,1%	0,9806	0,2821	25,5%	0,9002	0,3135	24,7%
7	0,9980	0,3303	26,1%	0,9985	0,3092	25,1%	0,9304	0,3069	28,8%
9	0,9968	0,1570	8,1%	0,9971	0,1441	7,6%	0,9613	0,2018	19,9%
8	0,9971	0,2295	15,5%	0,9976	0,2126	14,7%	0,9530	0,2419	22,8%
11	0,9943	0,0726	6,3%	0,9944	0,0686	6,0%	0,9626	0,1762	17,2%
10	0,9983	0,4402	38,6%	0,9988	0,4167	37,4%	0,9376	0,3909	36,6%
12	0,9984	0,5349	49,4%	0,9988	0,5105	48,1%	0,9025	0,4531	42,2%
15	0,9897	0,2327	10,9%	0,9907	0,2140	10,3%	0,9632	0,2598	26,8%
16	0,9895	0,2139	9,6%	0,9905	0,1963	9,0%	0,9630	0,2523	26,2%
19	0,9958	0,6617	53,7%	0,9968	0,6359	52,4%	0,9491	0,5617	56,4%
20	0,9951	0,5856	44,8%	0,9962	0,5594	43,5%	0,9361	0,4657	48,8%
21	0,9928	0,5348	40,3%	0,9945	0,5085	39,0%	0,9314	0,4341	45,4%
22	0,9976	0,7455	63,5%	0,9979	0,7199	62,2%	0,9154	0,6013	61,0%
23	0,9915	0,4307	27,4%	0,9932	0,4051	26,3%	0,9474	0,3744	39,3%
24	0,9978	0,7868	67,7%	0,9980	0,7615	66,4%	0,9411	0,6712	65,1%
27	0,9183	0,5032	43,8%	0,9231	0,4694	40,8%	0,8002	0,5557	56,5%
28	0,9152	0,5102	44,3%	0,9202	0,4759	41,3%	0,7801	0,5823	59,5%
31	0,9986	0,0658	5,7%	0,9987	0,0619	5,3%	0,9603	0,1286	11,5%
32	0,9944	0,1810	14,7%	0,9947	0,1690	13,8%	0,9666	0,1528	14,1%
33	0,9872	0,2522	20,7%	0,9881	0,2350	19,4%	0,9540	0,2148	19,0%
34	0,9994	0,0831	9,7%	0,9994	0,0778	9,4%	0,9365	0,1729	12,6%
35	0,9661	0,3629	31,0%	0,9686	0,3381	29,0%	0,9080	0,3443	28,8%
36	0,9991	0,2210	24,6%	0,9991	0,2082	23,7%	0,9427	0,3228	17,9%

Quadro 6B – Coeficientes estatísticos (correlação de Pearson, r; coeficiente de variação, CV; e, erro percentual, e%) para a coluna 6

Combinação de proposições	Profundidade da frente de umedecimento			Infiltração acumulada			Taxa de infiltração		
	r	CV	e	r	CV	e	r	CV	e
3	0,9981	0,0642	10,5%	0,9981	0,0623	10,1%	0,9973	0,4175	16,1%
4	0,9924	0,1838	14,6%	0,9942	0,1515	12,9%	0,9963	0,2586	22,2%
5	0,5703	0,9492	128,7%	0,5997	0,8249	105,1%	0,7521	4,8542	1036,5%
6	0,5703	0,9492	128,7%	0,5997	0,8249	105,1%	0,7521	4,9663	1063,7%
7	0,9980	0,2348	28,2%	0,9973	0,2106	26,4%	0,9977	0,2779	18,3%
9	0,9977	0,0559	6,8%	0,9977	0,0505	6,4%	0,9980	0,2557	15,8%
8	0,9978	0,1091	15,1%	0,9976	0,1011	14,2%	0,9973	0,5593	18,2%
11	0,9975	0,1101	8,6%	0,9980	0,0902	7,7%	0,9946	0,4280	19,7%
10	0,9969	0,3990	43,3%	0,9953	0,3580	40,7%	0,9978	0,9055	27,5%
12	0,9967	0,4258	46,0%	0,9950	0,3830	43,4%	0,9977	0,9882	29,3%
13	0,5758	0,9451	128,0%	0,6047	0,8215	104,6%	0,7521	4,7263	1005,3%
14	0,5703	0,9492	128,7%	0,5997	0,8249	105,1%	0,7521	4,8160	1027,2%
15	0,9987	0,4907	44,3%	0,9984	0,4370	41,5%	0,9981	0,5008	36,3%
16	0,9989	0,3216	28,9%	0,9987	0,2792	26,7%	0,9963	0,6199	26,7%
19	0,9985	0,6169	57,0%	0,9983	0,5618	54,2%	0,9981	0,9666	48,0%
17	0,6304	0,9030	119,8%	0,6545	0,7858	98,7%	0,7521	2,8986	513,7%
18	0,6304	0,9030	119,8%	0,6545	0,7858	98,7%	0,7521	2,9415	527,3%
20	0,9986	0,5271	47,4%	0,9986	0,4724	44,7%	0,9981	0,6381	39,7%
21	0,9983	0,4593	42,0%	0,9983	0,4067	39,3%	0,9976	0,3543	33,0%
22	0,9969	0,7257	66,1%	0,9952	0,6720	63,5%	0,9245	0,3205	48,7%
23	0,9985	0,3908	33,4%	0,9981	0,3418	31,0%	0,9963	0,7602	32,2%
24	0,9978	0,7010	64,6%	0,9961	0,6473	61,9%	0,9300	0,3196	47,3%
27	0,9780	0,2887	23,1%	0,9832	0,2395	20,2%	0,9961	0,3367	40,4%
28	0,9489	0,4217	37,6%	0,9584	0,3577	32,5%	0,9983	0,6628	62,5%
31	0,9907	0,1779	13,0%	0,9928	0,1450	11,7%	0,9981	0,4631	30,0%
32	0,9808	0,2635	19,3%	0,9855	0,2168	16,9%	0,9961	0,4611	37,8%
33	0,9734	0,3177	24,7%	0,9796	0,2653	21,3%	0,9972	0,2314	42,8%
34	0,9933	0,1183	18,9%	0,9933	0,1112	18,0%	0,9978	0,4635	26,3%
35	0,9638	0,3657	31,0%	0,9713	0,3084	26,9%	0,9983	0,3834	50,0%
36	0,9915	0,1436	22,5%	0,9911	0,1415	21,5%	0,9980	0,7712	28,2%

Quadro 7B – Coeficientes estatísticos (correlação de Pearson, r; coeficiente de variação, CV; e, erro percentual, e%) para a coluna 7

Combinação de proposições	Profundidade da frente de umedecimento			Infiltração acumulada			Taxa de infiltração		
	r	CV	e	r	CV	e	r	CV	e
3	0,9970	0,4959	42,1%	0,9972	0,5049	42,0%	0,8395	0,4893	41,9%
4	0,9974	0,4751	40,7%	0,9973	0,4850	40,6%	0,8438	0,4700	40,0%
7	0,9949	0,7816	68,7%	0,9960	0,7836	68,3%	0,7120	0,7430	65,6%
8	0,9970	0,7526	65,7%	0,9982	0,7552	65,3%	0,7099	0,6885	61,8%
9	0,9983	0,7285	63,7%	0,9977	0,7319	63,3%	0,6792	0,6689	59,7%
10	0,9978	0,6622	55,8%	0,9978	0,6667	55,5%	0,7327	0,6262	55,4%
11	0,9980	0,6845	57,6%	0,9979	0,6886	57,2%	0,7454	0,6335	57,2%
12	0,9967	0,7631	67,0%	0,9970	0,7655	66,6%	0,7055	0,7080	63,1%
15	0,9975	0,7375	60,3%	0,9958	0,7408	59,9%	0,7534	0,6700	62,8%
16	0,9973	0,7207	58,1%	0,9955	0,7245	57,8%	0,7803	0,6515	61,4%
19	0,9947	0,9503	83,0%	0,9962	0,9493	82,5%	0,7858	0,7658	71,5%
21	0,9984	0,9074	79,0%	0,9969	0,9071	78,6%	0,7813	0,7506	69,4%
20	0,9970	0,9257	80,7%	0,9968	0,9251	80,2%	0,7905	0,7700	71,0%
23	0,9977	0,8717	73,5%	0,9977	0,8721	73,1%	0,7056	0,7817	73,4%
22	0,9960	0,8568	72,6%	0,9955	0,8576	72,1%	0,7044	0,7523	71,0%
24	0,9966	0,9141	79,3%	0,9956	0,9136	78,9%	0,7884	0,7550	69,7%
27	0,9963	0,1584	19,7%	0,9958	0,1655	19,8%	0,6441	0,3582	32,3%
28	0,9964	0,1350	17,8%	0,9960	0,1404	17,8%	0,6166	0,3599	33,1%
31	0,9961	0,4785	44,6%	0,9974	0,4877	44,5%	0,6941	0,5237	38,4%
32	0,9971	0,4476	42,2%	0,9980	0,4583	42,2%	0,7596	0,4940	36,2%
33	0,9969	0,4171	39,0%	0,9973	0,4292	39,0%	0,7930	0,4798	35,6%
34	0,9981	0,3350	32,4%	0,9977	0,3494	32,6%	0,8554	0,4048	29,5%
35	0,9981	0,3786	35,5%	0,9980	0,3923	35,6%	0,8479	0,4386	32,7%
36	0,9952	0,4759	45,2%	0,9968	0,4851	45,1%	0,6838	0,5235	38,0%

Quadro 8B – Coeficientes estatísticos (correlação de Pearson, r; coeficiente de variação, CV; e, erro percentual, e%) para a coluna 8

Combinação de proposições	Profundidade da frente de umedecimento			Infiltração acumulada			Taxa de infiltração		
	r	CV	e	r	CV	e	r	CV	e
3	0,9879	0,2646	38,1%	0,9841	0,2933	38,8%	0,6134	0,4876	35,7%
4	0,9790	0,3411	51,9%	0,9738	0,3739	52,7%	0,6292	0,5986	38,2%
7	0,9972	0,1358	13,1%	0,9979	0,1472	13,6%	0,6191	0,2377	19,1%
9	0,9979	0,0650	16,3%	0,9981	0,0629	15,8%	0,5579	0,2923	19,8%
8	0,9981	0,0646	12,8%	0,9984	0,0673	12,7%	0,5686	0,2771	20,2%
10	0,9984	0,1317	28,9%	0,9985	0,1326	28,4%	0,5038	0,3718	26,2%
11	0,9974	0,1419	29,1%	0,9970	0,1500	28,8%	0,4365	0,4749	30,7%
12	0,9968	0,1790	16,5%	0,9978	0,1928	17,0%	0,5858	0,2404	20,8%
15	0,9972	0,3639	25,4%	0,9964	0,3950	26,3%	0,5551	0,4475	41,1%
16	0,9970	0,2901	26,5%	0,9966	0,3216	27,1%	0,5444	0,4389	38,9%
19	0,9964	0,6004	45,5%	0,9927	0,6266	45,8%	0,4667	0,5884	55,6%
20	0,9954	0,5415	36,7%	0,9920	0,5696	37,2%	0,5115	0,5532	50,8%
21	0,9926	0,5050	35,0%	0,9893	0,5343	35,6%	0,4509	0,5469	48,8%
23	0,9912	0,4378	30,8%	0,9892	0,4688	31,6%	0,5217	0,5478	51,1%
22	0,9949	0,4291	29,9%	0,9928	0,4597	30,6%	0,4755	0,4948	44,3%
24	0,9988	0,6054	46,3%	0,9971	0,6303	46,5%	0,5186	0,5730	53,4%
27	0,9913	0,2683	44,9%	0,9896	0,2875	45,1%	0,6472	0,4870	29,3%
28	0,9866	0,3296	59,1%	0,9840	0,3515	59,0%	0,6309	0,6718	36,2%
31	0,9979	0,1325	14,9%	0,9978	0,1506	15,2%	0,5427	0,2929	22,4%
32	0,9972	0,1040	19,6%	0,9975	0,1114	19,5%	0,5475	0,3316	24,6%
33	0,9968	0,1089	24,2%	0,9974	0,1078	23,6%	0,5520	0,3660	26,4%
34	0,9945	0,1589	35,0%	0,9952	0,1556	34,0%	0,5342	0,4750	29,9%
35	0,9972	0,1543	36,4%	0,9977	0,1509	35,4%	0,5366	0,5335	33,5%
36	0,9986	0,1507	10,3%	0,9981	0,1718	10,9%	0,4853	0,2683	19,3%