

**JOÃO HENRIQUE ZONTA**

**AVALIAÇÃO DO MODELO DE GREEN-AMPT-MEIN-LARSON EM  
CONDIÇÕES DE CAMPO**

Dissertação 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  
2007**

# JOÃO HENRIQUE ZONTA

## AVALIAÇÃO DO MODELO DE GREEN-AMPT-MEIN-LARSON EM CONDIÇÕES DE CAMPO

Dissertação 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: 24 de julho de 2007.

---

Prof. Paulo José Hamakawa

---

Prof. Antonio Teixeira de Matos

---

Prof. Demetrius David da Silva  
(Co - Orientador)

---

Pesq. José Márcio Alves da Silva

---

Prof. Mauro Aparecido Martinez  
(Orientador)

## **AGRADECIMENTOS**

A meus pais, João Zonta e Maria Luiza, as minhas irmãs Gisely e Gisleny e ao meu irmão João Batista, pela força e apoio em todos os momentos.

A minha noiva Josiane, pelo amor e carinho a mim dedicado e pela paciência nos momentos difíceis dessa trajetória.

Ao Professor Mauro Aparecido Martinez, pela amizade, pela orientação durante todo este percurso, pelos valiosos ensinamentos e conselhos, e pela confiança em mim depositada.

Aos meus conselheiros, Professor Fernando Falco Pruski e Professor Demetrius David da Silva pelo incentivo e pelas valiosas sugestões durante a condução dos experimentos e redação da tese.

Aos meus colegas de república, Heder e Leandro, por todos os momentos de muito trabalho e alegria compartilhados.

Ao Claudinei e a Josiane, pela ajuda na execução dos experimentos, aos amigos da pós-graduação, Alípio, Latuf, Welson, David, Débora, Flavia, Fabiana, Fernando e Luis Gustavo, e ao pessoal da Hidráulica, Chicão e Eduardo, que sempre se mostraram dispostos a ajudar no que fosse necessário.

Ao Marcelão, pela ajuda prestada ao resolver os “probleminhas” com o simulador de chuvas.

Ao Professor Edvaldo Fialho dos Reis, pois foi graças a ele que iniciei minha caminhada na pesquisa científica, sempre me incentivando e me apoiando no que fosse necessário.

À Universidade Federal de Viçosa e, em especial, ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Enfim, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

JOÃO HENRIQUE ZONTA, filho de João Zonta e Maria Luiza Guss Zonta, nasceu no dia 19 de setembro de 1982 em São João de Petrópolis, no Estado do Espírito Santo.

No ano de 2000, conclui o segundo grau na Escola Agrotécnica Federal de Santa Teresa, Espírito Santo, recebendo o título de Técnico Agrícola com Habilitação em Agropecuária.

No ano de 2001 ingressou no curso de Agronomia no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA-UFES), concluindo-o em 2005.

Em agosto de 2005, iniciou na Universidade Federal de Viçosa o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	viii
1.INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Processo físico de infiltração.....	4
2.2. Fatores que intervêm na infiltração.....	6
2.2.1. Cobertura do solo.....	7
2.2.2. Características do solo.....	7
2.2.3. Encrostamento superficial.....	8
2.2.4. Manejo e preparo do solo.....	9
2.3. Modelagem do processo de infiltração.....	10
2.3.1. Modelo de Green-Ampt (GA).....	11
2.3.2. Modelo de Green-Ampt modificado por Mein-Larson (GAML) .....	14
2.4. Propostas para modificações nos parâmetros de entrada do modelo de GAML.....	16
2.4.1. Umidade de saturação.....	16
2.4.2. Condutividade hidráulica do solo saturado.....	17
2.4.3. Potencial matricial na frente de umedecimento.....	18
2.5. Modelo de Green-Ampt para solo estratificado.....	20
3. METODOLOGIA.....	23
3.1. Calibração do simulador de chuvas.....	23
3.2. Ensaios de infiltração.....	24
3.3. Determinação das características físicas do solo.....	30
3.4. Simulação com o modelo de GAML.....	32
3.4.1. Parâmetros do modelo de GAML.....	32
3.5. Avaliação do modelo.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
4.1. Taxa de infiltração e tempo de empoçamento para os ensaios experimentais realizados em solo com e sem cobertura vegetal morta.....	35
4.2. Simulação do processo de infiltração.....	43
4.2.1. Em solo com cobertura vegetal morta.....	44

4.2.2. Em solo sem cobertura vegetal.....	58
5. RESUMO E CONCLUSOES.....	68
6. RECOMENDAÇÕES.....	70
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

## RESUMO

ZONTA, João Henrique, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2007. **Avaliação do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson em condições de campo.** Orientador: Mauro Aparecido Martinez. Co-Orientadores : Demetrius David da Silva e Fernando Falco Pruski.

Dentre as diversas equações que foram propostas para a simulação do processo de infiltração, o modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) é um dos mais empregados em estudos hidrológicos, por se basear nos processos físicos que ocorrem no solo durante a infiltração. Entretanto alguns de seus parâmetros não condizem com a situação real do processo de infiltração da água no solo. Assim, o presente trabalho teve como objetivos determinar em condições de campo, a taxa de infiltração ( $T_i$ ) e a infiltração acumulada ( $I$ ) no solo, com e sem cobertura vegetal morta; simular o processo de infiltração de água no solo com o modelo de GAML, usando diferentes metodologias de obtenção de seus parâmetros; e avaliar o modelo comparando os resultados simulados com os obtidos experimentalmente. Os ensaios foram realizados em um Cambissolo Háplico Tb Distrófico Podzólico, com utilização de simulador de chuvas. Utilizou-se parcelas experimentais com dimensões de 0,7 m de largura por 1,0 m de comprimento, que direcionavam o escoamento superficial produzido para uma caixa de coleta na qual o volume escoado era obtido com uso de Thalimedes, medindo-se o volume escoado. A infiltração foi calculada a partir da diferença entre o volume de água aplicado sobre a parcela e o volume de escoamento superficial coletado. Foram realizados nove testes, utilizando as seguintes intensidades de precipitação: 243, 245, 184, 170, 170 e 105 mm h<sup>-1</sup> (solo com cobertura) e 115, 103 e 100 mm h<sup>-1</sup> (solo sem cobertura). Foram realizadas simulações com o modelo de GAML testando diferentes combinações de propostas de determinação dos parâmetros de entrada:  $\theta_s$  (umidade de saturação do solo ou porosidade total) e  $\theta_w$  (umidade de saturação de campo) como valores de umidade na zona de transmissão;  $K_0$  (condutividade hidráulica do solo saturado) e  $T_{ie}$  (taxa de infiltração estável) como valores de condutividade hidráulica na zona de transmissão ( $K_w$ ) e o potencial matricial referente à umidade inicial do solo

( $\psi(\theta_i)$ ), equações de Risse et al. (1995), que calcula  $\psi_f$  em função da textura do solo, e de Cecílio (2005) para o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento ( $\psi_f$ ). Para avaliação do modelo, foi utilizado o índice de confiança ajustado ( $c'$ ), proposto por Camargo & Sentelhas (1997). De acordo com os resultados, nota-se que o valor da Tie para os ensaios em solo com cobertura foi em média  $40 \text{ mm h}^{-1}$  enquanto para solo sem cobertura foi de  $20 \text{ mm h}^{-1}$ , demonstrando o provável efeito do encrostamento superficial na redução da Tie. Quanto à simulação da infiltração, o modelo GAML com seus parâmetros originais não obteve bom desempenho pelo índice  $c'$ , sendo este em 55% dos casos considerado de péssimo a mal ( $c' \leq 0,5$ ), superestimando os valores de  $T_i$  e  $I$ . As combinações que utilizaram valores de  $\psi_f$  calculados pela equação de Risse et al. (1995) também apresentaram desempenho pelo índice  $c'$  de péssimo a mal ( $c' \leq 0,5$ ) em todos os ensaios, subestimando durante todo o tempo os valores de  $T_i$  e  $I$ , em ambas as condições de superfície. A combinação ( $K_0$ ,  $\theta_s$  e equação de Cecílio (2005)) apresentou os melhores resultados, com desempenho pelo índice  $c'$  em 66% dos casos classificado como bom ou superior ( $c' \geq 0,66$ ). A utilização do valor da Tie para representar a condutividade hidráulica do perfil do solo apresentou-se como boa alternativa, devido à maior confiabilidade em sua determinação.

## ABSTRACT

ZONTA, João Henrique, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2007.  
**Evaluation of the Green-Ampt-Mein-Larson model under field conditions.** Adviser: Mauro Aparecido Martinez. Co-advisers: Demetrius David da Silva and Fernando Falco Pruski.

Among the several equations that were proposed for simulation of infiltration, the Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) model is one of the most used in hydrological studies as it is based on the physical processes that occur in the soil during infiltration. However, some of its parameters do not match the real situation of the process of water infiltration in the soil. Thus, the objectives of this work was to determine the infiltration rate ( $T_i$ ) and cumulative infiltration ( $I$ ) in the soil under field conditions, with and without mulch; simulate the process of water infiltration in the soil with the GAML model, using different methodologies for obtaining its parameters; and evaluate the model by comparing simulated with experimental results. The trials were carried out in a Podzol Tb Dystrophic Haplic Cambisol, using a rain simulator. Experimental plots of 0.7 m width and 1 m length directed the surface runoff to a collection box in which the runoff volume was measured by a Thalimedes logger. Infiltration was computed from the difference between the water volume applied on the plot and the volume of the collected runoff. Nine tests were carried out using the following precipitation intensities: 243, 245, 184, 170, 170 and 105  $\text{mm h}^{-1}$  (soil with mulch) and 115, 103 and 100  $\text{mm h}^{-1}$  (soil without mulch). Simulations were performed with the GAML model to test different combinations of proposals to determine the entry parameters:  $\theta_s$  (saturation moisture or total porosity) and  $\theta_w$  (saturation field moisture) as moisture values in the transmission zone;  $K_0$  (saturated soil hydraulic conductivity) and  $T_{ie}$  (stable infiltration rate) as values of hydraulic conductivity in the transmission zone ( $K_w$ ) and the matric suction relative to the initial moisture content ( $\psi(\theta_i)$ ), equations of Risse et al. (1995) to calculate  $\psi_f$  as a function of soil texture, and Cecílio (2005) to calculate the matric suction in the wetting front ( $\psi_f$ ). The confidence index ( $c'$ ) proposed by Camargo & Sentelhas (1997) was used to evaluate the model. The  $T_{ie}$  for the trials in soil with mulch was 40  $\text{mm h}^{-1}$  on the average, whereas in soil

without mulch was  $20 \text{ mm h}^{-1}$ , indicating the probable effect of the surface crusting on  $T_{ie}$  reduction. As for the simulation of infiltration, the GAML model with its parameters did not have good performance by the  $c'$  index, which in 55% of the cases were considered as worse to bad ( $c'=0.5$ ), overestimating  $T_i$  and  $I$ . The combinations using  $\psi_f$  calculated by the Risse's et al. (1995) equation also had performance by the  $c'$  index from worse to bad ( $c'=0.5$ ) in all the trials, underestimating  $T_i$  and  $I$  during the whole time in both surface conditions. The combination ( $K_0$ ,  $\theta_s$  and Cecilio's (2005) equation) showed the best results, with performance by the  $c'$  index in 66% of the cases considered as good or better ( $c'=0.66$ ). The use of  $T_{ie}$  values to represent hydraulic conductivity of the soil profile was proven a good alternative because the highest reliability in its determination.

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos componentes do ciclo hidrológico, pode-se afirmar que a infiltração é um dos mais importantes pois, junto com a precipitação, determina a quantidade de água que torna-se disponível para as plantas, o escoamento superficial e o abastecimento dos reservatórios de águas subterrâneas.

Infiltração é a passagem da água através da superfície do solo. Inicialmente seu valor é elevado, diminuindo com o passar do tempo e com o aumento da umidade do solo, tendendo assintoticamente para um valor constante, denominado de taxa de infiltração estável (Tie).

Devido à importância do conhecimento do processo de infiltração para fins de simulação hidrológica e dimensionamento de sistemas de irrigação, foram desenvolvidos diversos modelos que simulam o processo de infiltração de água no solo.

Dentre estes modelos, devido a sua simplicidade, o modelo desenvolvido por Green-Ampt (GA) passou a ser amplamente utilizado na estimativa da infiltração, sendo incorporado a modelos matemáticos e computacionais baseados em processos destinados à modelagem hidrológica e ao dimensionamento de sistemas de irrigação via pivô central (BRANDÃO et al., 2003). Neste modelo, a infiltração de água no solo é função da condutividade hidráulica do solo saturado, do potencial matricial na frente de umedecimento e das umidades inicial e de saturação do solo, e não do tempo de ocorrência do processo.

No desenvolvimento da equação, Green & Ampt (1911) basearam-se na equação de Darcy e assumiram que durante o processo de infiltração existe uma carga hidráulica constante na superfície do solo, que a frente de umedecimento é bem nítida e precisamente definida, acima da qual o solo se encontra uniformemente saturado com condutividade hidráulica  $K_0$ , e que o valor do potencial matricial na frente de umedecimento ( $\Psi_f$ ) permanece igual ao valor do potencial matricial relativo à umidade inicial do solo ( $\Psi(\theta_i)$ ). É assumido também, que a água penetra no solo abruptamente, o que resulta na formação de duas regiões bem definidas, sendo a primeira

completamente saturada e a segunda com conteúdo de umidade correspondente a umidade inicial do solo ( $\theta_i$ ).

Por admitir a presença de uma carga constante  $H_0$  acima da superfície do solo durante todo processo de infiltração, a equação de Green-Ampt não pode ser utilizada para simulação do processo de infiltração em condições de precipitação ou irrigação, visto que inicialmente sob estas condições, o solo não se encontra em condições de empoçamento da superfície do solo.

Para solucionar este problema e determinar a infiltração que ocorre antes da intensidade de precipitação atingir a capacidade de infiltração e ocorrer o empoçamento da superfície do solo, Mein & Larson (1973) modificaram o modelo de Green-Ampt, desenvolvendo o modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML).

O modelo GAML estima a lâmina de água infiltrada até o momento em que a intensidade de precipitação se iguala a capacidade de infiltração, ocorrendo o empoçamento de água sobre a superfície do solo. A partir do empoçamento da água na superfície do solo, a taxa de infiltração passa a ser igual à capacidade de infiltração e seu valor pode ser estimado pela equação original de Green-Ampt (GA).

Pode-se destacar, entretanto, como limitação para a utilização dos modelos GA e GAML, o fato dos parâmetros de entrada do modelo não representarem efetivamente as condições reais de ocorrência da infiltração. Na maioria das situações, os solos são heterogêneos, os valores de  $K_0$  e  $\Psi_f$  podem variar tanto no tempo como no espaço, e a umidade inicial do solo raramente é constante ao longo do perfil. Assim, tem-se uma mudança gradativa do potencial matricial na frente de umedecimento, sendo esta frente difusa e não abrupta. Devido ao aprisionamento de ar nos poros do solo, na zona de transmissão não se chega ao total preenchimento dos poros do solo, assim, a umidade nesta zona não equivale à umidade de saturação do solo e com isso, a condutividade hidráulica na zona de transmissão não é equivalente a condutividade hidráulica do solo saturado, mas sim um valor menor.

Propostas para contornar os problemas encontrados no modelo vêm sendo elaboradas há décadas por diversos pesquisadores, por intermédio do uso de metodologias de adequação dos parâmetros de entrada dos modelos

de GA e GAML. Apesar de alguns estudos, como os realizados por Cecílio (2002), Mello (2003) e Cecílio (2005) mostrarem bons resultados na aplicação da equação de Green-Ampt com modificações nos parâmetros de entrada do modelo, estes foram realizados em condições de laboratório, diferentemente das condições de campo, nas quais alguns fatores são difíceis de serem controlados e por isso existem poucos estudos realizados.

Tendo em vista a necessidade de testar o modelo de Green-Ampt-Mein-Larson em condições de campo, com modificações em seus parâmetros de entrada, o presente trabalho teve os seguintes objetivos:

- Comparar a taxa de infiltração estável da água no solo com e sem cobertura vegetal morta;
- Avaliar o desempenho do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson, em solo com e sem cobertura vegetal morta, testando diferentes combinações de metodologias de obtenção dos parâmetros de entrada.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

Infiltração é a passagem verticalmente da água da superfície para o interior do solo (SILVEIRA et al., 1993).

Um fator importante ligado à infiltração, diz respeito às chuvas, pois dependendo de sua intensidade, pode gerar escoamento superficial quando a capacidade de infiltração é excedida (GUERRA, 1994).

À medida que a água infiltra no solo, as camadas superiores do perfil vão se umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há aporte de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade, sendo a camada superficial, naturalmente, a primeira a saturar. Normalmente, a infiltração decorrente de precipitações naturais não é capaz de saturar todo o solo, restringindo-se a saturar, quando consegue, apenas as camadas próximas à superfície, conformando um perfil típico onde o teor de umidade decresce com a profundidade (SILVEIRA et al., 2000).

### **2.1. Processo físico da infiltração**

Brandão et al. (2003) descrevem o perfil de umedecimento com quatro zonas distintas (Figura 1): zona de saturação, zona de transição, zona de transmissão e zona de umedecimento. A zona de saturação localiza-se imediatamente abaixo da superfície do solo e é normalmente uma camada fina, com espessura de aproximadamente 1,5 cm, em que o solo encontra-se saturado. A zona de transição caracteriza-se pelo decréscimo acentuado da umidade ao longo da profundidade, com espessura em torno de 5 cm. Já a zona de transmissão é a região do perfil caracterizada pelo aumento contínuo de sua espessura durante o processo de infiltração e pela pequena variação da umidade em relação ao espaço e ao tempo considerando um solo homogêneo. A zona de umedecimento é caracterizada por uma camada estreita com acentuada redução de sua umidade ao longo da profundidade. Abaixo desta zona, localiza-se a frente de umedecimento, que é o limite visível da movimentação da água no solo, na qual existe elevado gradiente hidráulico devido à variação abrupta da umidade, pois abaixo desta, o solo

possui umidade correspondente àquela que possuía antes do início do processo de infiltração ( $\theta_i$ ).

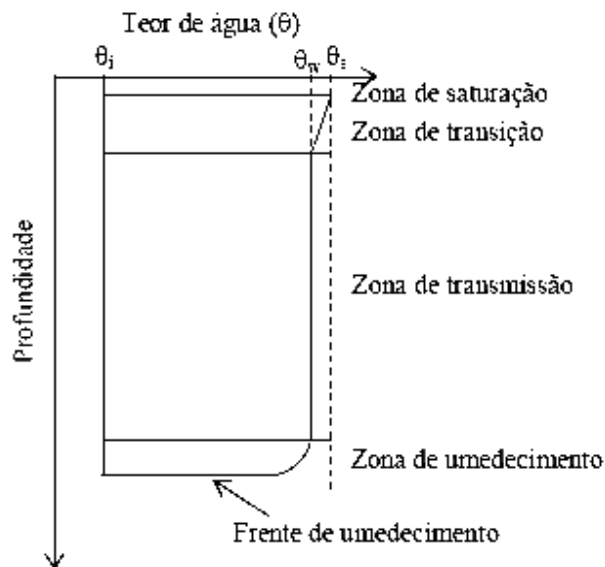


Figura 1. Perfil de umedecimento do solo durante a infiltração ( $\theta_i$  é a umidade inicial do solo e  $\theta_s$  é a umidade de saturação do solo). (Fonte: Brandão et al. (2003)).

Segundo Brandão et al. (2003) a capacidade de infiltração deve ser entendida como a quantidade máxima de água que pode infiltrar no solo em um dado intervalo de tempo. Este conceito é aplicado no estudo da infiltração para diferenciar a potencialidade que o solo tem de absorver água pela superfície, quando há disponibilidade de água para penetrar no solo, da taxa real de infiltração (SILVEIRA et al., 2000)

Quando uma precipitação atinge o solo com intensidade menor que a capacidade de infiltração, toda água penetra no solo, provocando progressiva diminuição na capacidade de infiltração. Persistindo a precipitação, a partir de um tempo  $t = t_p$  (tempo de empoçamento), a taxa de infiltração iguala-se à capacidade de infiltração, passando a decrescer com o tempo, tendendo para um valor constante após longo período de tempo, caracterizado como a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) (PRUSKI et al., 1997a), também denominado de taxa de infiltração estável ( $Tie$ ) (Figura 2).

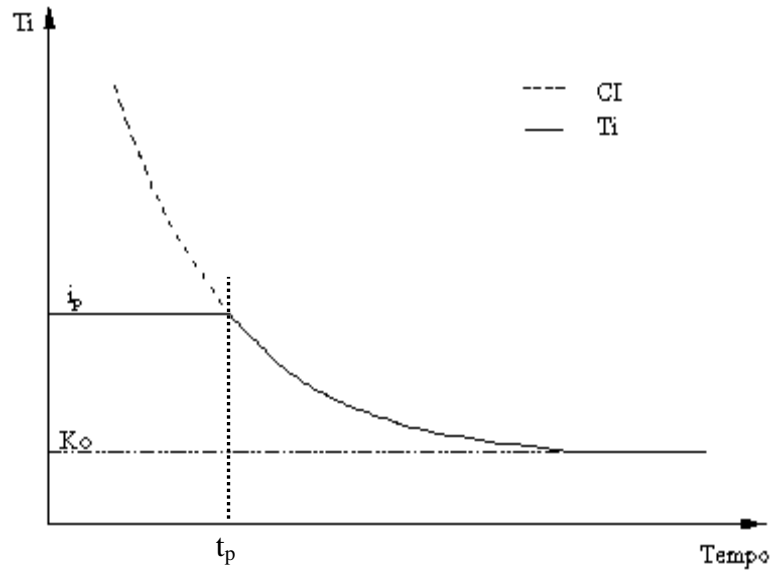


Figura 2. Curva representativa da capacidade de infiltração (CI) e da taxa de infiltração (Ti) em função do tempo considerando uma intensidade de precipitação constante ( $i_p$ ).

A taxa de infiltração corresponde a lâmina de água infiltrada por unidade de tempo, podendo ser expressa da seguinte forma:

$$Ti = \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

em que

$I$  = infiltração acumulada, mm; e

$t$  = tempo, h.

## 2.2. Fatores que intervêm na infiltração

Brandão et al.(2003) citam os seguintes fatores como determinantes na infiltração de água no solo: características do solo, cobertura, preparo e manejo do solo e selamento superficial.

### **2.2.1. Cobertura do solo**

A cobertura vegetal é responsável pelo aumento da macroporosidade da camada superficial e protege os agregados do solo do impacto direto das gotas de chuva. Cogo & Streck (2003) observaram que a estabilidade de agregados tende a aumentar em solos cultivados com plantas que produzem elevada massa de raízes, variando, no entanto, com a espécie vegetal, de acordo com as diferenças existentes na morfologia e distribuição de volume das raízes.

A presença de cobertura vegetal na superfície do solo também promove a redução da velocidade do escoamento superficial, devido ao aumento da rugosidade hidráulica do percurso ao longo do qual ocorre o escoamento (SILVA et al., 2001).

Segundo Chaves et al. (1993), os repetidos impactos das gotas de chuva contribuem para a redução na taxa de infiltração, por duas maneiras: diminuição da rugosidade superficial, reduzindo as chances de empoçamento, e formação de uma fina camada adensada na superfície. Guerra (1994) explicita que a ausência da cobertura vegetal facilita o impacto das gotas de chuva, fazendo com que os agregados se quebrem e crostas sejam formadas na superfície do solo, o que aumenta os efeitos do escoamento superficial, causando menores taxas de infiltração. Segundo Volk et al. (2004) os resíduos culturais servem como barreira física ao livre escoamento superficial, diminuindo sua velocidade, propiciando maior tempo para que a água infiltre no solo.

Com o solo descoberto, tem-se uma redução da rugosidade do solo e uma conseqüente redução da infiltração de água da chuva e aumento do escoamento superficial e da perda de água (STRECK & COGO, 2003).

### **2.2.2. Características do solo**

Dentre as condições físicas do solo, destacam-se aquelas que determinam a qualidade da estrutura e do espaço poroso do solo. A estrutura juntamente com a granulometria são características que influenciam expressivamente a movimentação da água no solo, uma vez que

determinam a macroporosidade existente no perfil do solo, a qual é de extrema importância na condutividade hidráulica do solo.

Solos de textura grosseira possuem, no geral, maior quantidade de macroporos do que solos de textura fina e, conseqüentemente, apresentam, quando saturados, maiores condutividade hidráulica e taxa de infiltração. No caso de solos de textura fina, a estrutura é de suma importância. Solos argilosos bem estruturados, ou com estrutura estável, podem apresentar maiores taxas de infiltração do que os solos com estrutura instável e, segundo afirmação de Resende et al. (2002), para latossolos, quanto mais argiloso maior será sua permeabilidade. Esta maior estabilidade dos agregados nestes solos argilosos é determinada pelos agentes cimentantes, que são representados principalmente pela matéria orgânica e pelos óxidos de Fe e Al (BRANDÃO et al., 2003).

### **2.2.3. Encrostamento superficial**

Encrostamento superficial é a formação de uma camada delgada (geralmente de 1 a 3 mm) na superfície do solo, caracterizada por uma elevada densidade global, pequena porosidade e baixa condutividade hidráulica (SILVA & KATO, 1997). Em estudos realizados por Silva & Kato (1997), foi verificado que o processo de formação do encrostamento superficial pode ser dividido em dois estágios. No primeiro estágio ocorre um decréscimo acentuado da condutividade hidráulica do solo saturado, e o segundo caracterizado por um decréscimo lento, demonstrando que a formação do encrostamento superficial é mais intensa nos primeiros minutos de chuva.

Este fenômeno é extremamente prejudicial para a penetração de água no solo, pois ocorre a formação de uma delgada camada adensada na superfície do solo, acarretando em considerável redução da macroporosidade da camada superficial (BRANDÃO et al. 2003). Como pequenas alterações na macroporosidade do solo levam a considerável redução da condutividade hidráulica, o encrostamento superficial é fator agravante na redução da capacidade de infiltração do solo.

Chu et al. (1986) afirmaram que a formação da crosta na superfície do solo é fator dominante na determinação da taxa de infiltração de água no solo. Coelho et al. (2000) trabalhando com chuva simulada, encontrou uma redução na taxa de infiltração da água no solo de 14,85 mm h<sup>-1</sup> para 13,26 mm h<sup>-1</sup>, quando a intensidade de aplicação passou de 22,77 mm h<sup>-1</sup> para 48,04 mm h<sup>-1</sup>, redução atribuída ao encrostamento superficial do solo devido à maior intensidade de precipitação na área.

Pruski et al. (1997b) trabalhando com latossolo roxo sob chuva simulada, observaram que os valores da taxa de infiltração foram menores quando eram aplicadas maiores intensidades de precipitação, chuvas estas que são associadas a maiores energias cinéticas, causando um maior encrostamento superficial.

Schaefer et al. (2002) estudando o processo de perda de solo num argissolo vermelho amarelo sob chuva simulada, detectaram a formação de encrostamento superficial em todas as parcelas analisadas, exceto naquelas com 100% de cobertura. Alguns autores, entre eles Chaves et al. (1993), tem demonstrado que os modelos usados para prever a infiltração de água no solo apresentam melhores resultados quando nestes são inseridos coeficientes que levam em consideração a formação do encrostamento superficial.

#### **2.2.4. Manejo e preparo do solo**

Por ser um fenômeno de superfície, a infiltração é influenciada pelo preparo convencional do solo, o qual exerce um efeito temporário ao deixar o solo solto, aumentando a infiltração. Entretanto, se a superfície não estiver protegida com vegetação ou cobertura morta, a chuva atuando na superfície do solo reduz a taxa de infiltração. Segundo Silva & Kato (1998), o preparo do solo para a agricultura e os tratos culturais provocam a compactação do solo, diminuindo sua macroporosidade e, conseqüentemente, a capacidade de infiltração.

A aração profunda é também um fator favorável ao aumento da infiltração, enquanto práticas que exercem compressão no solo podem diminuí-la. O preparo convencional do solo, recém-efetuado, induz maior rugosidade

superficial e, com isto, maior capacidade de retenção e de infiltração de água da chuva na sua superfície (VOLK et al. 2004).

Diversos estudos demonstram o efeito negativo do preparo do solo sobre a capacidade de infiltração da água no solo: Castro et al. (1986), avaliando o efeito de sistemas de preparo do solo na infiltração da água, obtiveram uma taxa de infiltração estável de  $12,8 \text{ mm h}^{-1}$ , quando utilizaram um arado de disco mais uma grade leve, enquanto obtiveram com uso de escarificador  $32,5 \text{ mm h}^{-1}$ . Destacam ainda o efeito da escarificação em profundidade, com pouco revolvimento do solo mantendo maior cobertura do solo por resíduos vegetais capaz de reduzir o escoamento superficial.

Silva et al. (2003) trabalhando em um latossolo de cerrado, verificou que houve redução significativa da condutividade hidráulica do solo saturado, quando este foi submetido ao preparo mecanizado, com aração e gradagem.

A utilização de algumas técnicas mecanizadas aliadas ao plantio direto pode surtir bom efeito para aumento da taxa de infiltração de água no solo. Segundo Camara & Klein (2005) a adoção da escarificação do solo no sistema plantio direto é muito benéfico para o aumento da taxa de infiltração de água no solo, pois acarreta em um aumento da rugosidade superficial do solo, quando comparado com o sistema plantio direto sem escarificação, apresentando uma taxa de infiltração estável de  $99,99 \text{ mm h}^{-1}$  contra  $26,49 \text{ mm h}^{-1}$  no plantio direto.

### **2.3. Modelagem do processo de infiltração**

Devido a grande importância do conhecimento do processo de infiltração da água no solo, tanto para o manejo da irrigação, como para o manejo e conservação de água e solo, diversos modelos, teóricos e empíricos, foram desenvolvidos com o intuito de simular este processo.

Os modelos empíricos são válidos somente para as condições em que eles foram determinados, ou seja, não podem ser adotados para outros tipos de solo e condições experimentais diferentes das adotadas para determinação de seus parâmetros. Dentre estes modelos, destacam-se os de Kostikov, Kostikov-Lewis, Hortan e Holtan.

Os modelos teóricos são baseados na física do escoamento em meio poroso, que é descrito pela equação de Richards ou mesmo pela equação de Darcy. Dentre estes, devido a sua simplicidade e por melhor representar a física do processo de infiltração, o modelo desenvolvido por Green & Ampt (1911) é um dos mais empregados, sendo incorporado a modelos matemáticos e computacionais baseados em processos destinados à modelagem hidrológica.

### **2.3.1. Modelo de Green-Ampt (GA)**

O modelo de Green-Ampt (1911) foi derivado a partir da equação de Darcy, e fornece a taxa de infiltração instantânea em função de parâmetros físicos do solo e do total infiltrado. O modelo assume que durante o processo de infiltração existe uma carga hidráulica  $H_0$  constante na superfície do solo e uma frente de umedecimento bem nítida e precisamente definida, acima da qual o solo se encontra uniformemente saturado, com condutividade hidráulica  $K_0$ , e que o potencial matricial nesta frente ( $\psi_f$ ) permanece igual ao valor do potencial matricial antes da infiltração. Foi assumido também, ocorre uma transmissão abrupta de umidade no perfil do solo, o que resulta na formação de duas regiões bem definidas: a primeira contendo o teor de água do solo saturado ( $\theta_s$ ) e a segunda com teor de água igual ao que possuía antes do início do processo ( $\theta_i$ ) (Figura 3), o que caracteriza o denominado movimento tipo pistão.

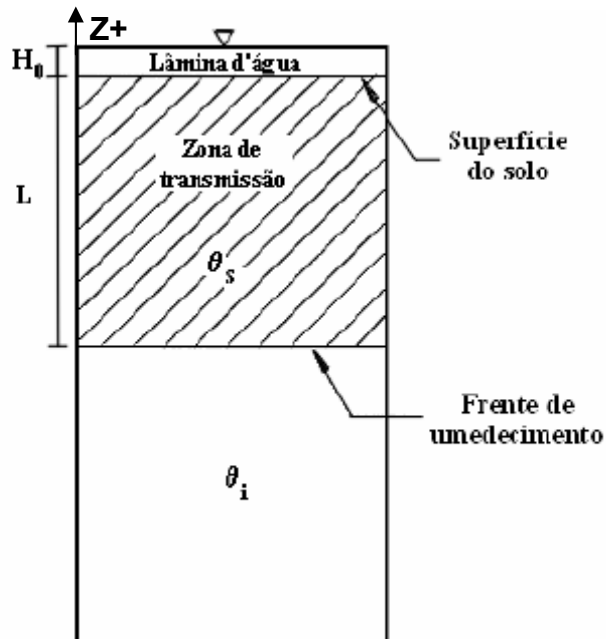


Figura 3. Esquema representativo da infiltração conforme pressuposições do modelo de Green-Ampt, destacando-se os teores de água do solo saturado ( $\theta_s$ ) e o inicial ( $\theta_i$ ).

Como o potencial matricial na frente de umedecimento apresenta sempre valor negativo, considera-se o valor de  $\psi_f$  como o seu módulo. Quando o valor de  $H_0$  é comparado à soma dos valores de  $L$  e  $|\psi_f|$  percebe-se que este é muito pequeno e, portanto, seu valor é desconsiderado no modelo de Green-Ampt, que desta maneira fica definido pela expressão:

$$Ti = K_0 \left( 1 + \frac{|\psi_f|}{L} \right) \quad (2)$$

em que

$Ti$  = taxa de infiltração,  $\text{mm h}^{-1}$ ;

$K_0$  = condutividade hidráulica do solo saturado,  $\text{mm h}^{-1}$ ;

$\psi_f$  = potencial matricial do solo na frente de umedecimento, mm; e

$L$  = profundidade da frente de umedecimento, mm.

Como considera-se que na zona de transmissão a umidade é constante e igual ao seu valor na saturação ( $\theta_s$ ), a infiltração acumulada ( $I$ ), durante o tempo  $t$  após o início da infiltração é calculada por

$$I = L(\theta_s - \theta_i) \quad (3)$$

em que

$I$  = infiltração acumulada, mm;

$\theta_s$  = teor de água do solo saturado,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ; e

$\theta_i$  = teor de água do solo no início do processo de infiltração,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ .

Explicitando-se  $L$  na equação (3) e substituindo-a na equação (2), obtém-se:

$$Ti = K_0 \left( 1 + \left| \psi_f \right| \frac{\theta_s - \theta_i}{I} \right) \quad (4)$$

A equação 4 é conhecida como equação de Green-Ampt, cuja representação gráfica é mostrada na Figura 4.

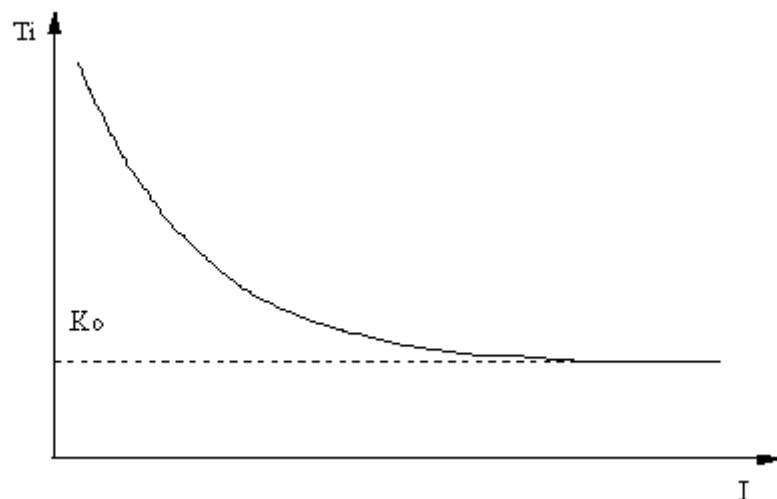


Figura 4. Curva representativa da taxa de infiltração em função da infiltração acumulada obtida a partir do modelo de Green-Ampt.

### 2.3.2. Modelo de Green-Ampt modificado por Mein-Larson (GAML)

Como o modelo de Green-Ampt foi desenvolvido considerando-se que desde o início do processo de infiltração, a superfície do solo se encontra saturada e que existe uma carga hidráulica sobre a superfície do solo, ele não se adequa corretamente à modelagem da infiltração de água no solo em condição de precipitação, visto que a condição em que ele foi desenvolvido não corresponde às reais condições de infiltração de água no solo durante um evento de precipitação, pois nestas condições, o empoçamento de água sobre a superfície do solo só ocorre no momento em que a intensidade de precipitação excede a capacidade de infiltração, dando início ao processo de escoamento superficial.

Mein & Larson (1973) integraram a equação proposta por Green-Ampt, conforme a duração da chuva, a fim de determinar qual o tempo de empoçamento de água no solo. A partir desta data, o modelo de Green-Ampt passou a ser conhecido na literatura como modelo de Green-Ampt modificado por Mein & Larson (GAML), o qual fornece o total infiltrado, de acordo com a intensidade das chuvas e sua duração.

Neste novo modelo, os autores consideram o comportamento da infiltração em três estágios distintos (Figura 5). Considerando que uma precipitação de intensidade  $i_p$  é aplicada a um solo com condutividade hidráulica  $K_0$  e capacidade de infiltração  $CI$ , temos:

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 5 pela linha A.

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

Estágio C:  $K_0 < CI \leq i_p$ . A taxa de infiltração iguala-se à capacidade de infiltração do solo ( $T_i = CI$ ) e diminui com o tempo, e ocorre o escoamento superficial. Este estágio é representado tanto pelo trecho C da curva BC.

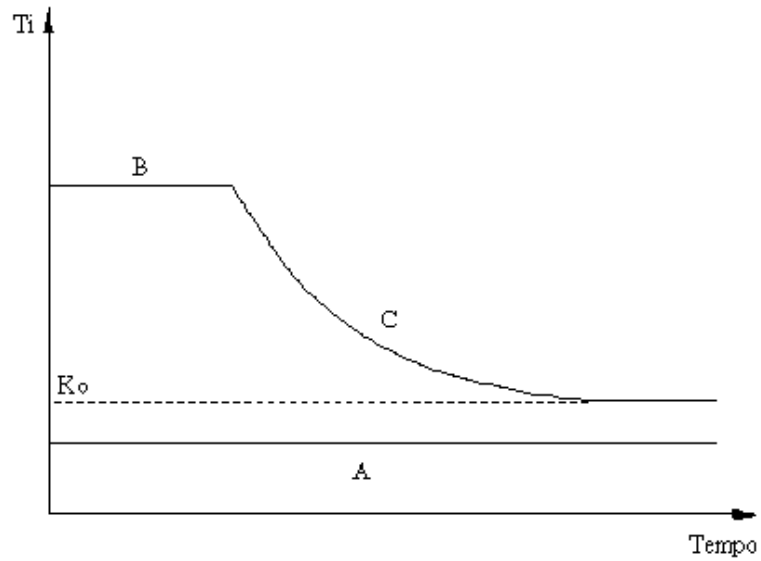


Figura 5. Diferentes estágios da infiltração sob condições de chuva.

O modelo GAML estima a lâmina de água infiltrada até o momento em que a intensidade de precipitação iguala-se a capacidade de infiltração, a partir do qual se inicia o empoçamento de água sobre a superfície do solo. Esta lâmina é estimada a partir da equação:

$$I_p = \frac{\Psi_f(\theta_s - \theta_i)}{\frac{i_p}{K_0} - 1} \quad (5)$$

em que:

$I_p$  = lâmina infiltrada até o momento em que a intensidade de precipitação excede a capacidade de infiltração, mm; e

$i_p$  = Intensidade de precipitação, mm h<sup>-1</sup>.

O tempo decorrido entre o início da infiltração e o momento em que a capacidade de infiltração iguala-se a intensidade de precipitação, chamado de tempo de empoçamento da água na superfície do solo, é dado por:

$$t_p = \frac{I_p}{i_p} \quad (6)$$

em que

$t_p$  = tempo de empoçamento da água na superfície do solo, h.

A partir do empoçamento da água na superfície do solo, a taxa de infiltração passa a ser igual à capacidade de infiltração e seu valor pode ser estimado pela equação original de Green-Ampt (eq. 4).

## **2.4. Propostas para modificações nos parâmetros de entrada do modelo de GAML**

Para utilização do modelo de GAML na modelagem de infiltração de água no solo é necessário o conhecimento dos parâmetros  $K_0$ ,  $\theta_s$  e  $\psi_f$ . Porém, como citado anteriormente, com a utilização destes parâmetros conforme originalmente propostos, não se tem a representação real do processo de infiltração de água no solo. Cecílio et al. (2003), em estudos de infiltração em um Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado, realizados em colunas de solo, afirma que a equação de Green-Ampt sem modificações nos seus parâmetros de entrada não descreve satisfatoriamente o processo de infiltração de água no solo.

Levando em consideração estes problemas, várias metodologias para determinação dos parâmetros de entrada do modelo ( $K_0$ ,  $\theta_s$  e  $\psi_f$ ) tem sido propostas visando representarem de maneira mais adequada o processo de infiltração em condições de campo.

### **2.4.1. Umidade de saturação**

Os modelos de Green-Ampt e GAML na sua forma original foram derivados considerando que a região acima da frente de umedecimento encontra-se saturada. Entretanto, devido ao fenômeno de aprisionamento de ar nos poros do solo, a umidade de saturação ( $\theta_s$ ) não é atingida. Este comportamento foi constatado por Slack (1980), o qual sugere a utilização da denominada saturação de campo ( $\theta_w$ ), que é a máxima umidade atingida no campo durante a infiltração.

Para Bloomsburg & Corey, citados por Slack et al. (1988), solos que possuem poros com tamanhos mais uniformes, maior pressão de borbulhamento e são constituídos por partículas menores têm tendência a aprisionar menos ar, possuindo, portanto um maior valor relativo de  $\theta_w$  ( $\theta_w/\theta_s$ ). Também mostraram que solos argilosos compactos apresentaram os maiores valores relativos de  $\theta_w$  e os solos com tamanhos de poros intermediários apresentaram os menores valores relativos deste parâmetro.

Zirbel et al., citado por Rodrigues (1999) constataram que  $\theta_w$  varia de  $0,79 \theta_s$  para um solo arenoso a  $0,84 \theta_s$  para um solo argiloso. Slack et al. (1988) indica valores de  $0,73 \theta_s$  para solos de textura média,  $0,79 \theta_s$  para solos de textura grossa e  $0,91 \theta_s$  para solos de textura fina. Rawls et al. (1989) apresentam uma equação para cálculo de  $\theta_w$  que leva em conta uma série de características do solo. Estudando um Latossolo Vermelho-Amarelo, com uso de colunas de solo, Mello (2003) encontrou valores de  $\theta_w$  variando entre  $0,76 \theta_s$  e  $0,92 \theta_s$  para material de solo com textura muito argilosa e entre  $0,81 \theta_s$  e  $0,94 \theta_w$  para material de textura franco, sendo que estes valores apresentaram uma tendência a aumentar com o aumento da densidade do solo.

Segundo Cecílio (2002), valores de  $\theta_w$  variando entre  $0,79 \theta_s$  a  $0,81 \theta_s$  para solos de textura argilosa e na faixa de  $0,85 \theta_s$  a  $0,86 \theta_s$  para solos de textura franca foram os que apresentaram melhores resultados para o Latossolo Vermelho-Amarelo em experimentos realizados em coluna de solo.

#### **2.4.2. Condutividade hidráulica do solo saturado**

Devido ao fato de que na zona de transmissão não ocorrer a completa saturação do solo, alguns autores sugerem a utilização da condutividade hidráulica na zona de transmissão ( $K_w$ ) em substituição a  $K_0$ . Bouwer (1969) recomenda a utilização de  $K_w$  igual a  $0,5 K_0$ . Segundo Cecílio et al. (2003), esta alternativa se adequa mais à física do processo de infiltração descrito por Green-Ampt, sendo no entanto, uma solução um pouco mais trabalhosa devido à necessidade da determinação de  $K_0$ .

Segundo Cecílio (2005), a taxa de infiltração estável (Tie) é um melhor estimador da condutividade hidráulica do solo, em substituição a  $K_0$  determinado por intermédio da metodologia do permeâmetro de carga constante, pois esta metodologia altera a estrutura das amostras de solo. O mesmo autor, trabalhando com três tipos de solo, encontrou melhores estimativas da taxa de infiltração de água no solo com a utilização de Tie em substituição a  $K_0$ . A utilização da Tie como o valor da condutividade hidráulica foge à física do processo de infiltração em solos estratificados, pois esta só se estabelece algum tempo após a entrada da frente de umedecimento em horizontes mais profundos; entretanto, esta solução pode ser considerada um simplificador muito grande da equação de Green-Ampt para solos estratificados, visto que dispensa a determinação da condutividade hidráulica de cada estrato ou horizonte do solo, justamente um dos pontos onde ocorre a maior dificuldade da aplicação desta equação (Cecílio et al., 2003).

### 2.4.3. Potencial matricial na frente de umedecimento

Dentre os parâmetros de entrada do modelo de Green-Ampt, o potencial matricial na frente de umedecimento é o de mais difícil determinação.

Bouwer, citado por Rodrigues (1999), recomenda que o valor de  $\psi_f$  seja metade da pressão de borbulhamento ( $\psi_b$ ), sendo o valor de  $\psi_b$  obtido a partir da curva de retenção de água no solo, valor este correspondente à pressão necessária aplicada ao solo para que o maior poro se esvazie.

Brakensiek (1977) recomenda a utilização de um valor médio de  $0,76 \psi_b$  para  $\psi_f$ . Sugere também a utilização da equação 7:

$$\psi_f = \frac{2 + 3\lambda}{1 + 3\lambda} \frac{\psi_b}{2} \quad (7)$$

em que:

$\psi_b$  = potencial matricial de entrada de ar, mm; e

$\lambda$  = índice de distribuição do tamanho de poros, adimensional.

Van Mullem, citado por Rawls et al. (1996) sugere que o valor de  $\psi_f$ , em cm, seja calculado usando a equação:

$$\psi_f = 4,903(K_0 + 0,02)^{-0,4932} \quad (8)$$

em que:

$K_0$  = condutividade hidráulica do solo saturado, cm h<sup>-1</sup>.

Risse et al. (1995) recomendam, para o cálculo de  $\psi_f$  (mm), a utilização da equação:

$$\psi_f = 0,01e^\alpha \quad (9)$$

em que

$$\alpha = 6,531 - 7,326\phi + 15,8C^2 + 3,809\phi^2 + 3,44SC - 4,989S\phi + 16,1S^2\phi^2 + 16C^2\phi^2 - 13,6S^2C - 34,8C^2\phi - 7,99S^2\phi$$

$\phi$  = porosidade total do solo, m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>

$S$  = teor de areia, decimal; e

$C$  = teor de argila, decimal.

Cecílio (2005) encontrou um fraco desempenho na estimativa da infiltração quando utilizou metodologias que estimam  $\psi_f$  em função de características do solo, resultado que corrobora as afirmações de van der Zweep & Stone (1991), citados por Yu (1999), que mostraram que a estimativa de  $\psi_f$  feita com a utilização de características do solo é usualmente inadequada. Porém, segundo Cecílio et al. (2003), a utilização da equação 9, recomendada por Risse et al. (1995), no cálculo de  $\psi_f$ , facilita a utilização da equação de Green-Ampt para solos estratificados, uma vez que dispensa o conhecimento da curva de retenção de água no solo, fazendo-se necessário apenas o conhecimento das frações granulométricas e da porosidade do solo, que são parâmetros mais fáceis de serem obtidos.

Ainda, segundo o mesmo autor, percebe-se que uma simulação melhor do processo é obtida quando se considera o valor da umidade inicial do solo

no cálculo de  $\psi_f$ , o que não ocorre com o uso da equação recomendada por Risse et al. (1995). Cecílio (2005) recomenda que o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento seja realizado a partir da curva de retenção de água no solo, sendo obtido pela área sob a curva de potencial matricial versus condutividade hidráulica relativa, conforme proposta de Slack (1980). Com isso, Cecílio (2005) recomenda a utilização da seguinte equação para determinação de  $\psi_f$ , sendo:

$$\psi_f = \frac{\Psi_b(2 + 3\lambda) \left[ Kr(\theta_w)^{\frac{3\lambda+1}{3\lambda+2}} - Kr(\theta_i)^{\frac{3\lambda+1}{3\lambda+2}} \right]}{[Kr(\theta_w) - Kr(\theta_i)][3\lambda + 1]} \quad (10)$$

em que:

$Kr$  - condutividade hidráulica relativa igual a  $K(\theta)/K_0$

## 2.5. Modelo de Green-Ampt para solo estratificado

Moore & Eigel (1981) propuseram a utilização do modelo de GAML em um perfil de solo composto por duas camadas (Figura 6).

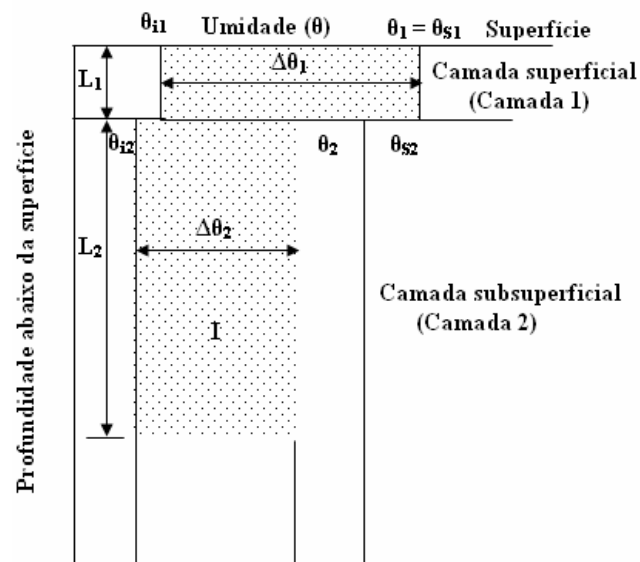


Figura 6. Perfil de solo composto por duas camadas. Fonte: Brandão et al. (2003).

Considerando uma intensidade de precipitação constante maior do que a condutividade hidráulica do solo saturado a taxa de infiltração antes do início do empoçamento ( $t < t_p$ ) será:

$$T_i = i_p \quad (11)$$

Enquanto a frente de umedecimento estiver na camada 1, o valor de  $I_p$  será calculado por:

$$I_p = \frac{\Delta\theta_1 \psi_{f1}}{\frac{i_p}{K_1} - 1}, \text{ para } L_p \leq L_1 \quad (12)$$

em que

$\Delta\theta_1 = \theta_{s1} - \theta_{i1}$  = variação do teor de água na camada 1, adimensional,

$\psi_{f1}$  = potencial matricial na camada 1, mm

$K_1$  = condutividade hidráulica na zona de transmissão para a camada 1,  $\text{mm h}^{-1}$ ; e

$L_p$  = Profundidade da frente de umedecimento, mm.

A partir do momento que a frente de umedecimento penetra na camada 2, o valor de  $I_p$  será obtido por:

$$I_p = \frac{\Delta\theta_2(L_1 + \psi_{f2}) - L_1 \Delta\theta_2 \left( \frac{i_p}{K_1} \right)}{\frac{i_p}{K_2} - 1} + L_1 \Delta\theta_1, \text{ para } L_p \geq L_1 \quad (13)$$

em que

$\Delta\theta_2 = \theta_{s2} - \theta_{i2}$  = variação do teor de água na camada 2, adimensional,

$\psi_{f2}$  = potencial matricial na camada 2, mm; e

$K_2$  = condutividade hidráulica na zona de transmissão para a camada 2,  $\text{mm h}^{-1}$ .

Após o início do empoçamento ( $t \geq t_p$ ), a taxa de infiltração será estimada por:

$$Ti = K_1 \left( 1 + \frac{\Delta\theta_1 \psi_1}{I} \right), \text{ para } L_p \leq L_1 \text{ e,} \quad (14)$$

$$Ti = K_2 \left[ \frac{\Delta\theta_2 (L_1 + \psi_2) + I - I_1}{L_1 \Delta\theta_2 \left( \frac{K_2}{K_1} \right) + I - I_1} \right], \text{ para } L_p > L_1 \quad (15)$$

### 3. METODOLOGIA

Os ensaios de infiltração foram realizados em uma encosta na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA/UFV), em um Cambissolo Háplico Tb distrófico, com e sem cobertura vegetal morta, usando um simulador de chuvas do tipo pendular. O modelo de GAML, com diferentes proposições para os parâmetros  $K_w$ ,  $\theta_s$  e  $\psi_f$ , foi testado por meio de comparação dos resultados simulados com aqueles obtidos experimentalmente nos ensaios de campo.

#### 3.1. Calibração do simulador de chuvas

O simulador de chuvas utilizado (Figura 7), desenvolvido no DEA/UFV, é similar ao descrito por Meyer & Harmon (1979), tendo cinco bicos VeeJet 80.100, oscilantes e dispostos linearmente, instalados a uma altura de 3 m da superfície do solo, trabalhando com pressão de serviço de 41,4 kPa. A intensidade e o perfil de precipitação foram controlados por um circuito analógico-digital conectado a um microcomputador.



Figura 7. Simulador de chuvas utilizado no experimento

A calibração do simulador de chuvas foi realizada no laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. Primeiramente era estabelecida a resistência elétrica com uso do circuito digital-analógico conectado ao equipamento. Para cada resistência elétrica estabelecida, foram realizados ensaios com duração de três minutos, durante o qual a precipitação foi coletada em uma calha com dimensões de 0,7 m de largura

por 1,0 m de comprimento. O volume coletado na calha foi determinado pelo método da pesagem usando uma balança de precisão de 0,1 g, A intensidade de precipitação foi calculada por:

$$ip = 600 \frac{V}{A \cdot td} \quad (16)$$

em que

$ip$  = intensidade de precipitação,  $\text{mm h}^{-1}$

$V$  = volume coletado nas calhas coletoras,  $\text{cm}^3$

$A$  = área das calhas coletoras,  $\text{cm}^2$ ; e

$td$  = duração do teste, min.

Após determinados os pares de valores de resistência elétrica versus intensidade de precipitação, foi determinada, por meio de análise de regressão, a curva de calibração do simulador de chuvas.

### 3.2. Ensaio de infiltração

Os ensaios experimentais consistiram na aplicação de chuva simulada com intensidade constante sobre parcelas experimentais, com e sem cobertura vegetal morta, e na coleta do escoamento superficial produzido.

Os ensaios foram realizados em parcelas experimentais delimitadas por chapas metálicas com dimensões de 0,7 m de largura por 1,0 m de comprimento e 0,18 m de altura, enterradas 0,15 m no solo (Figura 8).



Figura 8. Vista da parcela experimental, delimitada por chapas metálicas enterradas 0,15 m no solo.

Previamente a instalação das parcelas experimentais foi realizado o preparo convencional do solo, com aração e gradagem. A orientação das parcelas foi feita de modo que a maior dimensão ficasse na direção da maior declividade do terreno, em média 8%. O solo da parcela foi sistematizado de modo que o escoamento superficial gerado fosse direcionado para o centro da parcela, a fim de minimizar uma possível infiltração preferencial junto a parede da parcela experimental. Essa sistematização do solo foi feita com uso de ancinho e enxada.

Os ensaios foram realizados estando o solo em duas condições: sem cobertura vegetal e com cobertura vegetal morta, sendo esta composta por uma camada de palha seca de aproximadamente 4,5 a 5,0 t. ha<sup>-1</sup>, equivalente à cobertura utilizada no sistema plantio direto (EMBRAPA, 2006).



Figura 9. Parcelas experimentais com e sem cobertura vegetal.

Sob o simulador de chuvas foram instaladas quatro parcelas experimentais (Figura 10). Os ensaios eram realizados em uma parcela de cada vez, sendo as parcelas não utilizadas no ensaio cobertas com chapas metálicas para que não ficassem expostas à precipitação. (Figura 11).



Figura 10. Vista da disposição das parcelas experimentais sob o simulador de chuvas.



Figura 11. Vista do esquema experimental, mostrando a parcela utilizada em um ensaio e as demais cobertas com chapa metálica.

Em testes preliminares, verificou-se que o simulador de chuvas possuía capacidade de aplicação de intensidades de precipitação na faixa de 50 a 330 mm h<sup>-1</sup>. Foi verificado também, que para os ensaios em condição de solo com cobertura vegetal morta, era necessária a aplicação de intensidades de precipitação superiores a 100 mm h<sup>-1</sup> para que houvesse a ocorrência de escoamento superficial em um curto intervalo de tempo, e que a taxa de infiltração estável fosse atingida pelo menos duas horas após o início do teste, pois para tempos superiores a este, tinha-se o problema de superaquecimento do motor elétrico responsável pelo movimento dos bicos, paralisando o funcionamento do simulador de chuvas. Assim, para os ensaios realizados em condição de solo com cobertura vegetal morta, foram utilizadas intensidades de precipitação na faixa de 100 a 245 mm h<sup>-1</sup>, em intervalos de 70 mm h<sup>-1</sup>.

Para os ensaios em condição de solo sem cobertura vegetal, como a taxa de infiltração estável era atingida mais rapidamente, optou-se pela utilização de intensidades de precipitação na faixa de 100 a 115 mm h<sup>-1</sup>.

Desta forma, ensaios de infiltração foram realizados no solo com cobertura aplicando-se seis intensidades de precipitação: 243, 245, 184, 170, 170 e 105 mm h<sup>-1</sup>. Na condição sem cobertura foram realizados três ensaios com as intensidades de precipitação de: 115, 103 e 100 mm h<sup>-1</sup>.

A intensidade de precipitação foi determinada antes e após a execução de cada ensaio experimental, coletando-se o volume precipitado, durante três minutos, sobre um recipiente de mesma área que a parcela experimental (Figura 12). A intensidade de precipitação foi calculada usando a equação 16.



Figura 12. Calha utilizada para determinação da intensidade de precipitação aplicada durante o teste experimental.

O escoamento superficial produzido durante o ensaio foi conduzido da parcela experimental para o recipiente de coleta por meio de uma calha conectada à parcela experimental, ligada a um tubo flexível de 50 mm de diâmetro (Figura 13).



Figura 13. Vista da calha de coleta utilizada para o direcionamento do escoamento superficial ao recipiente de coleta.

O recipiente de coleta era formado por reservatórios comunicantes construídos com dois tubos de PVC de 250 mm de diâmetro, localizados dentro de uma trincheira de 1,5 metros de profundidade (Figura 14). Em um dos reservatórios foi instalado um aparelho medidor de nível de água, denominado Thalimedes (Figura 15), que registrava a altura da lâmina de água dentro do reservatório.



Figura 14. Recipiente de coleta do escoamento superficial.



Figura 15. Medidor de nível Thalimedes.

A taxa de infiltração foi calculada por:

$$Ti = ip - \frac{A_{res} \cdot \Delta l}{A_{inf} \cdot \Delta t} \quad (17)$$

em que:

$A_{inf}$  = área da parcela experimental, mm<sup>2</sup>

$A_{res}$  = área da seção transversal do recipiente de coleta, mm<sup>2</sup>

$\Delta l$  = variação do nível de água no recipiente de coleta no intervalo de tempo  $\Delta t$ , mm; e

$\Delta t$  = intervalo de tempo entre as leituras feitas no Thalimedes, h.

Os ensaios de infiltração duraram até quando a variação do nível de água no reservatório tornou-se constante, caracterizando então a estabilização da taxa de infiltração, denominada de taxa de infiltração estável ( $Tie$ ).

Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-35 cm e 35-60 cm fora da parcela experimental, antes do início de cada ensaio, e no centro da parcela, imediatamente após o final do ensaio, para a determinação do teor de água inicial e do teor de água na zona de transmissão, respectivamente (Figura 16). Os teores de água das amostras foram determinados utilizando-se o método padrão da estufa.



Figura 16. Retirada de amostra do solo ao final do teste para determinação do teor de água.

### 3.3. Determinação das características físicas do solo

Amostras de solo deformadas e indeformadas foram coletadas nas profundidades de 0-35 cm (Horizonte A) e 35-150 cm (Horizonte B) para determinação da classe textural, massa específica do solo, massa específica das partículas, porosidade total, condutividade hidráulica do solo saturado e da curva de retenção de água no solo, cujos resultados são apresentados nos Quadros 1 e 2 e na Figura 17.

Quadro 1. Porcentagem de areia grossa, areia fina, silte e argila e classe textural dos horizontes A e B do Cambissolo Háplico Tb distrófico Podzólico

Horizonte	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila <sup>1</sup>	Classe Textural
	dag kg <sup>-1</sup>				
A (0-35cm)	35	20	6	39	Argilo-Arenosa
B (35-150cm)	20	20	7	53	Argila

1 – Método da pipeta (EMBRAPA, 1997)

Quadro 2. Massa específica do solo ( $\rho$ ), massa específica das partículas ( $\rho_r$ ) porosidade total ( $\epsilon$ ), macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) dos horizontes A e B do Cambissolo Háplico Tb distrófico Podzólico

Horizonte	$\rho^1$	$\rho_r^2$	$\epsilon$ ( $\theta_s$ ) <sup>3</sup>	Macrop.	$K_0^4$
	(kg dm <sup>-3</sup> )				
A (0-35cm)	1,40	2,57	0,455	0,435	45
B (35-150cm)	1,37	2,58	0,469	0,389	20

1 - Massa específica do solo (Método do anel volumétrico).

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

3 - Porosidade do solo ( $1 - \frac{\rho}{\rho_r}$ )

4 - Método do permeâmetro de carga constante

As amostras deformadas do solo foram usadas para determinar a curva de retenção de água no solo (Figura 17), usando o extrator de Richards, conforme metodologia apresentada em Embrapa (1997).

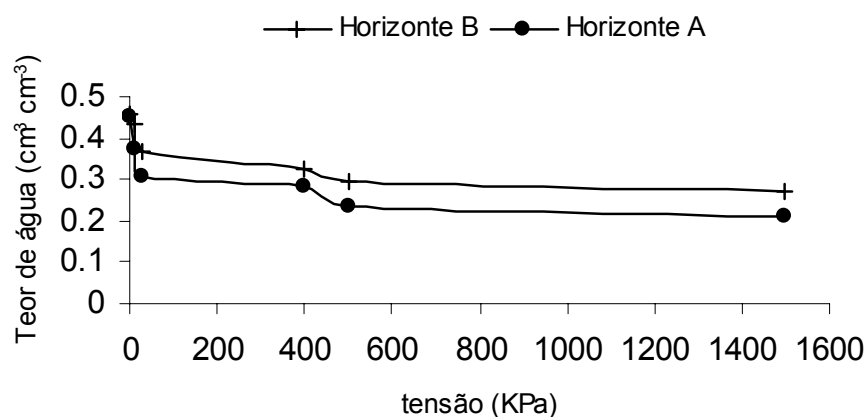


Figura 17. Curva de retenção de água no solo para os horizontes A e B.

Aos dados experimentais da curva de retenção foi ajustado o modelo de Brooks & Corey (TIMM et al., 1995). O ajuste desse modelo foi realizado com uso do Software SWRC (DOURADO-NETO et al., 2000), sendo os parâmetros obtidos a partir do ajuste do modelo apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Parâmetros do modelo de Brooks & Corey para os dois horizontes do Cambissolo Háplico Tb Distrófico

Horizonte	Parâmetros		
	$\lambda^1$	$\theta_r^2$	$\Psi_b^3$
<b>A</b>	0,4746	0,211	49,50
<b>B</b>	0,4619	0,269	73,00

1) índice de distribuição de tamanho de poros, adimensional

2) umidade residual do solo,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

3) potencial matricial de entrada de ar, cm

### 3.4. Simulação com o modelo de GAML

As simulações com o modelo de GAML foram realizadas com uso das equações 11, 12, 13, 14 e 15, e diferentes combinações com propostas de adequação dos seus parâmetros de entrada.

#### 3.4.1. Parâmetros do modelo de GAML

O teor de água na zona de transmissão foi considerado, num primeiro caso, igual ao teor de água do solo saturado ( $\theta_s$ ), como na proposta original de Green & Ampt (1911) e, num segundo caso, igual ao teor de água obtido ao final do ensaio de infiltração ( $\theta_w$ ) como proposto por Slack (1980).

As proposições para a condutividade hidráulica na zona de transmissão ( $K_w$ ) foram:  $K_w$  igual a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ), como na proposta original de Green & Ampt (1911), determinada em laboratório pelo método do permeâmetro de carga constante (EMBRAPA, 1997); e  $K_w$  igual ao valor da taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ), conforme proposto por Silva & Kato (1998), e determinada no ensaio de infiltração em campo.

Em relação ao potencial matricial na frente de umedecimento ( $\Psi_f$ ) foram utilizados os valores do potencial matricial referente a umidade inicial do solo  $\Psi(\theta_i)$ , conforme proposto por Green & Ampt (1911) e valores calculados usando as equações 9 e 10, conforme proposição de Risse et al. (1995) e de Cecílio (2005), respectivamente.

As simulações da taxa de infiltração, infiltração acumulada e tempo de empoçamento com o modelo de GAML foram realizadas usando diferentes combinações das propostas dos parâmetros do modelo, as quais são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4. Combinações de proposições dos parâmetros do modelo de GAML utilizadas na simulação do processo de infiltração de água no solo

Combinação	$\theta_s$	$K_w$	$\Psi_f$
<b>C1<sup>1</sup></b>	$\theta_s$ - Green & Ampt (1911)	$K_0$ -Green & Ampt (1911)	$\Psi(\theta_i)$ - Green & Ampt (1911)
<b>C2</b>	$\theta_s$ - Green & Ampt (1911)	$K_0$ -Green & Ampt (1911)	Eq 10 – Cecilio et al. (2007)
<b>C3</b>	$\theta_s$ - Green & Ampt (1911)	$K_0$ -Green & Ampt (1911)	Eq 9 - Risse et al. (1995)
<b>C4</b>	$\theta_s$ - Green & Ampt (1911)	Tie -Silva & Kato (1998)	$\Psi(\theta_i)$ - Green & Ampt (1911)
<b>C5</b>	$\theta_s$ - Green & Ampt (1911)	Tie -Silva & Kato (1998)	Eq 10 – Cecilio et al. (2007)
<b>C6</b>	$\theta_s$ - Green & Ampt (1911)	Tie -Silva & Kato (1998)	Eq 9 - Risse et al. (1995)
<b>C7</b>	$\theta_w$	$K_0$ -Green & Ampt (1911)	$\Psi(\theta_i)$ - Green & Ampt (1911)
<b>C8</b>	$\theta_w$	$K_0$ -Green & Ampt (1911)	Eq 10 – Cecilio et al. (2007)
<b>C9</b>	$\theta_w$	$K_0$ -Green & Ampt (1911)	Eq 9 - Risse et al. (1995)
<b>C10</b>	$\theta_w$	Tie -Silva & Kato (1998)	$\Psi(\theta_i)$ - Green & Ampt (1911)
<b>C11</b>	$\theta_w$	Tie -Silva & Kato (1998)	Eq 10 – Cecilio et al. (2007)
<b>C12</b>	$\theta_w$	Tie -Silva & Kato (1998)	Eq 9 - Risse et al. (1995)

1 – Proposta original de Green-Ampt (1911)

### 3.5. Avaliação do modelo

CAMARGO & SENTELHAS (1997), propõem a utilização do índice de confiança (c) para avaliação do desempenho de modelos hidrológicos, o qual analisa conjuntamente, a precisão e a exatidão do modelo. Este índice é obtido pelo produto do coeficiente de correlação (r) pelo índice de concordância (d).

O índice de concordância (d) é calculado por:

$$d' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^J (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (18)$$

em que

$J$  = número de observações;

$O$  = valor observado experimentalmente;

$E$  = valor estimado pelo modelo; e

$\bar{O}$  = média dos valores observados experimentalmente.

Porém, segundo LEGATES e McCABE Jr. (1999) o uso dos quadrados das diferenças no cálculo de (d) faz com que este índice acabe por apresentar valores relativamente altos, mesmo quando as performances dos modelos sejam ruins. Assim, os autores propõem a utilização do índice de concordância ajustado ( $d'$ ), calculado por:

$$d' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J (O_i - E_i)}{\sum_{i=1}^J (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (19)$$

Com isso, utilizou-se o índice de concordância ajustado ( $d'$ ) para o cálculo do índice de confiança ajustado ( $c'$ ).

O desempenho do modelo, avaliado pelo uso do índice de confiança ajustado ( $c'$ ) foi classificado de acordo com a proposta de Camargo & Sentelhas (1997), conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5. Análise do desempenho do modelo com base no índice de confiança ajustado

Valor de $c'$	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sufrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Taxa de infiltração e tempo de empoçamento para os ensaios experimentais realizados em solo com e sem cobertura vegetal morta

No Quadro 6 são apresentados os valores do teor de água inicial ( $\theta_i$ ), teor de água na zona de transmissão ( $\theta_w$ ) e da relação  $\theta_w/\theta_s$  para os ensaios realizados. Nos ensaios 1 e 3 o teor de água inicial do solo foi menor que nos demais ensaios. Quando comparados os horizontes A e B, nota-se que o teor de água inicial, no geral, foi maior no horizonte B, em decorrência do processo de secagem natural do solo e do maior teor de argila neste horizonte, que acarreta em maior capacidade de retenção de água.

Analisando os valores dos teores de água na zona de transmissão ( $\theta_w$ ) para os ensaios com cobertura vegetal morta, nota-se que estes variaram de 0,9 a 0,97 do teor de água do solo saturado ( $\theta_s$ ) (Quadro 6), com média de 0,94  $\theta_s$  para o horizonte A e 0,95  $\theta_s$  para o horizonte B, sendo que este apresenta textura mais fina que o horizonte A (Quadro 1). Estes resultados estão de acordo com Bloomsburg & Corey, citados por Slack et al. (1988), os quais mencionam que solos que possuem poros com tamanhos mais uniformes, maior pressão de borbulhamento e são constituídos por partículas menores tem tendência a aprisionar menos ar, possuindo, portanto um maior valor relativo de  $\theta_w$  ( $\theta_w/\theta_s$ ).

Nos ensaios realizados em solo sem cobertura, os valores de  $\theta_w$  variaram de 0,9 a 0,97  $\theta_s$  (Quadro 6), com média de 0,93  $\theta_s$  para o horizonte A e 0,94  $\theta_s$  para o horizonte B, semelhantes aos resultados obtidos para os ensaios realizados em solo com cobertura vegetal morta.

Quadro 6. Valores do teor de água inicial ( $\theta_i$ ), teor de água na zona de transmissão ( $\theta_w$ ) e da relação  $\theta_w/\theta_s$  para os ensaios experimentais realizados

Ensaio	ip <sup>1</sup> (mm h <sup>-1</sup> )	Camada (cm)	( $\theta_i$ ) (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	( $\theta_w$ ) (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_w/\theta_s$
<b>Solo com cobertura</b>					
<b>1</b>	<b>243</b>	0-35 <sup>2</sup>	0,30	0,43	0,95
		35-60 <sup>3</sup>	0,32	0,45	0,96
<b>2</b>	<b>245</b>	0-35	0,34	0,43	0,94
		35-60	0,37	0,45	0,96
<b>3</b>	<b>184</b>	0-35	0,30	0,41	0,90
		35-60	0,32	0,43	0,91
<b>4</b>	<b>170</b>	0-35	0,39	0,44	0,96
		35-60	0,40	0,46	0,98
<b>5</b>	<b>170</b>	0-35	0,36	0,44	0,96
		35-60	0,359	0,44	0,94
<b>6</b>	<b>105</b>	0-35	0,36	0,43	0,94
		35-60	0,41	0,45	0,95
<b>Solo sem cobertura</b>					
<b>7</b>	<b>103</b>	0-35	0,38	0,43	0,95
		35-60	0,39	0,42	0,90
<b>8</b>	<b>100</b>	0-35	0,38	0,41	0,90
		35-60	0,41	0,44	0,94
<b>9</b>	<b>115</b>	0-35	0,37	0,42	0,94
		35-60	0,37	0,45	0,97

1 - ip – Intensidade de precipitação, 2 - horizonte A; 3 - horizonte B

Os valores de taxa de infiltração ao longo do tempo são apresentados nas Figuras 18 a 26.

Comparando-se os ensaios 1 e 2, que foram realizados com intensidades de precipitação praticamente iguais, de 243 e 245 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente, nota-se que o ensaio 1 necessitou de um maior tempo de aplicação de água até se chegar ao valor de taxa da infiltração estável (Tie) (Figuras 18 e 19), provavelmente devido ao fato do teor de água inicial do solo no ensaio 1 ser menor que no ensaio 2 (Quadro 6).

Para os ensaios 3, 4 e 5, que também foram realizados com intensidades de precipitação similares, de 184, 170 e 170 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente, nota-se que os ensaios 3 e 5 foram os que tiveram maior duração, de 60 minutos, sendo o ensaio 4 com duração de 30 minutos (Figuras 20 a 22). Da mesma forma como citado anteriormente, este tempo de duração do ensaio pode ser atribuído a diferença no teor de água inicial do solo. Os ensaios 3 e 5 apresentaram menor teor de água inicial no solo do que o ensaio 4 (Quadro 6).

Os ensaios 7, 8 e 9 (Figuras 24 a 26), realizados em condição de solo sem cobertura, tiveram aproximadamente os mesmos tempos de duração, provavelmente devido ao fato do teor de água inicial do solo e a intensidade de precipitação aplicada para os três ensaios apresentarem valores bem próximos (Quadro 6).

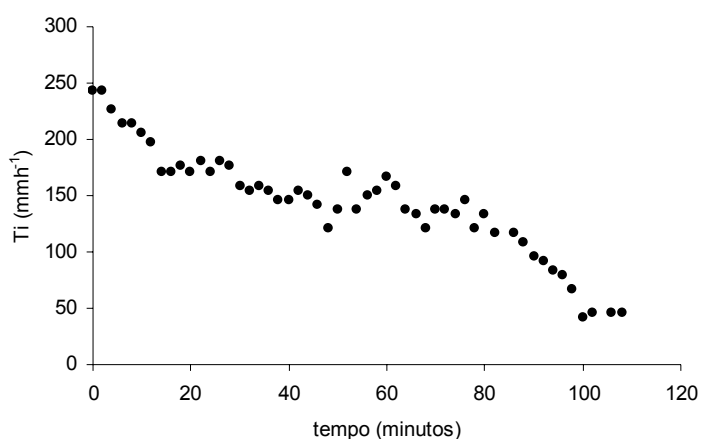


Figura 18. Taxa de infiltração em solo com cobertura vegetal morta referente ao ensaio 1 ( $i_p = 243 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

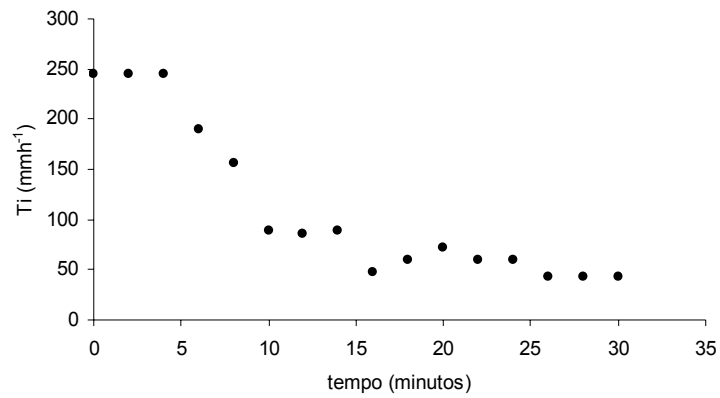


Figura 19. Taxa de infiltração em solo com cobertura vegetal morta referente ao ensaio 2 ( $i_p = 245 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,37 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

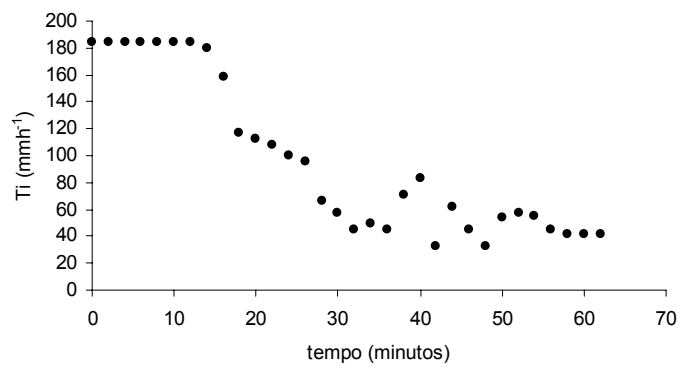


Figura 20. Taxa de infiltração em solo com cobertura vegetal morta referente ao ensaio 3 ( $i_p = 184 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

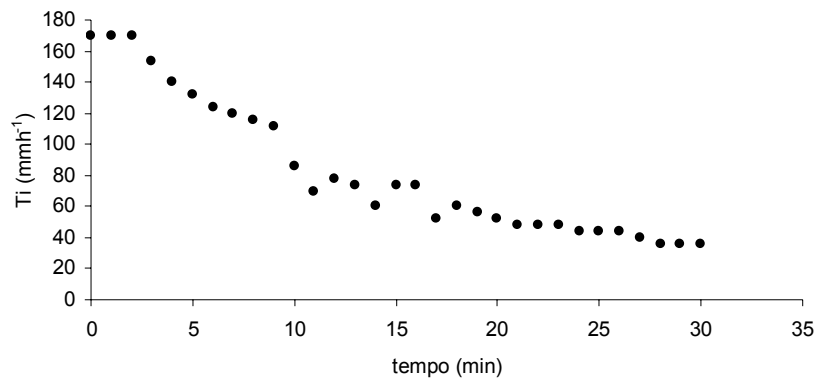


Figura 21. Taxa de infiltração em solo com cobertura vegetal morta referente ao ensaio 4 ( $i_p = 170 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

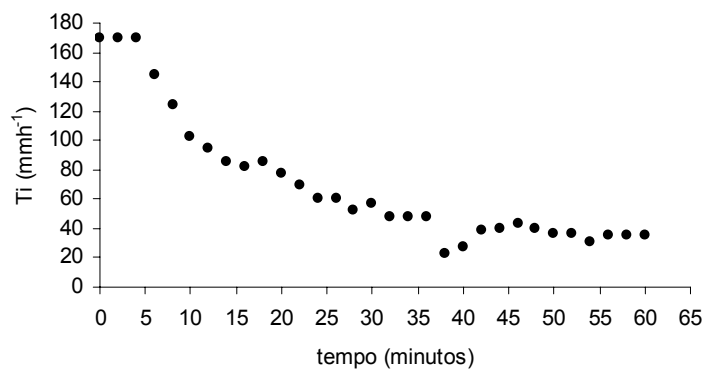


Figura 22. Taxa de infiltração em solo com cobertura vegetal morta referente ao ensaio 5 ( $i_p = 170 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

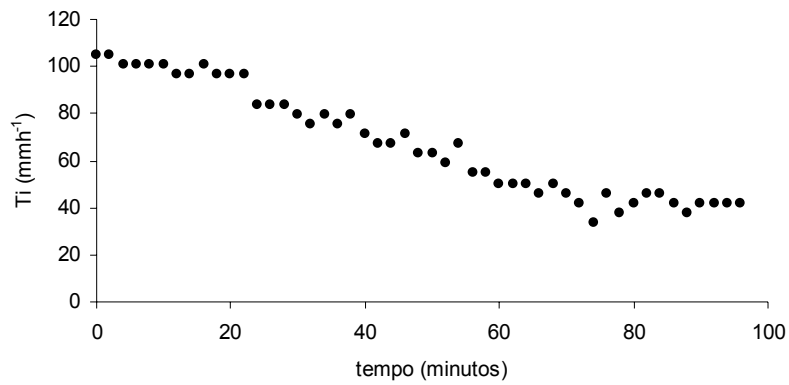


Figura 23. Taxa de infiltração em solo com cobertura vegetal morta referente ao ensaio 6 ( $i_p = 105 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,41 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

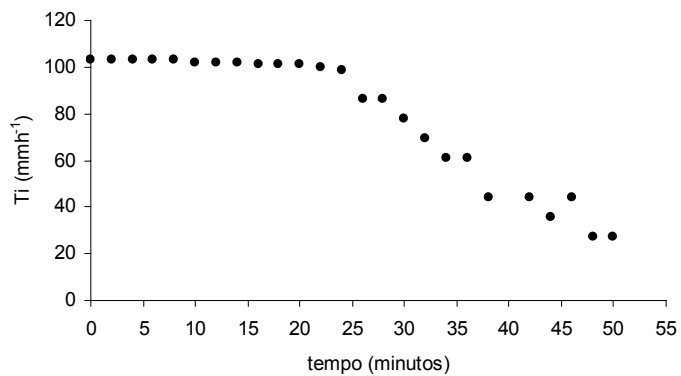


Figura 24. Taxa de infiltração em solo sem cobertura referente ao ensaio 7 ( $i_p = 103 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

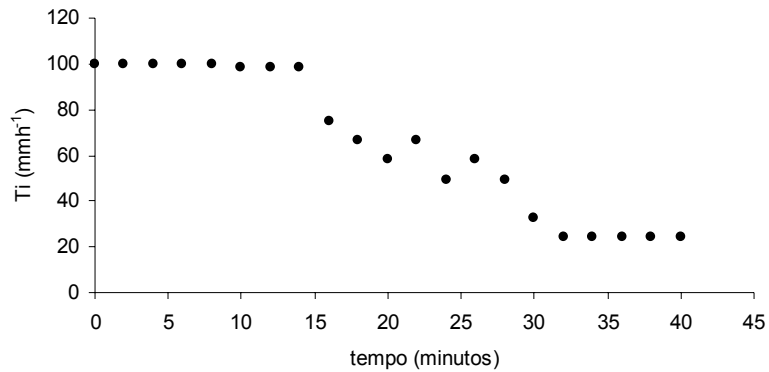


Figura 25. Taxa de infiltração em solo sem cobertura referente ao ensaio 8 ( $i_p = 100 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,41 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

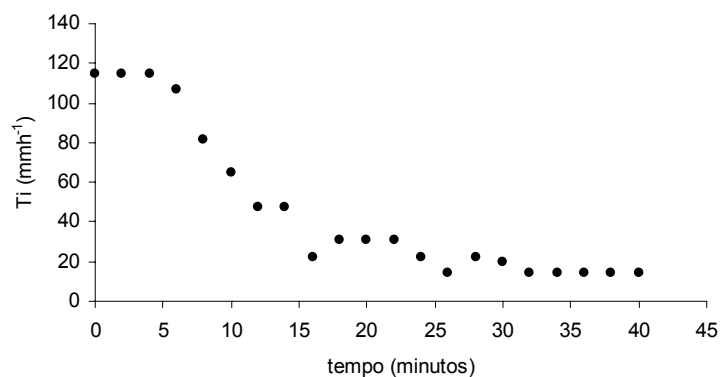


Figura 26. Taxa de infiltração em solo sem cobertura referente ao ensaio 9 ( $i_p = 115 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,37 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,37 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

Os valores de taxa de infiltração estável e de tempo de empoçamento são apresentados no Quadro 7.

Os valores da taxa de infiltração estável medidos em campo em solo com cobertura vegetal morta variaram de  $35,4$  a  $45,3 \text{ mm h}^{-1}$  (Quadro 7), sendo em média  $40,3 \text{ mm h}^{-1}$ . A taxa de infiltração estável medida em solo sem

cobertura variou de 14,0 a 27,3 mm h<sup>-1</sup> (Quadro 7), com média de 21,8 mm h<sup>-1</sup>, sendo o menor valor medido aquele referente ao teste realizado com maior intensidade de precipitação, que resulta maior energia despendida pelas gotas de chuva sobre a superfície do solo, o que provavelmente resulta em maior encrostamento da superfície do solo, diminuindo, com isso a taxa de infiltração estável.

Comparando-se os valores de taxa de infiltração estável medida em solo com e sem cobertura vegetal morta (Quadro 7) nota-se que os valores encontrados em solo sem cobertura foram em média duas vezes menores. Segundo Silva & Kato (1998), esta redução pode ser atribuída à formação de encrostamento superficial no solo desprovido de cobertura vegetal.

Quadro 7. Valores de taxa de infiltração estável (Tie) e tempo de empoçamento (tp) determinados para os ensaios experimentais.

<b>Ensaio</b>	<b>Tie (mm h<sup>-1</sup>)</b>	<b>tp (min)</b>
<b>Solo com cobertura</b>		
1	45,3	4,0
2	43,1	6,0
3	41,0	12,0
4	35,4	3,0
5	35,4	6,0
6	41,9	4,0
<b>Média</b>	40,3	5,8
<b>CV<sup>1</sup>(%)</b>	10,1	55,7
<b>Solo sem cobertura</b>		
7	27,3	10,0
8	24,3	10,0
9	14,0	6,0
<b>Média</b>	21,8	8,6
<b>CV(%)</b>	31,6	26,6

1 - Coeficiente de variação

O tempo de empoçamento medido nos ensaios com cobertura vegetal morta variaram de 3,0 a 12,0 minutos (Quadro 7), sendo o tempo de empoçamento do ensaio 3, de 12 minutos, atribuído à menor umidade inicial do solo no momento deste ensaio (Quadro 6) e à menor intensidade de precipitação. No ensaio 1, também realizado em condição de umidade inicial baixa (Quadro 6), porém com maior intensidade de precipitação, o tempo de empoçamento foi inferior ao do ensaio 3. Este resultado pode ser atribuído à alta intensidade de precipitação aplicada para o ensaio 1.

O tempo de empoçamento para os ensaios sem cobertura foi de 10,0 minutos para os ensaios 7 e 8 e de 6,0 minutos para o ensaio 9. O menor valor de tempo de empoçamento medido no ensaio 9 pode ser atribuído à provável formação de encrostamento superficial.

Os menores valores do tempo de empoçamento medidos nos ensaios em solo com cobertura vegetal morta em relação aos ensaios em solo sem cobertura podem ser atribuídos ao escoamento formado sobre a camada de palha após esta se saturar e a maior intensidade de precipitação aplicada em 5 dos seis ensaios, se comparada com as intensidades de precipitação aplicadas nos ensaios sem cobertura.

Nos ensaios realizados, observou-se que o processo de escoamento superficial teve início muito rápido, resultado corroborado pela afirmação de Coelho et al. (2000), na qual a aplicação de intensidades de precipitação acima da taxa de infiltração estável da água no solo, promove rápido empoçamento na superfície do solo, em média em tempos menores que 30 min. Mello (2003), trabalhando em colunas de solo, em laboratório com intensidade de precipitação média de  $141 \text{ mm h}^{-1}$ , encontrou valores de tempo de empoçamento variando de 1 a 17 minutos, corroborando com os valores encontrados em campo.

#### **4.2. Simulação do processo de infiltração**

As simulações da taxa de infiltração, infiltração acumulada e tempo de empoçamento foram realizados para as condições dos nove ensaios experimentais realizados, usando no modelo de GAML cada uma das combinações dos parâmetros de entrada apresentadas no Quadro 4.

A classificação do desempenho do modelo em cada simulação foi feita comparando-se o valor de  $c'$  calculado com aqueles do Quadro 5.

#### **4.2.1. Em solo com cobertura vegetal morta**

O desempenho do modelo de GAML na simulação da taxa de infiltração e infiltração acumulada, consideradas as diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, é apresentado no Quadro 8.

Analisando o Quadro 8, nota-se que em todos os ensaios realizados o modelo sempre simulou melhor a infiltração acumulada quando comparada com a taxa de infiltração, corroborando com os resultados encontrados por Cecílio (2005) e Mello (2003).

As combinações *C3*, *C6*, *C9* e *C12*, que utilizam a equação de Risse et al. (1995) para o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento não simularam bem os valores de taxa de infiltração e infiltração acumulada, em todos os ensaios, com desempenho péssimo para taxa de infiltração e péssimo a mal para infiltração acumulada em 100% dos casos.

As combinações *C1*, *C4*, *C7* e *C10*, que utilizam o potencial matricial relativo a umidade inicial do solo ( $\psi(\theta_i)$ ), como valor de potencial matricial na frente de umedecimento, apresentaram desempenho bom ou superior em apenas 16,7% dos ensaios, para taxa de infiltração, e em 41,7% dos ensaios para a infiltração acumulada (Quadro 8). O desempenho geral dessas combinações foi péssimo para taxa de infiltração e sofrível para infiltração acumulada.

A combinação *C1*, que utiliza os parâmetros originais propostos por Green & Ampt (1911), apresentou desempenho bom ou superior em 33% dos casos para taxa de infiltração e em 50% dos casos para infiltração acumulada.

Quadro 8. Desempenho do modelo de GAML na simulação da taxa de infiltração e infiltração acumulada nos ensaios em condição de cobertura vegetal morta

Combinação	Variável	Ensaio de Infiltração					
		1 (243 mm h <sup>-1</sup> )	2 (245 mm h <sup>-1</sup> )	3 (184 mm h <sup>-1</sup> )	4 (170 mm h <sup>-1</sup> )	5 (170 mm h <sup>-1</sup> )	6 (105 mm h <sup>-1</sup> )
C1	Ti	péssimo	bom	péssimo	bom	péssimo	sofrível
	I	bom	bom	sofrível	ótimo	mal	muito bom
C2	Ti	mal	ótimo	muito bom	bom	bom	sofrível
	I	bom	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	bom
C3	Ti	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo
	I	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	mal	mal
C4	Ti	péssimo	péssimo	péssimo	sofrível	péssimo	sofrível
	I	mediano	sofrível	sofrível	muito bom	mal	ótimo
C5	Ti	péssimo	muito bom	bom	muito bom	mediano	mediano
	I	mediano	muito bom	muito bom	ótimo	muito bom	ótimo
C6	Ti	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo
	I	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	mal
C7	Ti	mal	muito bom	péssimo	bom	mal	mal
	I	muito bom	muito bom	sofrível	ótimo	sofrível	bom
C8	Ti	péssimo	ótimo	bom	bom	bom	mal
	I	mal	ótimo	muito bom	muito bom	ótimo	sofrível
C9	Ti	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo
	I	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	mal	mal
C10	Ti	péssimo	mal	péssimo	sofrível	péssimo	mediano
	I	mediano	sofrível	sofrível	muito bom	mal	ótimo
C11	Ti	péssimo	muito bom	sofrível	bom	mediano	mediano
	I	sofrível	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo
C12	Ti	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo
	I	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	mal

As combinações C2, C5, C8 e C11, que utilizam a equação proposta por Cecílio (2005) para o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento simularam bem o processo de infiltração, apresentando desempenho bom ou superior em 55% dos casos para a taxa de infiltração e em 83%, para a infiltração acumulada. As combinações C2 e C8 foram as que apresentaram melhores resultados, com desempenho bom ou superior em 66% dos ensaios para a taxa de infiltração e em 100 e 66%, para a infiltração acumulada, respectivamente.

Os valores do tempo de empoçamento e da taxa de infiltração estável medidos e simulados para os seis ensaios experimentais são apresentados nos Quadros 9 e 10.

O tempo de empoçamento simulado com uso das combinações C3, C6, C9 e C12 foi igual a zero minutos (Quadro 9), ou seja, em nenhum instante a capacidade de infiltração superou a intensidade de precipitação, iniciando-se imediatamente o processo de escoamento superficial. Este resultado ocorreu pelo fato do potencial matricial na frente de umedecimento, calculado utilizando-se a equação de Risse et al. (1995), ser muito baixo, logo, o gradiente devido ao potencial matricial da água torna-se muito baixo e o processo de infiltração passa a ser governado pelo gradiente gravitacional, com isso, o gradiente do potencial da água no solo torna-se unitário e a capacidade de infiltração não supera a intensidade de precipitação em nenhum momento.

Em todos os ensaios realizados as combinações C1, C4, C7 e C10 superestimaram o tempo de empoçamento, apresentando valores da ordem de até 25 vezes o valor medido, como no ensaio 1(Quadro 9). Estes resultados vêm de encontro à afirmação de Silva & Kato (1998), que mesmo na condição de solo com cobertura vegetal morta, os valores de tempo de empoçamento simulados pelo modelo GAML com seus parâmetros originais são bastante discrepantes quando comparados com os valores observados. Para fins de simulação hidrológica, uma superestimativa do tempo de empoçamento acaba por subestimar o escoamento superficial, fato não desejável na maioria dos casos.

As combinações C2, C5, C8 e C11 foram as que melhor simularam o tempo de empoçamento, sendo as combinações que utilizam Tie como

parâmetro de entrada (C5 e C11) as que apresentaram resultados mais próximos dos reais (Quadro 9).

As combinações C1, C4, C7 e C10, superestimaram o tempo necessário para a obtenção da taxa de infiltração estável, pois, na simulação com estas combinações não se chega à estabilização do valor da taxa de infiltração, considerando o tempo do ensaio (Quadro 10).

As combinações C3 e C9 subestimaram os valores da taxa de infiltração estável, considerando a duração do ensaio do ensaio, em 50% e 83% dos ensaios, respectivamente (Quadro 10). As combinações C6 e C12, por utilizarem o valor da taxa de infiltração estável em substituição da condutividade hidráulica do solo, combinada com a equação de Risse et al. (1995) como parâmetros de entrada, simularam bem o valor da taxa de infiltração estável (Quadro 10), devido ao fato do potencial matricial na frente de umedecimento calculado pela equação de Risse et al. (1995) ser muito baixo, logo, o gradiente devido ao potencial matricial da água torna-se muito baixo e o processo de infiltração passa a ser governado pelo gradiente gravitacional, com isso, o gradiente do potencial da água no solo torna-se unitário. Segundo a equação de GAML, a partir do momento que o gradiente do potencial da água no solo torna-se unitário, a taxa de infiltração é igual a condutividade hidráulica na zona de transmissão.

Dentre as combinações que utilizam a equação de Cecílio (2005) para o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento (C2, C5, C8 e C11), as combinações que utilizam condutividade hidráulica do solo saturado como parâmetro de entrada (C2 e C8) foram as que melhor simularam a taxa de infiltração estável considerando a duração do ensaio (Quadro 10). As combinações que utilizam a taxa de infiltração estável como parâmetro de entrada (C5 e C11), superestimaram o tempo necessário para obtenção da taxa de infiltração estável para todos os ensaios (Quadro 10).

Quadro 9. Tempo de empoçamento (min) medido e simulado pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada nos ensaios em condição de cobertura vegetal morta

Ensaio	tp <sub>m</sub>	Combinações											
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1	4	49,8	6,9	0	106,5	6,9	0	43,0	5,8	0	92,4	5,8	0
2	6	11,8	4,8	0	14,8	4,5	0	9,2	3,7	0	11,7	3,5	0
3	12	86,7	16,6	0	178,0	14,7	0	63,5	11,7	0	130,9	10,4	0
4	3	7,5	5,4	0	5,4	3,9	0	5,7	4,1	0	4,2	3,0	0
5	6	25,1	7,8	0	9,7	5,6	0	20,1	6,5	0	8,1	4,6	0
6	4	26,4	23,3	0	38,7	29,8	0	18,7	16,6	0	26,8	21,0	0

\* tp<sub>m</sub> – Tempo de empoçamento medido

Quadro 10. Taxa de infiltração estável ( $\text{mm h}^{-1}$ ) medida e simulada pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada nos ensaios em condição de cobertura vegetal morta

Ensaio	Tie <sub>m</sub>	Combinações											
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1	45,3	115,0	35,9	24,0	202,7	72,5	45,0	108,8	39,5	23,9	189,5	71,0	45,0
2	43,1	65,4	43,4	45,0	112,0	76,7	43,0	63,7	43,0	45,0	107,9	75,2	43,0
3	41,0	184,0	49,5	45,0	184,0	81,3	41,0	184,0	46,7	24,3	184,0	76,9	41,0
4	35,4	52,8	41,8	45,0	75,8	60,6	35,0	52,5	42,0	24,9	74,8	61,8	35,0
5	35,4	71,9	45,5	24,8	104,5	64,6	35,0	65,7	42,7	24,3	95,9	61,3	35,0
6	41,9	34,2	31,4	22,3	61,0	56,5	41,0	31,5	29,3	21,9	56,6	53,2	41,0
<b>Média</b>	40,3	87,2	41,3	34,3	123,3	68,7	40,0	84,0	40,5	27,3	118,1	66,6	40,0
<b>CV%</b>	10,1	62,4	15,9	33,9	46,7	14,0	10,3	65,9	14,7	31,6	47,3	13,9	10,3

\* Tie<sub>m</sub> – Taxa de infiltração estável medida

\* CV – Coeficiente de variação

Os gráficos com as curvas de taxa de infiltração e infiltração acumulada ao longo do tempo medidas e simuladas para os seis ensaios experimentais são apresentados nas Figuras 27 a 32.

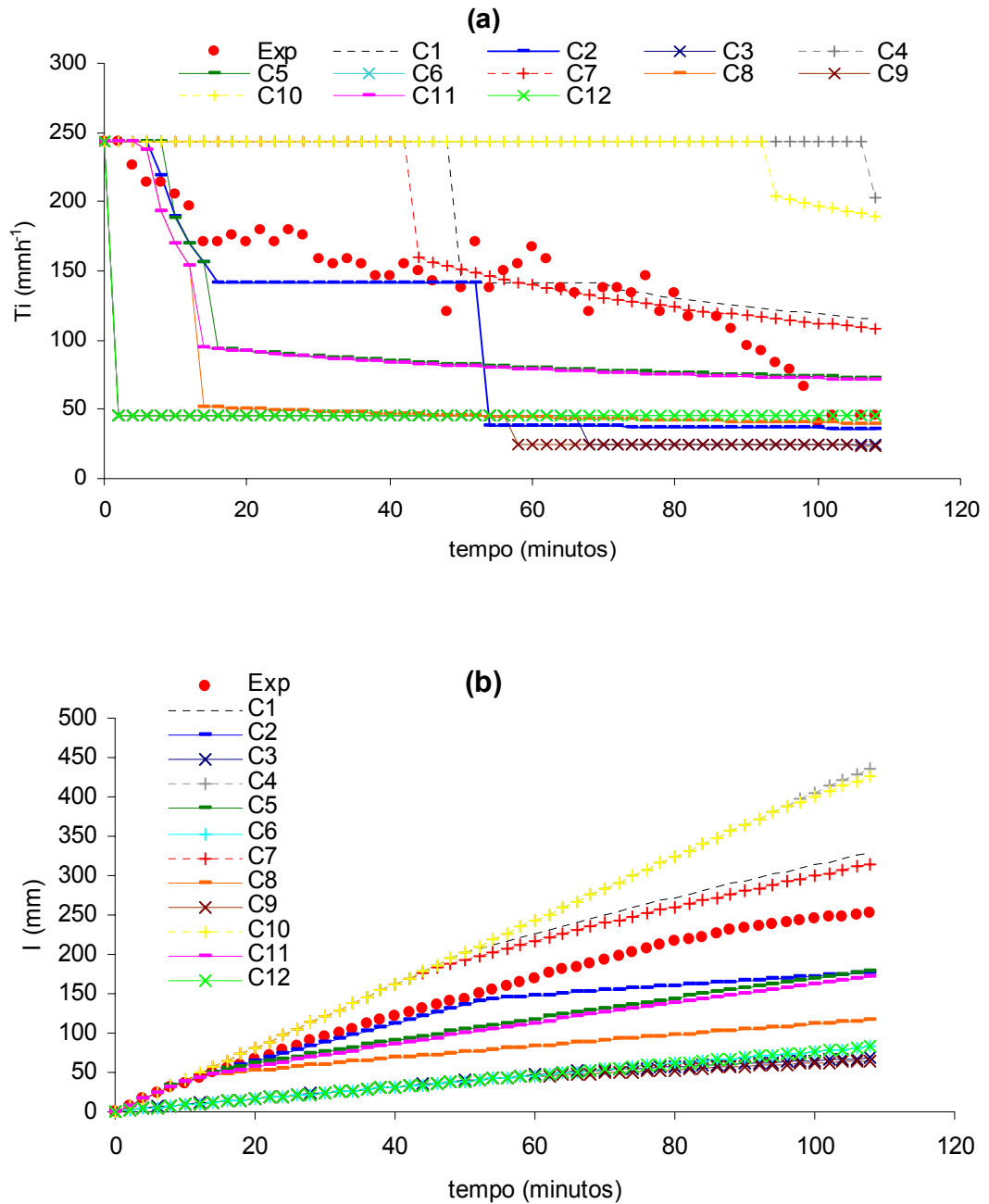


Figura 27. Taxas de infiltração (a) e infiltração acumulada (b) medidas em condição de cobertura vegetal morta e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada (Ensaio 1,  $i_p = 243 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

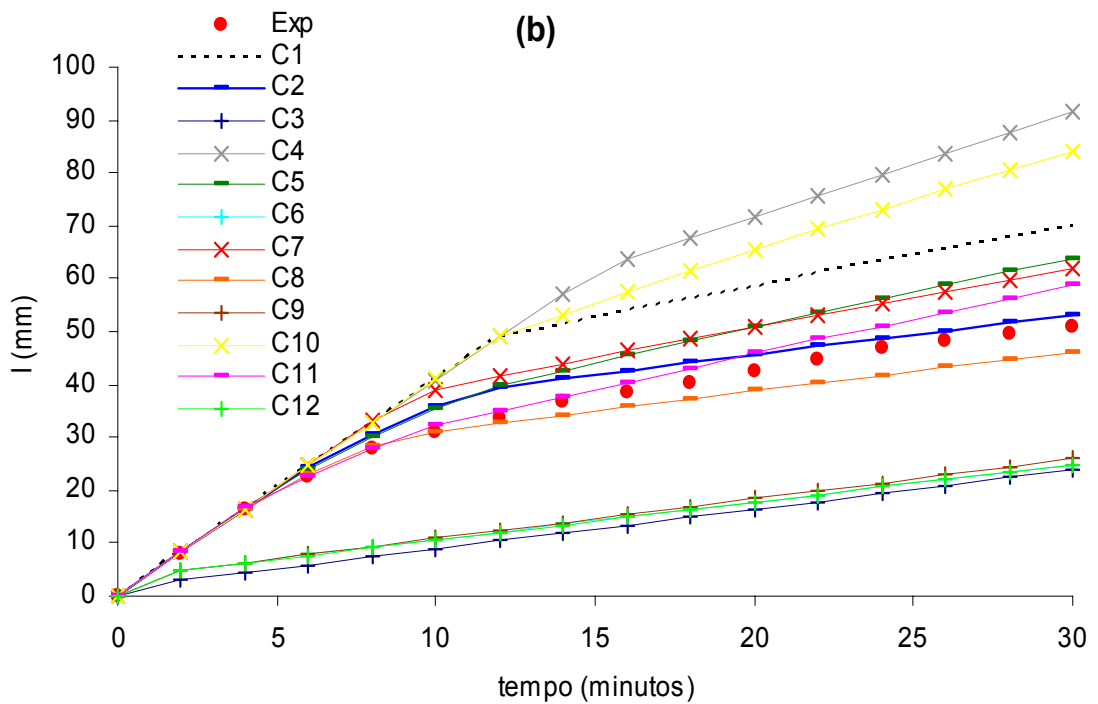
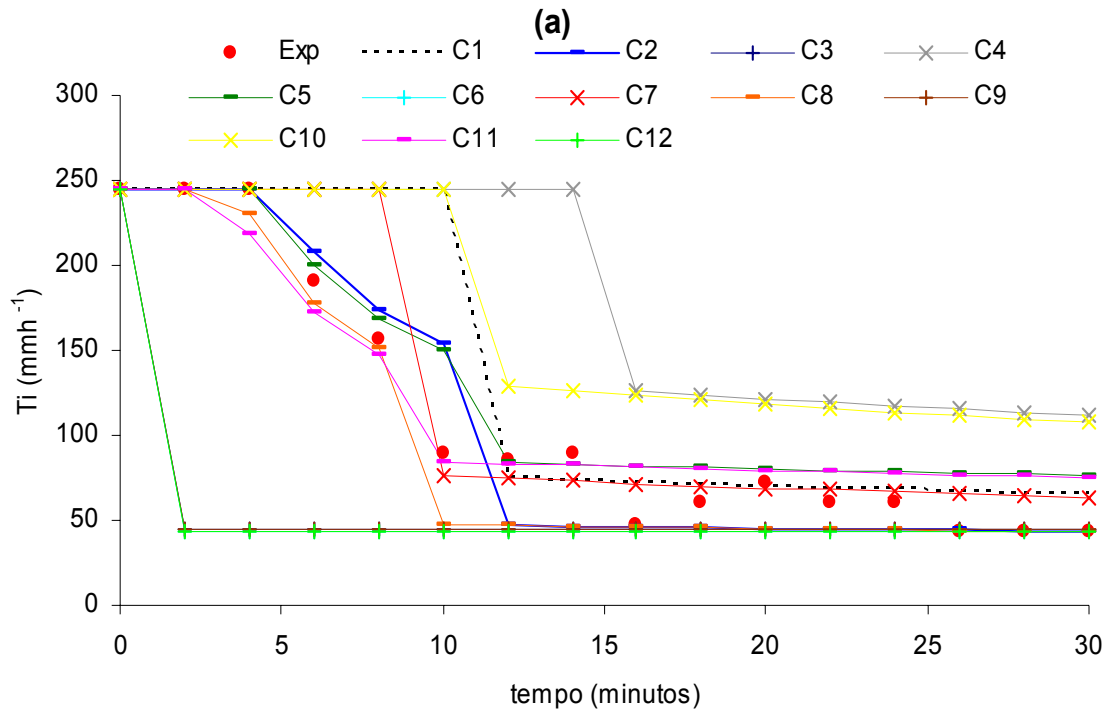


Figura 28. Taxas de infiltração (a) e infiltração acumulada (b) medidas em condição de cobertura vegetal morta e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada (Ensaio 2,  $i_p = 245 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,37 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

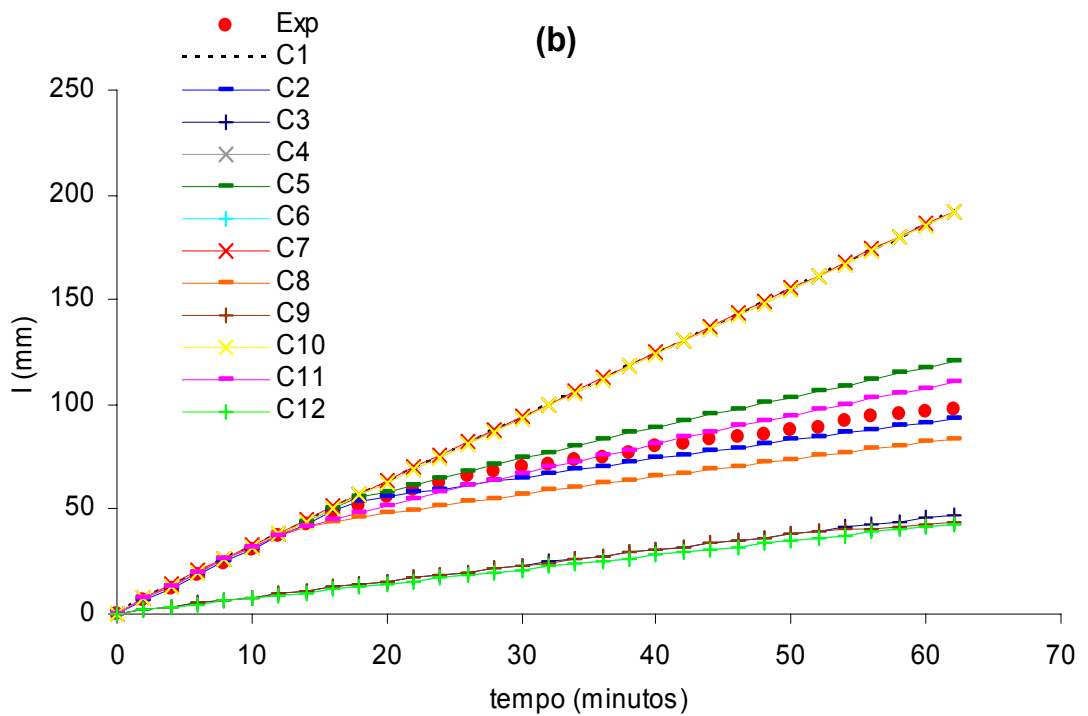
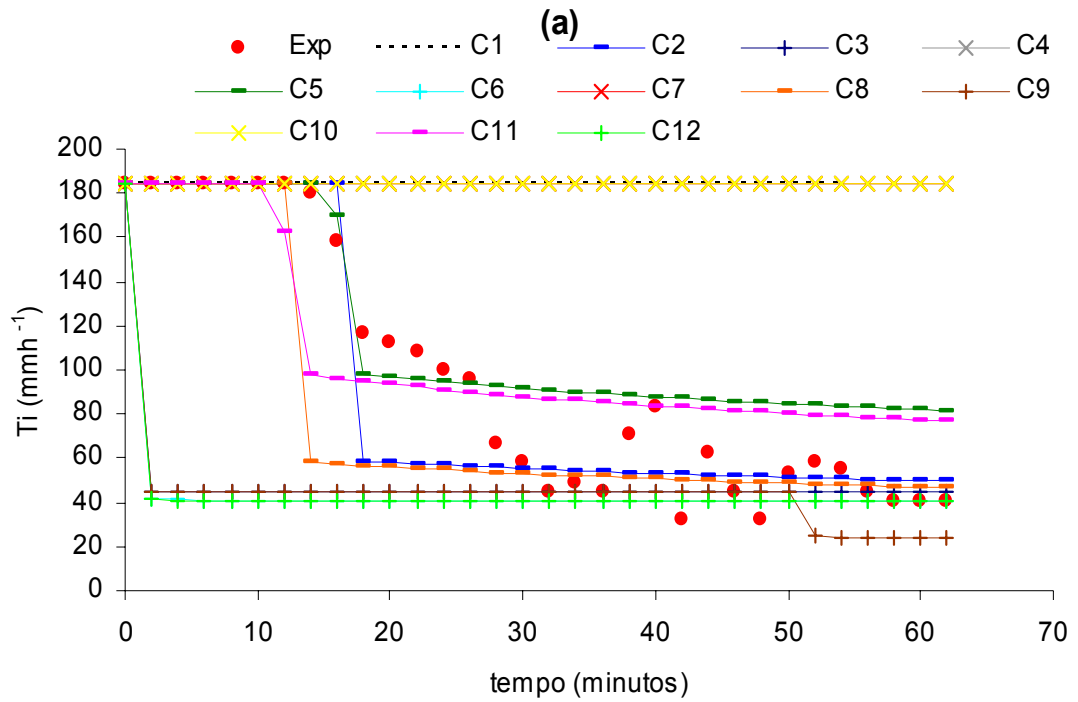


Figura 29. Taxas de infiltração (a) e infiltração acumulada (b) medidas em condição de cobertura vegetal morta e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada (Ensaio 3,  $i_p = 184 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_1 = 0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

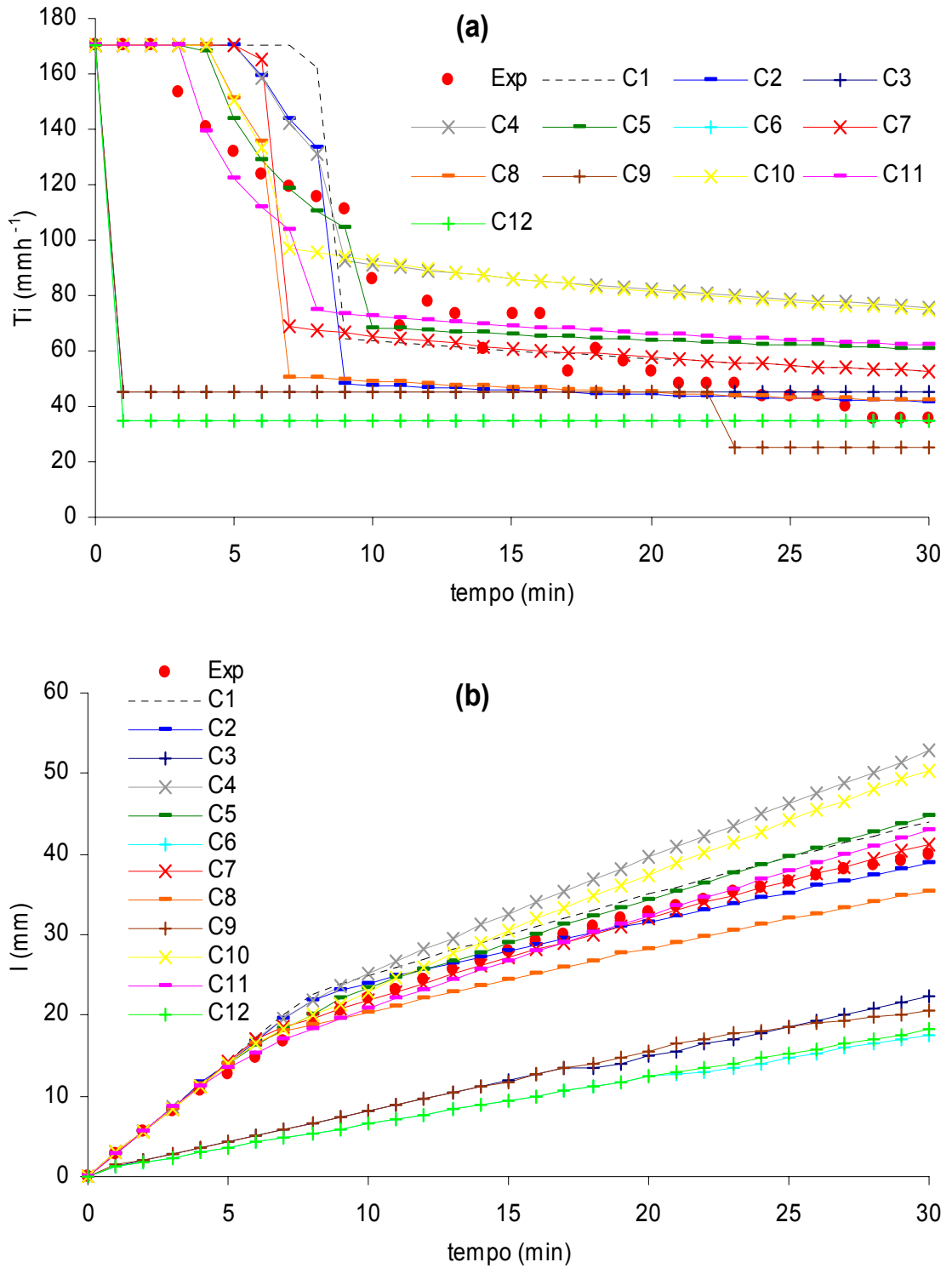


Figura 30. Taxas de infiltração (a) e infiltração acumulada (b) medidas em condição de cobertura vegetal morta e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada (Ensaio 4,  $i_p = 170 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

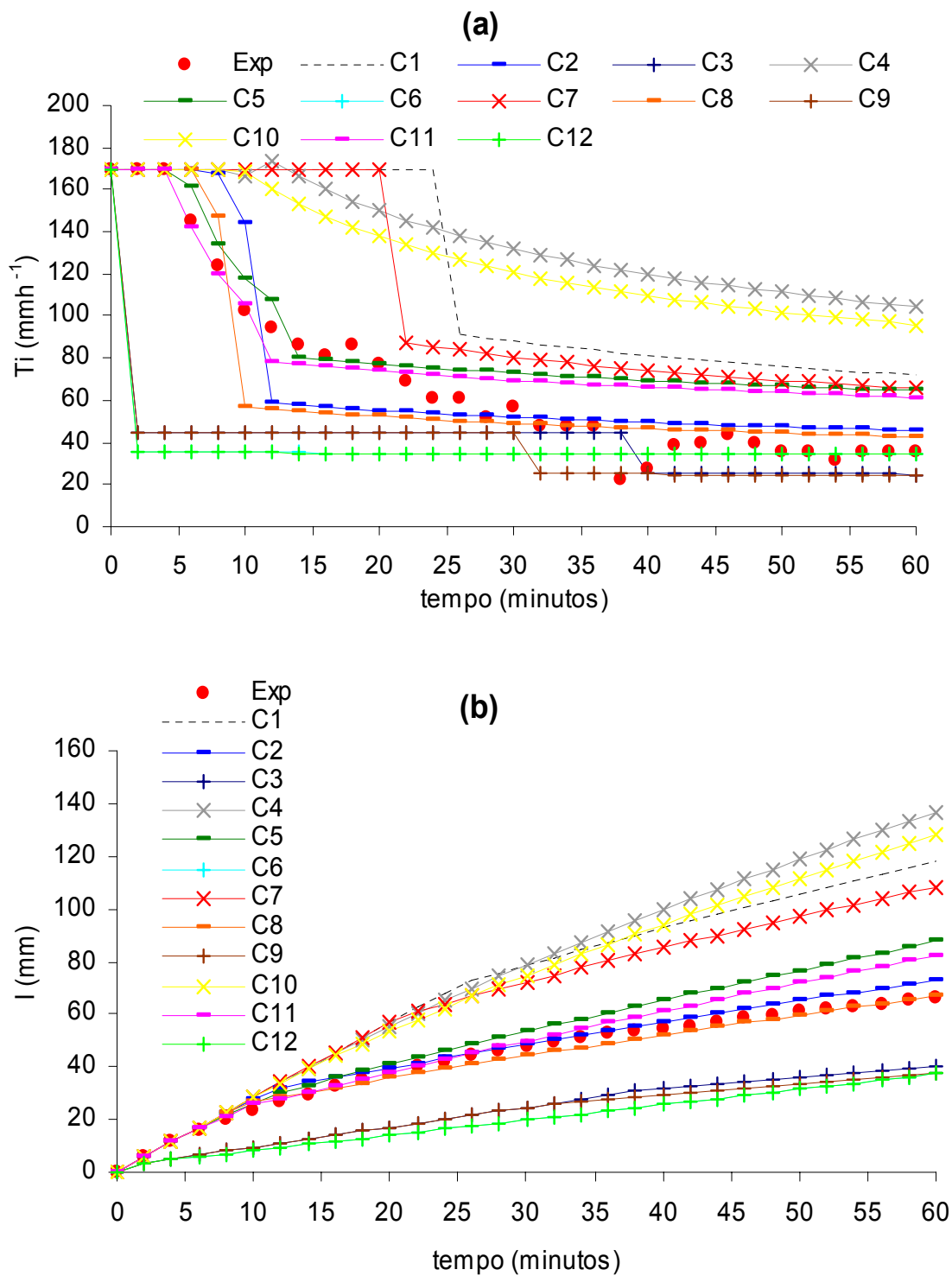


Figura 31. Taxas de infiltração (a) e infiltração acumulada (b) medidas em condição de cobertura vegetal morta e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada (Ensaio 5,  $i_p = 170 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

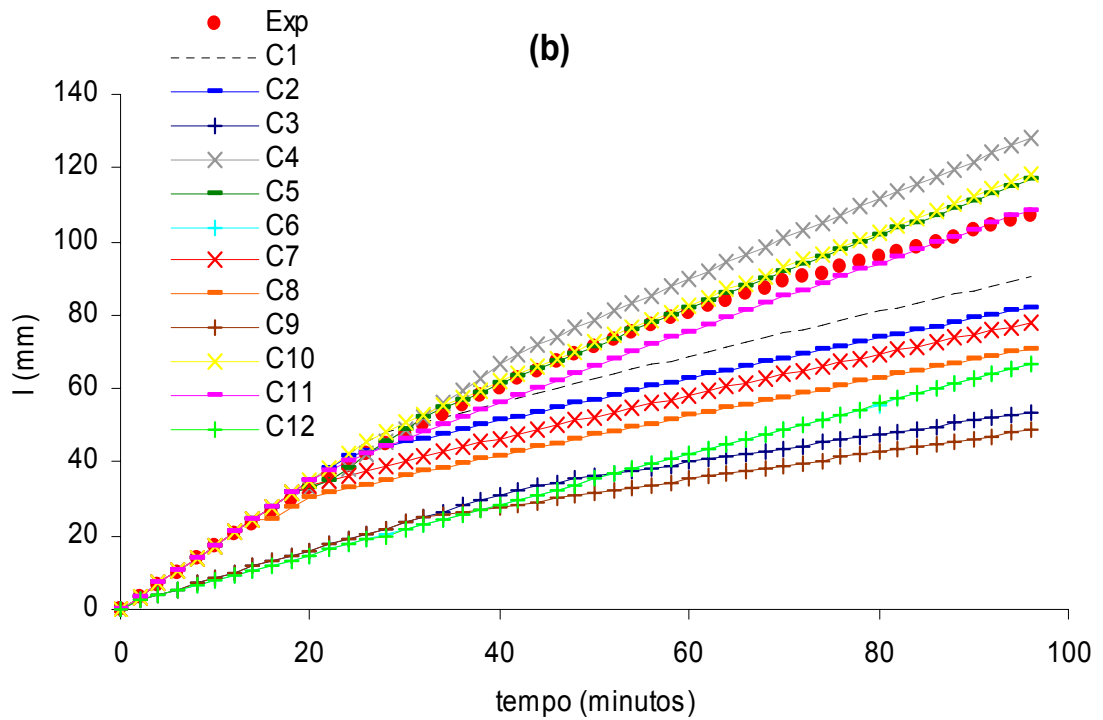
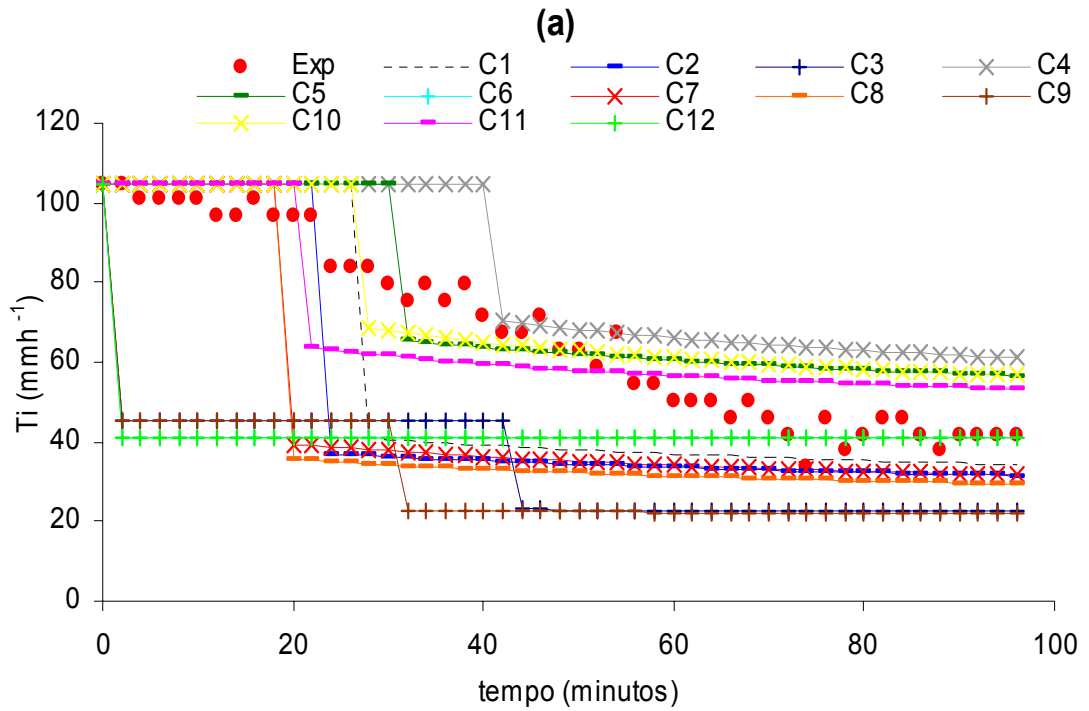


Figura 32. Taxas de infiltração (a) e infiltração acumulada (b) medidas em condição de cobertura vegetal morta e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada (Ensaio 6,  $i_p = 105 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,41 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

Pode-se observar que as simulações realizadas com as combinações que utilizam  $(\psi(\theta_i))$  para o cálculo de  $\psi_f$ , C1, C4, C7 e C10, não simularam bem o processo de infiltração de água no solo principalmente para os tempos iniciais, superestimando os valores de taxa de infiltração e infiltração acumulada (Figuras 27 a 32).

Esses valores são devido a utilização de  $(\psi(\theta_i))$  como valor do potencial matricial na frente de umedecimento, valor este geralmente elevado, levando à superestimativa do tempo de empoçamento. Para os ensaios 1 e 3 (Figuras 27 e 29), nas simulações realizadas com uso destas combinações, os valores de taxa de infiltração foram iguais aos valores de intensidade de precipitação ao longo de todo tempo. Este resultado pode ser explicado pelo fato de nestes ensaios o teor de água inicial no solo estar mais baixo que para os demais ensaios (Quadro 6), resultando em um elevado potencial matricial referente a esta umidade.

As combinações C2, C5, C8 e C11 simularam bem o processo de infiltração (Figuras 27 a 32) tanto para as condições de baixa umidade como para as condições de alta umidade do solo (Quadro 6), contrariando Chong et al. (1982) que recomendam a utilização do modelo de Green-Ampt apenas em condições de baixa umidade inicial do solo. Quando avaliados os seis ensaios experimentais, pelo menos uma destas combinações simulou bem o processo de infiltração, vindo de encontro aos resultados encontrados por Cecílio (2005), o qual encontrou bom desempenho quando da utilização da equação proposta pelo mesmo para o cálculo de  $\psi_f$ . O mesmo autor atribui estes resultados ao fato desta proposta calcular  $\psi_f$  com uso da curva de retenção de água no solo, sendo  $\psi_f$  calculado a partir da integral da curva de condutividade hidráulica versus potencial matricial da água no solo, considerando a variação de umidade ao longo de toda a frente de umedecimento ocorrendo entre os valores de umidade inicial e umidade da zona de transmissão, tendo um maior embasamento físico do processo de infiltração.

As combinações C3, C6, C9 e C12 subestimaram os valores de taxa de infiltração e infiltração acumulada durante todo período de tempo (Figuras 27 a 32), não simulando bem o processo de infiltração, corroborando com os resultados encontrados por Hutten & Cifford (1988), que encontraram uma

subestimativa da taxa de infiltração através do modelo de GAML utilizando equações baseadas na textura do solo para o cálculo de  $\psi_f$ . Cecílio (2005) também não encontrou bom desempenho utilizando equações empíricas para adequações dos parâmetros de entrada do modelo de Green-Ampt. Este desempenho também corrobora as afirmações de Van der Zweep & Stone (1991), citados por Yu (1999), que mostraram que a estimativa dos parâmetros de Green-Ampt feitas com a utilização de características do solo é usualmente inadequada. Ainda, segundo Wilcox *et al.* (1990), a utilização dessas estimativas empíricas pode acabar constituindo grave entrave à aplicação, não apenas dos modelos de Green-Ampt e GAML, mas de qualquer modelo com forte base física.

Observou-se que de um modo geral, as propostas que utilizaram o valor de Tie como estimativa da  $K_0$  apresentaram desempenho próximo ou superior às aquelas propostas que utilizam o valor de  $K_0$  determinado com uso do permeâmetro de carga constante. Como o valor de  $K_0$  determinado para o Horizonte B foi em média duas vezes menor que o valor de Tie, nota-se que as simulações realizadas com o uso de  $K_0$  apresentaram uma redução abrupta da Ti quando da passagem da frente de umedecimento para o Horizonte B.

Com o uso do valor de Tie como parâmetro de entrada este problema foi atenuado, apresentando a curva de Ti uma transição mais suave quando da passagem da frente de umedecimento para o Horizonte B. Silva & Kato (1998) e Cecílio (2005) recomendam o uso da Tie no estudo do processo de infiltração de água no solo. Esse fato pode ser ressaltado pela maior representatividade dos valores de Tie determinados em campo se comparados com os valores de  $K_0$  determinados em laboratório, visto que segundo Mesquita & Moraes (2004), devido sua difícil obtenção e pouca confiabilidade nos métodos de determinação, pode-se chegar a coeficientes de variação superiores a 70% para os valores de  $K_0$ . Todavia, vale ressaltar que os valores de Tie determinados com uso do método dos anéis concêntricos são maiores que aqueles determinados com uso de infiltrômetros de aspersão ou simuladores de chuva (COELHO *et al.*, 2000).

Ainda, segundo Cecílio *et al.* (2003), a utilização da Tie como o valor da condutividade hidráulica foge à física do processo de infiltração em solos

estratificados, pois esta só se estabelece algum tempo após a entrada da frente de umedecimento nos horizontes mais profundos; entretanto, esta solução pode ser considerada um simplificador muito grande da equação de Green-Ampt para solos estratificados, visto que dispensa a determinação da condutividade hidráulica de cada estrato ou horizonte do solo, justamente um dos pontos onde ocorre a maior dificuldade da aplicação desta equação.

Analisando os valores de infiltração acumulada, observa-se que com exceção das propostas C3, C6, C9 e C12, as demais apresentaram bom desempenho na simulação deste parâmetro. Estes resultados corroboram com os encontrados por Silva & Kato (1998), que encontraram bom desempenho do modelo de GAML na simulação dos valores de infiltração acumulada num solo de cerrado protegido do efeito do encrostamento superficial.

Comparando-se as curvas simuladas com as combinações que utilizam  $\theta_s$  e  $\theta_w$  como parâmetro de entrada, sem considerar os valores de condutividade hidráulica na zona de transmissão e o potencial matricial na frente de umedecimento, nota-se que as curvas obtidas com ambas as simulações passam bem próximas umas das outras, devido ao fato dos valores de  $\theta_w$  para os seis ensaios experimentais serem em média  $0,94 \theta_s$  para o Horizonte A e  $0,95\theta_s$  para o Horizonte B (Quadro 6).

Segundo Brandão et al. (2006), para a simulação do processo de infiltração de água no solo com o modelo de GAML, deve-se evitar a estimativa de  $\theta_w$  com base em valores de literatura, recorrendo sempre que possível à medição em campo da umidade na zona de transmissão do solo com o qual se deseja trabalhar.

#### **4.2.2. Em solo sem cobertura vegetal**

O desempenho do modelo de GAML na simulação da taxa de infiltração e infiltração acumulada, consideradas as diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, é apresentado no Quadro 11.

Analisando a simulação do processo de infiltração de água no solo (Quadro 11), nota-se que para o ensaio 7 apenas as combinações C1, C2 e C4 apresentaram bom desempenho, sendo que C1 teve melhor

desempenho, sendo este muito bom para taxa de infiltração e ótimo para infiltração acumulada. Para o ensaio 8, as melhores combinações foram C1, C2, C4 e C5, com C5 apresentando melhor desempenho, sendo este bom para taxa de infiltração e ótimo para infiltração acumulada. Para o ensaio 9, os melhores resultados foram encontrados com as combinações C5 e C11, sendo o melhor desempenho encontrado com C5, sendo este muito bom para taxa de infiltração e infiltração acumulada.

As combinações C3, C6, C9 e C12, que utilizam a equação de Risse et al. (1995) para o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento não simularam bem os valores de taxa de infiltração e infiltração acumulada, em todos os ensaios, com desempenho péssimo para taxa de infiltração e péssimo a mal para infiltração acumulada em 100% dos casos (Quadro 11), da mesma forma que para os ensaios em solo com cobertura vegetal morta. No geral, as combinações C1, C2, C4 e C5 apresentaram os melhores resultados, com desempenho bom ou superior em 66% dos ensaios (Quadro 11).

Das combinações que utilizam  $\theta_w$  como parâmetro de entrada, apenas C11 apresentou desempenho bom no ensaio 9. As demais combinações apresentaram desempenho variando de péssimo a mal para taxa de infiltração em todos os ensaios realizados (Quadro 11).

Quadro 11. Desempenho do modelo de GAML na simulação da taxa de infiltração e infiltração acumulada nos ensaios em condição de solo sem cobertura

Combinação	Variável	Ensaio de Infiltração		
		7 (103 mm h <sup>-1</sup> )	8 (100 mm h <sup>-1</sup> )	9 (115 mm h <sup>-1</sup> )
C1	Ti	muito bom	bom	péssimo
	I	ótimo	ótimo	mau
C2	Ti	bom	bom	péssimo
	I	ótimo	ótimo	mau
C3	Ti	péssimo	péssimo	péssimo
	I	mau	mau	mediano
C4	Ti	bom	bom	sofrível
	I	ótimo	ótimo	mediano
C5	Ti	mau	bom	muito bom
	I	ótimo	ótimo	muito bom
C6	Ti	péssimo	péssimo	péssimo
	I	mau	péssimo	péssimo
C7	Ti	sofrível	sofrível	péssimo
	I	muito bom	muito bom	péssimo
C8	Ti	péssimo	mau	mau
	I	bom	bom	sofrível
C9	Ti	péssimo	péssimo	péssimo
	I	mau	mau	sofrível
C10	Ti	sofrível	péssimo	sofrível
	I	ótimo	bom	bom
C11	Ti	péssimo	péssimo	bom
	I	bom	mediano	muito bom
C12	Ti	péssimo	péssimo	péssimo
	I	mau	péssimo	péssimo

Os valores do tempo de empoçamento e da taxa de infiltração estável medidos e simulados para os três ensaios experimentais em condição de solo sem cobertura são apresentados nos Quadros 12 e 13.

Quadro 12. Tempo de empocamento (min) medido e simulado pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada em condição de solo sem cobertura

Ensaio	Combinações												
	tp <sub>m</sub>	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
7	10	32,0	25,6	0	16,1	11,0	0	18,6	15,8	0	18,5	8,1	0
8	10	21,6	19,2	0	12,3	10,6	0	9,2	7,8	0	4,3	3,7	0
9	6	40,5	20,3	0	6,7	4,5	0	32,5	14,7	0	4,4	3,0	0

\* tp<sub>m</sub> – Tempo de empocamento medido

61

Quadro 13. Taxa de infiltração estável (mm h<sup>-1</sup>) medida e simulada pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada em condição de solo sem cobertura

Ensaio	Combinações												
	Tie <sub>m</sub>	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
7	27,3	51,0	44,5	24,3	60,2	53,6	27,3	39,0	35,0	22,5	47,9	43,6	27,3
8	24,3	40,5	37,3	23,5	44,5	40,7	24,3	38,4	35,5	23,5	42,0	38,8	24,3
9	14,0	115,0	44,6	25,1	50,4	28,5	14,0	71,4	46,0	25,7	51,4	29,6	14,0
<b>Média</b>	21,8	68,8	42,1	24,3	51,7	40,9	21,9	49,6	38,8	23,9	47,1	37,3	21,8
<b>CV%</b>	31,6	58,4	9,9	3,3	15,3	30,6	31,6	37,9	15,9	6,8	10,0	18,9	31,6

\*Tie<sub>m</sub> – Taxa de infiltração estável medida; CV – Coeficiente de variação

As combinações *C1*, *C2* e *C4* superestimaram em todos os ensaios o valor do tempo de empoçamento (Quadro 12). As propostas *C3*, *C6*, *C9* e *C12* subestimaram os valores de tempo de empoçamento em todos os testes realizados, sendo este igual à zero (Quadro 12), ou seja, em nenhum momento a capacidade de infiltração superou a intensidade de precipitação, tendo início o processo de escoamento superficial imediatamente após o início da precipitação.

A combinação *C11* subestimou os valores de tempo de empoçamento em todos os ensaios realizados (Quadro 12), devido ao uso como parâmetro de entrada dos valores de taxa de infiltração estável e da umidade de saturação de campo.

As combinações que apresentaram melhores resultados na simulação do tempo de empoçamento foram *C5* e *C4* (Quadro 12).

Os valores da taxa de infiltração estável foram bem simulados pelas combinações que utilizam a equação de Risse et al. (1995) para o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento (Quadro 13), corroborando com os resultados encontrados em condição de solo com cobertura vegetal morta.

As demais combinações superestimaram os valores da taxa de infiltração estável considerando o tempo decorrido do ensaio (Quadro 13). Estes resultados demonstram que o modelo de GAML não leva em consideração o provável efeito do selamento superficial que ocorre em condições de solo nu sob precipitação.

Os gráficos com as curvas de taxa de infiltração e infiltração acumulada ao longo do tempo medidas em condição de solo sem cobertura e simuladas para os três ensaios experimentais são apresentados nas Figuras 33 a 35.

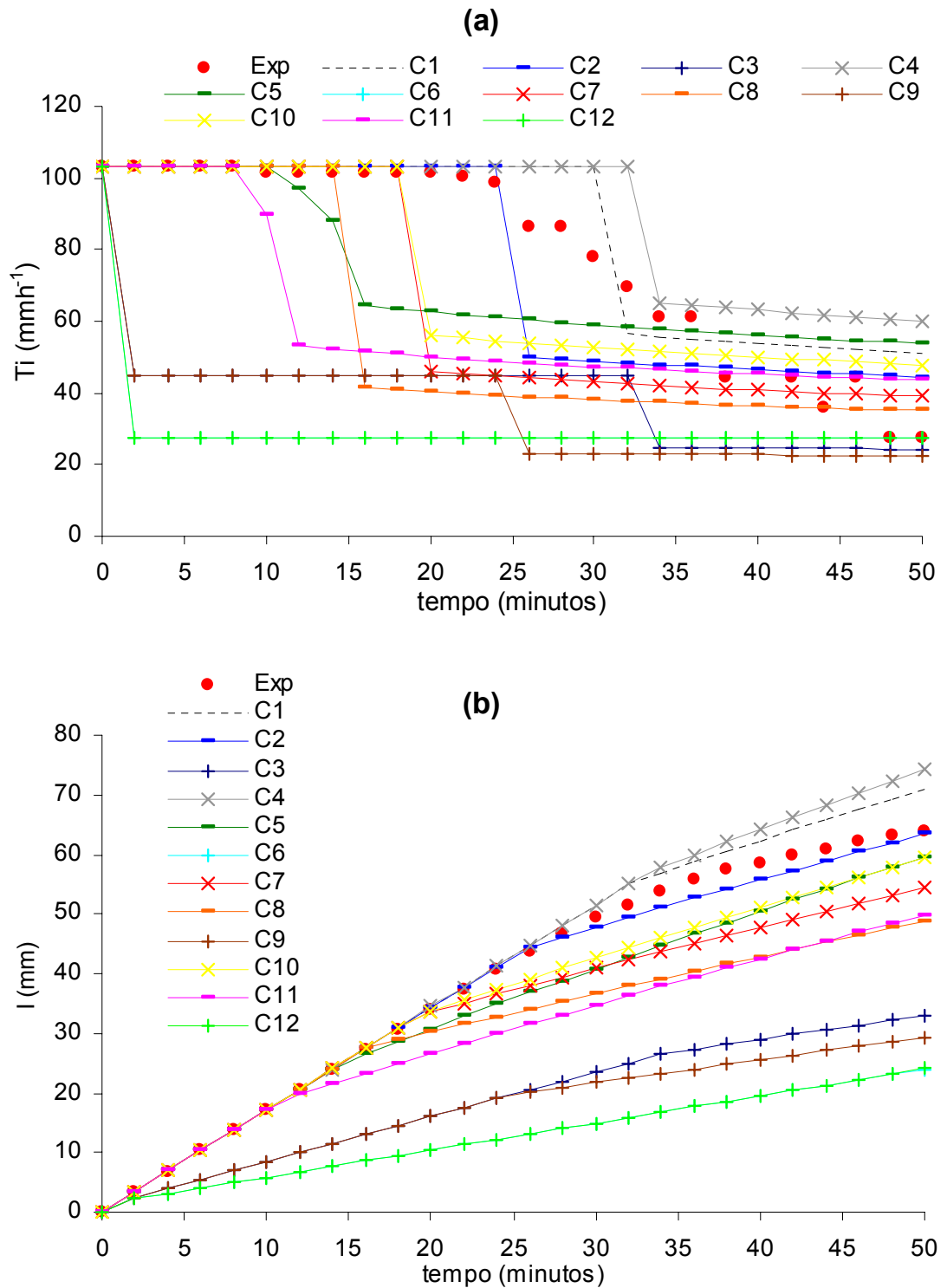


Figura 35. Taxas de infiltração (a) e infiltração acumulada (b) medidas em condição de solo sem cobertura e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada (Ensaio 7,  $i_p = 103 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

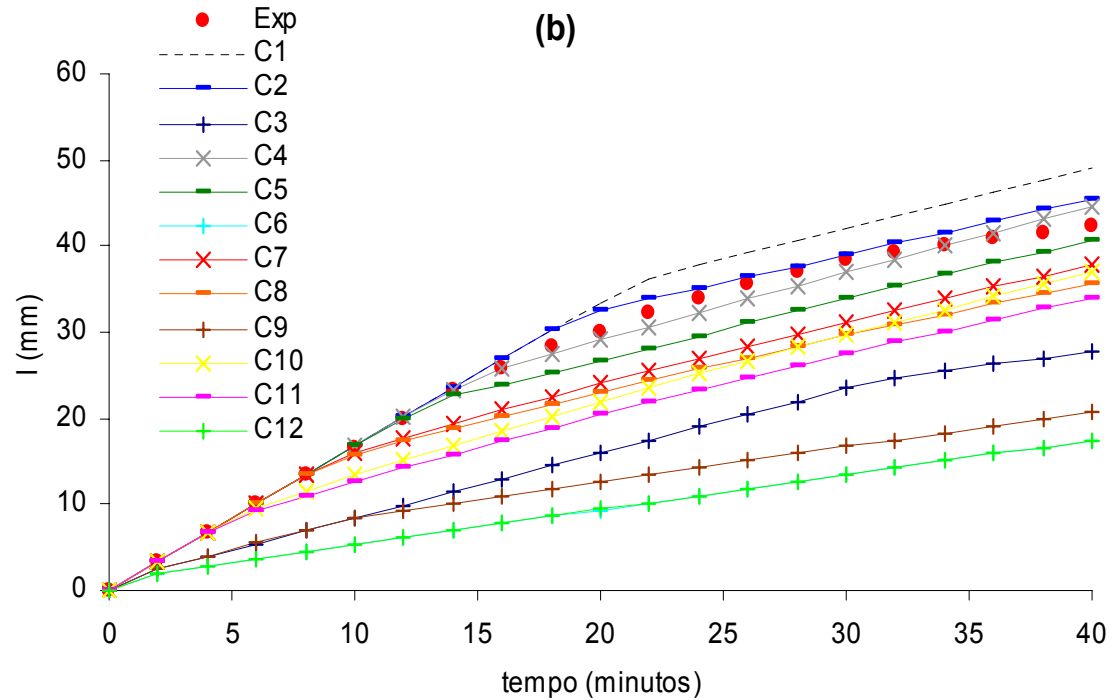
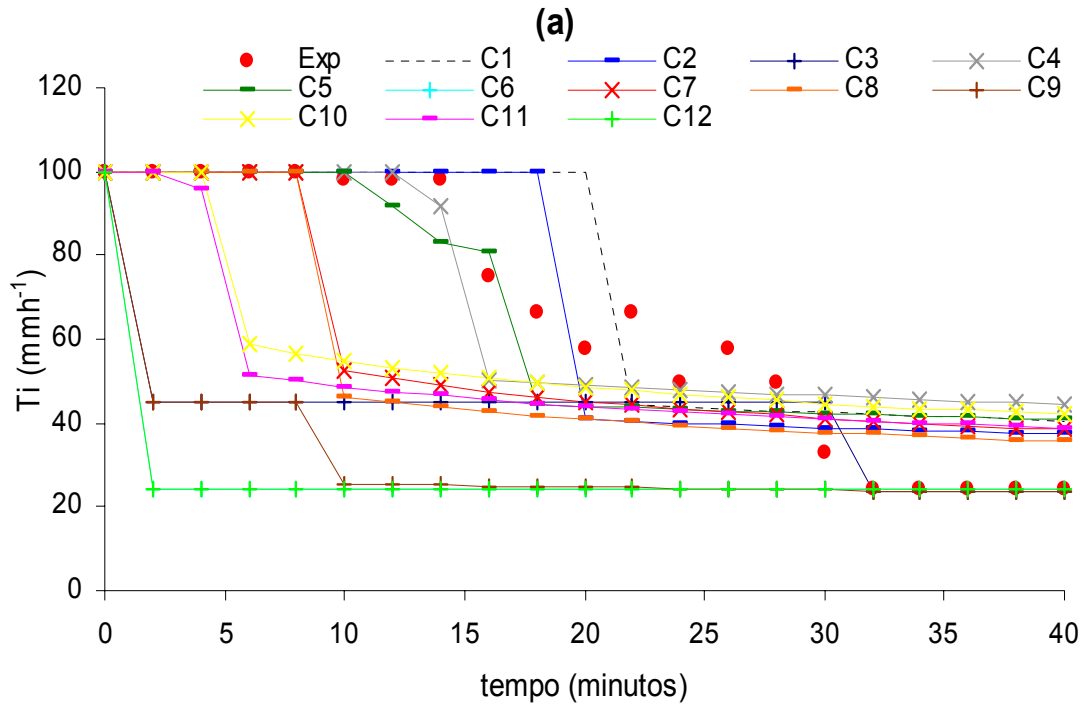


Figura 36. Taxas de infiltração (a) e infiltração acumulada (b) medidas em condição de solo sem cobertura e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada (Ensaio 8,  $i_p = 100 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,41 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

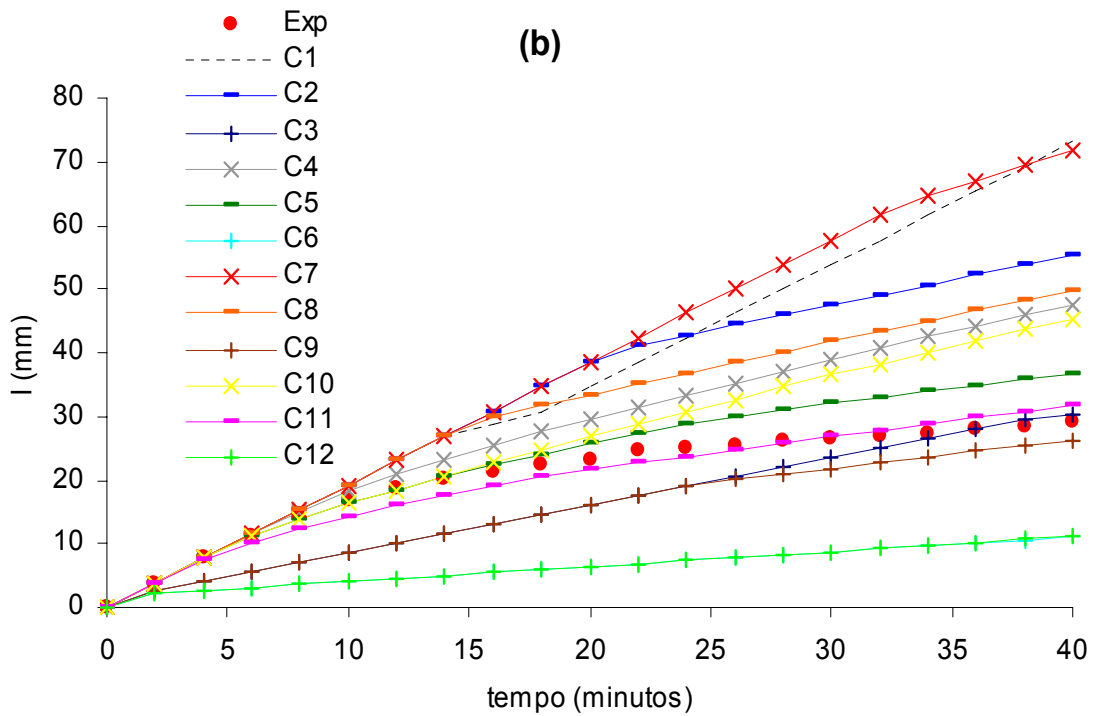
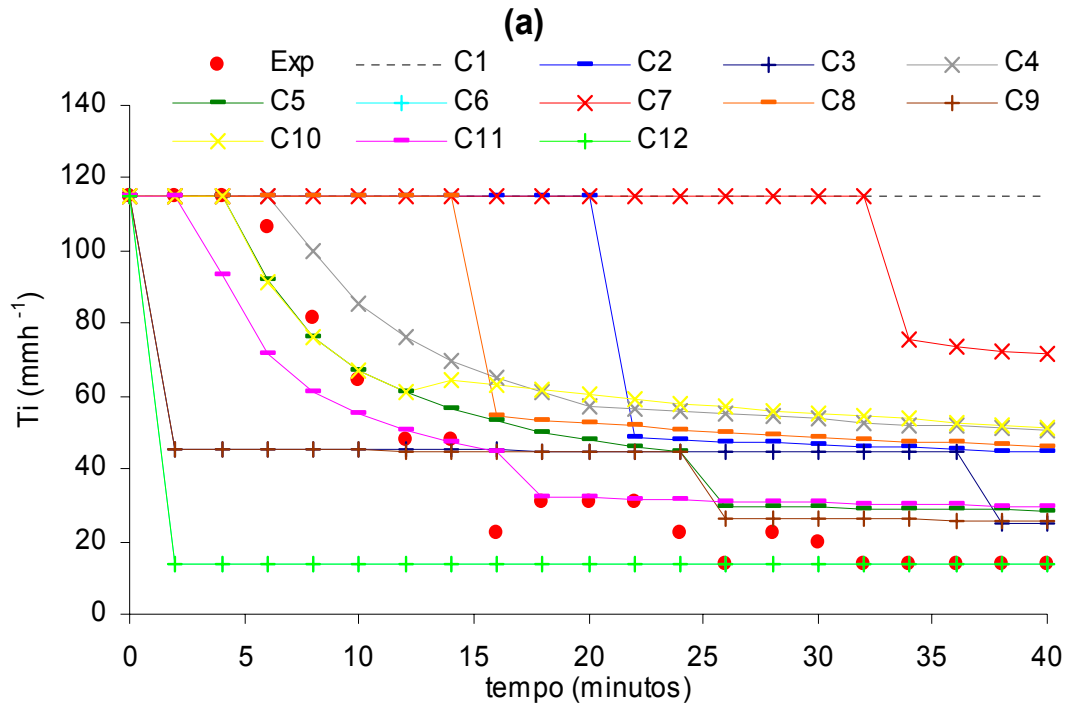


Figura 37. Taxas de infiltração (a) e infiltração acumulada (b) medidas em condição de solo sem cobertura e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada (Ensaio 9,  $i_p = 115 \text{ mm h}^{-1}$ ;  $\theta_i = 0,37 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. A) e  $0,37 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (hor. B)).

As combinações que utilizam equações baseadas na textura do solo para o cálculo de  $\psi_f$  (C3, C6, C9 e C12) não apresentaram bom desempenho na modelagem da  $T_i$  e  $I$  para os três testes experimentais, vindo de encontro aos resultados observados nos ensaios realizados com a presença de cobertura vegetal no solo. Essas combinações subestimaram os valores da taxa de infiltração e infiltração acumulada ao longo do tempo e do tempo de empoçamento e taxa de infiltração estável.

Quando comparadas as metodologias que utilizam  $K_0$  (C1 a C6) e  $T_{ie}$  (C7 a C12), não considerando a metodologia utilizada para o cálculo de  $\psi_f$ , as propostas que utilizam  $T_{ie}$  simularam melhor o processo de infiltração nos ensaios 8 e 9, devido ao fato de a  $T_{ie}$  ter apresentado um valor duas vezes menor do que a condutividade hidráulica do solo saturado no horizonte A. Assim, as propostas que utilizam  $K_0$  como parâmetro de entrada superestimaram a taxa de infiltração e a infiltração acumulada durante a maior parte do tempo (Figuras 35 a 37), sendo esta diferença mais acentuada nas condições iniciais, quando a frente de umedecimento ainda se encontra no Horizonte A, que possui valor de  $K_0$  2 vezes maior que  $T_{ie}$ . Assim, propostas que utilizam  $T_{ie}$  como parâmetro de entrada simularam melhor o início do processo de infiltração de água no solo.

Brandão et al. (2006) considera que a não inclusão da formação do selamento superficial pode levar a grosseira superestimativa da infiltração. Segundo alguns autores, como Moore (1981), Reichert et al. (1988) e Chaves et al. (1993) a inclusão do efeito do selamento superficial nos modelos usados na previsão da infiltração melhora a sua performance.

Na simulação do processo de infiltração de água no solo através do modelo de GAML, com propostas de adequação nos seus parâmetros de entrada, não houve uma proposta que obteve melhor desempenho para todos os ensaios, para ambas as condições de superfície do solo. Em todos os ensaios o modelo de GAML na sua proposta original propiciou uma superestimativa dos valores de taxa de infiltração e infiltração acumulada ao longo do tempo. As propostas que utilizam equações baseadas na textura do solo para o cálculo de  $\psi_f$  não obtiveram bom desempenho, subestimando os valores de taxa de infiltração e infiltração acumulada ao longo do tempo.

As combinações que utilizam a equação proposta por Cecílio (2005) para o cálculo de  $\psi_f$  (C2, C5, C8 e C11) foram as que obtiveram melhor desempenho na simulação da taxa de infiltração, infiltração acumulada e tempo de empoçamento, com os melhores resultados obtidos pela combinação C2.

## 5. RESUMO E CONCLUSOES

Dentre os diversos componentes do ciclo hidrológico, pode-se afirmar que a infiltração é um dos mais importantes pois, junto com a precipitação, determinam a quantidade de água que torna-se disponível para as plantas, o escoamento superficial e o abastecimento dos reservatórios de águas subterrâneas. Assim, o conhecimento deste processo é de extrema importância para diversas áreas da engenharia de conservação de água e solo. Dentre as diversas equações que foram propostas para a previsão do processo de infiltração, o modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) é um dos mais empregados, por se basear nos processos físicos que ocorrem no solo durante a infiltração.

O presente trabalho teve como objetivo determinar a taxa de infiltração e a infiltração acumulada no solo, com e sem cobertura vegetal morta, em condições de campo e avaliar o modelo de GAML com diferentes combinações de propostas de adequação dos seus parâmetros de entrada, em condições de campo, nas condições de solo com cobertura vegetal morta e sem cobertura.

Foram realizados nove ensaios de infiltração em uma encosta na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, sendo o solo da área classificado como Cambissolo Haplico Tb distrófico. Os ensaios foram realizados utilizando-se parcelas experimentais com dimensões de 0,7 m de largura por 1,0 m de comprimento, construídos de chapa metálica de 0,18 m de altura, enterrado no solo 0,15 m. Para aplicação da precipitação foi utilizado um simulador de chuvas construído no DEA/UFV, similar ao descrito por Meyer & Harmon (1979). Os ensaios de infiltração foram realizados no solo com cobertura aplicando-se seis intensidades de precipitação: 243, 245, 184, 170, 170 e 105 mm h<sup>-1</sup>. Na condição sem cobertura, foram realizados três ensaios com as intensidades de precipitação de: 103, 100 e 115 mm h<sup>-1</sup>.

A infiltração foi determinada a partir da diferença entre o volume de água aplicado sobre a parcela e o volume de escoamento superficial coletado na estrutura de coleta.

Foram realizadas simulações com o modelo de GAML testando diferentes combinações de propostas de determinação dos parâmetros de entrada:  $\theta_s$  (umidade de saturação do solo ou porosidade total) e  $\theta_w$  (umidade de saturação de campo) como valores de umidade na zona de transmissão;  $K_0$  (condutividade hidráulica do solo saturado) e  $Tie$  (taxa de infiltração estável) como valores de condutividade hidráulica na zona de transmissão ( $K_w$ ) e o potencial matricial referente a umidade inicial do solo ( $\psi(\theta_i)$ ), equações de Risse et al. (1995), que calcula  $\psi_f$  em função da textura do solo, e de Cecílio (2005) para o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento ( $\psi_f$ ). Para avaliação do modelo, foi utilizado o índice de confiança ajustado ( $c'$ ).

De acordo com os resultados obtidos conclui-se que:

- A taxa de infiltração estável determinada em solo sem cobertura foi em média 2 vezes menor que no solo com cobertura, devido ao possível efeito do encrostamento superficial;
- O valor de  $\theta_w$  variou de 0,90 a 0,97  $\theta_s$  para os horizontes A e B;
- A equação de GAML, na sua forma original, não apresentou bons resultados na simulação do processo de infiltração para solos estratificados, superestimando as taxas de infiltração e infiltração acumulada, em ambas as condições de superfície;
- A equação de GAML, na sua forma original, não possibilita boa estimativa do valor do tempo de empoçamento, superestimando-o em ambas as condições de superfície;
- A determinação do  $\psi_f$  a partir da textura do solo (equação de Risse et al. (1995)) não foi satisfatória, sendo que as combinações que utilizaram esta equação não simularam bem o processo de infiltração de água no solo, subestimando os valores de taxa de infiltração e infiltração acumulada ao longo do tempo e do tempo de empoçamento em ambas as condições de superfície;
- A utilização da equação proposta por Cecílio (2005) para o cálculo do  $\psi_f$  apresentou em geral bom desempenho para todos os testes experimentais;
- A combinação ( $K_0$ ,  $\theta_s$  e equação proposta por Cecílio (2005)) apresentou o melhor desempenho na simulação do processo de

infiltração de água no solo para ambas as condições de cobertura do solo;

- A utilização da Tie para representar a condutividade hidráulica do perfil solo apresentou bons resultados.

## **6. RECOMENDAÇÕES**

Existe a necessidade de maiores estudos em condições de campo para a aplicação do modelo de GAML, testando diferentes condições de cobertura do solo, trabalhando com intensidades e perfis de precipitação que simulem precipitações reais ocorridas, testando diferentes condições iniciais de umidade do solo, trabalhando com diferentes tipos de solo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRANDÃO, V.S.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. **Infiltração da água no solo**. Viçosa: UFV, 2003, 98p.
- BRANDÃO, V.S.; CECILIO, R.A.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. **Infiltração da água no solo. 3. ed. Atual. e Ampl.** Viçosa: UFV, 2006, 120p.
- BOUWER, H. Infiltration of water into nonuniform soil. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.95, n.4, p.451-462, 1969.
- BRAKENSIEK, D.L., ONSTAD, C.A. Parameter estimation of the Green and Ampt infiltration equation. **Water Resources Research**, v.13, n.6, p.1009-1012, 1977.
- CASTRO, O.M.; LOMBARDI NETO, F.; VIEIRA, S.R. & DECHEN, S.C.F. Sistemas convencionais e reduzidos de preparo do solo e as perdas por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, p.167-171, 1986.
- CÂMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa. v.29, n.5, 2005.
- CAMARGO, Â.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- CECÍLIO, R.A. **Aplicação da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado**. 2002. 119p. (Dissertação Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- CECÍLIO, R.A.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F.; MARTINEZ, M.A. Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de Green-Ampt. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, p.415-422, 2003.
- CECÍLIO, R.A. **Modelagem da infiltração da água no solo fundamentada na equação de Green-Ampt-Mein-Larson**. 2005. 165p. (Tese Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

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

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.

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.

COELHO, R.D.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N. Infiltração da água no solo: parte I infiltrômetro de anéis versus infiltrômetro de aspersores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.2, p.137-141, 2000.

COGO, N.P. & STRECK, E.V. Surface and subsurface decomposition of a desiccated grass pasture biomass related to erosion and its prediction with RUSLE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.1, p.153-164, 2003.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, v.57, n.1, p.191-192, 2000.

EMBRAPA – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLO. **Manual de método e análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA-CNPS, 212p., 1997.

EMBRAPA – EMBRAPA MILHO E SORGO. **Sistemas de Produção**. v.1, 2 ed., 2006. <<Disponível em: [http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho\\_2ed/mandireto.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_2ed/mandireto.htm)>>. Acesso em: 03/07/2006.

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.

GUERRA, A.J.T. Processos erosivos nas encostas. In: Guerra, A.J.T.; Cunha, S.B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.

HUTTEN N. C.; CIFFORD G. F. Using the Green and Ampt infiltration equation on native and plowed rangeland soils. **Journal OF Range Management**. v.41, n.2, p.159-161, 1988.

LEGATES, D.R.; McCABE Jr., G.J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v.35, n.1, p.233-241, 1999.

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

MELLO, L.T.A. **Avaliação de metodologias para obtenção dos parâmetros do modelo de Green-Ampt modificado po Mein e Larsson**. 2003. 77p. (Dissertação Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v.34, n.3, p.963-969, 2004.

MEYER, L.D; HARMON, W.C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.22, n.1, p.100-103, 1979.

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

MOORE, I.D., EIGEL, J.D. Infiltration into two-layered soil profiles. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.24, n.6, p.1496-1503, 1981.

PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.; SANTOS, W.L.; RODRIGUES, L.N.; ANTUNES, V.L. **Infiltração da água no solo**. Caderno didático n.25 – Revista Engenharia na Agricultura, UFV - Viçosa, 26p., 1997a.

PRUSKI, F.F.; VENDRAME, V.; OLIVEIRA, E.F.; BALBINO, L.C.; FERREIRA, P.A.; WERLANG, L., CARVALHO, L.T. Infiltração da água num latossolo roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.1.p.77-84.1997b.

RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L.; SAVABI, M.R. Infiltration parameters for rangeland soils. **Journal of Range Management**, v.42, n.2, p.139-142, 1989.

RAWLS, W.J. Infiltration. In: ASCE. **Hidrology Handbook**. 2. ed. New York, 1996. p. 75-124. (ASCE Manuals and Reporto n Engineering Practice, 28).

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

REZENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 4. ed. Viçosa: NEPUT, 2002. 338p.

RISSE, L.M.; NEARING, M.A.; ZHANG, X.C. Variability in Green-Ampt effective hydraulic 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. 145p. (Tese Doutorado). Universidade de Viçosa, Viçosa.

SCHAEFER, C.E..R.; SILVA, D.D.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; FILHO, M.R.A.; ALBUQUERQUE, M.A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos micro-estruturais em Argissolo Vermelho –Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.5, p.669-678, 2002.

SILVA, C.L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.2, p.213-220, 1997.

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,p.1149-1158, 1998.

SILVA, D.D.; PAIVA, K. W. N.; PRUSKI, F.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; AMORIM, R.S.S. escoamento superficial para diferentes intensidades de chuva e porcentagens de cobertura num podzólicovermelho Amarelo com

preparo e cultivo em contornos. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.21, n.1, p.1222, 2001.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, F. A. M.; FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n.6, p.973-983, 2003

SILVEIRA, A. L.; LOUZADA, J.A.; BELTRAME, L.F. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed.Universidade; ABRH, EDUSP, 1993.

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, p.335-372, 2000.

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

SLACK, D.C.; KILLEN, M.A.; BERGLUND, E.R.; ONSTAD, C.A. Application of the Green-Ampt-Mein-Larson infiltration model to taconite tailings. **Transactions of the ASAE**, v.31, n.5, p.1455-1461, 1988.

STRECK, E.V. & COGO, N.P. Reconsolidation of the soil surface after tillage discontinuity, with and without cultivation, related to erosion and its prediction with RUSLE. R. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:141-152, 2003.

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.

VOLK, L. B. S; COGO, N. P.; STRECK, E. V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas , v.28, n.4, p.763-774, 2004.

WILCOX, B.P.; RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L.; WIGHT, J.R. Predicting runoff from rangeland catchments: a comparison of two models. **Water Resources Research**, v.26, p.2401-2410, 1990.

YU, B. A comparison of the Green-Ampt and a spatially variable infiltration model for natural storm events. **Transactions of the ASAE**, v.42, n.1, p.88-97, 1999.