

**ROBERTO AVELINO CECÍLIO**

**MODELAGEM DA INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO  
FUNDAMENTADA NA EQUAÇÃO DE GREEN-AMPT-MEIN-LARSON**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2005

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

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

T

C388m  
2005

Cecílio, Roberto Avelino, 1976-  
Modelagem da infiltração da água no solo fundamen-  
tada na equação de Green-Ampt-Mein-Larson. / Roberto  
Avelino Cecílio. – Viçosa: UFV, 2005.  
xii, 151f : il. ; 29cm.

Inclui anexo.

Orientador: Mauro Aparecido Martinez.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referência bibliográfica: f.108-117.

1. Solos – Umidade. 2. Hidrologia – Modelo.  
3. Green-Ampt, Modelo de. I. Universidade Federal de  
Viçosa. II.Título.

CDD 22.ed. 631.7

**ROBERTO AVELINO CECÍLIO**

**MODELAGEM DA INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO  
FUNDAMENTADA NA EQUAÇÃO DE GREEN-AMPT-MEIN-LARSON**

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

APROVADA: 29 de agosto de 2005.

---

Prof. Carlos Ernesto G. R. Schaefer

---

Prof. Edvaldo Fialho dos Reis

---

Prof. Demetrius David da Silva  
(Conselheiro)

---

Prof. Fernando Falco Pruski  
(Conselheiro)

---

Prof. Mauro Aparecido Martinez  
(Orientador)

*Ana Paula  
Mãe, Pai  
Vó  
Tia, Dindinha  
Gui*

*Esta é dedicada a vocês....*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

À Ana Paula, Pai, Mãe, Tia Marina, Dindinha e ao Gui.

Aos primos.

À minha avó Izabel.

À toda minha família.

À UFV pela oportunidades propiciadas desde 1994.

À CAPES, pela concessão da bolsa durante os 40 meses cursados no Doutorado.

Ao Prof. Mauro Aparecido Martinez, pela orientação, cooperação e confiança durante minha passagem pela UFV.

Ao Prof. Fernando Falco Pruski, pela amizade, confiança, cooperação e pelas discussões travadas a respeito desta tese.

Ao Prof. Demetrius David da Silva, pela confiança, pelo apoio incondicional ao projeto de pesquisa que originou esta tese e por ter sido determinante de minha permanência na UFV em 1999.

Aos professores Carlos Ernesto Schaefer e Edvaldo Reis pelas sugestões.

Ao Wendy, André e Denise pela cooperação na condução do projeto de pesquisa.

Ao Hygor e à Fabiana pelas dicas no uso do simulador de chuvas.

Aos colegas de Pós-Graduação e funcionários do DEA/UFV e do Laboratório de Hidráulica.

Aos amigos do GPRH.

Aos meus grandes amigos, aos colegas dos tempos de graduação, aos moradores e agregados da *República Pensão Palácio* (1994-2001), aos colegas de república durante a Pós-graduação, ao Frei Hilário e aos *Ratos Imundos* do Colégio Santo Antônio.

Aos amigos do outro plano.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que tudo chegasse a este ponto.

## **BIOGRAFIA**

ROBERTO AVELINO CECÍLIO, filho de José Cecílio César e Diva Ferreira Avelino Cecílio, nasceu em Belo Horizonte, Minas Gerais, em 17 de maio de 1976.

Concluiu o segundo grau em 1993 no Colégio Santo Antônio, em Belo Horizonte – MG.

No primeiro semestre de 1994, ingressou na Universidade Federal de Viçosa, tendo concluído o Curso de Engenharia Agrícola em março de 1999.

Em agosto de 1999, iniciou o curso de mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em 2002.

Em abril de 2002 iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, na área de concentração Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o no ano de 2005.

## CONTEÚDO

	Página
RESUMO .....	ix
ABSTRACT .....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	5
2.1. Processo físico da infiltração .....	5
2.2. Fatores que interferem no processo de infiltração .....	8
2.2.1. Fatores ligados ao perfil do solo .....	8
2.2.2. Fatores relacionados à superfície do solo.....	9
2.2.3. Manejo do solo .....	10
2.2.4. Fatores naturais .....	11
2.3. Modelo de Green-Ampt .....	11
2.3.1. Modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson .....	14
2.3.2. Modelos de Green-Ampt e GAML para solos estratificados.....	17
2.3.3. Modificações propostas nos parâmetros de entrada dos modelos de Green-Ampt e GAML .....	17
2.3.3.1. Umidade da zona de transmissão ( $\theta_w$ ).....	18

2.3.3.2. Condutividade hidráulica da zona de transmissão ( $K_w$ ) .....	19
2.3.3.3. Potencial matricial da frente de umedecimento .....	20
2.4. Aplicabilidade dos diferentes modelos na descrição da infiltração .....	22
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1. Modelo para a estimativa da infiltração fundamentado em GAML (GAML-c) .....	24
3.1.1. Infiltração antes do empoçamento.....	24
3.1.2. Infiltração após o empoçamento .....	25
3.1.2.1. Cálculo dos potenciais matriciais na frente de umedecimento e da condutividade hidráulica do solo não-saturado .....	31
3.2. Proposta de adequação dos parâmetros de entrada do modelo de GAML (GAML-t).....	32
3.3. Testes experimentais .....	33
3.3.1. Colunas de solo .....	34
3.3.2. Medidor de teor de água tipo TDR .....	37
3.3.2.1. Calibração do medidor TDR .....	37
3.3.3. Condução dos testes experimentais.....	41
3.3.4. Caracterização física dos solos.....	45
3.3.4.1. Condutividade hidráulica do solo saturado .....	45
3.3.4.2. Massa específica do solo e de partículas.....	48
3.3.4.3. Teores de água inicial, da zona de transmissão e do solo saturado .....	49
3.3.4.4. Curva de retenção.....	50
3.4. Avaliação do desempenho de GAML-c e das diferentes propostas de adequação dos parâmetros de entrada do modelo de GAML .....	52
3.4.1. Simulações feitas com GAML-c.....	52
3.4.2. Adequações dos parâmetros de entrada do modelo de GAML utilizadas nas avaliadas .....	52

3.4.3. Análise estatística.....	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	57
4.1. Simulações feitas com o GAML-c.....	57
4.1.1. Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA).....	57
4.1.2. Argissolo Vermelho-Amarelo (PV) .....	66
4.1.3. Latossolo Vermelho (LV) .....	75
4.1.4. Considerações gerais a respeito das simulações feitas com o GAML-c para todos os solos.....	84
4.2. Comparação entre as simulações feitas com GAML-c, GAML-t e demais propostas de adequação dos parâmetros de entrada do modelo de GAML .....	85
4.2.1. Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA).....	86
4.2.2. Argissolo Vermelho (PV) .....	92
4.2.3. Latossolo Vermelho (LV) .....	98
4.3. Análise geral .....	103
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
ANEXOS .....	118
ANEXO A – Coeficientes estatísticos para as simulações feitas pelo GAML-c.....	119
ANEXO B – Coeficientes estatísticos para as simulações feitas pelo GAML-c, GAML-t e demais adequações do modelo de GAML .....	134

## RESUMO

CECÍLIO, Roberto Avelino, D.S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2005. **Modelagem da infiltração da água no solo fundamentada na equação de Green-Ampt-Mein-Larson.** Orientador: Mauro Aparecido Martinez. Conselheiros: Fernando Falco Pruski e Demetrius David da Silva.

O conhecimento do processo de infiltração da água no solo é de extrema importância para diversas áreas da engenharia de conservação de água e solo. O modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) é um dos mais utilizados para a simular a infiltração por ser relativamente simples e por vir apresentando bons resultados na estimativa do processo. Todavia, a difícil determinação dos parâmetros de entrada de GAML e o fato destes parâmetros não representarem efetivamente as condições reais de ocorrência da infiltração ainda dificultam sua aplicação. O presente trabalho teve o objetivo de melhorar a estimativa da infiltração de água no solo, considerando, para tal, duas vertentes distintas e independentes: uma baseada em uma análise físico-matemática mais detalhada do processo de infiltração e do deslocamento da frente de umedecimento pelo perfil do solo; e outra baseada em simples adequações dos parâmetros de entrada de GAML. Desenvolveu-se um novo modelo para a estimativa da infiltração de água no solo (GAML-c), fundamentado no GAML, baseando-se numa descrição mais aproximada da geometria e do deslocamento da frente de umedecimento. O GAML-c realiza uma discretização do teor de água para o qual o solo é umedecido quando da ocorrência do processo de infiltração, simulando o deslocamento simultâneo de diversas sub-frentes de umedecimento pelo perfil do solo. Paralelamente, propôs-se, também, a adequação dos parâmetros de entrada de GAML, a saber: substituir o teor de

água do solo na saturação ( $\theta_s$ ) pelo teor de água na zona de transmissão ( $\theta_w$ ); substituir a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) pela taxa de infiltração estável (Tie); e calcular o potencial matricial na frente de umedecimento ( $\psi_f$ ) por meio de uma equação baseada na condutividade hidráulica relativa aos teores de água inicial do solo ( $\theta_i$ ) e da zona de transmissão, e dos parâmetros pressão de borbulhamento ( $\psi_b$ ) e índice de distribuição do tamanho de poros ( $\lambda$ ), oriundos do ajuste da curva de retenção de água no solo feito pelo o modelo de Brooks & Corey. O conjunto de adequações propostas foi denominado GAML-t, não tendo qualquer relação com o procedimento GAML-c. Testes experimentais foram realizados em laboratório a fim de determinar a infiltração em três diferentes classes de solo: Argissolo Vermelho (PV), Latossolo Vermelho (LV) e Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA). Avaliou-se o desempenho de GAML-c e de GAML-t, comparando-os com o modelo de GAML aplicado em sua forma original e também adequado segundo cinco diferentes propostas. O GAML-c foi avaliado considerando quatro diferentes cenários, relativos à consideração dos parâmetros de entrada  $K_0$  e  $\theta_w$ :  $K_0$  igual à Tie e  $\theta_w$  experimental (TW);  $K_0$  determinado pelo permeâmetro de carga constante e  $\theta_w$  experimental (KW);  $K_0$  igual à Tie e  $\theta_w$  igual a  $\theta_s$  (TS); e  $K_0$  determinado pelo permeâmetro de carga constante e  $\theta_w$  igual à  $\theta_s$  (KS). Verificou-se que o GAML-c aplicado utilizando-se os parâmetros da simulação TW foi capaz de estimar o perfil de umidade do solo, provendo estimativas de infiltração aceitáveis em todos os tipos de solo estudados; mas ainda necessitando de ajustes. O GAML-t foi capaz de prover boas estimativas da infiltração de água em todos os solos estudados, sendo recomendado para aplicação na estimativa de infiltração.

## ABSTRACT

CECÍLIO, Roberto Avelino, D.S., Universidade Federal de Viçosa, August 2005.  
**Modelling soil water infiltration basing in the Green-Ampt-Mein-Larson equation.** Adviser: Mauro Aparecido Martinez. Committee Members: Fernando Falco Pruski and Demetrius David da Silva.

Knowledge of water infiltration process is extremely important to many areas of Soil and Water Conservation Engineering. Green-Ampt-Mein-Larson infiltration model (GAML) is one of the models that are most used to predict infiltration process because of its relative simplicity and encouraging results. However, the major obstacle in using GAML model is not just due to the difficulties in estimating its parameters, but also due to the fact these parameters do not represent field infiltration conditions. This study has had the objective of give better alternatives in predicting infiltration process, considering two different ways: one based on a most detailed physical-mathematical analysis of the infiltration process and of the wetting front movement through the soil profile; and other one based on simple modifications of GAML model parameters. It was developed a new model to simulate infiltration process (GAML-c) that is based on GAML model, and that provides a better description of the wetting front geometry and displacement through the soil profile. GAML-c model simulates the simultaneous displacement of many sub-wetting fronts through the soil profile. It was also proposed the following modifications in GAML model parameters: replace the saturation moisture content parameter ( $\theta_s$ ) with the “filled saturation” moisture content ( $\theta_w$ ); replace the saturated hydraulic conductivity parameter ( $K_0$ ) with the infiltration rate after long time of wetting ( $T_{ie}$ ); and calculate wetting front suction head ( $\psi_f$ ) by the use

of an equation that makes use of relative hydraulic conductivity in the initial soil moisture ( $\theta_i$ ) and “field saturation” moisture, and also of Brooks & Corey bubbling pressure and pore-size distribution index parameters. These three modifications were called GAML-t and do not have any relation to GAML-c model. Experimental infiltration tests were conducted at laboratory using three different soil types: Red Ultisol (PV), Red Oxisol (LV) and Red-Yellow Oxisol (LVA). The performances of GAML-c model and GAML-t modifications were evaluated and compared to the performances of GAML model applied with its original and modified parameters. Five different ways of modify GAML parameters were used. GAML-c was evaluated using four different scenarios: considering  $K_0$  equals to  $T_{ie}$  and the maximum soil moisture equals to  $\theta_w$  (TW); considering  $K_0$  value determined by constant-head permeameter method and the maximum soil moisture equals to  $\theta_w$  (KW); considering  $K_0$  equals to  $T_{ie}$  and the maximum soil moisture equals to  $\theta_s$  (TS); and considering  $K_0$  value determined by constant-head permeameter method and the maximum soil moisture equals to  $\theta_s$  (KS). It was verified that GAML-c model applied using TW scenario was able to simulate soil water profile, giving acceptable prediction of infiltration to the three soil types. However, GAML-c still needs better development. GAML-t was able to give very good predictions of infiltration to the three soil types, being strongly suggested to simulate infiltration process.

## 1. INTRODUÇÃO

A infiltração é definida como o processo de passagem da água da superfície para o interior do solo. Muitos são os fatores que afetam o processo, dentre os quais destacam-se as condições da superfície e as propriedades do solo (textura, densidade, porosidade, condutividade hidráulica, teor de água, etc.), além das características da água que infiltra, sendo a melhoria das condições de infiltração da água no solo importante na redução do processo erosivo e na recarga dos aquíferos subterrâneos, acarretando aumento no escoamento de base e redução nas vazões máximas dos cursos d'água.

A modelagem do processo erosivo é fundamental na definição de práticas de uso e manejo do solo mais eficientes para a redução das perdas de solo e água e, conseqüentemente, dos prejuízos associados, os quais foram estimados por HERNANI et al. (2002) em US\$ 4,2 bilhões por ano nas áreas agrícolas brasileiras, correspondentes aos custos relativos à reposição de corretivos e fertilizantes, à menor produtividade, aos maiores custos de produção, ao tratamento de água, à manutenção de estradas e ao maior consumo de energia, entre outros. A demanda de modelos que permitam uma melhor previsão hidrológica aumenta quando da notificação de inundações e dos prejuízos relacionados a estas (PALACIOS-VÉLEZ et al., 1998). O desenvolvimento de modelos hidrológicos mais eficientes, entretanto, requer um esforço contínuo de pesquisa da comunidade acadêmica, sendo que estes modelos necessitam de informações consistentes sobre precipitação, infiltração, escoamento, topografia, solo, entre outras.

Neste contexto, destaca-se a necessidade de uma boa estimativa do processo de infiltração para a modelagem do movimento de água no solo (CECÍLIO, 2002), a determinação das perdas de solo e água decorrentes de processos erosivos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999) e a previsão do potencial de contaminação de aquíferos subterrâneos (TOMBUL, 2003).

Para uma boa modelagem da infiltração é necessário o entendimento do processo e de suas relações com as propriedades do solo. Entretanto, a caracterização das variáveis que influenciam na infiltração é um processo demorado e difícil, pois a intensidade com que algumas variáveis afetam o processo, ainda hoje, não é bem definida, além do que os solos apresentam uma grande variabilidade espacial. Como resultado disto e também das variações temporais das propriedades do solo, a infiltração é um processo cuja real complexidade pode ser considerada apenas de forma aproximada, mediante o uso de equações matemáticas.

Com o intuito de simplificar o estudo da infiltração da água no solo, diversos pesquisadores desenvolveram modelos empíricos ou baseados na representação física do processo. A principal desvantagem do emprego dos modelos empíricos consiste no fato de que estes somente são válidos para as condições em que foram calibrados, ou seja, não devem ser adotados para outras condições. Já os modelos físicos são fundamentados em uma análise teórica ou conceitual do processo de infiltração de água no solo, especificam condições de contorno apropriadas e requerem dados de entrada detalhados, podendo ser aplicados em diferentes tipos de solo sob diferentes condições de uso e manejo, sendo necessário o conhecimento de características inerentes a cada situação.

Dentre os modelos teóricos, aquele desenvolvido por GREEN e AMPT (1911), denominado GA, e sua modificação feita por MEIN e LARSON (1973), denominado modelo de Green-Ampt-Mein-Larson ou GAML, são dois dos mais empregados devido à sua relativa simplicidade física e por apresentarem bons resultados na estimativa da infiltração.

Atualmente existem diversos modelos baseados em processos que se utilizam de GA e/ou GAML para a estimativa da infiltração para fins de modelagem do transporte de solutos no perfil do solo (ARNOLD et al., 1998), modelagem hidrológica (OGDEN, 1998; ARNOLD et al., 1998; SILVA, 2003), dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem (SKAGGS, 1980; EVANGELISTA, 2003), dimensionamento de sistemas de irrigação via pivô central (RODRIGUES, 1999) e previsão da erosão hídrica

(BEASLEY et al., 1980; SCHULZE, 1995; DE ROO et al., 1995; FLANAGAN e NEARING, 1996; ARNOLD et al., 1998).

Pode-se destacar, entretanto, duas limitações para a utilização dos modelos GA e GAML: os parâmetros de entrada do modelo não representam efetivamente as condições reais de ocorrência da infiltração; e a dificuldade e pouca confiabilidade nos métodos de obtenção destes parâmetros. WANG et al. (2003) citam ainda uma terceira desvantagem dos modelos de GA e GAML, que seria a sua incapacidade de estimar a distribuição temporal das umidades no perfil do solo.

Propostas mais simples para contornar os dois primeiros problemas vêm sendo feitas há décadas por diversos pesquisadores, por intermédio do uso de metodologias de adequação dos parâmetros de entrada dos modelos de GA e GAML. Contudo, muitas destas propostas baseiam-se em equações empíricas, derivadas de dados experimentais, acabando por não serem aplicáveis em qualquer situação.

Outra forma de contornar os problemas dos modelos de GA e GAML consiste em uma análise físico-matemática mais detalhada do processo de infiltração, especificando condições de contorno mais adequadas, principalmente para a interface entre o solo umedecido e o solo no teor de água inicial, isto é, a frente de umedecimento.

Do exposto, devido às dificuldades encontradas na aplicação do modelo de GAML, o presente trabalho teve como objetivo geral propor alterações neste modelo de modo a melhorar a estimativa da infiltração de água no solo. Para tal, considerou-se duas vertentes distintas e independentes: uma baseada em uma análise físico-matemática mais detalhada do processo de infiltração e do deslocamento da frente de umedecimento pelo perfil do solo; e outra baseada em simples adequações de seus parâmetros de entrada. Assim sendo, este trabalho teve os seguintes objetivos específicos:

- desenvolver um modelo para estimativa da infiltração de água no solo, fundamentado na equação de Green-Ampt-Mein-Larson, que possua maior detalhamento físico, levando em consideração o fato de a frente de umedecimento não ser abrupta, de não ocorrer saturação do perfil do solo acima desta frente e de ocorrer variação da condutividade hidráulica ao longo do tempo e do perfil do solo;
- propor adequações aos parâmetros de entrada do modelo de GAML que considerem maior embasamento físico a respeito do processo de infiltração; e

- avaliar os desempenhos tanto do procedimento desenvolvido quanto da adequação proposta, comparando-os com o desempenho do modelo de GAML, considerando diferentes propostas de adequação de seus parâmetros de entrada existentes na literatura científica nacional.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

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

À medida que a água infiltra no solo, as camadas superiores do perfil vão se umedecendo no sentido 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 água decresce com a profundidade (SILVEIRA et al., 2000).

PREVEDELLO (1996) descreve quatro zonas de umidade ao longo do perfil de umedecimento durante o processo de infiltração de água no solo sob condição de empoçamento de água na superfície (Figura 1). A primeira é a zona de saturação, mais próxima à superfície. Segue-se a zona de transição, caracterizada pelo decréscimo acentuado da umidade. Na seqüência tem-se a zona de transmissão, não saturada, onde a umidade varia pouco ao longo da profundidade; esta zona aumenta de espessura continuamente com a aplicação de água. Logo abaixo tem-se a zona de umedecimento, na qual a umidade decresce rapidamente com o aumento da profundidade. A frente de umedecimento, local em que a umidade sofre variação abrupta, representa o limite visível da movimentação de água no solo. Abaixo da frente de umedecimento o solo possui teor de água igual àquele que possuía no início do processo de infiltração ( $\theta_i$ ).

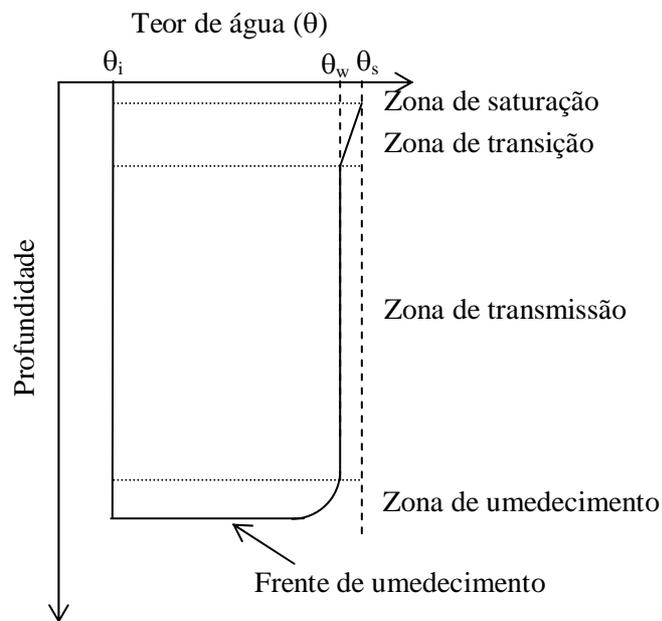


Figura 1. Perfil de umedecimento do solo em um tempo qualquer durante a ocorrência da infiltração (Fonte: PREVEDELLO, 1996).

Segundo SILVEIRA et al. (2000) o conceito de capacidade de infiltração é aplicado no estudo da infiltração para diferenciar o potencial que o solo tem de absorver água pela superfície, em termos de lâmina por tempo, da taxa real de infiltração que acontece quando há disponibilidade de água para penetrar no solo. HILLEL (1980) define capacidade de infiltração como sendo a taxa de infiltração, em volume de água por unidade de área e de tempo, que poderia ocorrer caso um excesso de água fosse aplicado ao solo.

Quando existe excesso de água na superfície do solo (condição de empoçamento), a capacidade de infiltração decresce ao longo do tempo até atingir um valor aproximadamente constante após um período longo de tempo, sendo denominado taxa de infiltração estável ou  $T_{ie}$  (Figura 2).

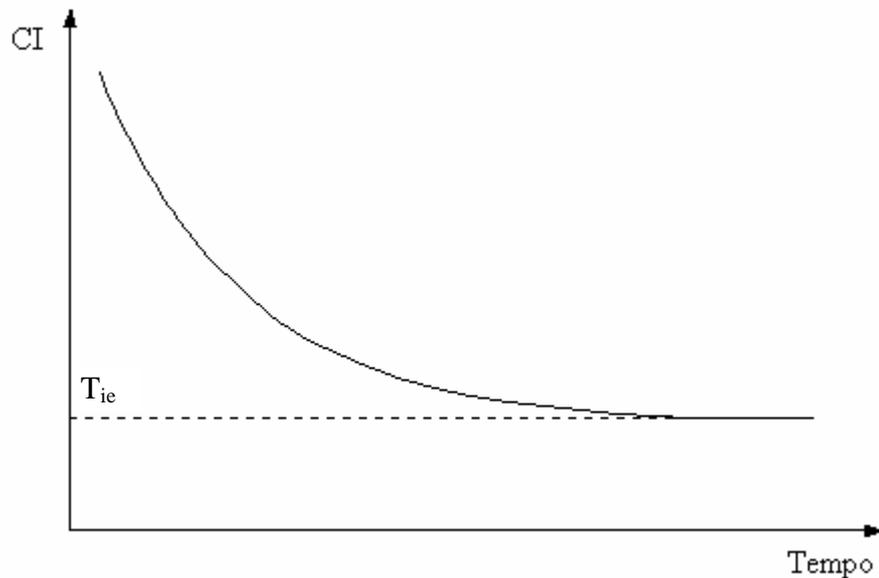


Figura 2. Curva representativa da capacidade de infiltração (CI) ao longo do tempo para condição em que existe uma lâmina de água sobre a superfície do solo.

BRANDÃO et al. (2002) definem a taxa de infiltração ( $T_i$ ) como a lâmina de água que atravessa a superfície do solo, por unidade de tempo, representando, portanto, a taxa de variação da infiltração acumulada ao longo do tempo. A curva de taxa de infiltração da água no solo só coincide com a curva de capacidade de infiltração quando ocorre precipitação na superfície com intensidade igual ou superior à capacidade de infiltração. Caso ocorra precipitação com intensidade ( $i_p$ ) menor que a capacidade de infiltração, toda a água penetrará no perfil a uma taxa igual à intensidade da precipitação, reduzindo a capacidade de infiltração devido ao umedecimento do solo. Caso a chuva continue a ocorrer, pode-se chegar a um ponto em que a capacidade de infiltração se iguala à intensidade de precipitação. A partir desse momento, a taxa de infiltração passa a se processar nas mesmas taxas da curva de capacidade de infiltração, que continua a decrescer no tempo, tendendo atingir o valor da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ), caso não haja aprisionamento de ar nos poros do solo. A Figura 3 mostra a curva da taxa de infiltração ao longo do tempo.

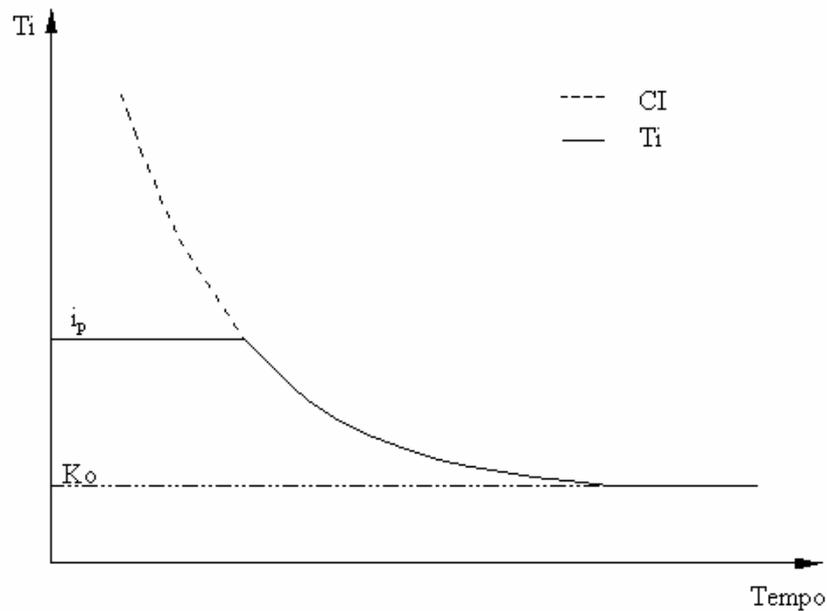


Figura 3. Curva representativa da capacidade de infiltração (CI) e da taxa de infiltração (Ti) em função do tempo considerando uma intensidade de precipitação constante ( $i_p$ ).

## 2.2. Fatores que interferem no processo de infiltração

RAWLS et al. (1996) classificam os fatores que interferem na infiltração em quatro categorias: fatores ligados ao perfil do solo, fatores relacionados à superfície, manejo do solo e fatores naturais.

### 2.2.1. Fatores ligados ao perfil do solo

Os fatores ligados ao solo incluem as características físicas (textura, estrutura, densidade e porosidade), físico-hídricas (retenção de água, condutividade hidráulica e umidade), mineralógicas (argilas e óxidos de Fe e Al) e químicas do solo.

A textura e a estrutura são as características que influenciam mais expressivamente a infiltração, uma vez que são determinantes da quantidade, forma e continuidade de macroporos presentes no perfil, que são fatores de extrema importância nas características físico-hídricas do solo (condutividade hidráulica e na retenção de água no solo).

Solos de textura grossa possuem, no geral, maior quantidade de macroporos do que solos de textura fina e, conseqüentemente, apresentam maiores condutividade

hidráulica e taxa de infiltração. Todavia, solos argilosos bem estruturados podem apresentar maiores taxas de infiltração do que os solos com estrutura instável. 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., 2002). Solos mais intemperizados, como aqueles formados sob clima tropical, são caracterizados pela presença predominante de óxidos de Fe e Al sobre as argilas silicatadas. Conseqüentemente estes solos, mesmo com altos teores de argila, podem apresentar elevadas taxas de infiltração, como é o caso dos solos sob cerrados (CORDEIRO, 1977)

FERREIRA (1988) demonstrou que a condutividade hidráulica em condições de saturação, e conseqüentemente a taxa de infiltração, de Latossolos brasileiros aumentam com o incremento do teor de argila presente no solo, sendo estas ocorrências bastante freqüentes no universo dos latossolos, devido à maior macroporosidade desses solos. O autor considera razoável a admissão de que quanto mais argiloso for o latossolo, maior será sua condutividade hidráulica.

Com relação à mineralogia, solos formados por argilas expansíveis possuem tendência de redução do tamanho dos poros, acarretando uma redução na condutividade hidráulica. Essa redução também é atribuída ao bloqueio dos poros mais finos por partículas de argila que se dispersam à medida que se expandem. Segundo LE BISSONNAIS (1995) solos cauliníticos possuem tendência de formação de agregados menos estáveis que solos montmoriloníticos devido à menor superfície específica dos primeiros. Entretanto, a caulinita está freqüentemente associada à ocorrência de óxidos de ferro que induzem a formação de agregados mais estáveis. Assim, pode-se considerar válida a consideração de que agregados dos solos em que a argila predominante é a caulinita são mais estáveis do que aqueles em que a argila predominante é a montmorilonita (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990), possuindo, portanto maior capacidade de infiltração.

### **2.2.2. Fatores relacionados à superfície do solo**

Estes fatores estão associados à cobertura da superfície, às suas condições (natural ou modificada pelo homem) e à sua capacidade de armazenar água (armazenamento superficial).

Áreas urbanizadas apresentam menores taxas de infiltração que áreas agrícolas por apresentarem altas percentagens de impermeabilização da superfície do solo, limitando a capacidade de infiltração.

O encrostamento superficial, causado pelo impacto das gotas de água, é um fator relacionado à superfície de ocorrência comum, particularmente em solos intensivamente cultivados. A superfície do solo apresenta-se compacta e, embora a espessura da camada de encrostamento superficial possa ser pequena, seu efeito sobre as propriedades físicas do solo, principalmente sobre a condutividade hidráulica, influencia, acentuadamente, as condições de infiltração.

BRANDÃO et al. (2002) descreve a seqüência de eventos que forma o encrostamento superficial da seguinte forma: quebra dos agregados de solo pelo impacto das gotas de chuva; movimento das partículas finas e dispersas ao longo de poucos centímetros abaixo da superfície e sua deposição nos poros do solo; compactação da camada superficial do solo pelo impacto das gotas d'água, produzindo uma camada delgada de solo expressivamente adensada; e deposição do material fino em suspensão, com a conseqüente orientação das partículas de argila.

### **2.2.3. Manejo do solo**

O manejo do solo afeta a infiltração à medida que interfere nas propriedades do solo e nas condições de sua superfície, através de práticas como o cultivo agrícola e a irrigação.

Em áreas cultivadas, o sistema radicular das plantas cria caminhos preferenciais que favorecem a infiltração da água. A manutenção da cobertura do solo, mesmo no período de “repouso”, aumenta a macroporosidade da camada superficial e protege os agregados do impacto direto das gotas de chuva sendo, desta forma, capaz de manter altas taxas de infiltração e diminuir consideravelmente as perdas de água e solo.

Em geral, o preparo do solo tende a aumentar a capacidade de infiltração, em razão da quebra da estrutura da camada superficial. No entanto, se as condições de preparo e manejo do solo forem inadequadas, sua capacidade de infiltração poderá tornar-se inferior à de um solo sem preparo, principalmente se a cobertura vegetal presente sobre o solo for removida (BRANDÃO et al., 2002).

O tráfego intenso de máquinas sobre a superfície do solo, principalmente quando se utiliza o sistema convencional de preparo, produz uma camada compactada que reduz

a capacidade de infiltração da água no solo. Solos situados em áreas de pastoreio também sofrem intensa compactação pelas patas dos animais.

CECÍLIO e PRUSKI (2004) compilaram informações de diversas pesquisas comparando o plantio direto com o sistema de preparo convencional, evidenciando valores médios pra a taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ) cerca de 32% maiores nas áreas com plantio direto que nas áreas com preparo convencional. Todavia, em alguns solos argilosos manejados sob plantio direto a compactação induzida pelo trânsito das máquinas promove um efeito mais acentuado na redução da capacidade de infiltração que aquele decorrente da proteção ao impacto das gotas de chuva e da formação dos canais naturais. Assim sendo, os autores observaram situações em que houve a redução da  $T_{ie}$  em até 42% no plantio direto em relação ao preparo convencional, fazendo com que as perdas de água fossem majoradas nas áreas com plantio direto. Desta forma, o aumento ou a redução do escoamento superficial em áreas com plantio direto dependerá do efeito combinado destes dois fatores.

#### **2.2.4. Fatores naturais**

Os fatores naturais incluem os processos naturais, tais como a precipitação, congelamento do solo, mudança de estação, temperatura e umidade. Estes fatores variam com o tempo e o espaço e interagem com outros fatores que também afetam a infiltração.

### **2.3. Modelo de Green-Ampt**

Dentre os modelos existentes para a simulação do processo de infiltração, um dos mais bem embasados fisicamente e portanto mais utilizados é o de Green-Ampt. GREEN e AMPT (1911) desenvolveram um modelo derivado da equação de Darcy assumindo 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 ( $\psi_f$ ) nesta frente permanece igual ao valor do potencial matricial antes da infiltração. Foi assumido, também, que a água penetra no solo abruptamente, o que resulta na formação de duas regiões bem definidas: sendo 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 4), o que caracteriza o denominado movimento tipo pistão.

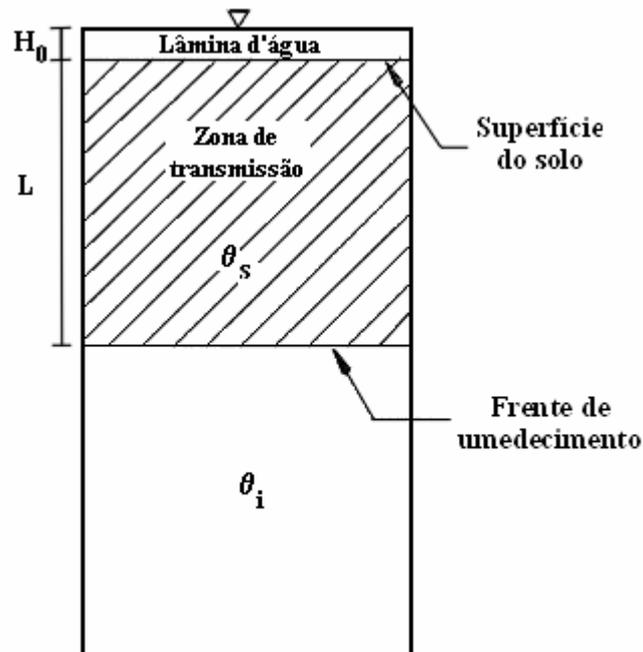


Figura 4. Esquema representativo da infiltração conforme pressuposições do modelo de Green-Ampt, destacando-se o teor de água do solo saturado ( $\theta_s$ ) e o inicial ( $\theta_i$ ).

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 definida pela expressão

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

em que

$T_i$  = taxa de infiltração,  $L T^{-1}$ ;

$K_0$  = condutividade hidráulica do solo saturado,  $L T^{-1}$ ;

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

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

A lâmina total infiltrada, ou infiltração acumulada ( $I$ ) é dada por

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

em que

$I$  = infiltração acumulada, L;

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

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

Explicitando-se  $L$  na equação (2) e substituindo-a na equação (1), obtém-se:

$$Ti = K_0 \left( 1 + \psi_f \frac{(\theta_s - \theta_i)}{I} \right) \quad (3)$$

A equação (3) é conhecida como equação de Green-Ampt, cuja representação gráfica é mostrada na Figura 5.

A infiltração acumulada pode ser então calculada pela equação  $I(t) = \int_0^t Ti(t) dt$ .

Substituindo  $Ti(t) = \frac{dI(t)}{dt}$  na equação (3), separando as variáveis e integrando, encontra-se a equação para determinar a lâmina acumulada em função do tempo. Sabendo-se que  $I(t) = 0$  para  $t = 0$ , tem-se

$$K_0 t = I(t) - \psi_f (\theta_s - \theta_i) \ln \left[ 1 + \frac{I(t)}{\psi_f (\theta_s - \theta_i)} \right] \quad (4)$$

Esta equação às vezes se torna de uso mais adequado porque calcula a infiltração acumulada em função do tempo.

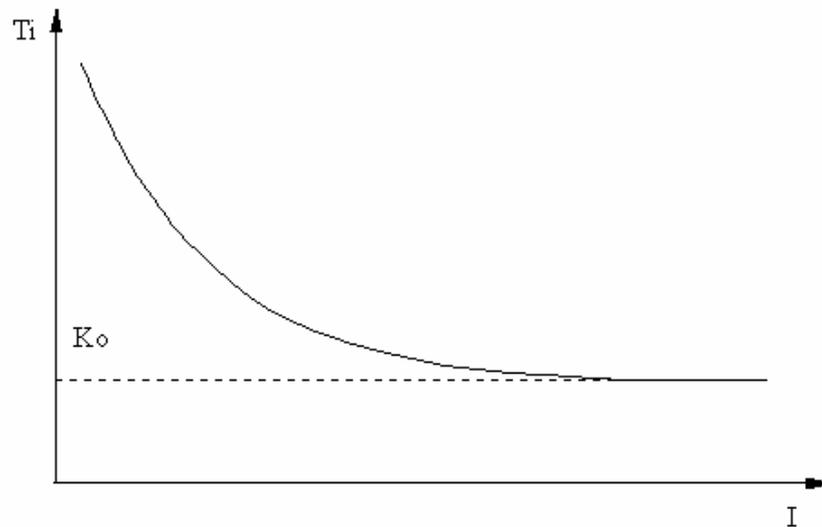


Figura 5. Curva representativa da taxa de infiltração em função da infiltração acumulada obtida a partir do modelo de Green-Ampt.

### 2.3.1. Modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson

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. Esta situação, entretanto, não corresponde às condições de infiltração que ocorrem sob condições de precipitação, pois deveria haver antes a saturação da camada próxima à superfície e o empoçamento de água sobre a superfície do solo.

Para determinar a infiltração que ocorre antes de a superfície do solo atingir a saturação, MEIN e LARSON (1974) modificaram o modelo de Green-Ampt e este novo modelo passou a ser denominado de Green-Ampt modificado por Mein e Larson, ou modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML).

No modelo GAML, os autores consideram o comportamento da infiltração em três estágios distintos (Figura 6). Considerando que uma precipitação de intensidade  $i_p$  é aplicada a um solo com condutividade hidráulica  $K_0$  e capacidade de infiltração  $CI$ , os três estágios podem ser assim caracterizados:

Estágio A:  $i_p < K_0$ . Para esta condição não há ocorrência de escoamento superficial, pois toda a água precipitada infiltra no solo, portanto  $T_i = i_p$ . Este estágio é representado na Figura 6 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 da água no solo ocorre conforme a capacidade de infiltração do solo e começa a diminuir com o tempo, portanto  $T_i = CI$ . O escoamento superficial começa a ocorrer. Este estágio é representado tanto pelo trecho C da curva BC.

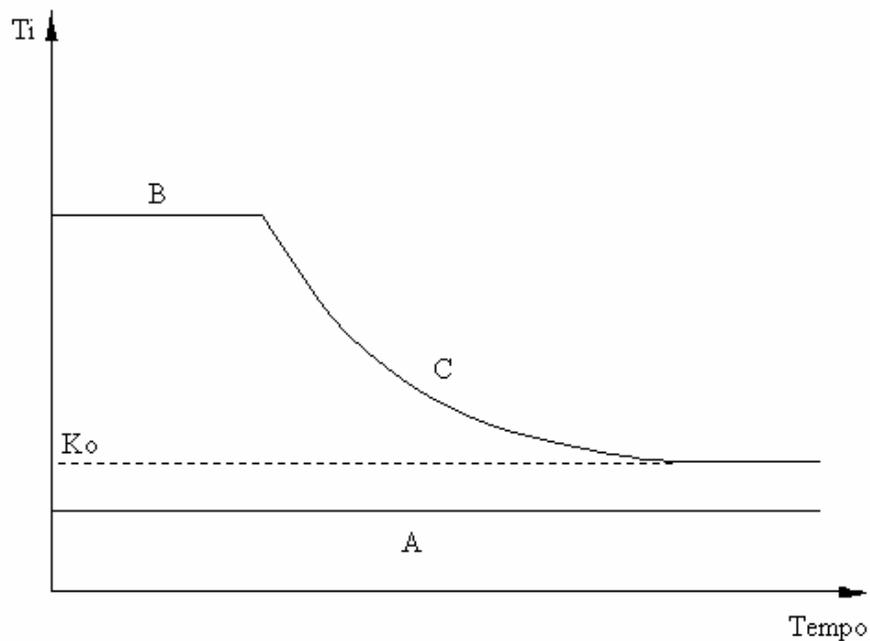


Figura 6. Diferentes estágios da infiltração sob condições de chuva.

O modelo GAML estima a lâmina de água infiltrada antes da saturação da camada superficial do solo (estágio B), por meio da equação (5), a partir da consideração de que o teor de umidade na superfície aumenta durante a precipitação até que a camada de solo situada próxima à superfície atinja a saturação e ocorra o empoçamento de água sobre a superfície do solo.

$$I_0 = \frac{\Psi_f}{\frac{i_p}{K_0} - 1} (\theta_s - \theta_i) \quad (5)$$

em que

$I_0$  = lâmina infiltrada antes da saturação da superfície, L; e

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

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

$$t_p = \frac{I_0}{i_p} \quad (6)$$

em que  $t_p$  é o tempo de empoçamento da água na superfície do solo, T.

A partir do empoçamento da água na superfície do solo, a taxa de infiltração passa a ser igual à capacidade de infiltração, ou seja:

$$Ti = K_0 \left( 1 + \frac{\psi_f (\theta_s - \theta_i)}{I} \right) \quad (7)$$

A equação (7) é idêntica à equação de Green-Ampt, embora Mein e Larson tenham utilizado condições diferentes na derivação do seu modelo. Fazendo  $Ti(t) = \frac{dI(t)}{dt}$ , na equação (7) e integrando-a com relação ao tempo (t), nos intervalos t e  $t_p$ , tem-se, segundo MEIN e LARSON (1973), a equação (8), que descreve a infiltração depois da completa saturação da superfície do solo, isto é, em  $t > t_p$ .

$$K_0(t - t_p) = I(t) - \psi_f (\theta_s - \theta_i) \ln \left[ 1 + \frac{I(t)}{\psi_f (\theta_s - \theta_i)} \right] \quad (8)$$

MEIN e FARRELL (1974) introduziram o parâmetro  $t_s$  na equação (8), a qual passou a ter a seguinte apresentação

$$K_0(t - t_p + t_s) = I(t) - \psi_f (\theta_s - \theta_i) \ln \left[ 1 + \frac{I(t)}{\psi_f (\theta_s - \theta_i)} \right] \quad (9)$$

em que  $t_s$  é o tempo necessário para infiltrar a lâmina  $I_s$  sob condições de saturação da camada superficial do solo, L.

O valor de  $t_s$  é calculado pela equação (8), substituindo-se  $(t - t_p)$  por  $t_s$  e I por  $I_s$ .

### **2.3.2. Modelos de Green-Ampt e GAML para solos estratificados**

Embora tenham sido desenvolvidos para solos homogêneos, diversos pesquisadores modificaram os modelos de Green-Ampt e GAML (HILLEL e GARDNER, 1970; HACHUM e ALFARO, 1980; MOORE, 1981; AHUJA, 1983; BRAKENSIEK e RAWLS, 1983; FLERCHINGER et. al. 1988; RAWLS et. al. 1990) tornando possível sua aplicação em solos heterogêneos ou com escrostamento superficial.

HACHUM e ALFARO (1980) apresentaram um modelo baseado no de Green-Ampt para prever a infiltração em solos com vários estratos. Segundo os autores, o arranjo das camadas de solo pode ter um considerável efeito no comportamento da infiltração, sendo que CHILDS e BYBORDI (1969) afirmaram que o modelo só era válido para valores decrescentes de  $K_0$  em função da profundidade. Entretanto, BOUWER (1969) e BOUWER (1976) demonstraram a aplicabilidade do modelo tanto para valores crescentes quanto para valores decrescentes de  $K_0$  com a profundidade, sob condições de empçamento.

Na aplicação do modelo de GA ou GAML, considera-se um perfil de solo estratificado, composto por  $n$  camadas de espessura  $H_1, H_2, \dots, H_n$ , a partir da superfície, com condutividade hidráulica sob condições de saturação  $K_1, K_2, \dots, K_n$ , déficit de teor de água  $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \dots, \Delta\theta_n$  e potencial matricial na frente de umedecimento  $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ . O déficit de teor de água é a diferença entre o teor de água do solo saturado e o teor de água inicial do solo.

### **2.3.3. Modificações propostas nos parâmetros de entrada dos modelos de Green-Ampt e GAML**

Para utilizar os modelos de Green-Ampt ou GAML, os valores de  $K_0, \theta_s$  e  $\psi_f$  devem ser conhecidos. Além da determinação desses parâmetros no campo ser difícil e/ou fornecer resultados duvidosos, a utilização destes parâmetros não condiz com a realidade física do processo de infiltração, fazendo com que este não seja adequadamente estimado.

Originalmente, os modelos de Green-Ampt e GAML 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, sendo que a máxima umidade atingida pelo solo é a umidade da zona de transmissão ( $\theta_w$ ), menor que  $\theta_s$ .

Segundo WILSON e ODURO (2004) a condutividade hidráulica é o parâmetro ao qual o modelo de GAML apresenta maior sensibilidade. Todavia, uma vez que a frente de umedecimento se encontra em uma zona onde a saturação não é completa, a condutividade hidráulica do solo não pode ser  $K_0$ , e sim a condutividade hidráulica relativa à umidade da zona de transmissão ( $K_w$ ).

Devido à desuniformidade da umidade do solo no início do processo de infiltração e à variação de suas propriedades físicas ao longo do perfil, a frente de umedecimento não é abrupta, como pressuposto no desenvolvimento do modelo de Green-Ampt. A frente de umedecimento é, na verdade, difusa e torna-se cada vez mais difusa à medida em que penetra no solo (WANG e BENSON, 1995). Segundo RODRIGUES (1999), o parâmetro  $\psi_f$  é o mais difícil de ser determinado com precisão. Todavia, BRAKENSIEK e ONSTAD (1977) afirmam que este parâmetro é aquele ao qual o modelo apresenta menor sensibilidade.

Assim sendo, diversos pesquisadores, visando melhorar a estimativa de  $T_i$  e  $I$  feitas com os modelos de GA e GAML, propuseram adequar seus parâmetros de entrada, substituindo  $\theta_s$  por  $\theta_w$ ,  $K_0$  por  $K_w$ , e propondo alternativas para o cálculo de  $\psi_f$ . Na seqüência é feito um levantamento das formas de adequação encontradas na literatura especializada.

### **2.3.3.1. Umidade da zona de transmissão ( $\theta_w$ )**

Wilson et al., citados por MOORE et al. (1981), indicam haver uma tendência de que solos de textura mais fina apresentem menos ar aprisionado que solos de textura grossa. Todavia, tal afirmativa somente não é válida para solos típicos de clima tropical, como é o caso dos latossolos. Para Bloomsburg e 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.

SLACK (1980) constatou que  $\theta_w$  varia de  $0,8 \theta_s$  para solos de textura arenosa a  $0,9 \theta_s$  para solos de textura argilosa. POULOVASSILIS e EL-GHAMRY (1977) indicam valores para  $\theta_w$  de aproximadamente  $0,85 \theta_s$  para uma coluna porosa de uma mistura de duas frações de areia. ONSTAD et. al. (1973) utilizaram um valor médio de  $0,86 \theta_s$ . BRAKENSIEK e ONSTAD (1977) obtiveram valores que variaram entre  $0,85 \theta_s$  e  $\theta_s$  para o solo franco argilo siltoso, assumindo um valor médio de  $0,926 \theta_s$ . BRAKENSIEK (1977), em experimentos de campo, encontrou valores variando entre  $0,55 \theta_s$  e  $0,90 \theta_s$ . 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.

Em estudos realizados com solos do Brasil, CECÍLIO (2002) propõe a utilização de valores de  $\theta_w$  variando entre  $0,79 \theta_s$  a  $0,81 \theta_s$  para Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa e na faixa de  $0,85 \theta_s$  a  $0,86 \theta_s$  para textura franca. MELLO (2003), estudando Latossolo Vermelho-Amarelo, encontrou valores relativos de  $\theta_w$  que aumentaram com a densidade do solo. Segundo o autor estes valores variaram entre  $0,76 \theta_s$  e  $0,92 \theta_w$  para material de solo com textura muito argilosa e entre  $0,81 \theta_w$  e  $0,94 \theta_w$  para material de textura franca.

### **2.3.3.2. Condutividade hidráulica da zona de transmissão ( $K_w$ )**

BOUWER (1969) sugere que  $K_w$  seja igual a  $0,5 K_0$ . MOORE et al. (1981) mostra que a literatura indica um valor mínimo de  $K_w$  igual  $0,4 K_0$  enquanto CHÉRIF et al. (2004) encontraram um valor máximo igual a  $0,62 K_0$ .

SILVA e KATO (1998) utilizam a taxa de infiltração estável de água no solo ( $T_{ie}$ ) para representar a condutividade hidráulica do solo. RAWLS et al. (1989) apresentam uma extensa equação para cálculo de  $K_w$ , baseando-se em diversas características do solo.

Segundo KIDWELL et al. (1997) o modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) utiliza-se das equações (10), (11) ou (12) para o cálculo de  $K_w$ , em  $m s^{-1}$ . Caso a percentagem de argila do solo seja menor ou igual a 40% utiliza-se a equação (10).

$$K_w = -0,46 + 0,05Sa^{1,25} + 9,44CEC^{-0,69} \quad (10)$$

em que

Sa = percentagem de areia; e

CEC = capacidade de troca catiônica, meq/100g de solo.

Caso CEC seja menor ou igual a 1,  $K_w$  é calculado por

$$K_w = 8,98 + 0,05Sa^{1,25} \quad (11)$$

Se a percentagem de argila for superior a 40% utiliza-se:

$$K_w = -0,016e^{\frac{171}{Cl}} \quad (12)$$

em que Cl é a percentagem de argila da camada superficial do solo.

Diversos pesquisadores (SLACK, 1980; van GENUTCHEN, 1980; ALEXANDRE e SKAGGS, 1986) sugerem que  $K_w$  pode ser obtido por intermédio da curva que relaciona condutividade hidráulica com a umidade do solo, a partir do valor de  $\theta_w$ . Para tal os autores recomendam utilização, em conjunto, de modelos que relacionam umidade com potencial matricial (Brooks & Corey, Campbel, van Genutchen) e de modelos que relacionam a condutividade hidráulica do solo com seu potencial matricial (Burdine, Mualem, Alexander & Skaggs).

### 2.3.3.3. Potencial matricial da frente de umedecimento

HILLEL (1980) comenta que para um solo inicialmente seco, o valor deste parâmetro é da ordem de 50 a 100 cm.c.a. BOUWER (1969) recomenda que o valor seja metade da pressão de borbulhamento ( $\psi_b$ ), oriunda do modelo de BROOKS e COREY (1964), descrito na seqüência.

BRAKENSIEK (1977) recomenda um valor médio de  $0,76 \psi_b$ . Sugere também a utilização da equação (13), que calcula o potencial matricial a partir do índice de distribuição do tamanho de poros ( $\lambda$ ) e de  $\psi_b$ , oriundos do modelo de BROOKS e COREY (1964).

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

RISSE et al. (1995) e RAWLS et al. (1996) recomendam, para o cálculo de  $\psi_f$ , a utilização da equação.

$$\begin{aligned} \psi_f &= 0,01e^\alpha \\ \alpha &= 6,531 - 7,326\theta_w + 15,8C^2 + 3,809\theta_w^2 + 3,44SC - 4,989S\theta_w + \\ &\quad + 16,1S^2\theta_w^2 + 16C^2\theta_w^2 - 13,6S^2C - 34,8C^2\theta_w - 7,99S^2\theta_w \end{aligned} \quad (14)$$

em que

S = teor de areia, decimal;

C = teor de argila, decimal; e

van Mullem, citado por RAWLS et. al. (1996) sugere que o valor de  $\psi_f$  (em mm) seja calculado com base na condutividade hidráulica do solo saturado (em  $\text{cm h}^{-1}$ ), a partir da expressão (15).

$$\psi_f = 49,03(K_0 + 0,02)^{-0,4932} \quad (15)$$

Para Latossolo Vermelho-Amarelo em condições de estratificação, CECÍLIO (2002) recomenda que o valor do potencial matricial na frente de umedecimento seja igual à média entre o potencial matricial relativo a umidade inicial ( $\psi(\theta_i)$ ) e o potencial matricial relativo à umidade da zona de transmissão ( $\psi(\theta_w)$ ), ambos determinados a partir da curva de retenção. Para o mesmo solo, porém sem estratificação, MELLO (2003) sugere que o valor de  $\psi_f$  possa ser estimado por  $\psi(\theta_w)$ .

MEIN e LARSON (1973) e MEIN e FARREL (1974) sugerem que o valor  $\psi_f$  seja calculado pela integração da curva de condutividade hidráulica relativa ( $K_r$ ) em função do potencial matricial ( $\psi$ ), conforme a equação (16).

$$\psi_f = \int_{0,01}^1 \psi dK_r \quad (16)$$

Uma vez que  $K_w < K_0$ , SLACK (1980) sugere que o limite superior da integral seja igual a  $K_w/K_0$  e que o limite inferior seja tomado em relação a umidade inicial, sendo assim a equação (16) pode ser reescrita na forma:

$$\Psi_f = \int_{\frac{K(\theta_i)}{K_0}}^{\frac{K_w}{K_0}} \frac{\psi \, dK_r}{\left( \frac{K_w}{K_0} - \frac{K(\theta_i)}{K_0} \right)} \quad (17)$$

em que  $K(\theta_i)$  é a condutividade hidráulica do solo com teor de água  $\theta_i$ ,  $L T^{-1}$ .

PANIKAR e NANJAPPA (1977) indicam a utilização da equação (18) para solos arenosos.

$$\Psi_f = \Psi_b^2 + \frac{\Psi_b}{\left( \frac{b^2 + 2b + 3}{b} - 1 \right)} \quad (18)$$

em que  $b$  é a inclinação negativa da reta resultante da plotagem log-log da curva de retenção de umidade, descrita de acordo com o modelo de Campbell.

WANG e BENSON (1995) afirmam que o potencial matricial na frente de umedecimento decresce na medida em que esta penetra no solo, propondo uma equação empírica que estima o potencial matricial em função do tempo de ocorrência da infiltração em argilas compactas.

#### 2.4. Aplicabilidade dos diferentes modelos na descrição da infiltração

Em estudos realizados em regiões de clima temperado, CLEMMENS (1983) recomenda a utilização da equação de Kostiakov-Lewis para a estimativa da infiltração em áreas irrigadas. Todavia, no trabalho do autor, o modelo de GA foi aplicado em sua forma original. Já CHONG et al. (1982) recomendam a utilização do modelo de GA apenas em condições de baixa umidade inicial do solo. SHUKLA et al. (2003) obteve melhor performance quando da utilização do modelo de Horton.

Em oposição ao anteriormente mencionado, a aplicação dos modelos de GA e GAML em regiões de clima temperado vem tendo sua eficiência comprovada por diversos pesquisadores, tanto em solos homogêneos (SKAGGS et al., 1969; IDIKE et al., 1980; RAWLS e BRAKENSIEK, 1986; SLACK et al., 1988; SILVA e SERRALHEIRO, 2005) quanto estratificados (HACHUM e ALFARO, 1980; MOORE e EIGEL, 1981; CHU et al., 1986; JENNINGS et al., 1988; MOHAMOUD, 1991; KIM e CHUNG, 1994; KING et al., 1999; WANG et al., 1999).

Poucos trabalhos foram realizados para avaliar modelos de infiltração no Brasil, sendo que o início dos estudos concentrou-se na década de 1990. REICHERT et al. (1992) e ALVES e CABEDA (1999) analisaram o modelo de Smith aplicado em solos do Rio Grande do Sul. CHAVES et al. (1993) propôs um modelo para estimativa da infiltração sob condições dinâmicas de selamento superficial. ARAÚJO FILHO e RIBEIRO (1996) estudaram a infiltração de água em solos da Bahia, concluindo que os modelos de Philip e Kostiakov apresentaram comportamento similar. PRUSKI et al. (1997) ajustou os parâmetros do modelo de Kostiakov em Latossolo Roxo do Paraná. AGUIAR et al. (1998) obteve bons resultados quando do ajuste da equação de Holtan modificada para estimativa da infiltração em solo a região Semi-Árida do Ceará. COSTA et al. (1999) estudou a infiltração de água em Latossolo Roxo, em Minas Gerais. ALVES SOBRINHO et al. (2003), SILVA (2003) e PANACHUKI (2003) avaliaram os modelos de Horton e Kostiakov-Lewis em diferentes solos do Mato Grosso do Sul sob diversos sistemas de cultivo. PAIXÃO et al. (2004) avaliaram os modelos de Horton, Kostiakov e Kostiakov-Lewis aplicados em solo franco-arenoso da Paraíba.

Com relação aos modelos de GA e GAML, SILVA e KATO (1998), estudando o comportamento de solos do cerrado brasileiro sob a ação de chuvas simuladas concluíram que o modelo de GAML, substituindo-se  $K_0$  pela  $T_{ie}$ , simulou bem os valores de infiltração acumulada e de taxa de infiltração, para condições de solo coberto, sendo razoáveis estas simulações para condições de solo nu. Sob a condição de solo nu, quando consideraram a variação da  $T_{ie}$  em função da energia cinética da precipitação, os valores simulados pelo modelo de GA, tanto de infiltração acumulada quanto de taxa de infiltração, foram melhores que os valores simulados pelo modelo de GAML. MELLO (2003) e CECÍLIO (2002) verificaram uma boa estimativa fornecida pelos modelos GAML e GA, com modificações em seus parâmetros de entrada, aplicados em Latossolo Vermelho-Amarelo sob condições homogêneas e estratificadas, respectivamente.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Modelo para a estimativa da infiltração fundamentado em GAML (GAML-c)

O modelo proposto, denominado GAML-c, tem o objetivo de melhor simular o processo de infiltração sob condições de precipitação, baseando-se numa descrição mais aproximada da geometria e do deslocamento da frente de umedecimento.

Para tanto, o processo de infiltração foi dividido em duas etapas, conforme idealizado por MEIN e LARSON (1973): uma etapa que estima a infiltração ocorrida antes do empoçamento de água sobre a superfície do solo, e outra etapa que estima a infiltração após o empoçamento.

##### 3.1.1. Infiltração antes do empoçamento

Antes da ocorrência do empoçamento de água sobre a superfície do solo, toda água precipitada sobre o solo infiltra no perfil, elevando o teor de água do solo de  $\theta_i$  para  $\theta_s$ , isto é, até o solo atingir a saturação. Nesta etapa considera-se que a frente de umedecimento tem a configuração proposta por GREEN e AMPT (1911), ou seja, a frente de umedecimento é considerada como um plano abaixo do qual o teor de água é igual a  $\theta_i$  e acima do qual o teor de água é  $\theta_s$ . Portanto, o perfil de umidade do solo é aquele apresentado na Figura 4.

A lâmina infiltrada antes do empoçamento ( $I_0$ ) é calculada pela equação (5), proposta por MEIN e LARSON (1973). Todavia, para a aplicação da referida equação, é

necessário o conhecimento do potencial matricial na frente de umedecimento ( $\psi_f$ ). Considera-se que este potencial seja igual ao potencial matricial de entrada de ar ( $\psi_b$ ), proposto por BROOKS e COREY (1964). Isto porque o parâmetro  $\psi_b$  representa a sucção máxima que pode ser aplicada em uma amostra de solo saturado sem que haja retirada de água, isto é, corresponde ao maior valor absoluto de potencial matricial que o solo saturado apresenta.

O tempo decorrido desde o início da precipitação até o empoçamento é calculado pela equação (6), e a taxa de infiltração ( $T_i$ ) é igual à intensidade de precipitação ( $i_p$ ). A profundidade da frente de umedecimento ( $L_0$ ) no momento do empoçamento é dada por:

$$L_0 = \frac{I_0}{\theta_s - \theta_i} \quad (19)$$

### 3.1.2. Infiltração após o empoçamento

Após a ocorrência do empoçamento de água sobre a superfície do solo, a descrição da infiltração feita pelo GAML-c considera que o perfil de umedecimento do solo durante a infiltração é aquele apresentado na Figura 7. Desta maneira, considera-se que na zona de umedecimento o teor de água no solo é igual ao teor de água do solo saturado ( $\theta_s$ ).

Abaixo da zona de umedecimento situa-se a zona de transmissão, sendo considerado que o perfil de solo contido dentro da zona é umedecido até o teor de água  $\theta_w$ , que pode ser tomado como menor ou igual  $\theta_s$ . Logo após a zona de transmissão situa-se a frente de umedecimento, que não é mais considerada abrupta, mas que existe um decréscimo gradual do teor de água do solo com o aumento da profundidade.

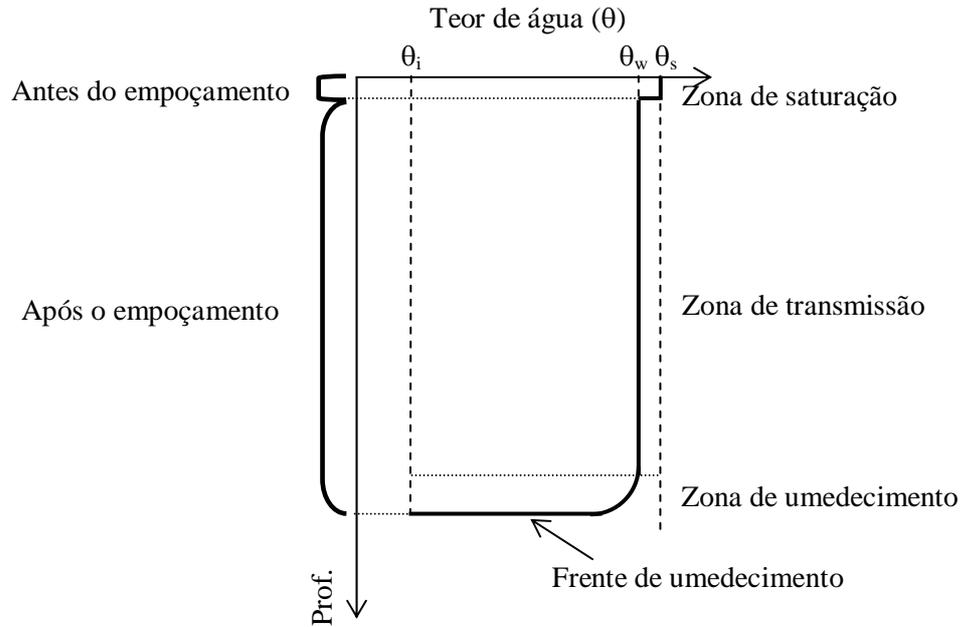


Figura 7. Perfil de umedecimento do solo considerado no GAML-c.

O GAML-c permite obter uma melhor descrição da frente de umedecimento ainda utilizando-se o conceito de movimento tipo pistão, idealizado por GREEN e AMPT (1911). Para tanto, realiza-se uma discretização do teor de água para o qual o solo será umedecido quando da ocorrência do processo de infiltração. Assim, o GAML-c propõe simular o deslocamento simultâneo de diversas sub-frentes de umedecimento pelo perfil do solo, todas deslocando-se de acordo com movimento do tipo pistão e elevando o teor de água do solo em um valor fixo igual a  $\Delta\theta$  (Figura 8). Este valor fixo pode ser calculado pelas equações (20) ou (21), caso considere que o solo atinge a saturação ( $\theta_s$ ) ou apenas o teor de água da zona de transmissão ( $\theta_w$ ), respectivamente.

$$\Delta\theta = \frac{\theta_s - \theta_i}{nf} \quad (20)$$

em que  $nf$  é o número de sub-frentes de umedecimento que se deseja considerar

$$\Delta\theta = \frac{\theta_w - \theta_i}{nf} \quad (21)$$

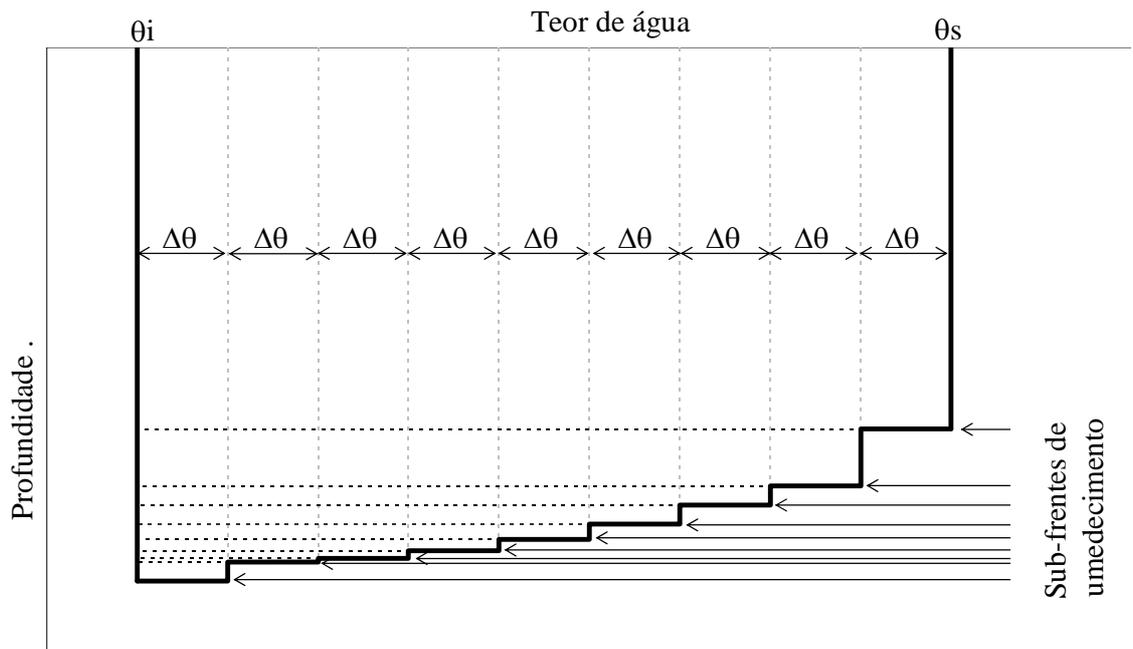


Figura 8. Perfil de umedecimento num instante qualquer considerado no GAML-c.

Considera-se que o processo ocorre da seguinte maneira:

1. Logo após o empocamento o deslocamento da primeira sub-frente de umedecimento faz com que o teor de água do solo se eleve de  $\theta_i$  para  $\theta_s$  (ou  $\theta_w$ , dependendo da situação a ser considerada).
2. Simultaneamente ao deslocamento dessa primeira sub-frente ocorre o deslocamento de uma segunda sub-frente de umedecimento, mais profunda. Essa segunda sub-frente eleva o teor de água do solo de  $\theta_i$  para  $\theta_s - \Delta\theta$  (ou  $\theta_w - \Delta\theta$ ).
3. Outras sub-frentes de umedecimento também se deslocam simultaneamente em maiores profundidades, elevando o teor de água do solo a valores decrescentes, até que a última sub-frente de umedecimento eleve o teor de água para  $\theta_i + \Delta\theta$  apenas.

Da mesma forma que realizado na concepção do modelo de GREEN e AMPT (1911), algumas premissas foram assumidas no desenvolvimento do GAML-c:

- validade da equação de Darcy;
- perfil do solo homogêneo; e
- a profundidade do solo infinita.

Outras duas premissas também são consideradas:

- existência de várias sub-frentes de umedecimento abruptas; e
- potencial matricial em cada sub-frente de umedecimento constante no tempo e ao longo da profundidade.

A seguir é descrito o movimento das sub-frentes de umedecimento. Tome-se como exemplo o perfil de umidade apresentado na Figura 9, considerando a primeira de sub-frente de umedecimento que se desloca pelo perfil, entre as profundidades (A) e (B), elevando o teor de água do solo de  $\theta_i$  até  $\theta_w$ . Neste caso, o cálculo de  $\Delta\theta$  é feito pela da equação (21).

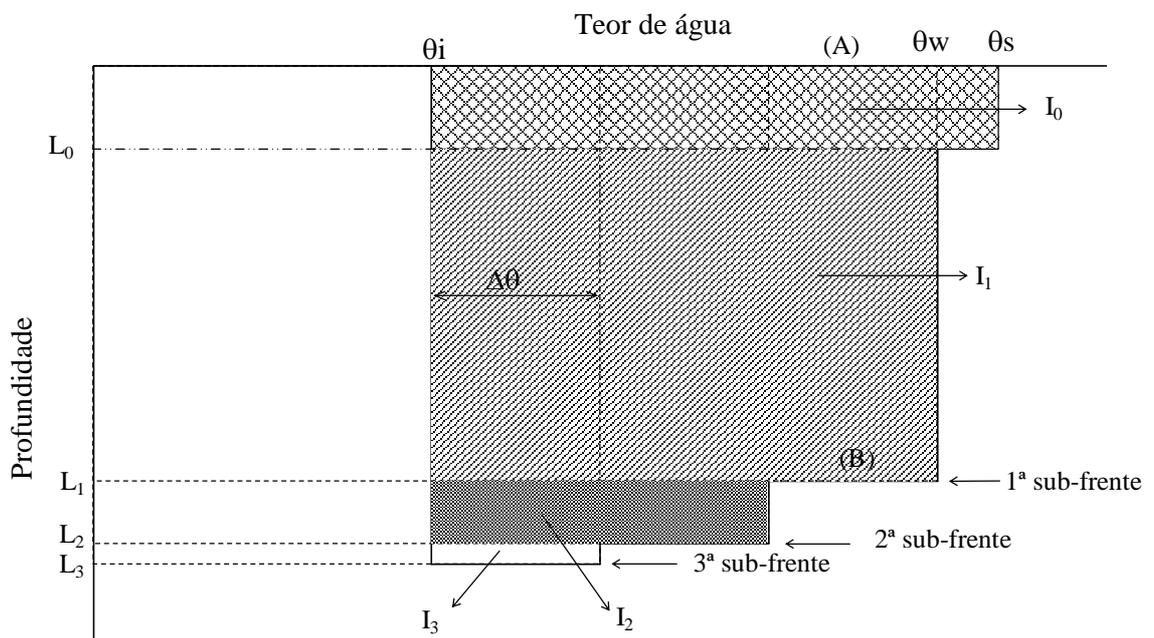


Figura 9. Perfil de umidade em um instante qualquer após o empoçamento de água sobre a superfície.

Como a 1ª sub-frente de umedecimento considerada na Figura 9 eleva o teor de água do solo para  $\theta_s$ , o potencial matricial nesta sub-frente (profundidade B) é igual ao potencial matricial relativo ao teor de água  $\theta_w$  ( $\psi(\theta_w)$ ). Aplicando-se a equação de Green-Ampt para esta frente, tem-se

$$T_{i_1} = K_{eq1} \left( 1 + \frac{\Psi_f}{L_1} \right) \quad (22)$$

em que

$Ti_1$  = taxa de infiltração provocada pela 1ª sub-frente,  $L T^{-1}$ ;

$K_{eq1}$  = condutividade hidráulica equivalente do solo situado entre a superfície e a profundidade  $L_1$ ,  $L T^{-1}$ ;

$L_1$  = profundidade da 1ª sub-frente de umedecimento, L.

Pela Figura 9, percebe-se que a lâmina parcial infiltrada ( $I_{parcial}$ ) é igual a:

$$I_{parcial} = I_0 + I_1 = L_0(\theta_s - \theta_i) + (L_1 - L_0)(\theta_w - \theta_i) \quad (23)$$

em que

$I_1$  = lâmina infiltrada, após o empoçamento, devido ao deslocamento da 1ª sub-frente de umedecimento, L;

$I_0$  = lâmina infiltrada antes do empoçamento  $L_3$ ,  $L T^{-1}$ ; e

$L_0$  = profundidade da frente de umedecimento no momento do empoçamento, L.

Utilizando-se a equação de Green-Ampt na forma apresentada na equação (9), tem-se:

$$K_{eq1}(t - t_p + t_s) = I_{parcial} - [\psi(\theta_w)](3\Delta\theta) \ln \left[ 1 + \frac{I_{parcial}}{[\psi(\theta_w)](3\Delta\theta)} \right] \quad (24)$$

Analisando-se as equações (23) e (24), verifica-se que  $K_{eq1}$  é o único parâmetro desconhecido necessário para a determinação de  $I_1$  e, conseqüentemente, de  $L_1$  e da lâmina parcial infiltrada em um tempo  $t > t_p$  qualquer. Esse parâmetro pode ser calculado por:

$$K_{eq1} = \frac{L_0 + (L_1 - L_0)}{\frac{L_0}{K_0} + \frac{L_1 - L_0}{K(\theta_i + 3\Delta\theta)}} \quad (25)$$

em que  $K(\theta_i + 3\Delta\theta)$  é a condutividade hidráulica do solo com teor de água  $\theta_i + 3\Delta\theta$ .

Utilizando a mesma linha de raciocínio para a segunda sub-frente de umedecimento tem-se:

$$\begin{aligned} I_{\text{parcial}} &= I_0 + I_1 + I_2 \\ I_{\text{parcial}} &= L_0(\theta_s - \theta_i) + (L_1 - L_0)(\theta_w - \theta_i) + (L_2 - L_1)(\theta_i + 2\Delta\theta) \end{aligned} \quad (26)$$

em que

$I_2$  = lâmina infiltrada, após o empoçamento, devido ao deslocamento da 2ª sub-frente de umedecimento, L.

$L_2$  = profundidade da 2ª sub-frente de umedecimento, L.

$$K_{\text{eq2}}(t - t_p + t_s) = I_{\text{parcial}} - [\psi(\theta_i + 2\Delta\theta)](2\Delta\theta) \ln \left[ 1 + \frac{I_{\text{parcial}}}{[\psi(\theta_i + 2\Delta\theta)](2\Delta\theta)} \right] \quad (27)$$

em que  $K_{\text{eq2}}$  é a condutividade hidráulica equivalente do solo situado entre a superfície e a profundidade  $L_2$ ,  $L T^{-1}$ , sendo calculado por:

$$K_{\text{eq2}} = \frac{L_0 + (L_1 - L_0) + (L_2 - L_1)}{\frac{L_0}{K_0} + \frac{L_1 - L_0}{K(\theta_i + 3\Delta\theta)} + \frac{L_2 - L_1}{K(\theta_i + 2\Delta\theta)}} \quad (28)$$

em que  $K(\theta_i + 2\Delta\theta)$  é a condutividade hidráulica do solo com teor de água  $\theta_i + 2\Delta\theta$

A mesma linha de raciocínio pode ser seguido para a 3ª sub-frente de umedecimento, ou para a n-ésima sub-frente, o que leva às seguinte equações gerais:

$$\begin{aligned} I_{\text{pn}} &= \sum_{i=1}^n I_i \\ I_{\text{pn}} &= L_0(\theta_s - \theta_i) + \sum_{i=1}^n [(L_i + L_{i-1})(nf - i + 1)\Delta\theta] \end{aligned} \quad (29)$$

em que  $I_{\text{pn}}$  é a lâmina infiltrada parcial, após o empoçamento, devido ao deslocamento da n-ésima sub-frente de umedecimento, L.

$$K_{\text{eqn}} = \frac{L_n}{\frac{L_0}{K_0} + \sum_{i=1}^n \frac{L_i - L_{i-1}}{K[\theta_i + (nf - i + 1)\Delta\theta]}} \quad (30)$$

em que  $K$  é a condutividade hidráulica do solo não saturado.

$$K_{eqn} t = I_{pn} - [\psi(\theta_i + (nf - n + 1)\Delta\theta)] [(nf - n + 1)\Delta\theta] \ln \left[ 1 + \frac{I_{parcial}}{[\psi(\theta_i + (nf - n + 1)\Delta\theta)] [(nf - n + 1)\Delta\theta]} \right] \quad (31)$$

As equações (29), (30) e (31) são as equações utilizadas para a estimativa da infiltração provocada pelo deslocamento de cada sub-frente de umedecimento, fixado qualquer tempo  $t > t_p$ . Ressalta-se que a simulação do deslocamento das sub-frentes é feito começando-se pela frente 1, que eleva o solo à maior umidade.

A solução das três equações é feita atribuindo-se valores para  $I_i$  a fim de calcular  $I_{pn}$  e  $K_{eqn}$ . Os valores de  $I_{pn}$  e  $K_{eqn}$  são substituídos na equação (31) até que seus dois membros assumam valores iguais.

Caso se considere que o perfil de solo atinja a saturação após o empoçamento e sim o teor de água  $\theta_w$ , deve-se utilizar a equação (20) para o cálculo de  $\Delta\theta$ . Além disso, na simulação da primeira sub-frente de umedecimento, o potencial matricial ( $\psi_f$ ) não será  $\psi(\theta_w)$ , e sim  $\psi_b$ . Os demais procedimentos continuam sendo feitos da mesma maneira.

### 3.1.2.1. Cálculo dos potenciais matriciais na frente de umedecimento e da condutividade hidráulica do solo não-saturado

O potencial matricial é calculado por intermédio do modelo proposto de BROOKS e COREY (1964), apresentado nas equações (32) e (33). Optou-se pelo modelo de Brooks & Corey baseando-se no trabalho realizado por TIMM (1994), que verificou que este estimou adequadamente a curva de retenção para uma série de solos brasileiros.

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ \frac{\psi_b}{\psi} \right]^\lambda, \quad |\psi| > |\psi_b| \quad (32)$$

$$\theta(\psi) = \theta_s, \quad |\psi| \leq |\psi_b| \quad (33)$$

em que

- $\psi_b$  = potencial matricial de entrada de ar, cm;  
 $\psi$  = potencial matricial, cm  
 $\lambda$  = índice de distribuição de tamanho de poros, adimensional;  
 $\theta(\psi)$  = teor de água do solo no potencial matricial  $\psi$ ,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  
 $\theta_r$  = teor de água residual do solo,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ; e  
 $\theta_s$  = teor de água do solo saturado,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

A condutividade hidráulica do solo não saturado ( $K(\theta)$ ) é obtida por intermédio da equação de Burdine, que foi escolhida devido ao bom desempenho apresentado na estimativa da condutividade hidráulica de solos não saturados, no trabalho feito por ALEXANDER e SKAGGS (1986).

$$K(\theta) = K(\theta(\psi)) = K_0 \left[ \frac{\psi_b}{\psi(\theta)} \right]^{2+3\lambda} \quad (34)$$

### 3.2. Proposta de adequação dos parâmetros de entrada do modelo de GAML (GAML-t)

Neste trabalho propõe-se uma adequação dos parâmetros de entrada do modelo de GAML, denominada GAML-t. Diferentemente do GAML-c, o GAML-t é oriundo de uma análise menos conceitual do processo de infiltração e visa dar uma aplicação mais simples ao modelo de GAML.

No GAML-t continua-se a considerar a forma original do modelo de GAML, modificando-se três de seus parâmetros de entrada, a fim de melhor caracterizar o processo de infiltração: (a) teor de água do solo saturado, (b) potencial matricial na frente de umedecimento, e (c) condutividade hidráulica do solo saturado.

Propõe-se que o teor de água do solo saturado ( $\theta_s$ ) seja substituído pelo teor de água da zona de transmissão ( $\theta_w$ ), que é, efetivamente, o teor de água que maior parte do perfil de solo atinge durante a infiltração. Conforme visto anteriormente, diversos pesquisadores já propuseram esta alteração no modelo GAML.

Sabe-se que o teor de água ao longo da frente de umedecimento varia entre  $\theta_w$  e  $\theta_i$ , portanto, considera-se que a proposta de cálculo de  $\psi_f$  feita por SLACK (1980), e apresentada na equação (17), tem maior emba

- Argissolo Vermelho (PV), coletado na base da serra de São Geraldo, no município de São Geraldo, MG;
- Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), textura argilosa, coletado nas imediações do “Tiro de Guerra”, no município de Viçosa, MG; e
- Latossolo Vermelho (LV), textura média, coletado na área do Centro de Experimentação, Pesquisa e Extensão do Triângulo Mineiro (CEPET), no município de Capinópolis, MG.

Os materiais de solo foram secados ao ar e peneirados em malha com abertura de 10 mm, valor mínimo recomendado por AGASSI e BRADFORD (1999) e utilizado por REICHERT et al. (1992) para se efetuar estudos em condições de laboratório. Posteriormente, retirou-se amostras desses materiais de solo para realização da análise textural apresentada no Quadro 1.

Quadro 1. Análise textural dos solos utilizados no experimento

Solo	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila <sup>1</sup>	Classificação textural	Estrutura
	dag kg <sup>-1</sup>					
PV	7	9	25	59	argila	forte média blocos sub-angulares
LVA	13	10	7	70	muito-argilosa	forte pequena granular
LV	26	52	2	20	franco-arenosa	forte pequena/média granular

<sup>1</sup> Método da pipeta (EMBRAPA, 1997).

### 3.3.1. Colunas de solo

As colunas de solo, destinadas a conter os materiais de solo para a realização dos testes experimentais, foram construídas com tubos de PVC de 20 cm de diâmetro e altura útil de 48 cm (perfis dos solos PV e LV) ou 78 cm (perfis do solo LVA). Cada coluna foi montada sobre tampão de PVC de 20 cm de diâmetro, sendo seu fundo aberto com um orifício de 1 cm de diâmetro e seu interior preenchido com brita e areia grossa,

a fim de permitir a rápida drenagem da água. A Figura 10 mostra uma coluna utilizada no experimento.

A fim de facilitar o adensamento dos materiais de solo dentro das colunas e o posterior desmanche destas, as colunas foram construídas com módulos de PVC de 10 cm de altura unidos por intermédio de cola de silicone e tira de borracha para vedação (Figura 10). O módulo de PVC localizado na parte superior das colunas foi dotado de uma calha para condução do escoamento superficial (Figura 10). A base desta calha localizava-se a 2 cm do topo da coluna de solo, fazendo com que a altura útil deste último módulo fosse de apenas 8 cm.

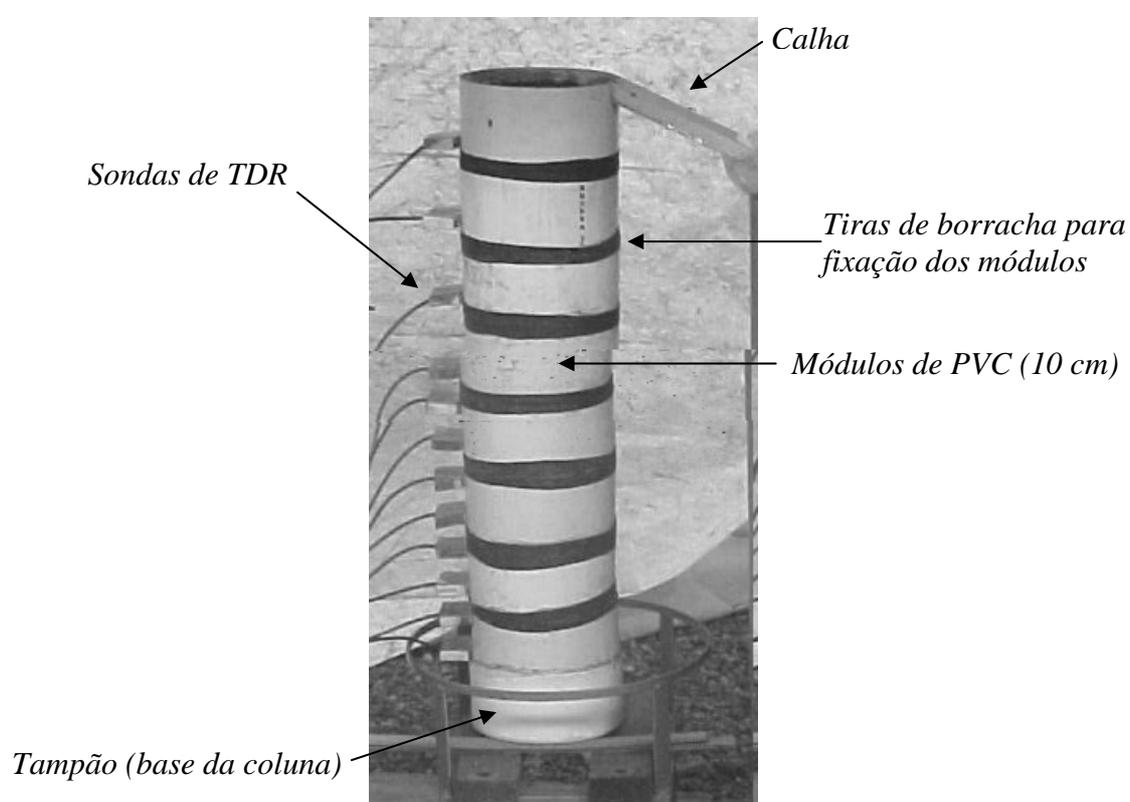


Figura 10. Coluna de solo utilizada no experimento (vista lateral).

A fim de minimizar a ocorrência de caminhos preferenciais para água entre as paredes internas das colunas e o material de solo procedeu-se à colagem de areia grossa nas paredes destas, aumentando assim a sua rugosidade.

Com o intuito de determinar-se a umidade do solo em diversas profundidades ao longo do tempo de realização dos testes experimentais foi necessário que cada módulo de PVC tivesse sua parede perfurada para a inserção de sondas de TDR (Figura 10). As

perfurações consistiram em três orifícios dispostos horizontalmente na parede do módulo, com 3,2 mm de diâmetro e espaçados 2 cm entre si. Após a inserção das sondas, os espaços que porventura pudessem permitir a passagem de água de dentro para fora das colunas eram fechados com a utilização de massa para calafetar.

Antes de iniciar-se o preenchimento das colunas com os materiais de solo, estes foram umedecidos e guardados em recipientes vedados durante uma semana, com o intuito de homogeneizar a umidade de todo o material.

Posteriormente, a umidade do material de solo contido nos recipientes foi determinada com o intuito de calcular a massa de solo úmido necessária para adensar camadas de 4 cm e 5 cm de solo dentro das colunas de PVC. A massa de solo utilizada para adensamento de cada camada foi calculada de modo que a massa específica do solo adensado dentro da coluna se aproximasse da massa específica observada em campo. As camadas foram adensadas individualmente a partir de carga exercida com a queda de um peso em uma placa de PVC, com diâmetro de aproximadamente 20 cm, colocada sobre o solo. A determinação do momento de término do adensamento de cada camada foi feita com a utilização de uma régua, que permitia a obtenção da distância entre o topo da coluna e a superfície da camada compactada. Ao fim do adensamento de cada camada, sua superfície foi levemente escarificada com o intuito de quebrar o espelhamento que se formava (Figura 11).

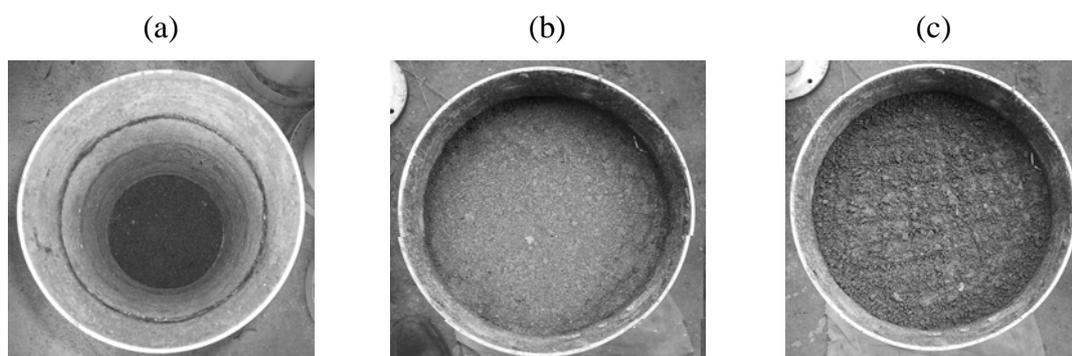


Figura 11. Vista superior do preenchimento das colunas de PVC: (a) coluna vazia, apenas o interior do tampão preenchido; (b) coluna parcialmente preenchida com solo, antes da escarificação; e (c) coluna parcialmente preenchida com solo, após a escarificação.

### 3.3.2. Medidor de teor de água tipo TDR

Como havia necessidade de determinar-se o teor de água do perfil de solo em diferentes profundidades ao longo do tempo de ocorrência de cada teste experimental, optou-se pelo uso da técnica da Reflectometria de Domínio Temporal (TDR). Segundo NOBORIO et al. (1996), JONES et al. (2002) e TIMLIN e PACHEPSKY (2002) esta é a técnica mais apropriada para tal situação, por permitir a realização de varias determinações de teor de água praticamente simultâneas com o uso de multiplexadores, sem destruição da amostra de solo. O equipamento determinador de teor de água do tipo TDR utilizado no experimento foi o *TDR100* em conjunto com o multiplexador *SDMX50*, ambos da *Campbell Scientific, Inc.*

O uso do equipamento TDR100 é feito com sondas (guias de onda) específicas, as quais foram construídas com três hastes paralelas de aço inoxidável com 3 mm de diâmetro, 10 cm de comprimento e espaçamento de 2 cm entre hastes (Figura 12). A escolha de sondas desse tipo baseou-se em análises de guias de onda feitas por SILVA et al. (2002) e COELHO et al. (2003).

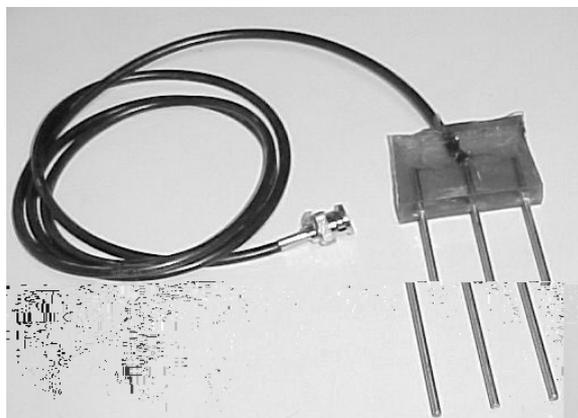


Figura 12. Sonda (guia de onda) de TDR utilizada no experimento.

#### 3.3.2.1. Calibração do medidor TDR

Uma vez que a utilização da técnica TDR para determinação do teor de água do solo é altamente dependente de sua textura (PONIZOVSKI et al., 1999) foram feitas três calibrações do equipamento TDR100, uma para cada tipo de solo.

Ressalta-se que o processo de calibração consiste em correlacionar a constante dielétrica aparente ( $K_a$ ) das três fases do solo (medida pelo TDR) com seu teor de água. A metodologia de calibração baseou-se naquela descrita por CECÍLIO et al. (2004), que utiliza a parcial secagem do solo em estufa para acelerar o processo de calibração.

Deste modo, amostras de material de cada um dos três solos foram acondicionadas em recipientes de massa conhecida, construídos em PVC, com altura de 12 cm e diâmetro interno de 9,7 cm. A fim de permitir a saturação do solo, a parte inferior dos recipientes foi fechada com tela de malha fina. A massa de solo utilizada para preenchimento de cada recipiente foi igual àquela necessária para a obtenção de massa específica próxima àquela utilizada nos testes experimentais. O solo contido dentro dos recipientes foi então saturado durante um período de 48 horas, e uma sonda de TDR, de massa conhecida, foi inserida em cada recipiente.

Após o período de saturação do solo iniciou-se a coleta de dados, que consistiu em medir-se a massa ( $m_t$ ) do conjunto solo + água + recipiente + sonda e determinar-se, com o uso do equipamento TDR100, a constante dielétrica aparente ( $K_a$ ) do solo contido no recipiente.

Durante uma semana, os recipientes foram mantidos com a superfície exposta para permitir perda de água apenas por evaporação, sendo feitas, de 12 em 12 horas, determinações de  $m_t$  e de  $K_a$ . Após esse período, os recipientes foram levados à estufa, em uma temperatura constante igual a 50°C. As determinações de  $m_t$  e  $K_a$  continuaram a ser feitas de 12 em 12 horas até que se verificasse a estabilização de  $m_t$ .

Findas as medições de  $m_t$  e  $K_a$ , retirou-se amostras do solo contido nos recipientes e obteve-se o teor de água final do solo, por meio do método padrão de estufa, e a massa de solo seco ( $m_s$ ) de todo o volume de solo contido nos recipientes. Com base na massa de solo seco, do recipientes e das sondas, além da massa específica do solo ( $d_a$ ) e dos valores de  $m_t$  coletados, obteve-se os valores de umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) do solo por intermédio da equação (37).

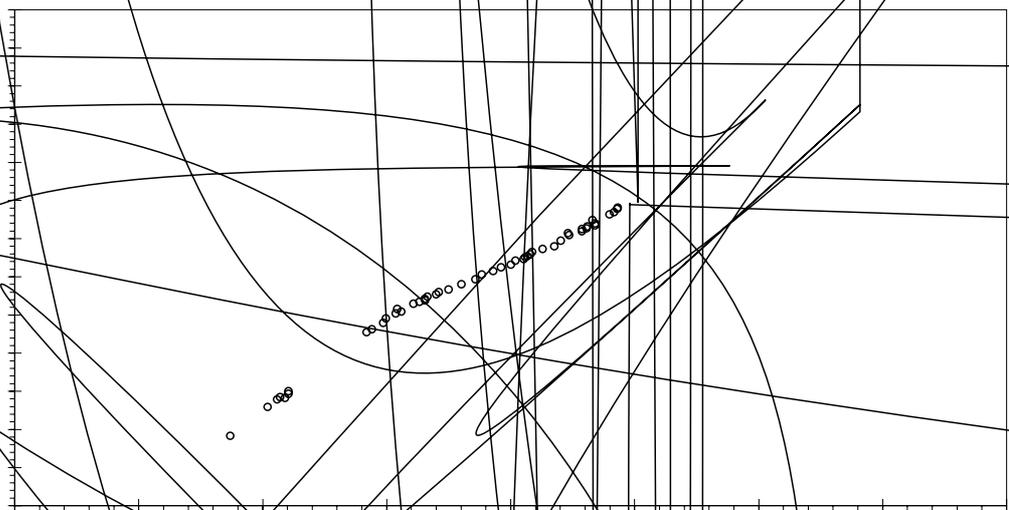
$$\theta = \frac{d_a}{d_{\text{água}}} \left( \frac{m_t - m_s - m_g - m_r}{m_s} \right) \quad (37)$$

em que

$$\theta = \text{teor de água volumétrico do solo, m}^3 \text{ m}^{-3}$$

- $d_a$  = massa específica do solo,  $g\ cm^{-3}$ ;
- $d_{\text{água}}$  = massa específica da água,  $g\ cm^{-3}$ ;
- $m_t$  = massa do conjunto recipiente-solo úmido-guia de onda; g;
- $m_s$  = massa de solo seco; g;
- $m_g$  = massa da guia de onda; g; e
- $m_r$  = massa do recipiente, g.

Finalmente, associando-se os valores de  $\theta$  aos respectivos valores de  $K_a$ , periodicamente determinados, foi realizada a calibração do TDR por meio do ajuste de um modelo polinomial do terceiro grau, segundo a proposta de TOPP et al. (1980). As Figuras 13, 14 e 15 mostram as curvas e equações de calibração dos solos LVA, PV e LV, respectivamente.



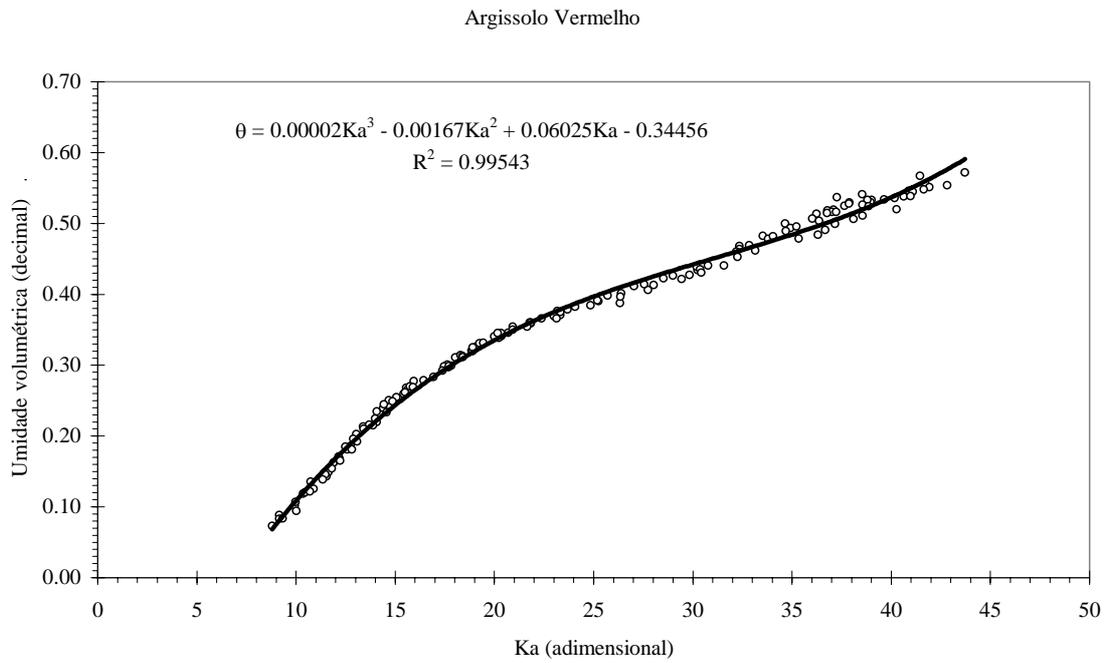


Figura 14. Curva e equação de calibração para determinação de umidade por intermédio do TDR para o Argissolo Vermelho.

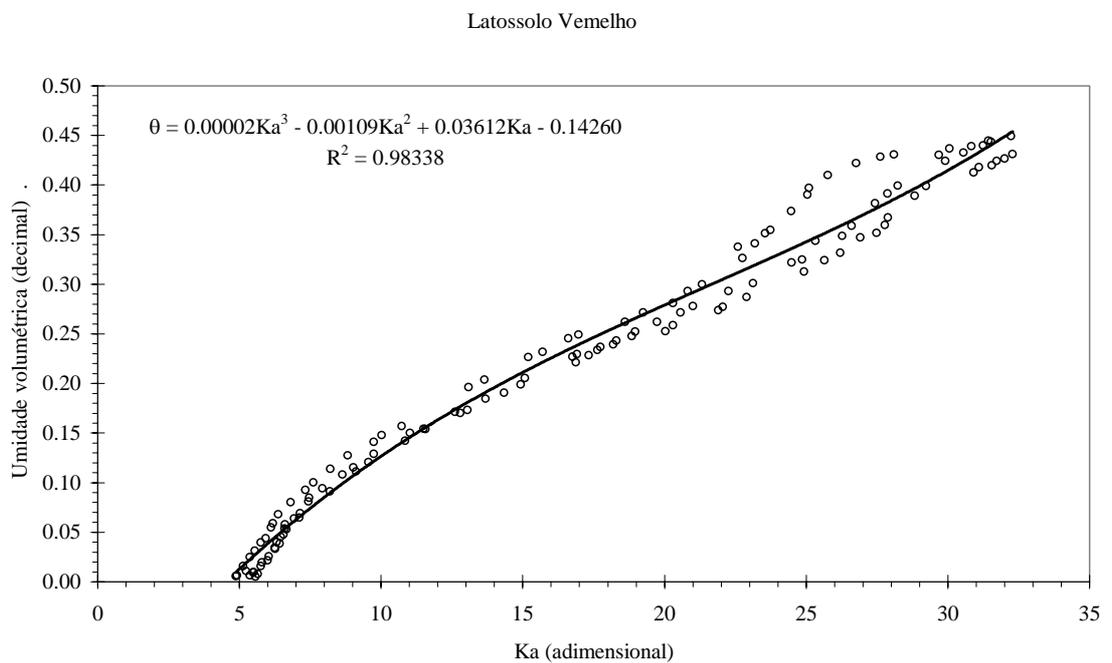


Figura 15. Curva e equação de calibração para determinação de umidade por intermédio do TDR para o Latossolo Vermelho.

### 3.3.3. Condução dos testes experimentais

A condução dos testes experimentais constitui-se, essencialmente, em aplicar chuva simulada com intensidade constante sobre cada perfil de solo contido nas colunas de PVC, e coletar todo o escoamento superficial produzido.

Antes de se iniciar a aplicação de água sobre o perfil de solo, sua superfície era coberta com manta de tecido sintético altamente permeável (bidim), a fim de minimizar os efeitos do selamento superficial.

A intensidade de precipitação era determinada antes e após a execução dos testes experimentais. Para tal utilizava-se um recipiente de mesmo diâmetro que as colunas de PVC instalado no mesmo local e à mesma altura que ficaria o topo destas. Aplicava-se, durante três minutos, chuva simulada sobre este recipiente, medindo-se posteriormente o volume total coletado. A lâmina precipitada foi calculada por intermédio do quociente entre o volume coletado e a área do recipiente, sendo a intensidade de precipitação igual à razão entre a lâmina precipitada e o tempo de coleta.

As intensidades de precipitação ( $i_p$ ) aplicadas sobre os perfis de solo foram iguais a  $530 \text{ mm h}^{-1}$ ,  $574 \text{ mm h}^{-1}$  e  $558 \text{ mm h}^{-1}$  nos três testes experimentais realizados com o solo LV;  $486 \text{ mm h}^{-1}$ ,  $442 \text{ mm h}^{-1}$  e  $398 \text{ mm h}^{-1}$  naqueles feitos com o LVA; e  $211 \text{ mm h}^{-1}$ ,  $225 \text{ mm h}^{-1}$  e  $274 \text{ mm h}^{-1}$  nos realizados com o PV. A escolha de intensidades de precipitação dessas magnitudes baseou-se nos valores de taxa de infiltração estável encontrados para estes solos por BRANDÃO (2003), no estudo da infiltração de água em colunas de solo com ausência de selamento superficial.

Para aplicação da chuva simulada foi utilizado um simulador estacionário de bicos múltiplos e oscilantes construído na UFV conforme modelo proposto pelo National Soil Erosion Research Laboratory, vinculado ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (Figura 16). O simulador apresenta cinco bocais do tipo Veejet 80.100, espaçados de 1,10 m, operando com pressão de serviço de 34,5 kPa. Todavia quatro bocais foram fechados para a realização dos testes experimentais. Para garantir uma melhor uniformidade de aplicação da chuva, durante a realização dos testes o simulador foi coberto com lona plástica para evitar a ação do vento.



Figura 16. Simulador de chuvas utilizado no experimento.

Sondas de TDR foram inseridas paralelas à superfície do solo (Figura 17) nas profundidades de 6 cm, 11 cm, 16 cm, 21 cm, 26 cm, 31 cm, 36 cm, 41 cm e 46 cm nos testes realizados com os solos PV e LV; e nas profundidades 6 cm, 16 cm, 26 cm, 36 cm, 41 cm, 46 cm, 51 cm, 56 cm, 61 cm, 66 cm, 71 cm e 76 cm nos testes realizados com o LVA. Tais sondas foram utilizadas tanto para a medição do teor de água inicial e final do solo, quanto para determinação periódicas dos teores de água do perfil do solo durante a realização dos testes experimentais. Ressalta-se que o teor de água inicial também foi determinado pelo método padrão de estufa, retirando-se amostras no momento do adensamento do solo dentro das colunas.

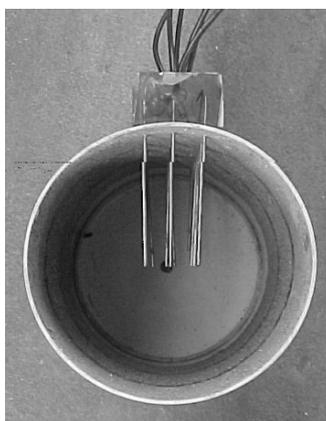


Figura 17. Inserção das sondas na coluna de PVC (vista superior).

O escoamento superficial gerado durante a aplicação de chuva simulada era conduzido a uma estrutura de coleta por intermédio da calha instalada na parte superior da coluna de PVC (Figura 18). A estrutura de coleta era composta por dois reservatórios que se comunicavam por intermédio de uma mangueira flexível. O primeiro reservatório destinava-se a coletar toda a água escoada, enquanto no segundo foi instalado um equipamento medidor de nível de água, denominado *Thalimedes* (Figura 19), que registrava e armazenava a altura da lâmina de água dentro da estrutura de coleta.

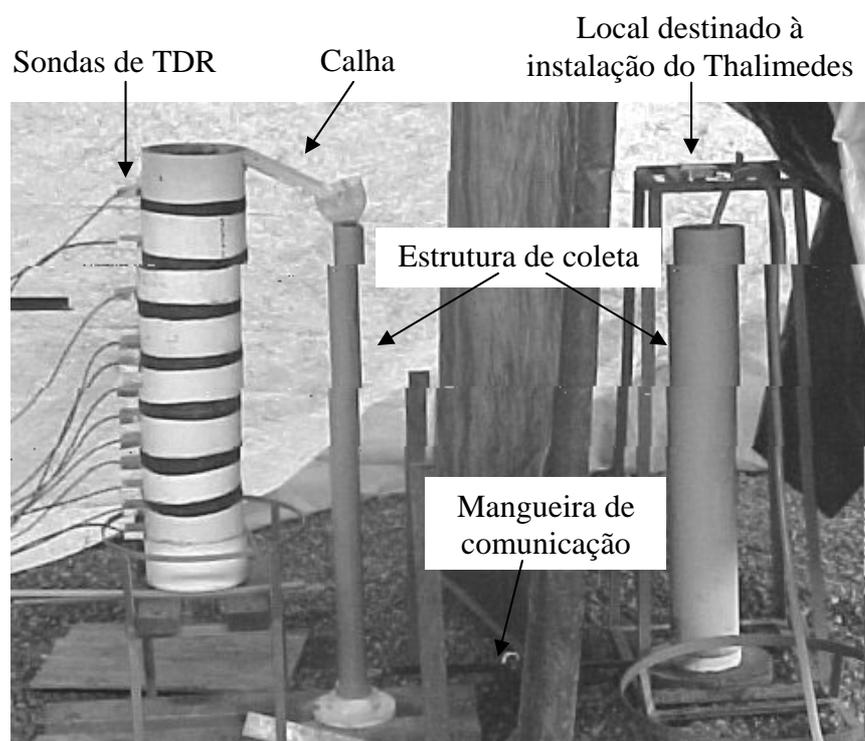


Figura 18. Disposição da coluna de PVC e da estrutura de coleta durante os testes experimentais.

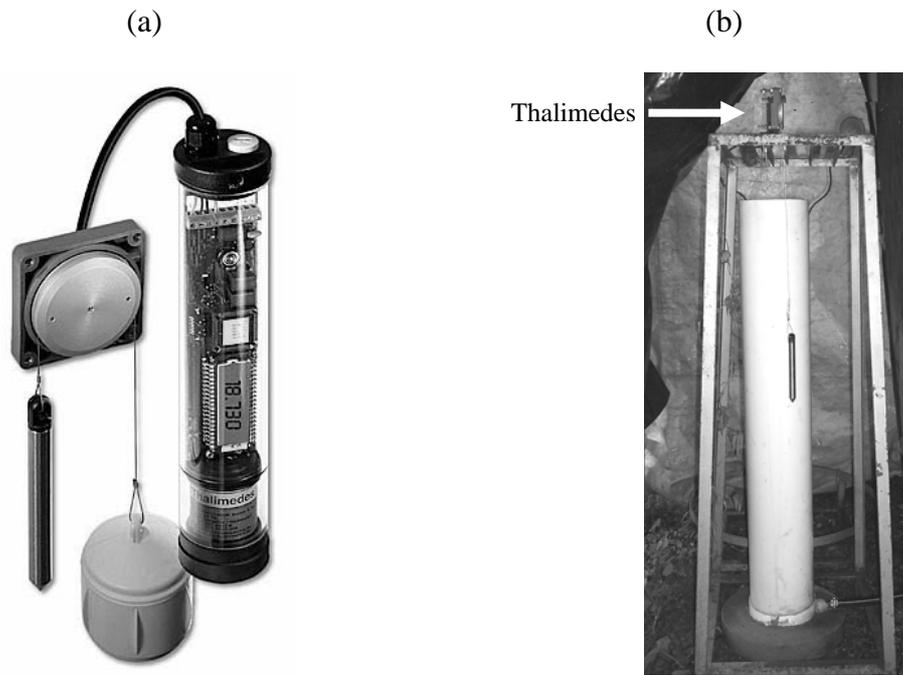


Figura 19. Medidor de nível Thalimedes: (a) foto ilustrativa e (b) instalado na estrutura de coleta.

O volume de água infiltrada em um intervalo de tempo  $\Delta t$  foi obtido indiretamente por meio da diferença entre os volumes precipitado ( $V_{\text{prec}}$ ) e escoado ( $V_{\text{esc}}$ ). Os volumes precipitado e escoado foram obtidos por intermédio das equações (38) e (39), respectivamente.

$$V_{\text{prec}} = i_p \Delta t A_{\text{coluna}} \quad (38)$$

em que

$$V_{\text{prec}} = \text{volume precipitado, mm}^3;$$

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

$$\Delta t = \text{intervalo de tempo, h; e}$$

$$A_{\text{coluna}} = \text{área da seção transversal da coluna de PVC; mm}^2.$$

$$V_{\text{esc}} = \Delta n_a A_{\text{EC}} \quad (39)$$

em que

$$V_{\text{esc}} = \text{volume escoado, mm}^3;$$

$\Delta n_a$  = diferença entre as leituras do Thalimedes no intervalo de tempo  $\Delta t$ ;  
mm e

$A_{EC}$  = área da seção dos dois reservatórios da estrutura de coleta;  $\text{mm}^2$ .

A diferença entre  $V_{\text{prec}}$  e  $V_{\text{esc}}$  era igual ao volume infiltrado ( $V_{\text{inf}}$ ) no intervalo de tempo, sendo que a lâmina infiltrada foi igual ao quociente  $V_{\text{inf}}/A_{\text{coluna}}$ . A taxa de infiltração foi determinada dividindo-se a lâmina infiltrada pelo intervalo de tempo entre duas leituras sucessivas.

Os testes foram encerrados no momento em que ocorreu a saída de água pelo dreno localizado na parte inferior da coluna de PVC.

Considerou-se que a taxa de infiltração estável da água no solo ( $T_{ie}$ ) foi atingida após verificar-se que a taxa de variação do nível d'água dentro da estrutura de coleta tornou-se constante.

### **3.3.4. Caracterização física dos solos**

Esta etapa consistiu em determinar as características físicas dos perfis de solo necessárias à aplicação do modelo de GAML, a saber:

- condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ );
- massa específica do perfil de solo ( $d_a$ );
- massa específica de partículas ( $d_p$ );
- umidade inicial do solo ( $\theta_i$ );
- umidade da zona de transmissão ( $\theta_w$ );
- umidade de saturação do solo ( $\theta_s$ ); e
- curva de retenção da água no solo.

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

A condutividade hidráulica do solo saturado foi determinada após a realização dos testes experimentais, seguindo a metodologia do permeâmetro de carga constante, aplicada por MELLO (2003). Para tal, separava-se cada um dos módulos de PVC de 10

cm de altura com auxílio de fio de cobre. Posteriormente os módulos eram deixados em um reservatório para saturar por fluxo ascendente durante 48 horas. Ao final desse prazo, os módulos eram colocados sobre um funil de latão, onde existia uma chapa furada, na qual foi apoiado o módulo. Sobre os módulos fixou-se, por meio de tira de borracha, um anel de PVC de 10 cm de altura e 20 cm de diâmetro destinado a propiciar o estabelecimento de uma lâmina de água sobre a amostra de solo contida no módulo. Finalmente, aplicou-se água sobre a superfície do solo, por intermédio de frasco de Mariotte, coletando-se, em intervalos de tempo regulares, o volume de água percolado, até que o mesmo permanecesse constante. No momento em que notou-se a estabilização do volume de água percolado mediu-se a lâmina de água sobre a superfície do solo e a temperatura desta. De posse destes dados calculou-se a condutividade hidráulica do solo saturado por intermédio da equação (40). A Figura 20 mostra a estrutura montada para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado à temperatura ambiente.

$$K_e = 600 \frac{V_{\text{coletado}} H_{\text{módulo}}}{A_{\text{módulo}} t_{\text{coleta}} (H_{\text{módulo}} + h_{\text{água}})} \quad (40)$$

em que

$K_e$  = condutividade hidráulica do solo saturado na temperatura medida,  $\text{mm h}^{-1}$ ;

$V_{\text{coletado}}$  = volume percolado coletado no tempo  $t_{\text{coleta}}$ ,  $\text{cm}^3$ ;

$H_{\text{módulo}}$  = altura do módulo de PVC contendo o solo, cm;

$A_{\text{módulo}}$  = área da seção transversal do módulo de PVC contendo o solo,  $\text{cm}^2$ ;

$t_{\text{coleta}}$  = tempo de coleta da água percolada, min; e

$h_{\text{água}}$  = altura da lâmina de água sobre a superfície do solo, cm.

O valor de  $K_e$  foi recalculado na temperatura de referência de 20 °C por meio da equação (41).

$$K_0 = K_e \frac{\eta_e}{\eta_{20}} \quad (41)$$

em que

$K_0$  = condutividade hidráulica do solo saturado a 20°C,  $\text{mm h}^{-1}$ ;

$\eta_e$  = viscosidade dinâmica da água na temperatura medida,  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ; e

$\eta_{20}$  = viscosidade dinâmica da água a 20 °C,  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ .

O Quadro 2 apresenta os valores médios de condutividade hidráulica do solo saturado e da taxa de infiltração estável obtidos nos nove testes experimentais.

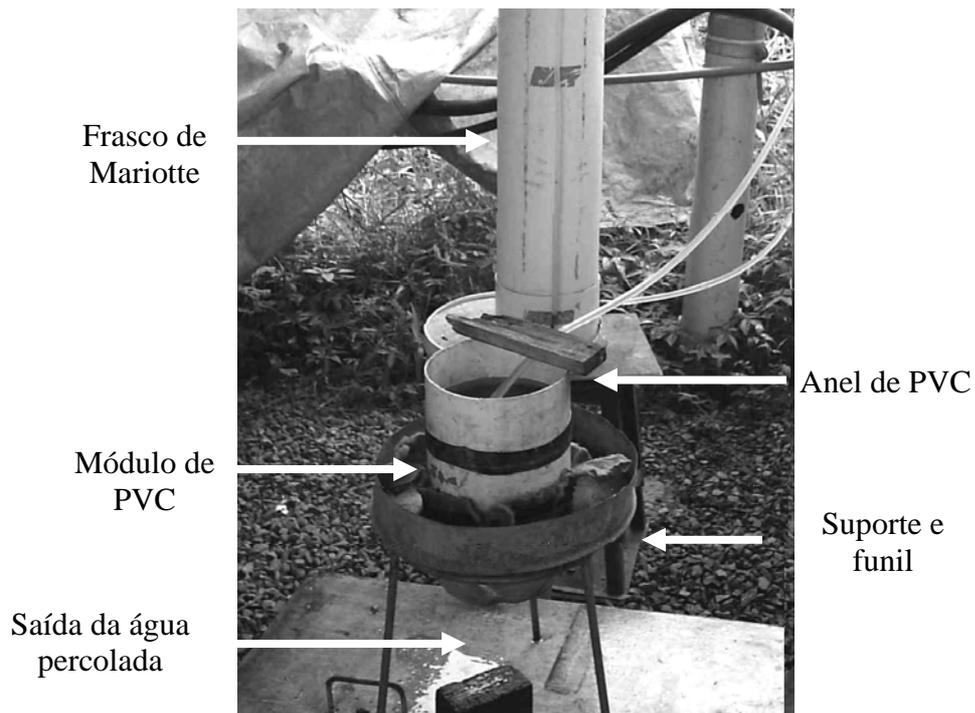


Figura 20. Estrutura montada para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado.

Quadro 2. Valores de condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) a 20°C e taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ) determinados nos nove testes experimentais

Solo	$K_0$ ( $\text{mm h}^{-1}$ )			$T_{ie}$ ( $\text{mm h}^{-1}$ )		
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 1	Teste 2	Teste 3
LV	102,6	99,1	101,6	253,1	253,3	227,4
LVA	112,1	129,5	106,0	130,3	72,5	107,6
PV	35,5	50,7	83,2	78,9	132,4	195,7

### 3.3.4.2. Massa específica do solo e de partículas

A massa específica de partículas dos materiais de solo foi determinada usando o método do balão volumétrico usando como agente penetrante o álcool etílico (EMBRAPA, 1997).

A massa específica do solo contido nas colunas era obtida por intermédio da média das massas específicas do solo contido em cada módulo constituinte das colunas. As massas específicas de cada módulo eram determinadas duas vezes, antes e após a realização dos testes, sendo a média destes dois valores tomada como a massa específica do solo contido no módulo.

Antes da realização dos testes, a determinação da massa específica do solo contido nos módulos era feita no momento do adensamento dos materiais de solo, retirando-se uma amostra para determinação de umidade pelo método padrão de estufa. Conhecido o valor do teor de água gravimétrico do solo e a massa de solo úmido contido em cada módulo, pode-se determinar a massa específica por intermédio da equação (42).

$$d_a = \frac{M_u}{\text{Vol}_{\text{módulo}} (U_g + 1)} \quad (42)$$

em que

$M_u$  = massa de solo úmido acondicionado no módulo, g;

$U_g$  = teor de água gravimétrico do solo contido no módulo, g g<sup>-1</sup>; e

$\text{Vol}_{\text{módulo}}$  = volume do módulo, g cm<sup>-3</sup>.

Depois da determinação da condutividade hidráulica do solo saturado o módulo contendo solo tinha sua massa determinada ( $M_t$ ) e uma amostra retirada para determinação do teor de água, pelo método de estufa. Posteriormente era determinada a massa do módulo de PVC sem a presença do solo ( $M_m$ ). O cálculo da massa específica do solo era então feito por intermédio da equação (42), substituindo-se o valor de  $M_u$  por  $M_t - M_m$ , ambos os valores em g.

O Quadro 3 apresenta os valores de massa específica de solos e partículas nos nove testes experimentais.

Quadro 3. Massa específica do solo e de partículas para os nove testes experimentais

Solo	Massa específica de partículas (g cm <sup>-3</sup> )	Massa específica do solo (g cm <sup>-3</sup> )		
		Teste 1	Teste 2	Teste 3
LV	2,735	1,42	1,43	1,44
LVA	2,289	1,05	1,06	1,07
PV	2,597	1,19	1,19	1,19

### 3.3.4.3. Teores de água inicial, da zona de transmissão e do solo saturado

O teor de água inicial do perfil foi obtida tanto por intermédio das amostras retiradas para a determinação da massa específica do solo antes do início dos testes (item 3.3.4.2) quanto por intermédio das sondas de TDR instaladas na lateral das colunas de solo, fazendo-se a média entre as duas determinações.

O teor de água da zona de transmissão foi calculado fazendo-se a média dos teores de água determinados, por intermédio do TDR, ao final dos testes experimentais. Para tal, foram utilizados apenas os teores de água medidos nas cinco sondas localizadas na parte inferior das colunas de solo, uma vez que percebia-se que o teor de água medido nas sondas superiores era praticamente o mesmo do solo saturado, indicando que o solo atingia a saturação nas camadas superiores (até cerca de 25 cm).

A umidade de saturação ( $\theta_s$ ) foi considerada com sendo igual à porosidade ( $\phi$ ) do solo, obtida por intermédio da equação (43).

$$\phi = \left( 1 - \frac{d_a}{d_p} \right) \quad (43)$$

O Quadro 4 apresenta os valores dessas umidades nos nove testes experimentais.

Quadro 4. Teores de umidade inicial ( $\theta_i$ ), da zona de transmissão ( $\theta_w$ ) e do solo saturado ( $\theta_s$ ) nos nove testes experimentais

Solo	$\theta_i$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )			$\theta_w$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )			$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )		
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 1	Teste 2	Teste 3
LV	0,113	0,100	0,093	0,398	0,413	0,424	0,479	0,477	0,474
LVA	0,327	0,320	0,318	0,521	0,509	0,524	0,541	0,537	0,534
PV	0,300	0,297	0,289	0,523	0,528	0,525	0,543	0,542	0,541

#### 3.3.4.4. Curva de retenção

Após a obtenção da condutividade hidráulica do solo saturado foram retiradas amostras não-deformadas dos solos contidos nas colunas de PVC para a determinação das curvas de retenção de água no solo.

As amostras foram saturadas por fluxo ascendente durante 48 horas. Posteriormente, estabeleceu-se que as amostras de solo seriam submetidas às tensões de 6, 10, 30, 60, 80, 100, 200, 500 e 1500 kPa. A tensão de 6 kPa (60 cm) foi aplicada utilizando-se mesa de tensão e as demais tensões foram aplicadas utilizando-se o extrator de Richards.

Devido à pouca quantidade de amostras não-deformadas, nem todos os pontos da curva de retenção puderam ser obtidos com a utilização dessas amostras, havendo necessidade de utilizar também amostras de solo deformadas. Desta maneira, as amostras não-deformadas foram submetidas apenas às tensões de 6, 10 e 30 kPa.

Para o solo PV utilizou-se apenas as amostras de solo submetidas às tensões de 6, 10, 30 kPa (amostras não-deformadas) e 1500 kPa (amostras deformadas) para o traçado da curva de retenção, o que foi devido ao fato de as amostras de solo (deformadas) submetidas às tensões 60 e 80 kPa apresentarem teor de água superiores aos das amostras submetidas a 10 e 30 kPa (não-deformadas), sendo, portanto, descartadas.

O Quadro 5 apresenta os valores dos teores de água gravimétricos referentes a cada tensão nos três solos do experimento.

Quadro 5. Valores dos teores de água no solo ( $\text{g g}^{-3}$ ) associados a diferentes tensões de água

Solo	Tensão aplicadas (kPa)								
	6*	10*	30*	60	80	100	200	500	1500
LV	0,151	0,117	0,082	0,079	0,075	0,074	0,068	0,060	0,059
LVA	0,355	0,335	0,295	0,273	0,270	0,267	0,263	0,246	0,240
PV	0,335	0,317	0,275	-	-	-	-	-	0,219

\* obtidos com uso amostras de solo não-deformadas

Aos dados apresentados no Quadro 5 foram ajustados modelos de curva de retenção de Brooks & Corey (BROOKS e COREY, 1964), que é representado pelas equações (32) e (33). O ajuste do modelo foi feito com o uso do programa computacional *Soil Water Retention Curve – SWRC* (DOURADO NETO et al., 2000), resultando nos valores apresentados no Quadro 6.

Quadro 6. Parâmetros do modelo de Brooks & Corey ajustados para os solos dos testes experimentais

Solo	Teste	Parâmetro			
		$\psi_b$ (cm)	$\lambda$	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )
LV	1	13,2	0,7470	0,085	0,479
	2	13,2	0,7470	0,086	0,477
	3	13,6	0,7470	0,086	0,474
LVA	1	8,7	0,4032	0,237	0,541
	2	9,1	0,4032	0,240	0,537
	3	9,1	0,4032	0,241	0,534
PV	1	10,4	0,3572	0,237	0,543
	2	10,6	0,3572	0,238	0,542
	3	10,7	0,3572	0,238	0,541

### **3.4. Avaliação do desempenho de GAML-c e das diferentes propostas de adequação dos parâmetros de entrada do modelo de GAML**

#### **3.4.1. Simulações feitas com GAML-c**

A determinação do parâmetro condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) feita com o emprego do método do permeâmetro de carga constante é de pouca confiabilidade, o que se deve ao fato do alto coeficiente de variação apresentado, que é, em geral, superior a 70% (MESQUITA e MORAES, 2004) e, freqüentemente, superior a 100% (WARRICK e NIELSEN, 1980). Assim sendo, alguns pesquisadores (SILVA e KATO, 1998) sugerem que a taxa de infiltração estável ( $Tie$ ) possa ser utilizada como representativa desse valor.

Desta maneira, para o emprego do GAML-c, considerou-se dois valores distintos de condutividade hidráulica do solo saturado:  $K_0$  obtido com o emprego do permeâmetro de carga constante (item 3.3.4.1) e  $Tie$ . Nas simulações também considerou-se duas condições distintas de umidade do perfil de solo, uma tomando o valor de  $\theta_s$  como teor de água máximo que o solo atingia após o empoçamento e outra tomando  $\theta_w$  como este valor. Assim sendo, foram feitas quatro simulações com o GAML-c para cada teste experimental, a fim de verificar quais os parâmetros que forneceriam melhores estimativas da taxa de infiltração, lâmina infiltrada e do perfil de umidade do solo.

#### **3.4.2. Adequações dos parâmetros de entrada do modelo de GAML utilizadas nas avaliadas**

Simulou-se o processo de infiltração em todos os testes experimentais utilizando-se o GAML-t e o modelo de GAML tanto em sua forma original quanto utilizando-se adequações de seus parâmetros de entrada recomendadas para solos brasileiros. As adequações utilizadas foram as quatro recomendadas por CECÍLIO et al. (2003) e a recomendada por SILVA e KATO (1998) para Latossolo Vermelho-Amarelo. Comparou-se a performance obtida por estas simulações com a performance obtida pelo procedimento de aplicação de GAML-c que apresentou boas estimativas em todos os testes experimentais.

O Quadro 7 são apresentadas as simulações feitas para cada teste experimental com os respectivos parâmetros de entrada usados.

Quadro 7. Parâmetros modificados na realização das simulações

<b>Simulação</b>	<b><math>\theta_s</math></b>	<b><math>K_0</math></b>	<b><math>\psi_f</math></b>	<b>Fonte</b>
S1	melhor estimativa feita por GAML-c			GAML-c
S2	$\theta_w$	Tie	eq. (35)	GAML-t
S3	$\theta_s$	$K_0$	eq.(16)	MEIN e LARSON (1973)
S4	$\theta_w$	0,5 $K_0$	$\psi(\theta_i)$	CECÍLIO et al. (2003)
S5	$\theta_w$	$K_0$	eq.(14)	CECÍLIO et al. (2003)
S6	$\theta_w$	Tie	eq.(14)	CECÍLIO et al. (2003)
S7	$\theta_w$	Tie	$[\psi(\theta_i)+\psi(\theta_w)]/2$	CECÍLIO et al. (2003)
S8	$\theta_s$	Tie	eq.(16)	SILVA e KATO (1998)

### 3.4.3. Análise estatística

Ainda não existe consenso entre pesquisadores da área a respeito de quais são os métodos estatísticos mais recomendados para a análise da performance de modelos hidrológicos. Diversos trabalhos utilizam diferentes índices estatísticos, dificultando a comparação entre performances obtidas. Além disso, quando o assunto é especificamente a modelagem da infiltração, muitos pesquisadores lançam mão apenas de uma análise gráfica das curvas modeladas.

Tendo em vista estes fatos, optou-se por calcular alguns dos índices estatísticos atualmente mais utilizados para avaliação de performance modelos hidrológicos e hidroclimáticos. Ressalta-se que os índices estatísticos foram aplicados para avaliar a performance dos modelos para a estimativa tanto da lâmina infiltrada quanto da taxa de infiltração ao longo do tempo.

CAMARGO e SENTELHAS (1997) propõem que ao correlacionar os valores estimados e observados experimentalmente sejam considerados o coeficiente de correlação (r); o índice de concordância (d), proposto por WILLMOTT (1981); e o índice de confiança (c).

Segundo CAMARGO e SENTELHAS (1997), a precisão do modelo é dada pelo coeficiente de correlação (r) e a exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados, matematicamente essa aproximação é dada pelo índice de concordância (d), calculado pela equação (44). Seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^J (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (44)$$

em que

- J = número de observações;
- O = valor observado experimentalmente;
- E = valor estimado pelo modelo; e
- $\bar{O}$  = média dos valores observados experimentalmente.

O índice de confiança (c) permite analisar conjuntamente a precisão e a exatidão dos resultados obtidos, sendo o produto do coeficiente de correlação (r) pelo índice de concordância (d). No Quadro 8 são apresentados os critérios de avaliação do desempenho de modelos quanto ao seu índice de confiança.

Quadro 8. Análise do desempenho do modelo com base no índice de confiança (CAMARGO e SENTELHAS, 1997)

<b>Valor de c</b>	<b>Desempenho</b>
> 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	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

O coeficiente de eficiência (E) vem sendo utilizado para a avaliação de modelos hidrológicos (WILCOX et al., 1990; RISSE et al., 1995; YU, 1999). NASH e SUTCLIFFE (1970) definiram este índice, que varia de  $-\infty$  a 1, com os maiores valores indicando melhor performance, por intermédio da equação (45).

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^J (O_i - \bar{O})^2} \quad (45)$$

Todavia, para LEGATES e McCABE Jr. (1999) o uso dos quadrados das diferenças no cálculo de d e E faz com que estes índices acabem por apresentar valores relativamente altos, mesmo quando as performances dos modelos sejam ruins. Assim, os autores propõem que se use os índices coeficiente de eficiência ajustado (E') e índice de concordância ajustado (d'), calculados pelas equações (46) e (47).

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J |O_i - E_i|}{\sum_{i=1}^J |O_i - \bar{O}|} \quad (46)$$

$$d' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J |O_i - E_i|}{\sum_{i=1}^J (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (47)$$

Ressalta-se que o índice d' foi utilizado para calcular um índice de confiança ajustado (c'), mais rigoroso que o índice c, por intermédio do produto de d' por r. A análise do desempenho conforme este índice c' também foi feita com base nos valores do Quadro 8.

Além disso, LEGATES e McCABE Jr. (1999) indicam que, como informação adicional, deva-se incluir o erro médio absoluto (EMA) e a raiz do erro médio quadrado (REMQ), equações (48) e (49), respectivamente, em conjunto com gráficos que apresentem os pontos observados e estimados e os coeficiente de ajuste de uma função linear (a e b) entre estes.

$$\text{EMA} = \frac{\sum_{i=1}^J |O_i - E_i|}{J} \quad (48)$$

$$\text{REMQ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^J (O_i - E_i)^2}{J}} \quad (49)$$

Finalmente, CHONG et al. (1982) utiliza o erro médio percentual (EMP), expresso pela equação:

$$\text{EMP} = \frac{\sum_{i=1}^J \frac{|O_i - E_i|}{O_i}}{J} 100 \quad (50)$$

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Simulações feitas com o GAML-c**

Apesar de terem sido calculados todos estes índices estatísticos do item 3.4.3, apenas o índice  $c'$  foi determinante na avaliação das performances das simulações realizadas, sendo os coeficientes estatísticos  $E'$ , REMQ, EMA e EMP utilizados apenas para auxiliar nas discussões. Desta maneira, os demais coeficientes são apenas apresentados no Anexo, onde também são tem-se gráficos confrontando os valores de  $T_i$  e  $I$  observados e estimados por cada uma das simulações.

#### **4.1.1. Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)**

As Figuras 21, 22 e 23 apresentam as curvas simuladas de  $T_i$  e  $I$  ao longo do tempo, bem como os seus valores experimentais nos três testes realizados no solo LVA. Nos Quadros 9, 10 e 11 são apresentados os coeficientes estatísticos  $E'$ ,  $c'$ , REMQ, EMA e EMP, e o desempenho das simulações realizadas na estimativa de  $I$  e  $T_i$  feitas nos três testes experimentais realizados.

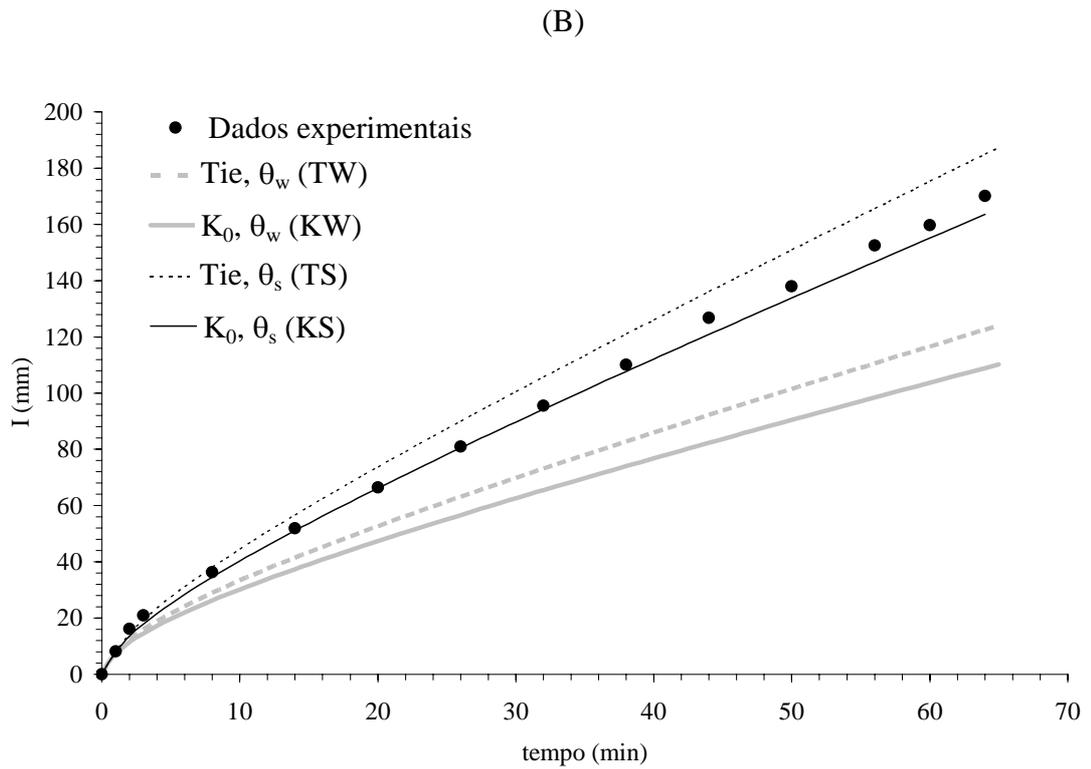
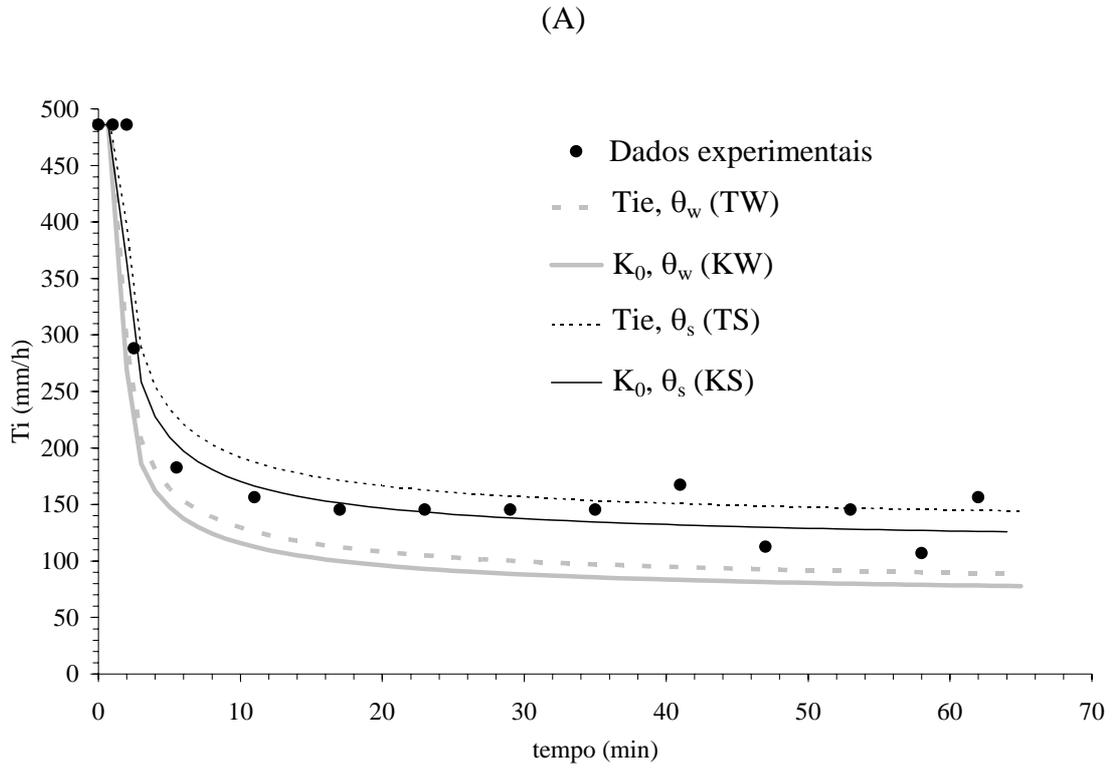
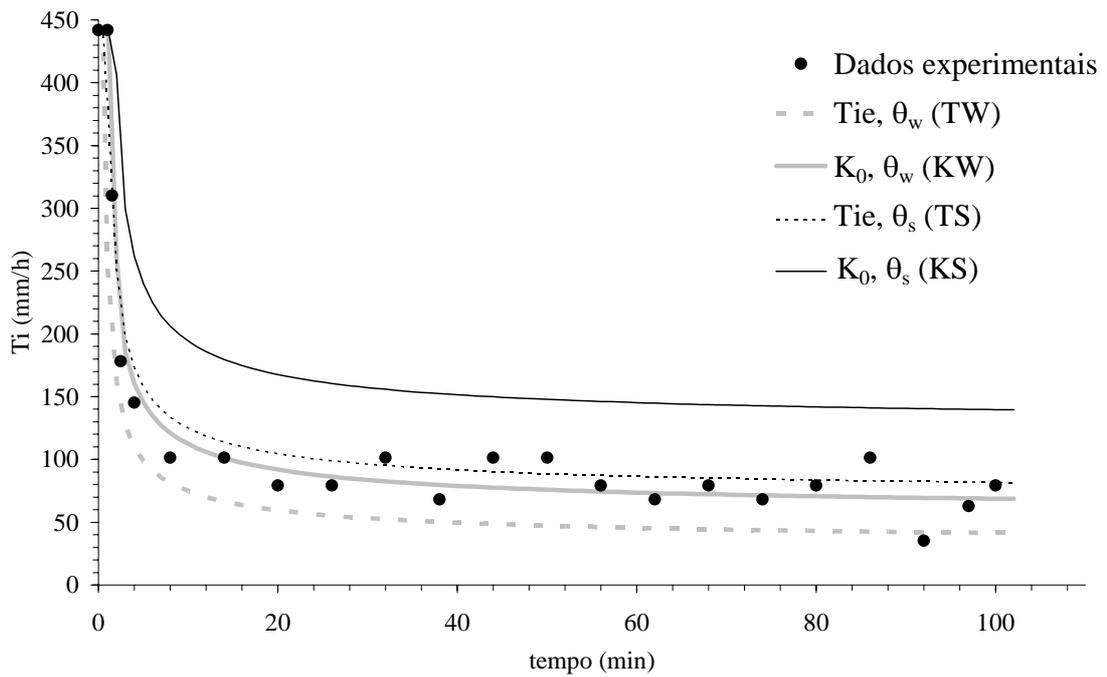


Figura 21. Taxas de infiltração (A) e lâminas infiltradas (B) medidas e estimadas pelo GAML-c ao longo do tempo no 1º teste experimental do LVA.

(A)



(B)

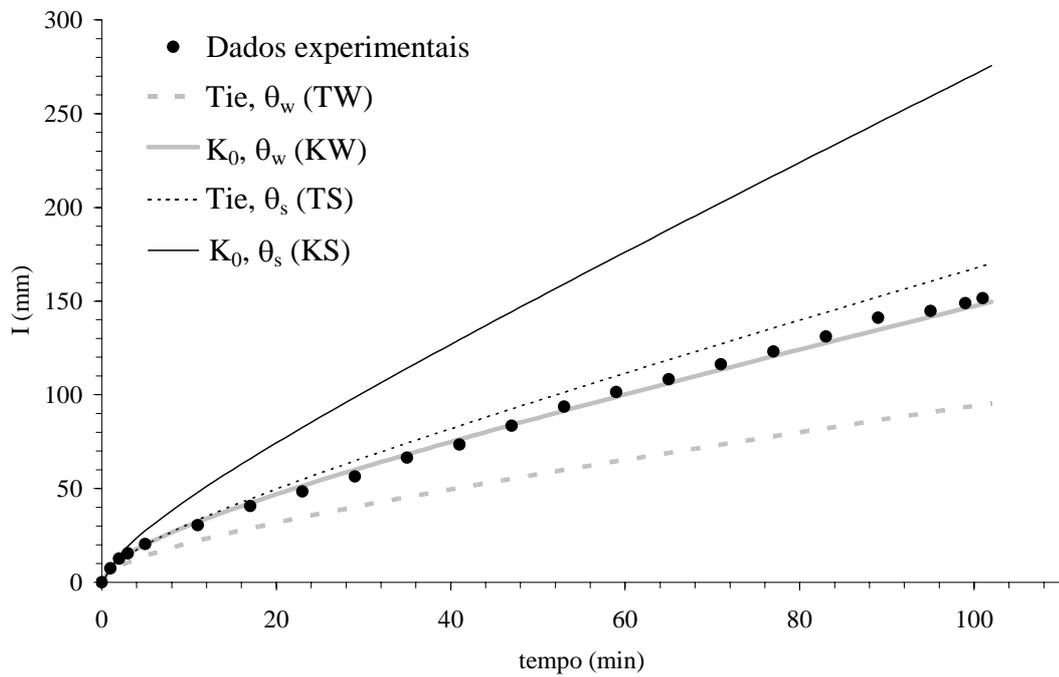
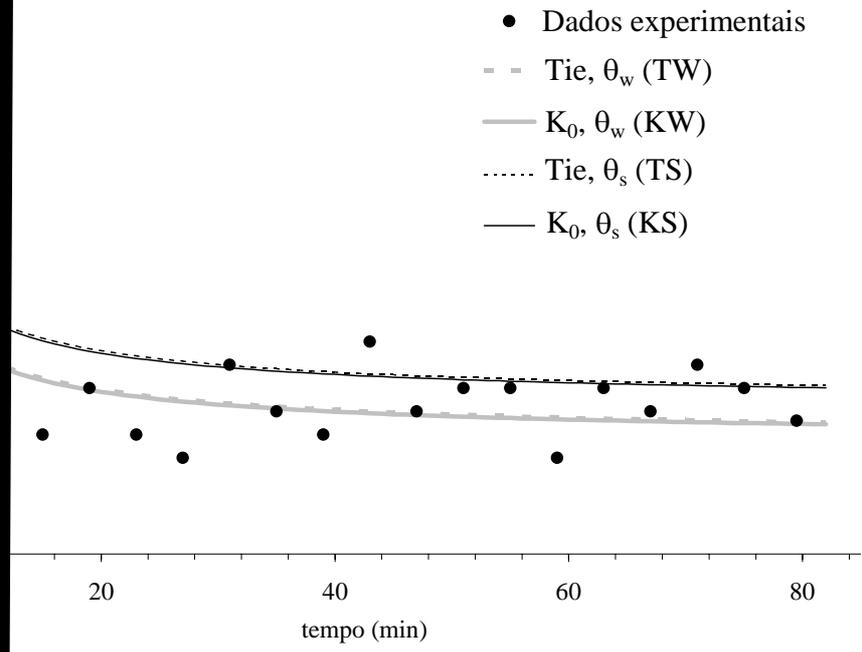
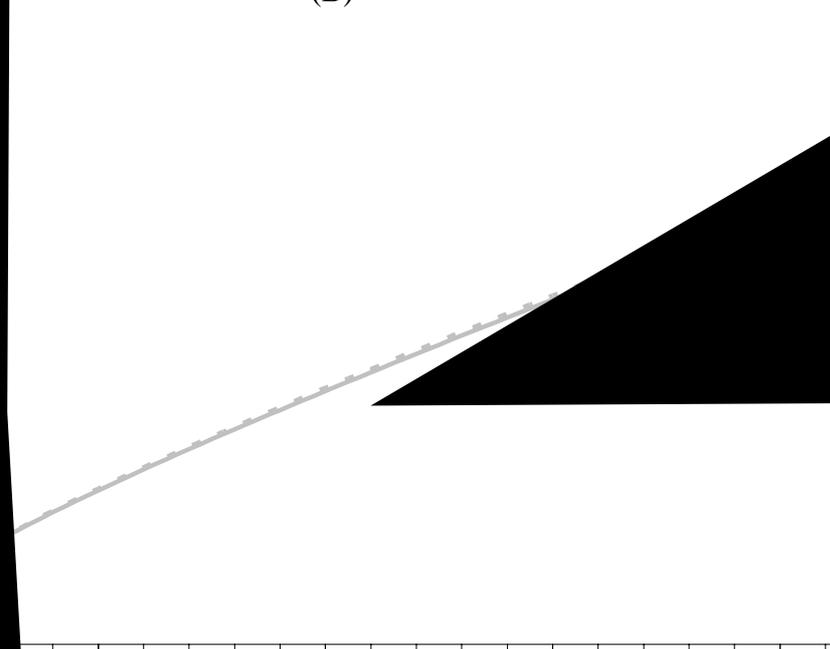


Figura 22. Taxas de infiltração (A) e lâminas infiltradas (B) medidas e estimadas pelo GAML-c ao longo do tempo no 2º teste experimental do LVA.

(A)



(B)



Quadro 9. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 1º teste experimental do LVA

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		K <sub>0</sub> , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		K <sub>0</sub> , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>E'</b>	0,54	0,40	0,39	0,27	0,83	0,78	0,94	0,77
<b>c'</b>	0,73	0,68	0,64	0,62	0,92	0,86	0,97	0,85
<b>Desempenho</b>	Bom	Bom	Mediano	Mediano	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
<b>REMQ</b>	27,25	70,42	35,42	82,65	9,53	30,32	3,57	36,99
<b>EMA</b>	22,29	54,94	29,16	67,28	8,07	20,54	2,83	21,67
<b>EMP</b>	23%	28%	30%	36%	9%	12%	4%	10%

Quadro 10. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 2º teste experimental do LVA

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		K <sub>0</sub> , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		K <sub>0</sub> , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>E'</b>	0,32	0,17	0,95	0,77	0,80	0,66	-0,41	-0,23
<b>c'</b>	0,59	0,59	0,97	0,87	0,91	0,80	0,53	0,21
<b>Desempenho</b>	Sofrível	Sofrível	Ótimo	Ótimo	Ótimo	M. bom	Sofrível	Péssimo
<b>REMQ</b>	34,46	63,47	2,62	18,27	9,84	24,93	71,82	75,31
<b>EMA</b>	28,84	47,81	2,20	13,18	8,39	19,47	59,73	70,93
<b>EMP</b>	33%	39%	3%	15%	10%	21%	63%	85%

Quadro 11. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 3º teste experimental do LVA

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		K <sub>0</sub> , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		K <sub>0</sub> , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>E'</b>	0,93	0,58	0,93	0,57	0,57	0,55	0,60	0,55
<b>c'</b>	0,96	0,72	0,96	0,71	0,81	0,68	0,82	0,69
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Bom	Ótimo	Bom	M. bom	Bom	M. bom	Bom
<b>REMQ</b>	3,29	37,92	3,41	38,64	21,04	37,48	19,72	36,91
<b>EMA</b>	2,73	28,06	2,79	28,57	17,50	30,06	16,45	29,41
<b>EMP</b>	5%	21%	5%	21%	18%	29%	17%	28%

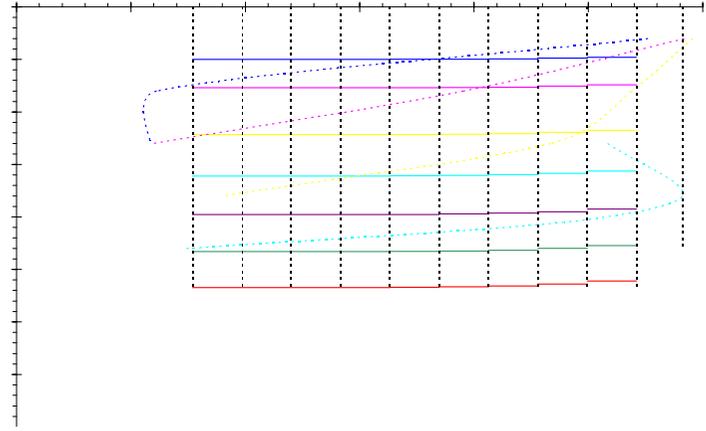
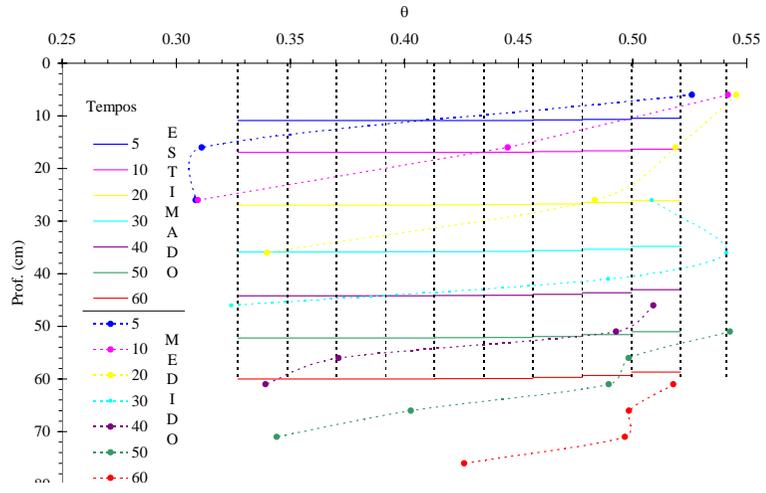
Verifica-se que, de maneira geral, as quatro formas de aplicação do GAML-c estimaram bem os valores de  $T_i$  e  $I$ , excetuando-se o 2º teste experimental. Neste teste, observou-se desempenho inferior da simulação que utilizou a  $T_{ie}$  como condutividade hidráulica do solo e  $\theta_w$  como umidade da zona de transmissão (TW), e também da que fez uso de  $K_0$  como condutividade hidráulica e  $\theta_s$  como umidade da zona de transmissão (KS). A simulação TW tendeu subestimar  $T_i$  e  $I$  enquanto a KS tendeu superestimá-los. Na simulação KS, do 2º teste experimental, os valores negativos de  $E'$  indica a ineficiência das simulações (WILCOX et al., 1990).

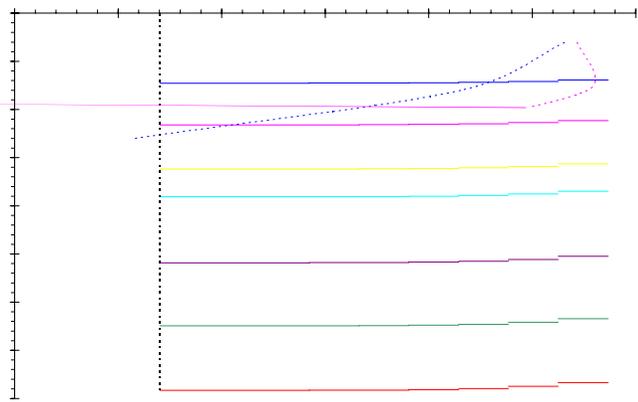
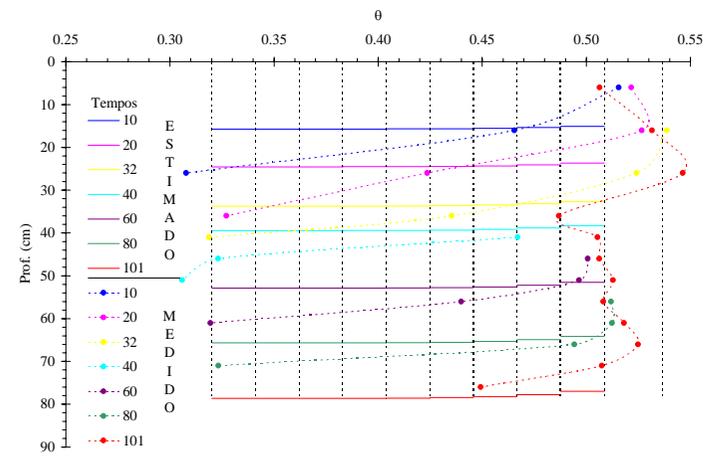
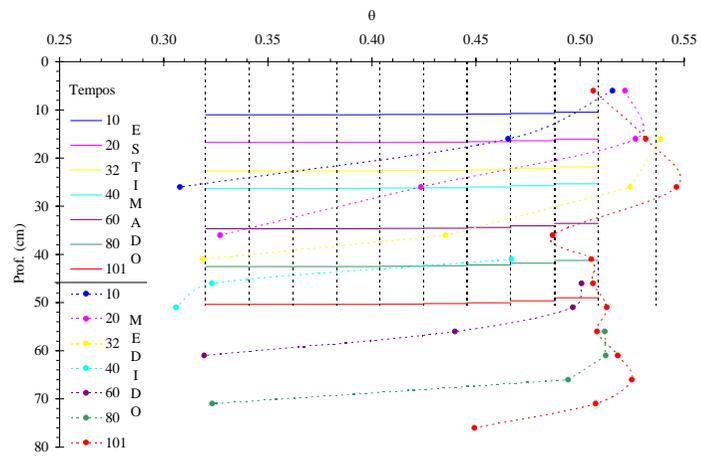
No 3º teste experimental, observa-se que as simulações que consideraram um mesmo valor para umidade da zona de transmissão ( $\theta_w$  ou  $\theta_s$ ), independentemente do parâmetro adotado como condutividade hidráulica, tiveram desempenhos muito próximos, sendo que as curvas simuladas de  $T_i$  e de  $I$  quase se sobrepuseram. Tal fato deveu-se à grande proximidade entre os valores de  $K_0$  e  $T_{ie}$  neste teste.

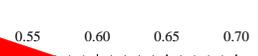
Com relação aos parâmetros  $K_0$  e  $T_{ie}$ , percebeu-se que no segundo teste experimental o valor de  $K_0$  foi maior que o da  $T_{ie}$  (Quadro 2 da página 47), quando o esperado era justamente o contrário. O maior valor de  $K_0$  deveu-se em parte a uma maior condutividade hidráulica, determinada pelo método do permeâmetro de carga constante, apresentada pelo solo contido em dois dos módulos que formavam a coluna, onde pode ter havido perturbação e rearranjo dos agregados, quando da desmontagem da coluna de solo e retirada destes módulos; além de poder ter havido fluxo preferencial da água pela interface entre o solo e as paredes dos módulos. Ressalta-se também que pode ter havido subestimativa do valor da  $T_{ie}$  neste teste, uma vez que esta foi calculada com base na média dos últimos valores experimentais de  $T_i$ .

Finalmente, considerando os três testes experimentais, a simulação que utilizou em conjunto os parâmetros  $T_{ie}$  e  $\theta_s$  (TS) tendeu apresentar boas estimativas, indicando que a  $T_{ie}$  pode ser utilizada para representar a condutividade hidráulica do perfil do solo. Nestas simulações, o erro médio percentual (EMP) máximo foi igual a 18% e 29%, para  $I$  e  $T_i$ , respectivamente; sendo que seu desempenho, conforme o índice de confiança ajustado ( $c'$ ), mais rigoroso, nunca foi inferior a “Bom” para  $T_i$  e “Muito Bom” para  $I$ .

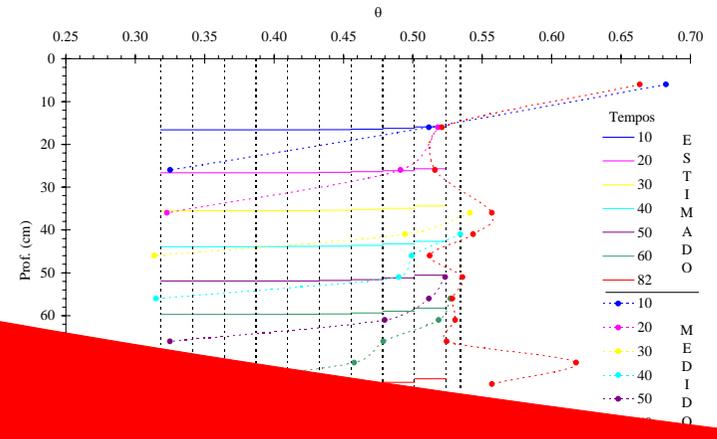
As Figuras 24, 25 e 26 apresentam os perfis de umidade medidos e estimados pelas simulações feitas com a utilização do GAML-c nos três testes experimentais do LVA.







pos  
 10 E  
 20 S  
 30 T  
 40 I  
 50 M  
 60 A  
 70 D



Nota-se nas simulações relativas aos três testes experimentais que, fixado um valor qualquer de tempo, houve pequena diferença nas profundidades simuladas de cada sub-frente de umedecimento, resultado já esperado, uma vez que o LVA é um solo com alta macroporosidade que possui comportamento de retenção de água semelhante ao de solos arenosos, o que faz com que a umidade na frente de umedecimento varie pouco com a profundidade.

De modo geral, as simulações que consideraram que o solo atingia apenas a umidade  $\theta_w$  após o tempo de empoçamento (KW e TW) apresentaram menores estimativas da profundidade das sub-frentes de umedecimento quando comparadas às que utilizaram  $\theta_s$ . Tal fato deve-se os menores valores de condutividade hidráulica equivalente do perfil do solo provenientes da queda da umidade de  $\theta_s$  para  $\theta_w$ .

No 3º teste experimental percebeu-se, nas profundidades 6 cm e 71 cm, dois valores de umidade medida extremamente altos, extrapolando, inclusive, a umidade de saturação do solo. Tais valores se devem a erros nas leituras feitas com o TDR, não representando valores reais da umidade do solo.

Não houve uma simulação que melhor estimasse o perfil de umidade nos três testes experimentais do LVA. No 1º teste experimental o perfil de umidade foi melhor estimado pela simulação que utilizou  $K_0$  com  $\theta_s$  (KS) e Tie com  $\theta_s$  (TS). No 2º teste experimental, houve melhor estimativa do perfil de umidade com as simulações que utilizaram  $K_0$  com  $\theta_w$  (KW) e Tie com  $\theta_s$  (TS). Finalmente, no 3º teste experimental as combinações  $K_0$  com  $\theta_w$  (KW) e Tie com  $\theta_w$  (TW) simularam melhor o perfil de umidade. Assim como ocorrido para a estimativa de  $T_i$  e  $I$ , no geral, os melhores perfis foram estimados pela simulação TS.

#### **4.1.2. Argissolo Vermelho-Amarelo (PV)**

As Figuras 27, 28 e 29 apresentam as curvas simuladas de  $T_i$  e  $I$  ao longo do tempo, bem como os seus valores experimentais nos três testes realizados no solo PV. Nos Quadros 12, 13 e 14 são apresentados os coeficientes estatísticos  $E'$ ,  $c'$ , REMQ, EMA e EMP, e o desempenho das simulações realizadas na estimativa de  $I$  e  $T_i$  feitas nos três testes experimentais realizados.

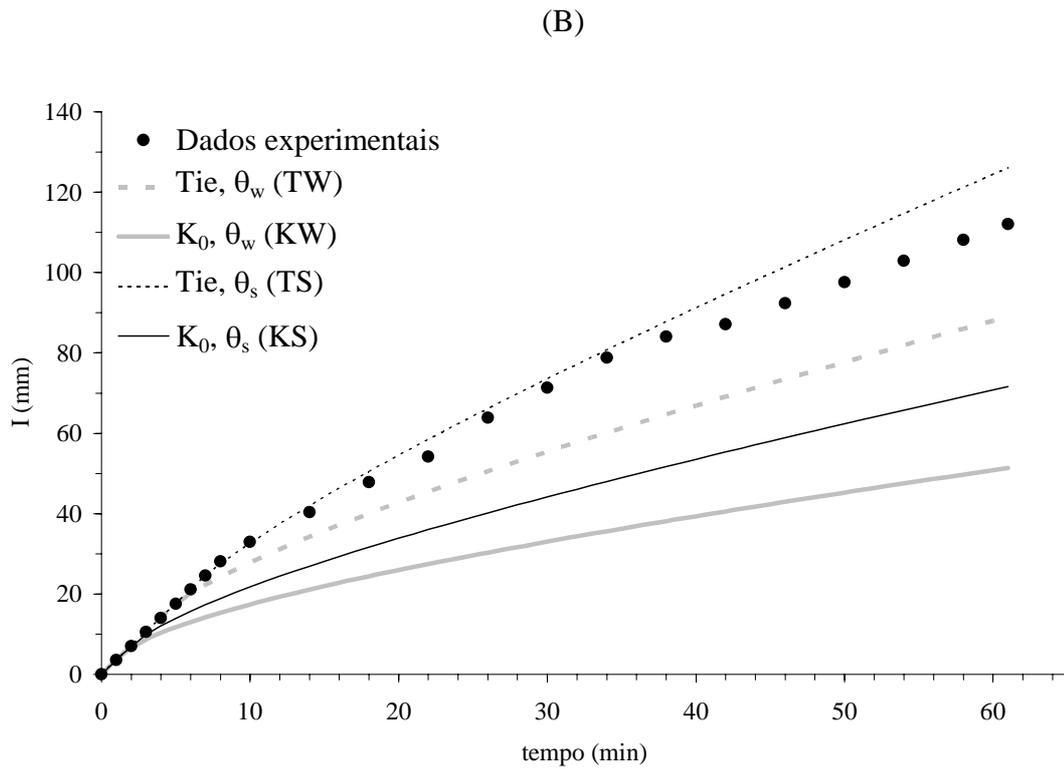
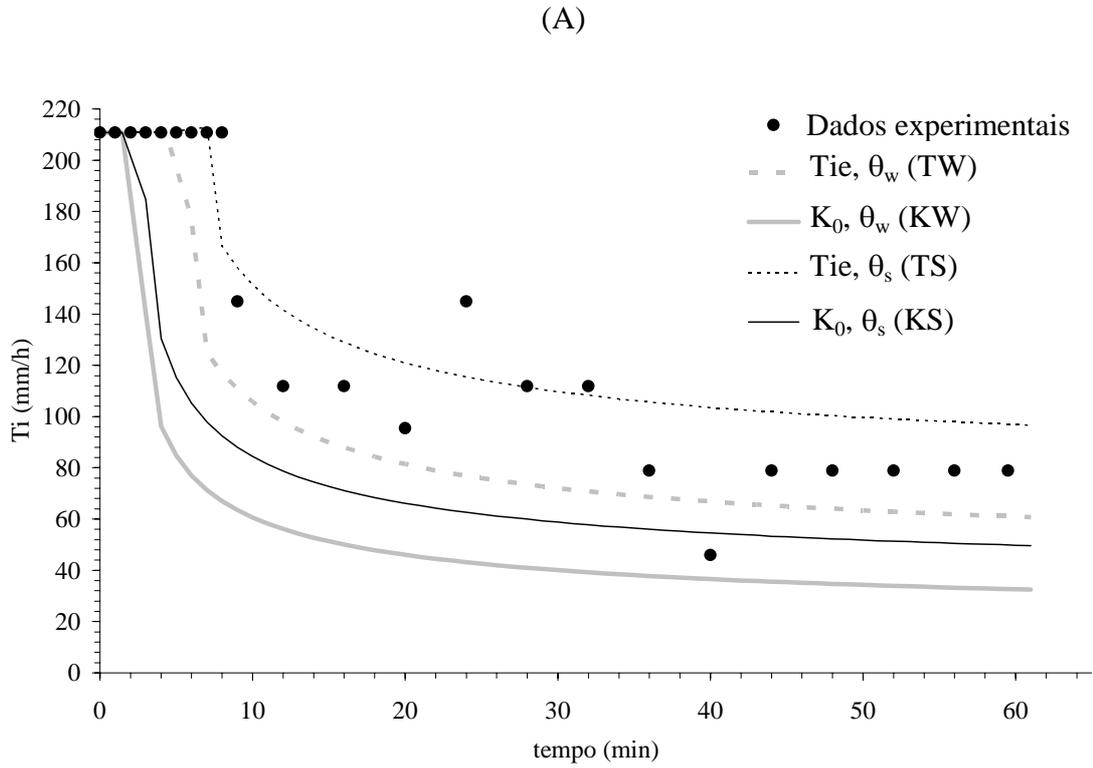


Figura 27. Taxas de infiltração (A) e lâminas infiltradas (B) medidas e estimadas pelo GAML-c ao longo do tempo no 1º teste experimental do PV.

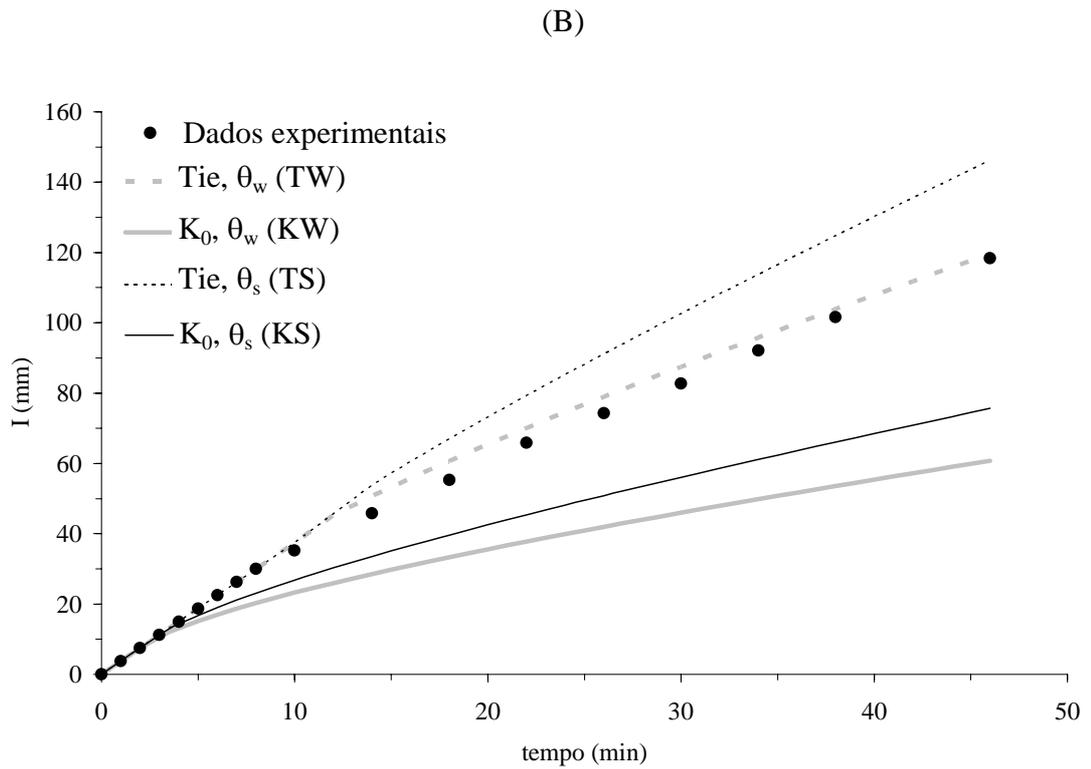
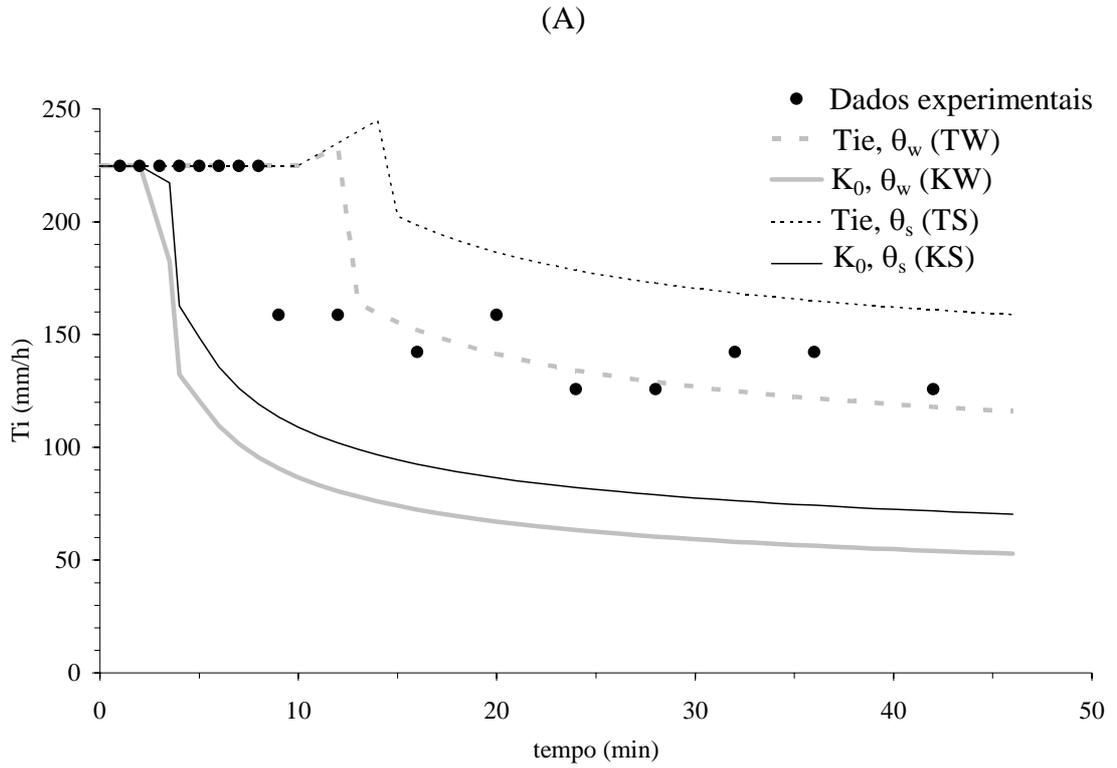


Figura 28. Taxas de infiltração (A) e lâminas infiltradas (B) medidas e estimadas pelo GAML-c ao longo do tempo no 2º teste experimental do PV.

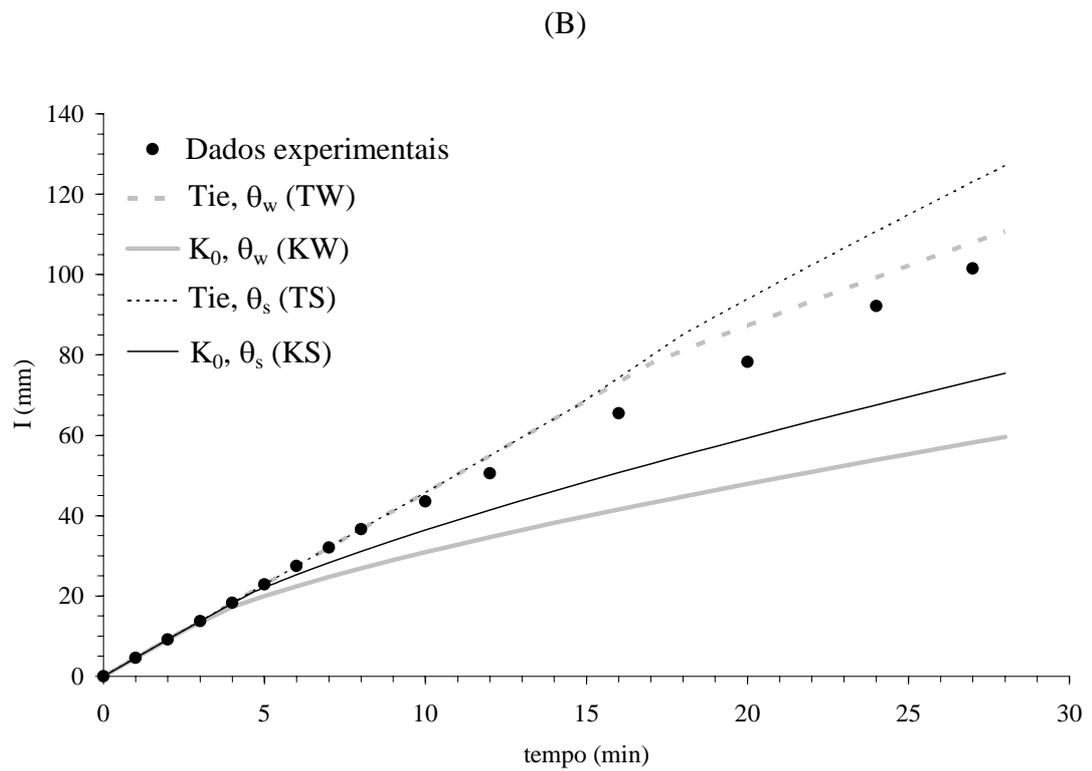
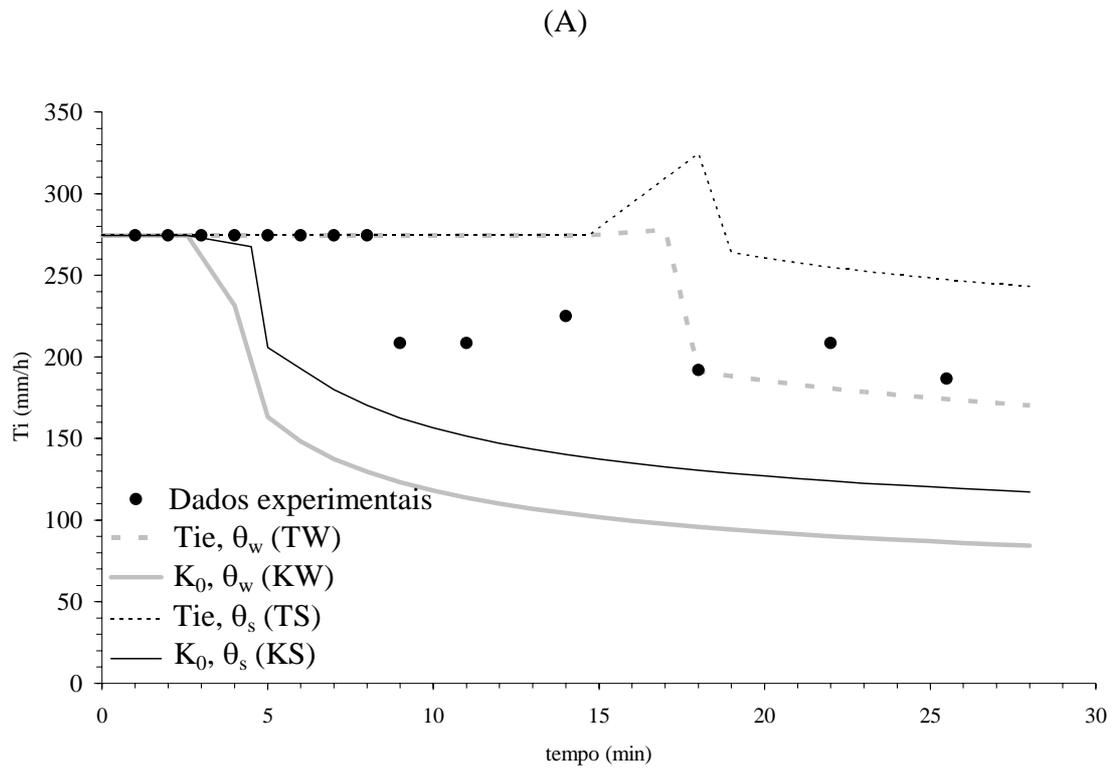


Figura 29. Taxas de infiltração (A) e lâminas infiltradas (B) medidas e estimadas pelo GAML-c ao longo do tempo no 3º teste experimental do PV.

Quadro 12. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 1º teste experimental do PV

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		K <sub>0</sub> , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		K <sub>0</sub> , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>E'</b>	0,68	0,51	0,13	-0,27	0,88	0,72	0,41	0,10
<b>c'</b>	0,82	0,68	0,44	0,26	0,94	0,80	0,64	0,42
<b>Desempenho</b>	Muito Bom	Bom	Mau	Péssimo	Ótimo	Muito Bom	Mediano	Mau
<b>REMQ</b>	13,37	37,15	34,61	80,47	6,08	21,38	23,63	60,08
<b>EMA</b>	10,27	26,40	27,79	68,72	3,90	15,02	19,01	48,81
<b>EMP</b>	14%	21%	42%	51%	5%	18%	29%	35%

Quadro 13. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 2º teste experimental do PV

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		K <sub>0</sub> , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		K <sub>0</sub> , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>E'</b>	0,94	0,79	0,37	-0,81	0,72	0,43	0,55	-0,37
<b>c'</b>	0,97	0,82	0,61	0,22	0,88	0,51	0,73	0,31
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Muito Bom	Mediano	Péssimo	Ótimo	Péssimo	Bom	Péssimo
<b>REMQ</b>	2,82	18,44	26,28	83,78	12,92	35,43	19,25	64,09
<b>EMA</b>	1,92	8,76	19,10	74,18	8,50	23,40	13,80	56,21
<b>EMP</b>	3%	6%	29%	44%	11%	16%	21%	33%

Quadro 14. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 3º teste experimental do PV

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		K <sub>0</sub> , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		K <sub>0</sub> , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>E'</b>	0,90	0,51	0,46	-1,51	0,80	0,27	0,67	-0,62
<b>c'</b>	0,95	0,52	0,67	0,18	0,91	0,30	0,81	0,31
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Sofrível	Bom	Péssimo	Ótimo	Sofrível	Muito Bom	Péssimo
<b>REMQ</b>	4,28	29,78	19,70	99,32	9,00	38,73	12,40	66,67
<b>EMA</b>	2,63	16,75	13,59	85,54	5,00	25,01	8,20	55,20
<b>EMP</b>	4%	8%	22%	37%	6%	12%	12%	24%

Observa-se que as simulações que utilizaram o parâmetro  $K_0$  (KW e KS) não estimaram bem os dados experimentais em nenhum dos três testes, chegando a apresentar valores negativos de  $E'$  para  $T_i$  em todos os testes. Estas duas simulações sempre subestimaram tanto  $T_i$  quanto  $I$ . Observou-se que nos três testes experimentais o valor da  $T_{ie}$  foi, em média, 2,4 vezes superior ao  $K_0$ , caracterizando uma discrepância muito grande entre valores que deveriam ser próximos. Existe grande possibilidade de que o ciclo de umedecimento-secagem-umedecimento que o solo sofreu depois dos testes experimentais e antes da determinação de  $K_0$  tenha causado alterações na estrutura deste por intermédio de rearranjo de partículas do solo, o que resultou em certo preenchimento de macroporos com conseqüente redução da condutividade hidráulica.

Esse fato reforça a idéia de que a  $T_{ie}$  é um melhor estimador da condutividade hidráulica do solo, em substituição a  $K_0$  determinado por intermédio da metodologia do permeâmetro de carga constante, que acaba por alterar a estrutura das amostras de solo.

As simulações TW e TS apresentaram melhores resultados, todavia promoveram uma estimativa pouco confiável de  $T_i$  nos instantes logo após o tempo de empoçamento, calculando, no 2º e 3º testes, uma taxa de infiltração superior à intensidade de precipitação. Este fato é atribuído, nesse solo, ao grande aumento que o gradiente hidráulico sofre nestes instantes, uma vez que o valor do potencial matricial na frente de umedecimento passa de  $\psi_b$  a valores de  $\psi$  relativos aos teores de água nas sub-frentes de umedecimento.

Por fim, nos três testes experimentais, a simulação TW ( $T_{ie}$  e  $\theta_w$ ) apresentou boas estimativas tanto de  $T_i$  quanto de  $I$ . Nas estimativas feitas para os três testes experimentais, o erro médio percentual (EMP) máximo foi igual a 14% e 21%, para  $I$  e  $T_i$ , respectivamente. O índice  $c'$  para a estimativa de  $T_i$  no 3º teste experimental apresentou desempenho “Sofrível”. Isto ocorreu devido à falha de TW ao estimar um tempo de empoçamento muito grande, levando a grandes discrepâncias entre os valores estimados e calculados, e reduzindo drasticamente o índice  $d'$ . Todavia, quando se leva em consideração os índices REMQ, EMA e EMP, verifica-se valores iguais a 29,78 mm  $h^{-1}$ , 16,75 mm  $h^{-1}$  e 8%, respectivamente, que representam erros muito baixos.

As Figuras 30, 31 e 32 apresentam os perfis de umidade medidos e estimados pelas simulações feitas com a utilização do GAML-c nos três testes experimentais do PV.

TW

KW

$\theta$

TS

Prof. (cm)

Tempos  
10 -  
20 -  
30 -  
50 -  
61 -  
10 -  
20 -  
40 -  
fim

M

KS

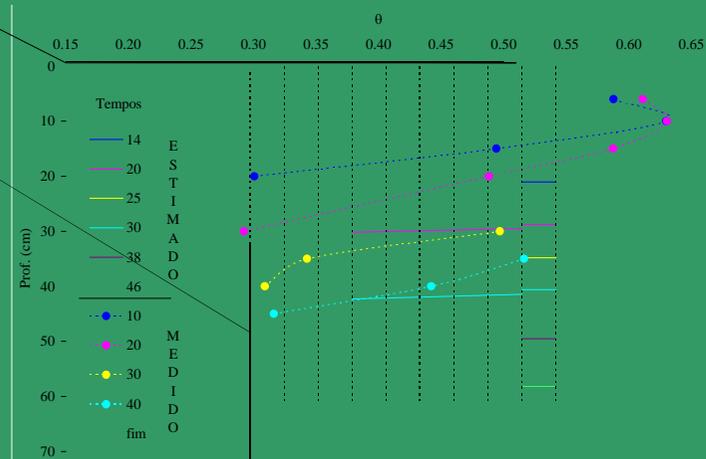
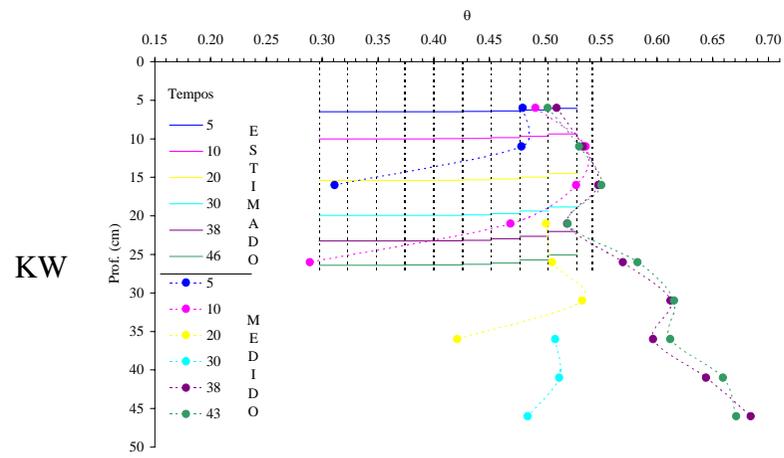
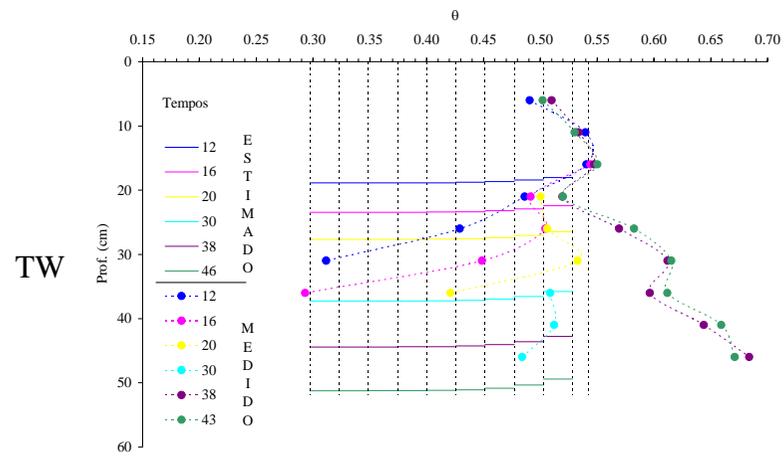


Figura 30. Perfis de umidade medidos e estimados por intermédio das simulações feitas com o GAML-c no 1º teste experimental do PV.



0102030  
405060700.15

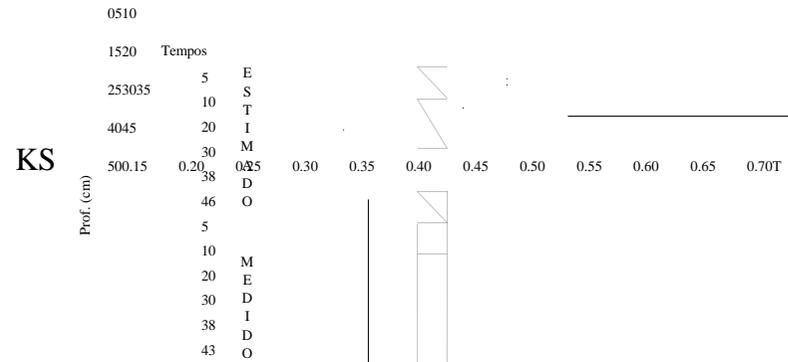
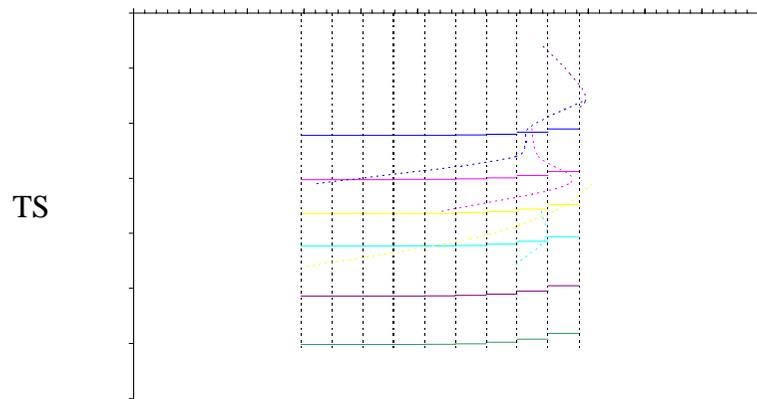


Figura 31. Perfis de umidade medidos e estimados por intermédio das simulações feitas com o GAML-c no 2º teste experimental do PV.

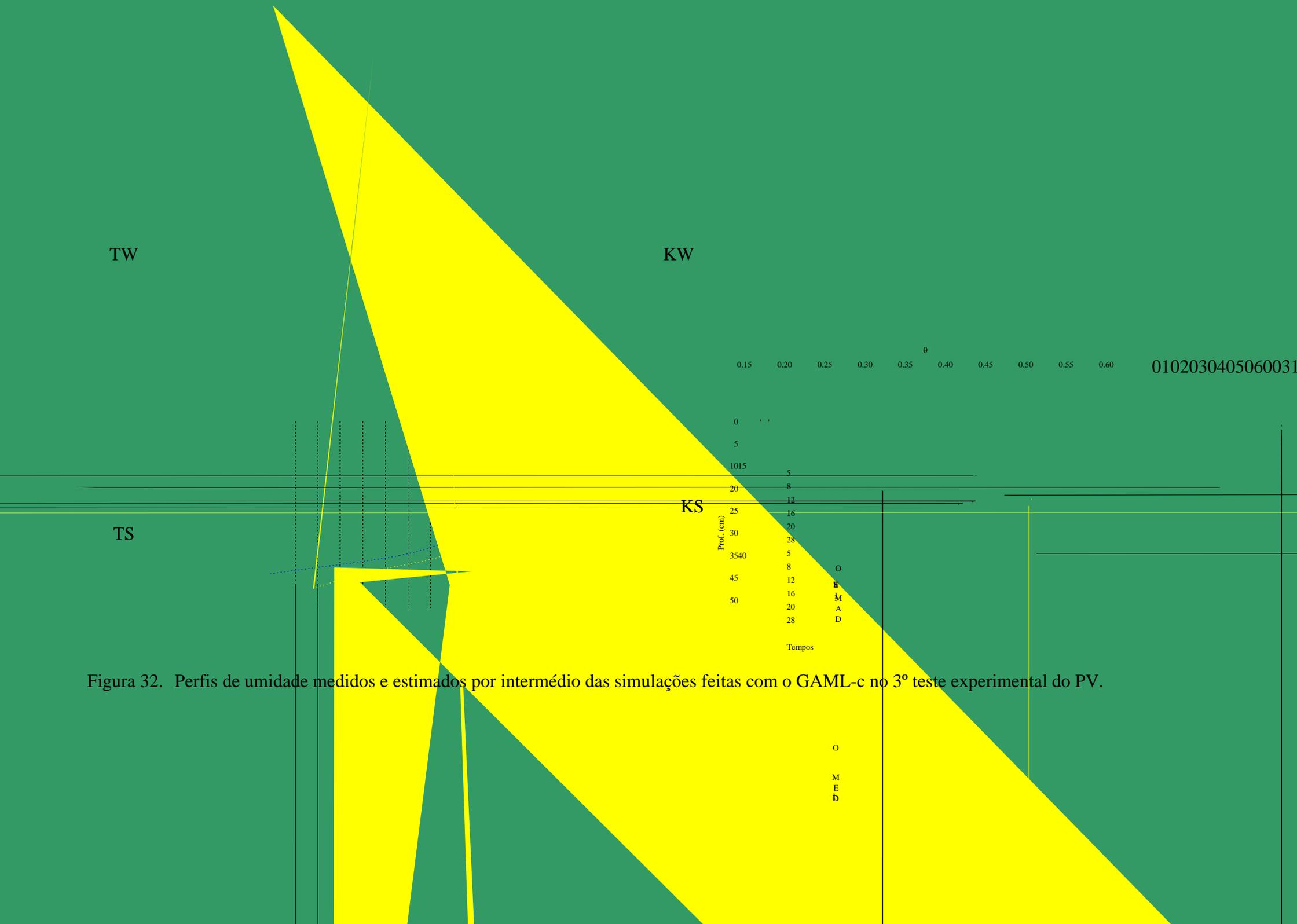


Figura 32. Perfis de umidade medidos e estimados por intermédio das simulações feitas com o GAML-c no 3º teste experimental do PV.

Nota-se que para o PV foram estimadas maiores diferenças entre as profundidades das diversas sub-frentes de umedecimento simuladas, fixado um tempo qualquer, fato condizente com a realidade uma vez que o solo em questão tem comportamento típico de solos argilosos no que diz respeito à retenção de água, fazendo com que haja maior variação da umidade com a profundidade.

Do mesmo modo que verificado para o LVA, as simulações que consideraram que o solo atingia apenas a umidade  $\theta_w$  após o tempo de empoçamento apresentaram menores estimativas da profundidade das sub-frentes de umedecimento quando comparadas às que utilizaram  $\theta_s$ .

Verificaram-se valores de umidade medida extremamente altos em muitos pontos do 1º e 2º testes experimentais, semelhante ao ocorrido no 3º teste do LVA. Tais valores também se devem a erros nas leituras feitas com o TDR, não representando valores reais da umidade do solo.

Assim como ocorrido para as estimativas de  $T_i$  e  $I$ , as simulações que utilizaram  $K_0$  (KW e KS) não estimaram bem o perfil de umidade. As melhores estimativas foram providas pelas simulações TW e TS, sendo que os perfis estimados por TW foram ligeiramente melhores, principalmente para o 2º teste experimental.

#### **4.1.3. Latossolo Vermelho (LV)**

As Figuras 33, 34 e 35 apresentam as curvas simuladas de  $T_i$  e  $I$  ao longo do tempo, bem como os seus valores experimentais nos três testes realizados no solo LV. Nos Quadros 15, 16 e 17 são apresentados os coeficientes estatísticos  $E'$ ,  $c'$ , REMQ, EMA e EMP, e o desempenho das simulações realizadas na estimativa de  $I$  e  $T_i$  feitas nos três testes experimentais realizados.

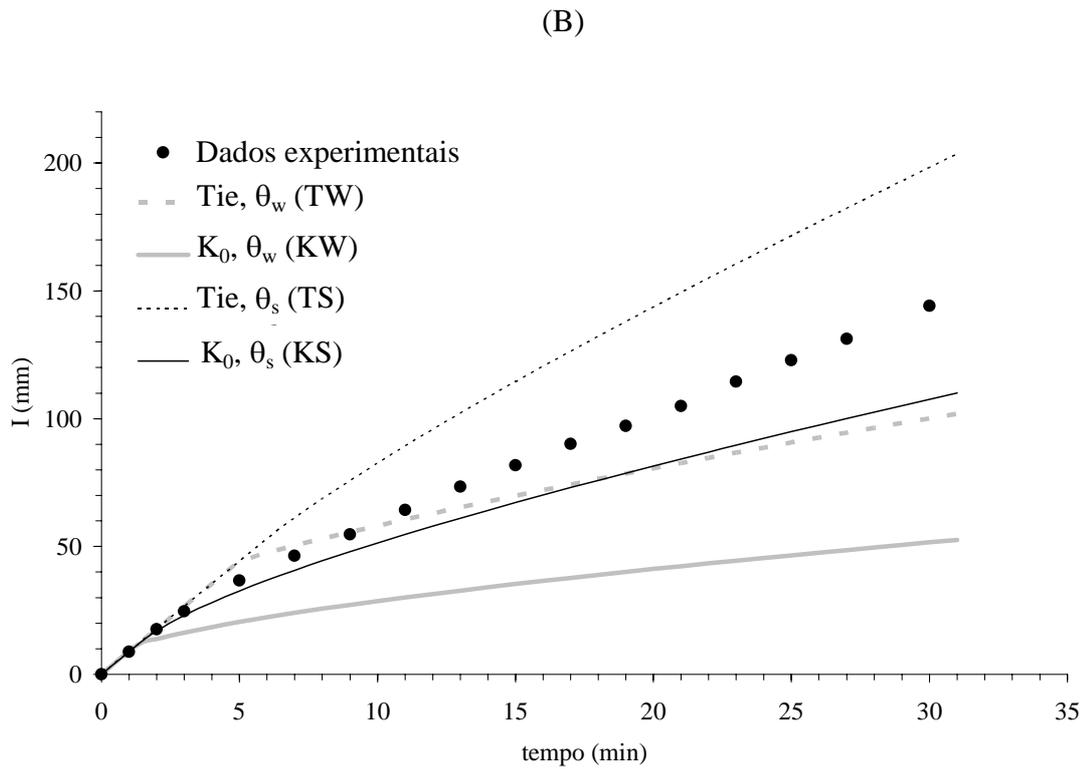
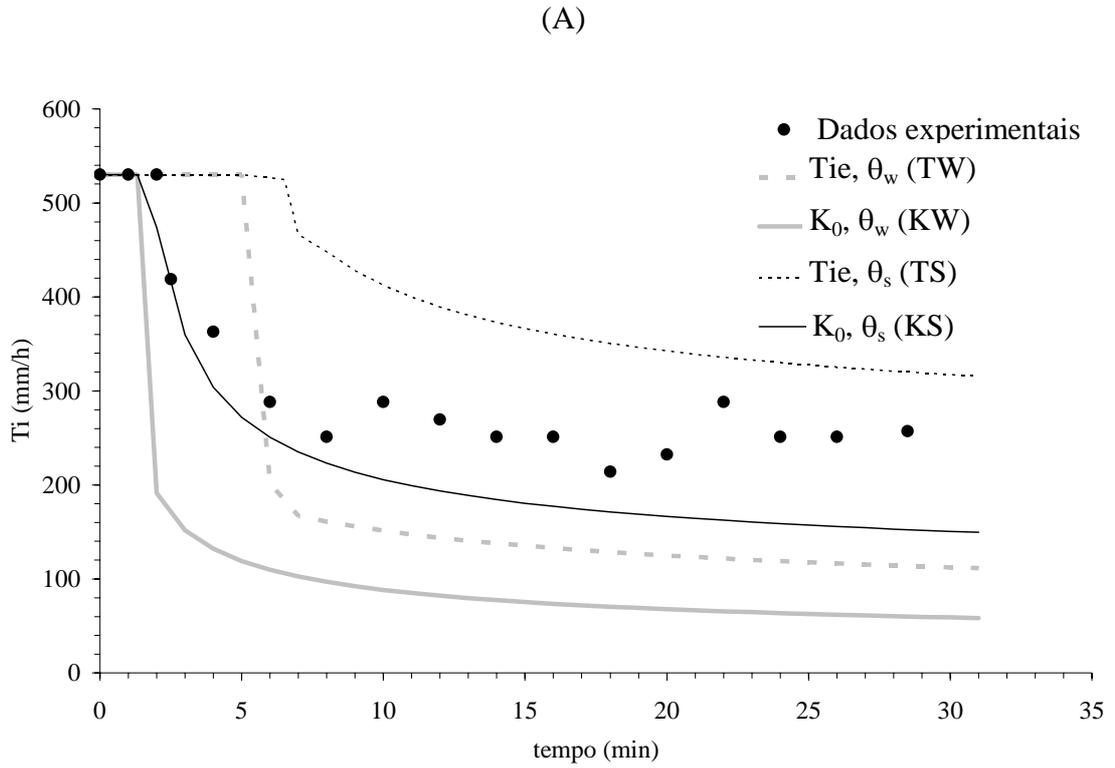
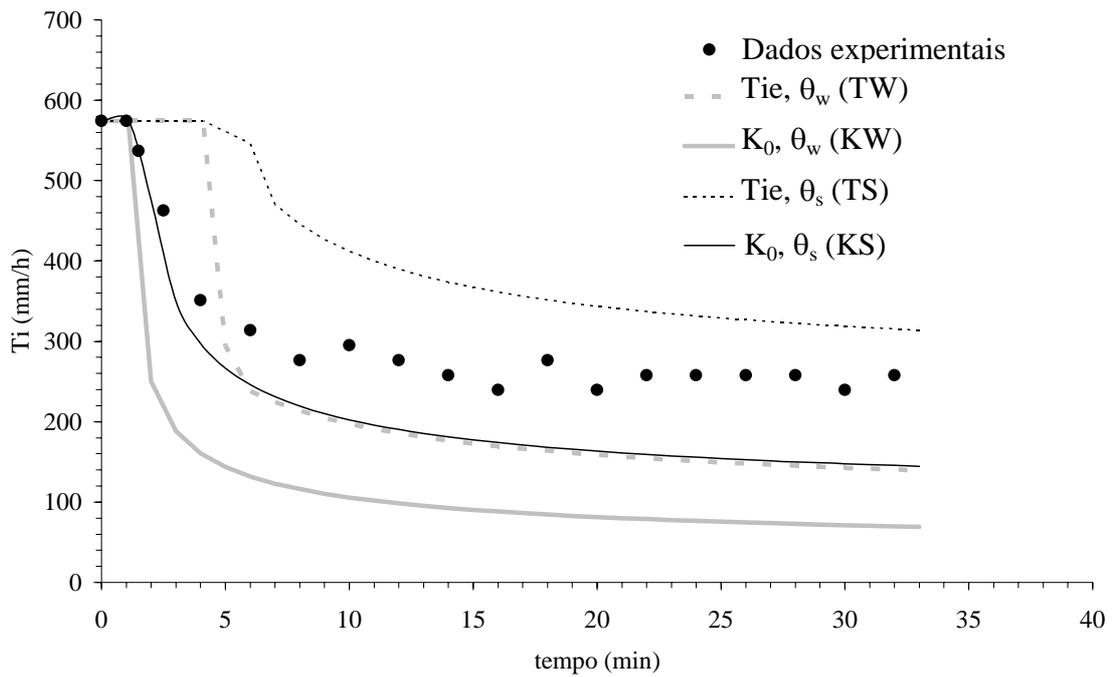


Figura 33. Taxas de infiltração (A) e lâminas infiltradas (B) medidas e estimadas pelo GAML-c ao longo do tempo no 1º teste experimental do LV.

(A)



(B)

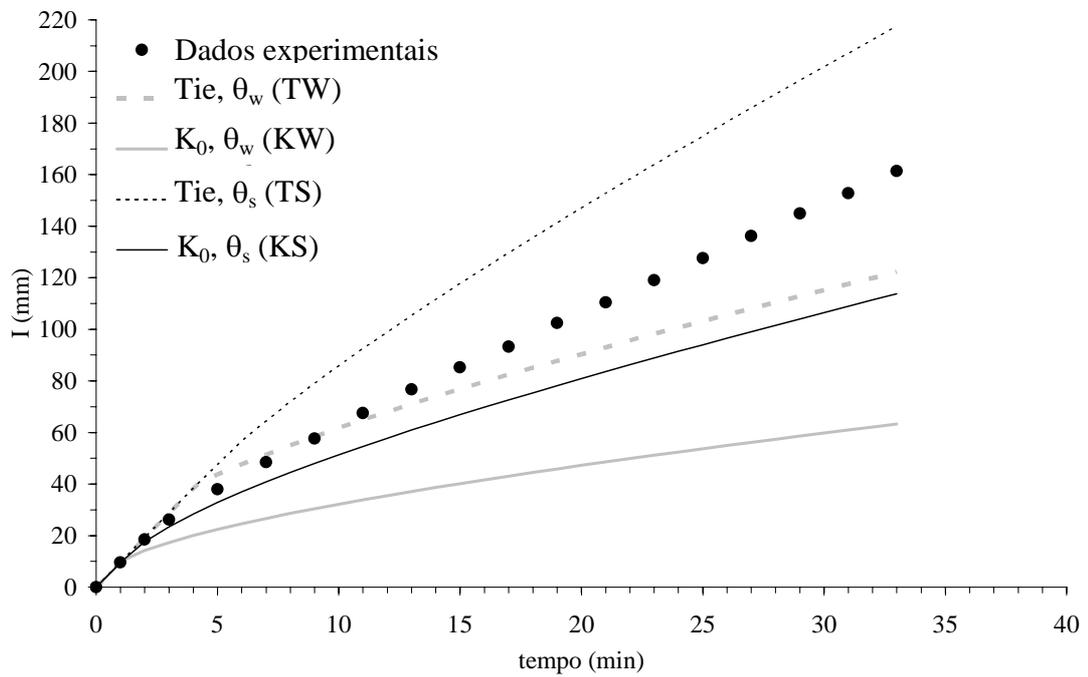
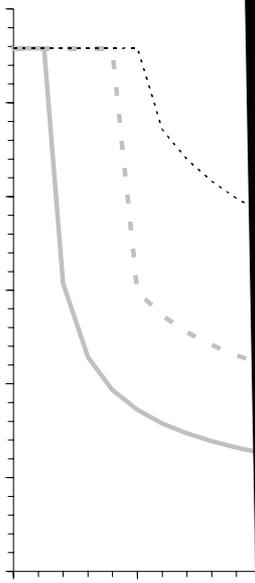


Figura 34. Taxas de infiltração (A) e lâminas infiltradas (B) medidas e estimadas pelo GAML-c ao longo do tempo no 2º teste experimental do LV.



Quadro 15. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 1º teste experimental do LV

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		$K_0$ , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		$K_0$ , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>E'</b>	0,58	-0,46	-0,24	-1,51	0,19	-0,29	0,59	0,05
<b>c'</b>	0,73	0,53	0,22	0,21	0,68	0,19	0,76	0,62
<b>Desempenho</b>	Bom	Sofrível	Péssimo	Péssimo	Bom	Péssimo	Muito Bom	Mediano
<b>REMQ</b>	20,14	120,83	51,60	202,31	33,77	111,29	18,23	77,83
<b>EMA</b>	14,70	111,24	43,30	190,80	28,34	98,08	14,49	71,98
<b>EMP</b>	15%	41%	49%	66%	31%	36%	15%	26%

Quadro 16. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 2º teste experimental do LV

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		$K_0$ , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		$K_0$ , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>E'</b>	0,65	-0,17	-0,20	-1,42	0,23	-0,26	0,48	-0,16
<b>c'</b>	0,79	0,61	0,24	0,27	0,69	0,26	0,69	0,58
<b>Desempenho</b>	Muito Bom	Mediano	Péssimo	Péssimo	Bom	Péssimo	Bom	Sofrível
<b>REMQ</b>	18,90	92,80	56,70	189,77	36,04	105,94	25,75	90,73
<b>EMA</b>	14,02	87,74	47,94	181,43	30,97	94,27	20,98	86,77
<b>EMP</b>	13%	32%	48%	62%	31%	33%	20%	31%

Quadro 17. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 3º teste experimental do LV

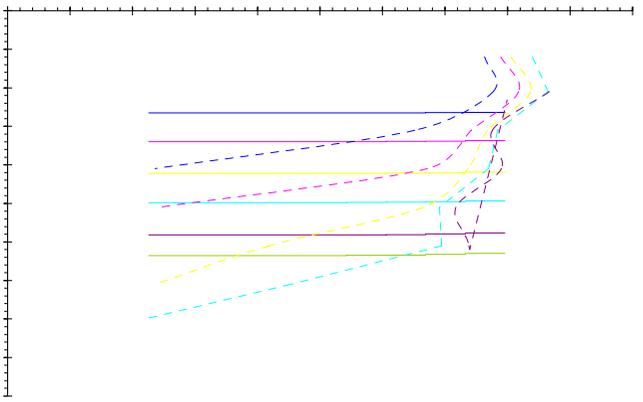
Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		$K_0$ , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		$K_0$ , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>E'</b>	0,77	0,25	-0,03	-0,92	0,28	-0,09	0,57	0,12
<b>c'</b>	0,87	0,70	0,35	0,35	0,71	0,36	0,75	0,65
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Bom	Péssimo	Péssimo	Bom	Péssimo	Muito Bom	Mediano
<b>REMQ</b>	0,93	0,62	-0,10	-1,15	0,48	0,16	0,79	0,54
<b>EMA</b>	9,09	57,45	40,88	146,85	28,51	83,03	17,22	67,07

Verifica-se que as simulações KW e TS não estimaram bem os dados experimentais em nenhum dos três testes, promovendo subestimativas de  $T_i$  e  $I$ , e chegando a apresentar valores negativos de  $E'$ .

A estimativa de  $T_i$  feita pela simulação TW não apresentou bom desempenho (índices  $c'$ ) no 1º teste, decorrente da superestimativa do tempo de empoçamento, o que acabou resultando em estimativa de taxa de infiltração igual a  $i_p$ , enquanto o valor experimental caiu drasticamente. A análise dos gráficos e dos valores de EMA, EMP e REMQ encontrados mostra que estes foram muito próximos aos da simulação KS, evidenciando que as estimativas feitas por TW também podem ser consideradas como de boa qualidade. Ressalta-se que, para fins de simulação hidrológica, uma superestimativa do tempo de empoçamento acaba por subestimar o escoamento superficial, fato não desejável na maioria dos casos.

A simulação KS apresentou boas estimativas tanto de  $T_i$  quanto de  $I$  nos três testes experimentais, embora com tendência de subestimativa. Nas estimativas feitas para os três testes experimentais, o erro médio percentual (EMP) máximo foi igual a 20% e 31%, para  $I$  e  $T_i$ , respectivamente. O índice  $c'$  para a estimativa de  $T_i$  no 2º teste experimental resultou em desempenho “Sofrível”, com os índices REMQ, EMA e EMP iguais a  $90,73 \text{ mm h}^{-1}$ ,  $86,77 \text{ mm h}^{-1}$  e 31%, respectivamente.

As Figuras 36, 37 e 38 apresentam os perfis de umidade medidos e estimados





KW

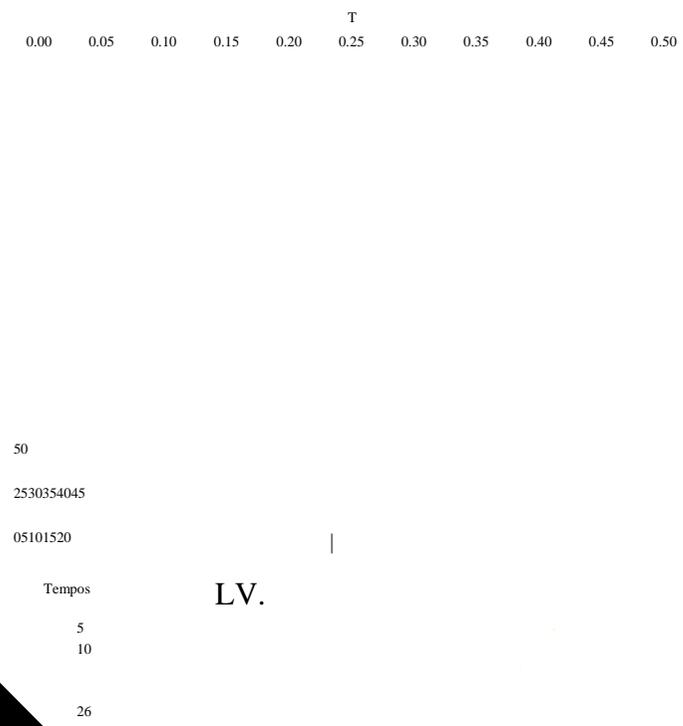


Figura138. Perfis de umidade medidos e estimados para o 2º teste experimental do

Nota-se que para o LV foram estimadas as menores diferenças entre as profundidades das diversas frentes de umedecimento simuladas, uma vez que o solo é tipicamente arenoso.

Do mesmo modo que verificado para o LVA e o PV, as simulações que consideraram que o solo atingia apenas a umidade  $\theta_w$  após o tempo de empoçamento apresentaram menores estimativas da profundidade das sub-frentes de umedecimento quando comparadas às que utilizaram  $\theta_s$ .

As simulações que utilizaram  $K_0$  (KW e KS) não estimaram bem o perfil de umidade. As melhores estimativas foram obtidas com as simulações TW e TS, sendo que os perfis estimados por TS foram ligeiramente melhores, excetuando-se o 3º teste experimental.

#### **4.1.4. Considerações gerais a respeito das simulações feitas com o GAML-c para todos os solos**

O modelo GAML-c foi capaz de contornar o problema levantado por WANG et al. (2003) relativo à incapacidade de GA e GAML em estimar a distribuição de umidades no perfil do solo durante a ocorrência da infiltração.

Todavia, nenhuma das simulações apresentou melhores resultados para todos os testes experimentais, o que leva à necessidade de aprimoramento do modelo, incluindo uma melhor estimativa de seus parâmetros de entrada, principalmente da condutividade hidráulica do solo saturado. Com base nos resultados observados, recomenda-se, corroborando SILVA e KATO (1998), o uso do valor da Tie como representativo da condutividade hidráulica do solo saturado em substituição ao valor determinado usando o método do permeâmetro de carga constante, uma vez que este método altera a estrutura das amostras de solo, sendo parcialmente responsável pelos altos coeficientes de variação na determinação de  $K_0$ , também relatados por WARRICK e NIELSEN (1980) e MESQUITA e MORAES (2004).

Embora não tenha havido uma simulação que apresentasse melhores estimativas de  $T_i$ ,  $I$  e do perfil de umedecimento, as simulações TW e TS, que utilizam a Tie, tiveram bom desempenho na maior parte dos testes, reforçando a idéia anterior a respeito do uso deste parâmetro como representativo da condutividade hidráulica do perfil de solo.

Por ter apresentado resultados ligeiramente melhores que TS, recomenda-se que o GAML-c seja utilizado considerando-se os parâmetros das simulações TW, isto é, tomar a  $Tie$  como condutividade hidráulica do solo saturado e  $\theta_w$  como o teor de água da zona de transmissão. Assim sendo, nas simulações realizadas no próximo item, serão considerados apenas os resultados obtidos com o emprego de TW.

Com relação ao perfil de umidade, as simulações que utilizaram o valor de  $\theta_s$  como o teor de água que o perfil do solo atinge após o tempo de empoçamento acabaram por estimar maiores profundidades das sub-frentes de umedecimento. Fato devido ao maior peso que o parâmetro tomado como condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$  ou  $Tie$ ) passou a ter no cálculo da condutividade hidráulica equivalente do solo.

Finalmente, os resultados obtidos pelas simulações KW e KS para os solos PV e LV corroboram o trabalho de YU (1999) que descreveu a tendência do modelo de GAML em subestimar a infiltração em eventos cuja intensidade de precipitação é muito alta. Ressalta-se que, no presente trabalho, esta tendência deveu-se ao baixo valor de condutividade hidráulica utilizado nestas simulações, uma vez que considerou-se o valor de  $K_0$  obtido com o emprego do permeâmetro de carga constante.

#### **4.2. Comparação entre as simulações feitas com GAML-c, GAML-t e demais propostas de adequação dos parâmetros de entrada do modelo de GAML**

As simulações apresentadas na seqüência foram feitas utilizando-se o modelo de GAML tanto em sua forma original quanto considerando as quatro adequações dos parâmetros de entrada propostas por CECÍLIO et al. (2003) e a adequação proposta por SILVA e KATO (1998), conforme o Quadro 7. Também utilizou-se a adequação GAML-t e o procedimento de aplicação GAML-c com os parâmetros  $Tie$  e  $\theta_w$  (TW), conforme item 4.1.4.

Ressalta-se que, da mesma forma que feito para a análise do GAML-c, apenas o índice  $c'$  foi determinante na avaliação das performances das simulações realizadas, sendo os coeficientes estatísticos  $E'$ , REMQ, EMA e EMP utilizados apenas para auxiliar nas discussões. Assim, os demais coeficientes também são apenas apresentados no Anexo, acompanhados dos gráficos confrontando os valores de  $Ti$  e  $I$  observados e estimados por cada uma das simulações.

#### 4.2.1. Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)

As Figuras 39, 40 e 41 apresentam as curvas simuladas de  $T_i$  e  $I$  ao longo do tempo, bem como os seus valores experimentais nos três testes realizados no solo LVA. Nos Quadros 18, 19 e 20 são apresentados os coeficientes estatísticos  $E'$ ,  $c'$ , REMQ, EMA e EMP, e o desempenho das simulações realizadas na estimativa de  $I$  e  $T_i$  feitas nos três testes experimentais realizados.

Analisando-se as Figuras e Quadros apresentados verifica-se que em todos os três testes experimentais as simulações S4, S5, S6 e S7, baseadas nas adequações propostas por CECÍLIO et al. (2003) não apresentaram bons resultados, sempre superestimando os valores de  $T_i$  e  $I$  e chegando a apresentar valores negativos para o coeficiente  $E'$ . Interessante ressaltar que o LVA foi o mesmo solo utilizado por CECÍLIO et al. (2003) para propor estas adequações dos parâmetros de GA. Todavia, estes trabalharam com solo em condições de estratificação, estimando a infiltração nos horizontes A, B e C, e não apenas no material de solo do horizonte A, como no presente trabalho. Os autores ainda recomendaram a aplicação destas formas de adequação para alta umidade inicial do solo, condição diferente da aqui aplicada.

Nota-se também que as simulações S3 (parâmetros originais de MEIN e LARSON, 1973), S2 (GAML-t) e S8 (parâmetros modificados por SILVA e KATO, 1998) apresentaram resultados muito próximos, exceção feita à simulação S3 no 2º teste experimental, que, conforme anteriormente citado apresentou  $K_0$  bem maior que a  $T_{ie}$ , causando superestimativa de  $T_i$  e  $I$ . A proximidade entre as simulações deveu-se tanto à semelhança entre os valores de  $K_0$  e  $T_{ie}$  no 1º e 3º testes experimentais, bem como à proximidade entre os valores de  $\theta_s$  e  $\theta_w$ , verificado pela relação  $\theta_s/\theta_w$  igual a 0,96, em média.

O pior desempenho de S3, comparativamente a S2 e S8, no 2º teste experimental mais uma vez permite questionar o uso do valor de  $K_0$ , determinado com o método do permeâmetro de carga constante, para a estimativa da infiltração, uma vez que as simulações S2 e S8 utilizam-se da  $T_{ie}$  para estimar a condutividade hidráulica do perfil de solo.

Observou-se que a simulação S1 (GAML-c) possuiu tendência de subestimar  $T_i$  e  $I$ , tendo estimado os menores valores destes em todos os testes experimentais. Além disso, a simulação feita para o 2º teste experimental não apresentou bons resultados.

Finalmente, o melhor desempenho geral nos três testes experimentais pode ser atribuído às simulações S2 (GAML-t) e S8, sendo que S8 possui a tendência de sempre superestimar a infiltração, o que não foi observado na simulação feita com o GAML-t.

Quadro 18. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 1º teste experimental do LVA

Simulação		E'	c'	Desempenho	REMQ	EMA	EMP
S1	I	0,54	0,73	Bom	27,25	22,29	23%
	Ti	0,40	0,68	Bom	70,42	54,94	28%
S2	I	0,96	0,98	Ótimo	2,51	1,93	7%
	Ti	0,61	0,72	Bom	66,72	36,00	13%
S3	I	0,96	0,98	Ótimo	2,34	1,97	5%
	Ti	0,72	0,79	Muito bom	50,59	25,60	11%
S4	I	0,07	0,63	Mediano	51,58	44,67	46%
	Ti	0,38	0,59	Sufrível	86,96	57,32	33%
S5	I	-0,05	0,61	Mediano	58,95	50,22	50%
	Ti	0,27	0,52	Sufrível	89,45	67,66	42%
S6	I	-0,31	0,55	Sufrível	74,50	62,82	61%
	Ti	0,04	0,38	Péssimo	107,77	88,22	56%
S7	I	-0,64	0,49	Mau	93,79	78,60	75%
	Ti	-0,23	0,22	Péssimo	138,25	113,23	72%
S8	I	0,75	0,88	Ótimo	14,32	12,15	13%
	Ti	0,72	0,80	Muito bom	42,57	25,61	13%

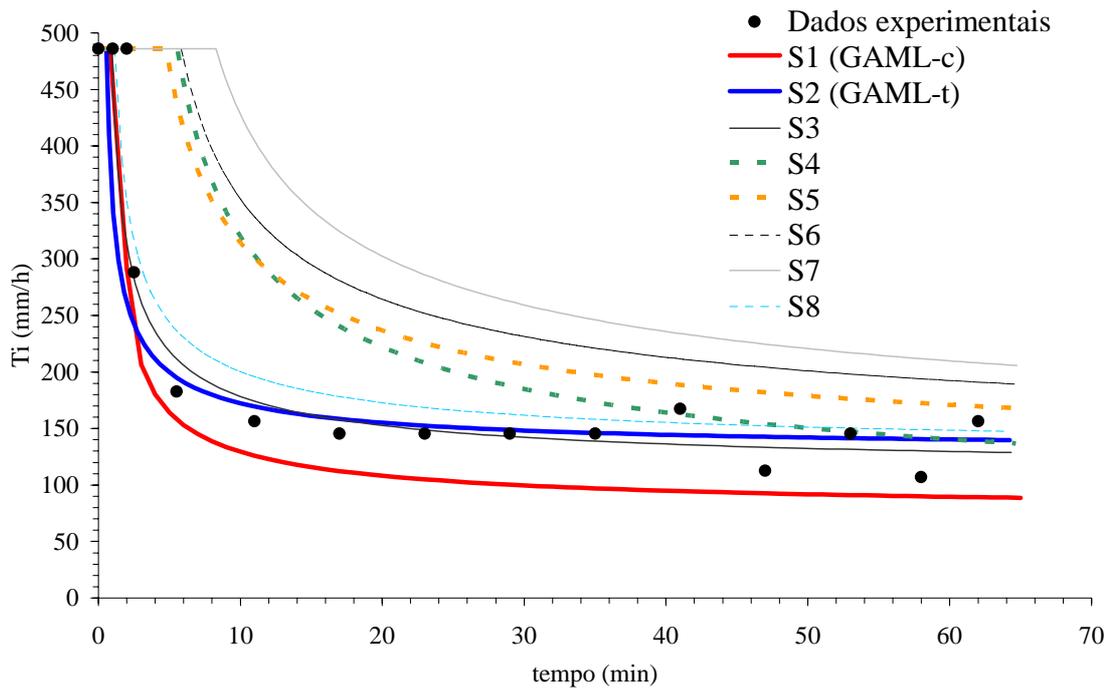
Quadro 19. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 2º teste experimental do LVA

Simulação		E'	c'	Desempenho	REMQ	EMA	EMP
S1	I	0,32	0,59	Sufrível	34,46	28,84	33%
	Ti	0,17	0,59	Sufrível	63,47	47,81	39%
S2	I	0,78	0,89	Ótimo	9,67	9,36	18%
	Ti	0,43	0,64	Mediano	64,62	32,73	22%
S3	I	-0,53	0,51	Sufrível	77,83	64,94	68%
	Ti	-0,19	0,21	Péssimo	72,75	68,68	85%
S4	I	-2,01	0,30	Péssimo	147,98	127,76	141%
	Ti	-1,22	0,06	Péssimo	152,39	128,48	141%
S5	I	-2,22	0,29	Péssimo	160,25	136,38	147%
	Ti	-1,50	0,01	Péssimo	159,14	144,26	164%
S6	I	-0,69	0,46	Mau	82,06	71,69	82%
	Ti	-0,36	0,28	Péssimo	102,77	78,81	82%
S7	I	-1,27	0,37	Péssimo	110,89	96,41	109%
	Ti	-0,74	0,15	Péssimo	123,90	100,43	107%
S8	I	0,70	0,86	Ótimo	14,59	12,60	16%
	Ti	0,68	0,80	Muito bom	24,27	18,52	21%

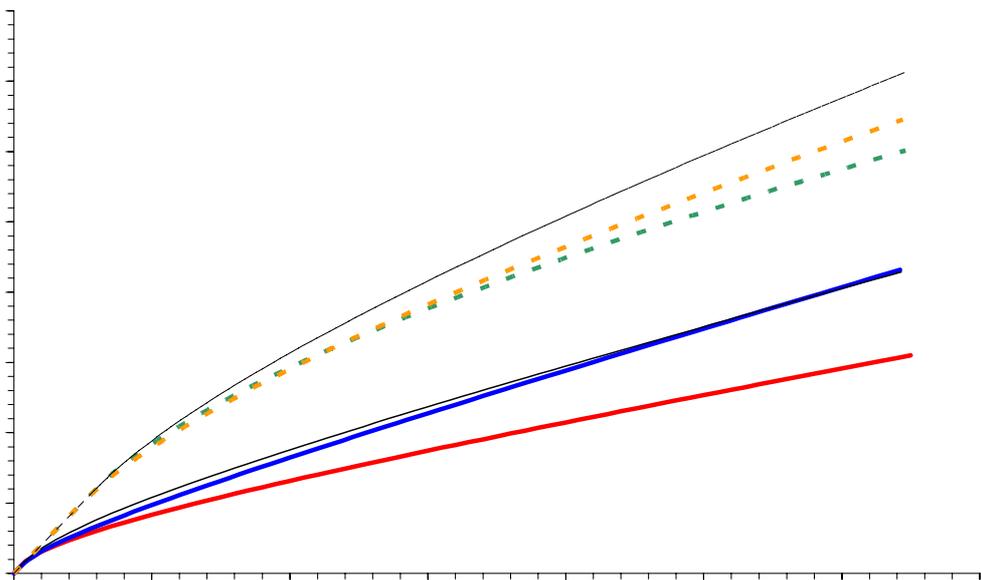
Quadro 20. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 3º teste experimental do LVA

Simulação		E'	c'	Desempenho	REMQ	EMA	EMP
<b>S1</b>	<b>I</b>	0,93	0,96	Ótimo	3,29	2,73	5%
	<b>Ti</b>	0,58	0,72	Bom	37,92	28,06	21%
<b>S2</b>	<b>I</b>	0,44	0,76	Muito bom	27,41	22,92	24%
	<b>Ti</b>	0,51	0,66	Bom	40,51	32,50	33%
<b>S3</b>	<b>I</b>	0,50	0,78	Muito bom	24,41	20,42	22%
	<b>Ti</b>	0,52	0,66	Bom	39,59	31,77	30%
<b>S4</b>	<b>I</b>	-1,06	0,41	Mau	98,41	83,95	90%
	<b>Ti</b>	-0,55	0,13	Péssimo	132,22	102,76	98%
<b>S5</b>	<b>I</b>	-0,75	0,45	Mau	83,81	71,33	77%
	<b>Ti</b>	-0,39	0,15	Péssimo	112,01	91,77	86%
<b>S6</b>	<b>I</b>	-0,78	0,45	Mau	85,41	72,63	78%
	<b>Ti</b>	-0,42	0,14	Péssimo	113,74	93,60	88%
<b>S7</b>	<b>I</b>	-1,59	0,35	Péssimo	126,34	105,70	110%
	<b>Ti</b>	-1,07	0,01	Péssimo	159,41	136,93	132%
<b>S8</b>	<b>I</b>	0,47	0,77	Muito bom	25,77	21,50	23%
	<b>Ti</b>	0,51	0,65	Bom	40,18	32,53	32%

(A)



(B)



(A)

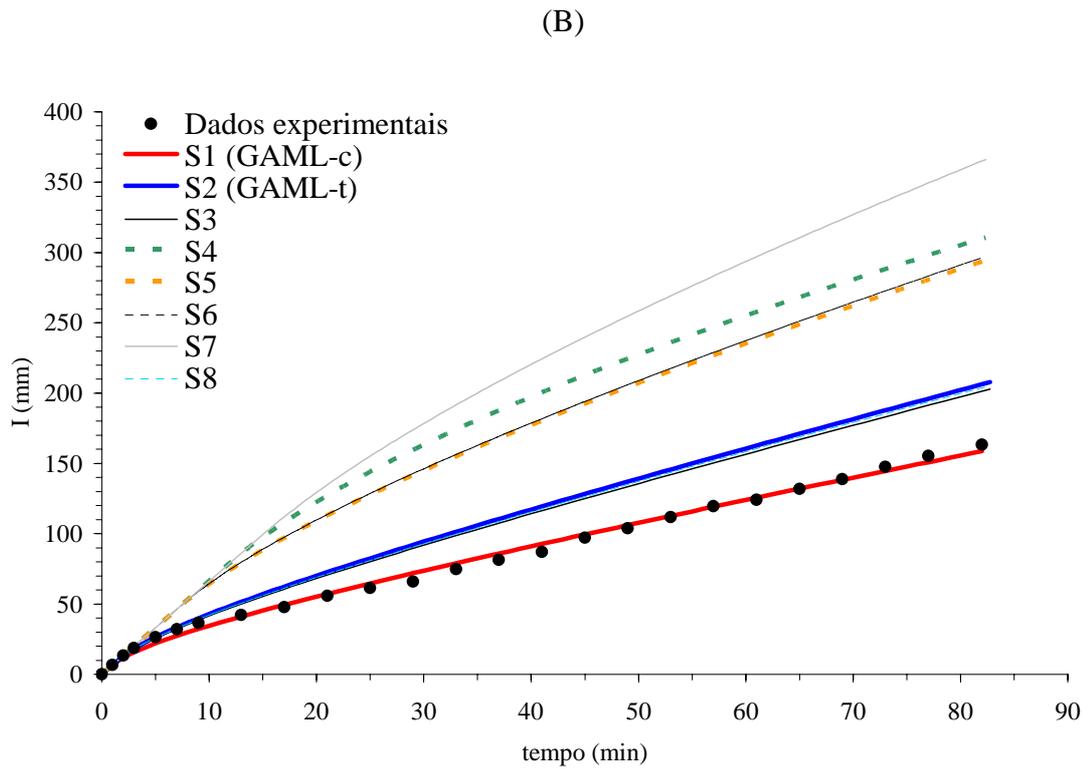
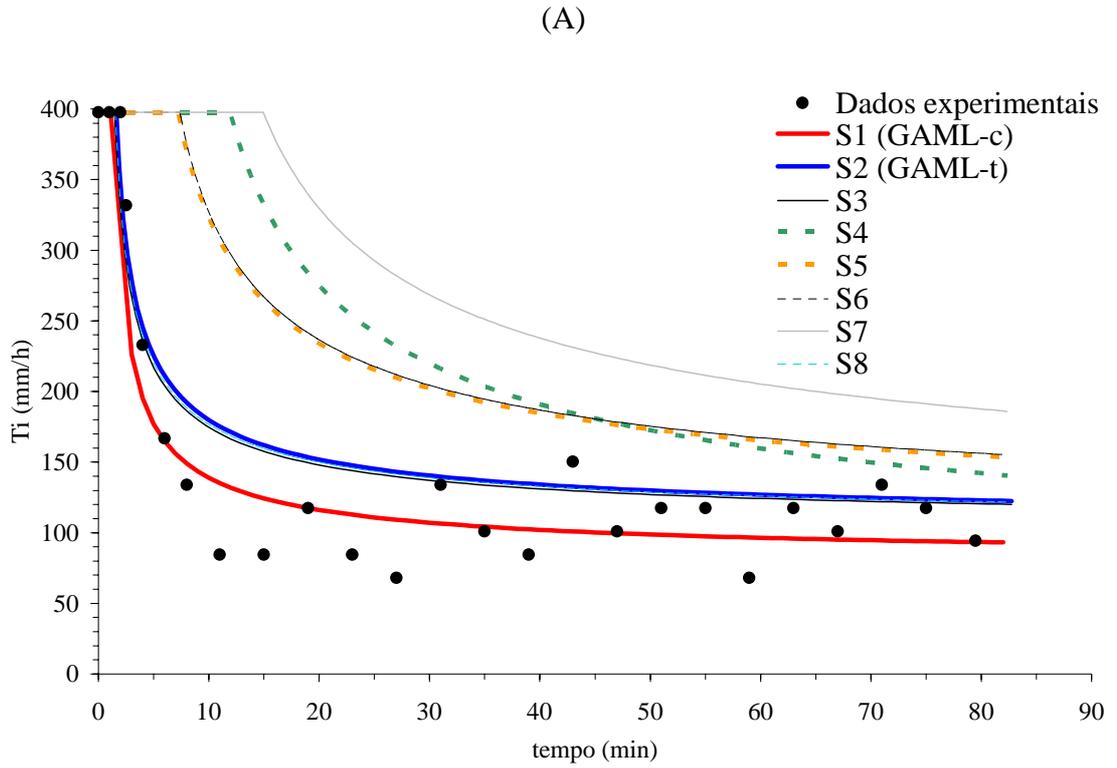


Figura 41. Taxas de infiltração (A) e lâminas infiltradas (B) medidas e simuladas no 3º teste experimental do LVA.

#### 4.2.2. Argissolo Vermelho (PV)

As Figuras 42, 43 e 44 apresentam as curvas simuladas de  $T_i$  e  $I$  ao longo do tempo, bem como os seus valores experimentais nos três testes realizados no solo PV. Nos Quadros 21, 22 e 23 são apresentados os coeficientes estatísticos  $E'$ ,  $c'$ , REMQ, EMA e EMP, e o desempenho das simulações realizadas na estimativa de  $I$  e  $T_i$  feitas nos três testes experimentais realizados.

Observa-se que as simulações S4, S6 e S7 apresentaram sempre as piores estimativas de  $T_i$ , decorrente da grande falha de todas em estimar o tempo de empoçamento, simulando taxas de infiltração iguais a  $i_p$  em praticamente todo o tempo de duração dos testes experimentais. Assim sendo, suas curvas simuladas foram praticamente iguais durante o tempo de duração dos testes.

Também verifica-se a tendência da S3 (MEIN e LARSON, 1973) em subestimar a infiltração em todos os testes, não apresentando bons resultados para  $T_i$ , conforme indicam os índices estatísticos e os gráficos das Figuras 42, 43 e 44.

A simulação S8, embora tenha apresentado boas estimativas de  $I$ , acabou deixando por desejar na estimativa de  $T_i$ , por apresentar superestimativa no tempo de empoçamento nos testes em que o valor da  $T_{ie}$  foi maior (2º e 3º, com  $132 \text{ mm h}^{-1}$  e  $196 \text{ mm h}^{-1}$ , respectivamente).

No geral, as melhores estimativas de  $T_i$  e  $I$  foram obtidas por S1 (GAML-c), S2 (GAML-t) e S5, sendo que as simulações feitas com o GAML-c obtiveram melhores classificações. Todavia, as três simulações apresentaram baixos índices REMQ, EMA e EMP, sendo indicadas para a estimativa da infiltração.

Quadro 21. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 1º teste experimental do PV

Simulação		E'	c'	Desempenho	REMQ	EMA	EMP
S1	I	0,68	0,82	Muito bom	13,37	10,27	14%
	Ti	0,51	0,68	Bom	37,15	26,40	21%
S2	I	0,82	0,91	Ótimo	6,59	5,72	12%
	Ti	0,50	0,58	Sofrível	37,48	27,05	21%
S3	I	0,44	0,67	Bom	21,77	17,84	29%
	Ti	0,12	0,45	Mau	57,87	47,36	34%
S4	I	0,04	0,66	Bom	45,48	30,78	35%
	Ti	-0,31	0,01	Péssimo	91,21	70,89	85%
S5	I	0,89	0,95	Ótimo	4,91	3,61	5%
	Ti	0,79	0,85	Muito bom	18,84	11,48	13%
S6	I	0,21	0,71	Bom	36,29	25,33	30%
	Ti	0,07	0,31	Péssimo	64,94	50,32	58%
S7	I	0,02	0,66	Bom	46,97	31,53	36%
	Ti	-0,34	0,01	Péssimo	93,59	72,69	88%
S8	I	0,82	0,91	Ótimo	8,50	5,81	7%
	Ti	0,69	0,78	Muito bom	22,47	16,94	19%

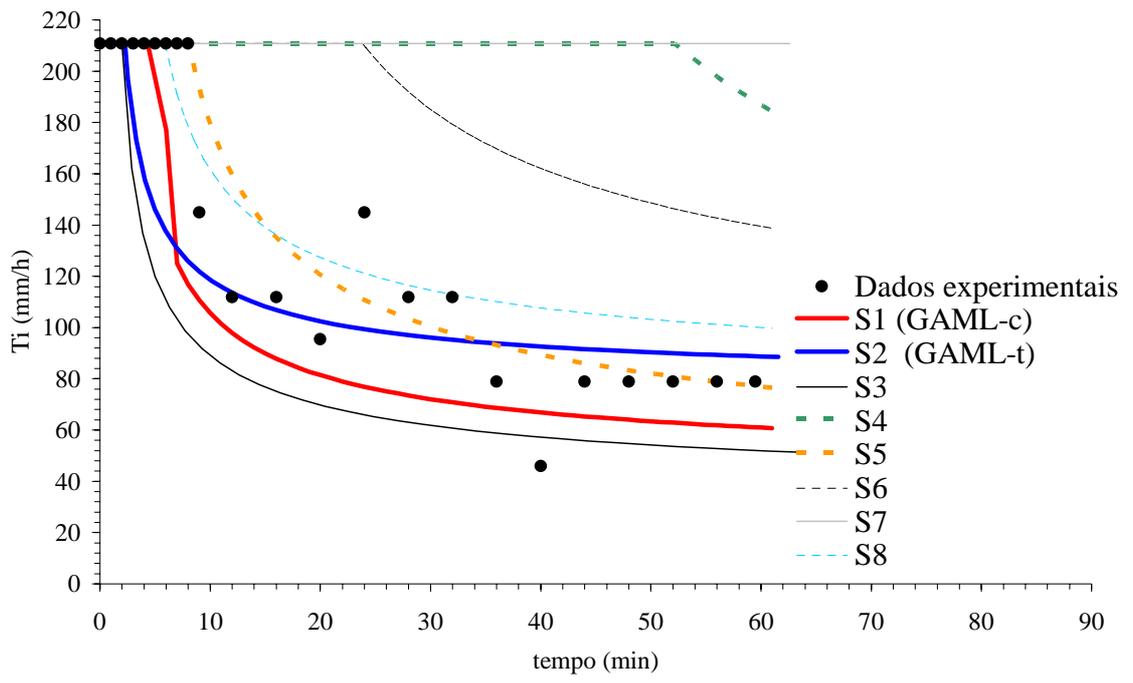
Quadro 22. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 2º teste experimental do PV

Simulação		E'	c'	Desempenho	REMQ	EMA	EMP
S1	I	0,94	0,97	Ótimo	2,82	1,92	3%
	Ti	0,79	0,82	Muito bom	18,44	8,76	6%
S2	I	0,79	0,90	Ótimo	9,86	6,35	8%
	Ti	0,56	0,66	Bom	27,12	18,27	13%
S3	I	0,57	0,75	Muito bom	17,65	12,96	21%
	Ti	-0,26	0,36	Péssimo	59,43	51,91	31%
S4	I	0,57	0,82	Muito bom	21,24	12,93	15%
	Ti	-0,06	0,03	Péssimo	60,77	43,64	31%
S5	I	0,91	0,96	Ótimo	3,92	2,70	4%
	Ti	0,70	0,76	Muito bom	20,98	12,21	8%
S6	I	0,57	0,82	Muito bom	21,24	12,93	15%
	Ti	-0,06	0,03	Péssimo	60,77	43,64	31%
S7	I	0,57	0,82	Muito bom	21,245	12,93	15%
	Ti	-0,06	0,03	Péssimo	60,77	43,64	31%
S8	I	0,71	0,87	Ótimo	13,70	8,80	11%
	Ti	0,41	0,53	Sofrível	34,72	24,07	17%

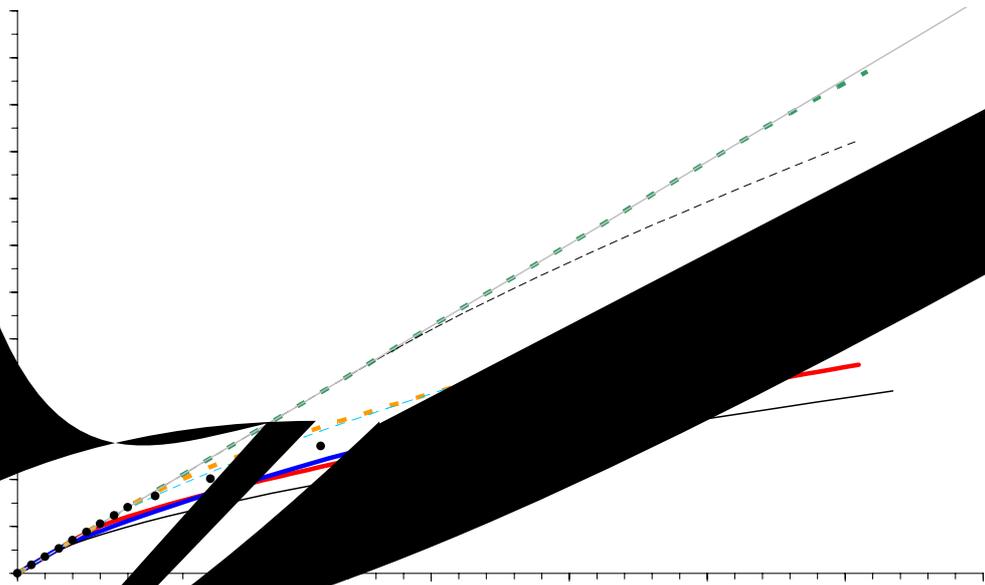
Quadro 23. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 3º teste experimental do PV

Simulação		E'	c'	Desempenho	REMQ	EMA	EMP
<b>S1</b>	<b>I</b>	0,90	0,95	Ótimo	4,28	2,63	4%
	<b>Ti</b>	0,51	0,52	Sufrível	29,78	16,75	8%
<b>S2</b>	<b>I</b>	0,86	0,94	Ótimo	5,96	3,44	4%
	<b>Ti</b>	0,42	0,46	Mau	31,85	19,79	10%
<b>S3</b>	<b>I</b>	0,70	0,83	Muito bom	11,15	7,65	12%
	<b>Ti</b>	-0,54	0,31	Péssimo	62,25	52,58	23%
<b>S4</b>	<b>I</b>	0,81	0,91	Ótimo	8,66	4,79	6%
	<b>Ti</b>	0,13	0,11	Péssimo	46,31	29,83	15%
<b>S5</b>	<b>I</b>	0,89	0,95	Ótimo	4,70	2,85	4%
	<b>Ti</b>	0,58	0,55	Sufrível	27,12	14,19	7%
<b>S6</b>	<b>I</b>	0,81	0,91	Ótimo	8,66	4,79	6%
	<b>Ti</b>	0,13	0,11	Péssimo	46,31	29,83	15%
<b>S7</b>	<b>I</b>	0,81	0,91	Ótimo	8,66	4,79	6%
	<b>Ti</b>	0,13	0,11	Péssimo	46,31	29,83	15%
<b>S8</b>	<b>I</b>	0,82	0,92	Ótimo	8,17	4,57	6%
	<b>Ti</b>	0,21	0,23	Péssimo	41,45	26,78	13%

(A)



(B)



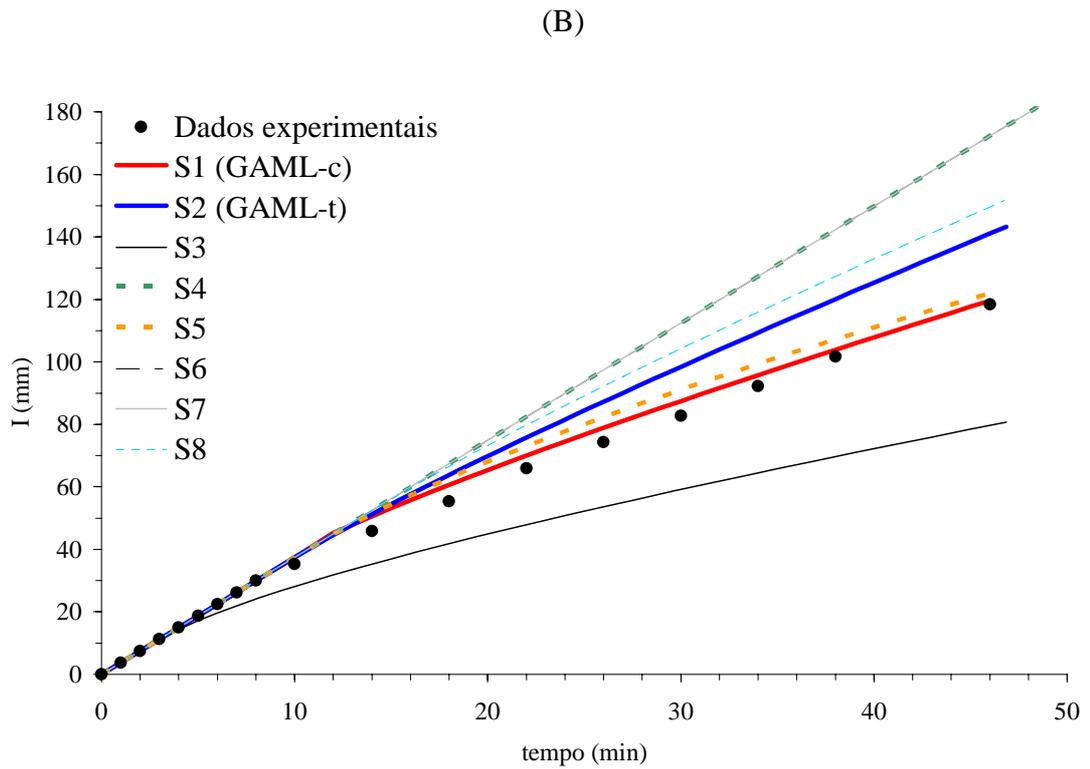
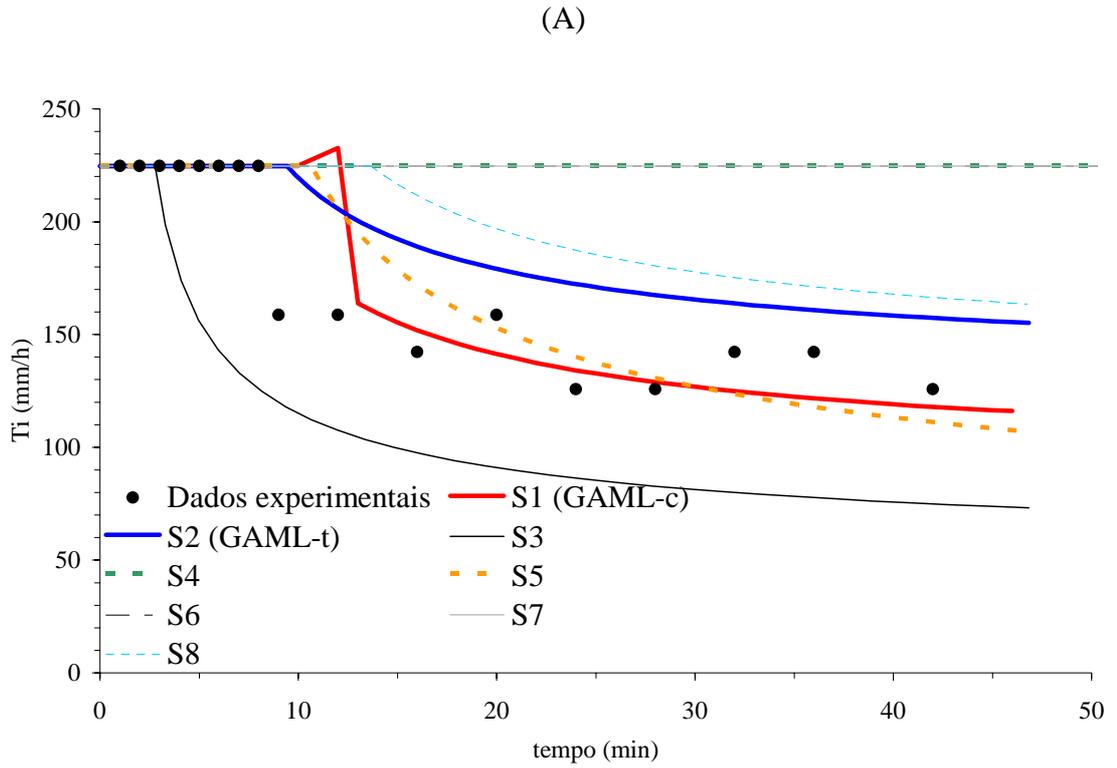


Figura 43. Taxas de infiltração (A) e lâminas infiltradas (B) medidas e simuladas no 2º teste experimental do PV.

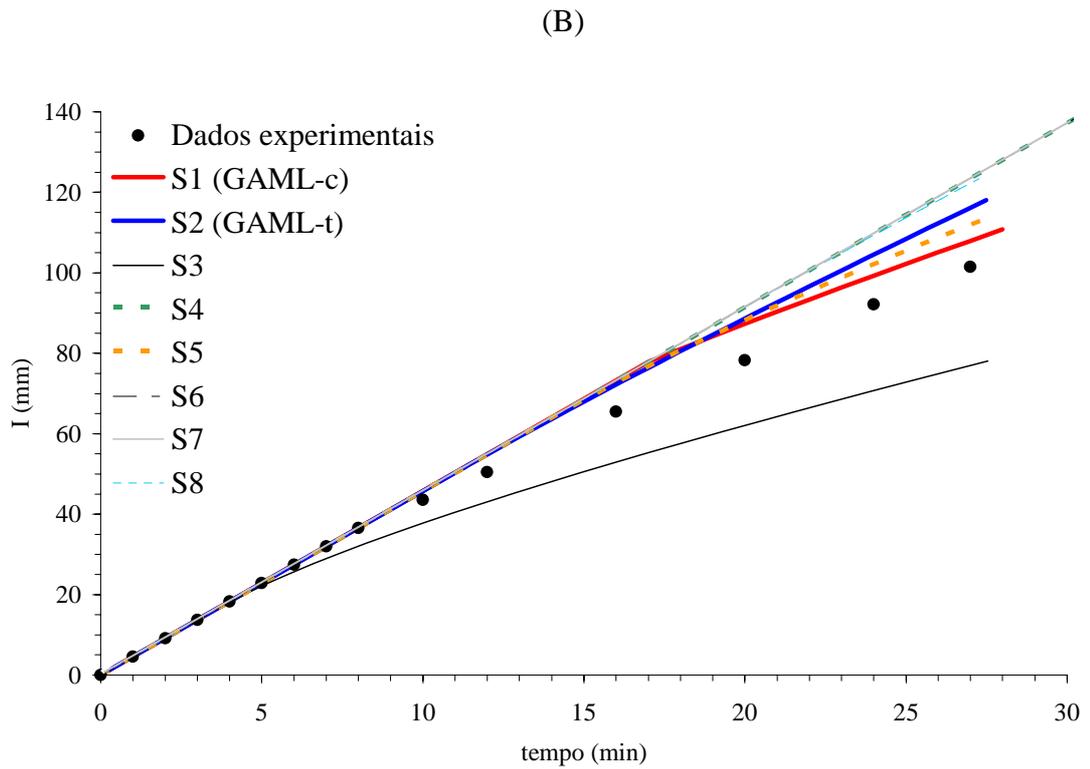
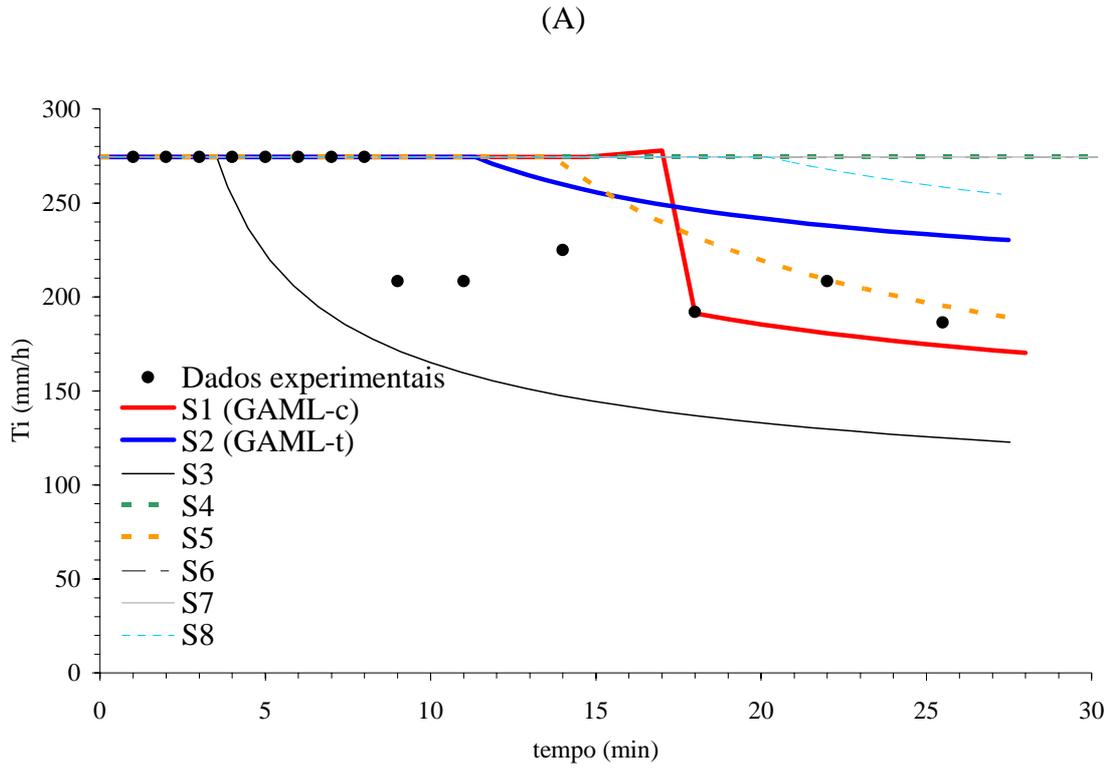


Figura 44. Taxas de infiltração (A) e lâminas infiltradas (B) medidas e simuladas no 3º teste experimental do PV.

### 4.2.3. Latossolo Vermelho (LV)

As Figuras 45, 46 e 47 apresentam as curvas simuladas de Ti e I ao longo do tempo, bem como os seus valores experimentais nos três testes realizados no solo LV. Nos Quadros 24, 25 e 26 são apresentados os coeficientes estatísticos E', c', REMQ, EMA e EMP, e o desempenho das simulações realizadas na estimativa de I e Ti feitas nos três testes experimentais realizados.

As simulações S4, S5 e S7, realizadas de acordo com as adequações propostas por CECÍLIO et al. (2003), não apresentaram boas estimativas tanto de Ti quanto de I, sendo que S5 e S7 apresentaram grande superestimativa do tempo de empoçamento, prevendo Ti igual a  $i_p$  para quase todos os pontos experimentais. A simulação S8 apresentou estimativas um pouco melhores, todavia ainda ruins, possuindo tendência de superestimar os valores experimentais de Ti e I em todos os testes. A simulação feita com o GAML-c (S1) apresentou boa estimativa apenas no 3º teste experimental, sendo que nos demais sua performance foi muito parecida com a do modelo original de MEIN e LARSON (1973), ou seja, com a simulação S3.

As simulações S2 (GAML-t) e S6 apresentaram as melhores estimativas de Ti e I para os três testes experimentais, sendo a estimativa de S6 de melhor qualidade.

Quadro 24. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 1º teste experimental do LV

Simulação		E'	C'	Desempenho	REMQ	EMA	EMP
S1	I	0,58	0,73	Bom	20,14	14,70	15%
	Ti	-0,46	0,53	Sofrível	120,83	111,24	41%
S2	I	0,83	0,92	Ótimo	7,77	6,12	7%
	Ti	0,57	0,70	Bom	38,91	32,82	12%
S3	I	0,68	0,82	Muito bom	14,53	11,36	12%
	Ti	-0,16	0,53	Sofrível	93,55	87,93	31%
S4	I	-0,26	0,58	Sofrível	54,30	44,00	46%
	Ti	-1,26	0,01	Péssimo	195,18	172,05	65%
S5	I	0,23	0,54	Sofrível	31,27	26,84	33%
	Ti	-0,56	0,37	Péssimo	125,41	118,33	40%
S6	I	0,57	0,81	Muito bom	18,21	15,13	16%
	Ti	0,31	0,55	Sofrível	60,11	52,23	20%
S7	I	-0,43	0,54	Sofrível	63,80	50,12	51%
	Ti	-1,92	0,01	Péssimo	242,10	221,87	85%
S8	I	0,09	0,66	Bom	38,11	31,73	34%
	Ti	-0,17	0,26	Péssimo	101,46	88,98	33%

Quadro 25. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 2º teste experimental do LV

Simulação		E'	c'	Desempenho	REMQ	EMA	EMP
S1	I	0,65	0,79	Muito bom	18,90	14,02	13%
	Ti	-0,17	0,61	Mediano	92,80	87,74	32%
	I	0,63	0,84	Muito bom	17,43	14,73	14%

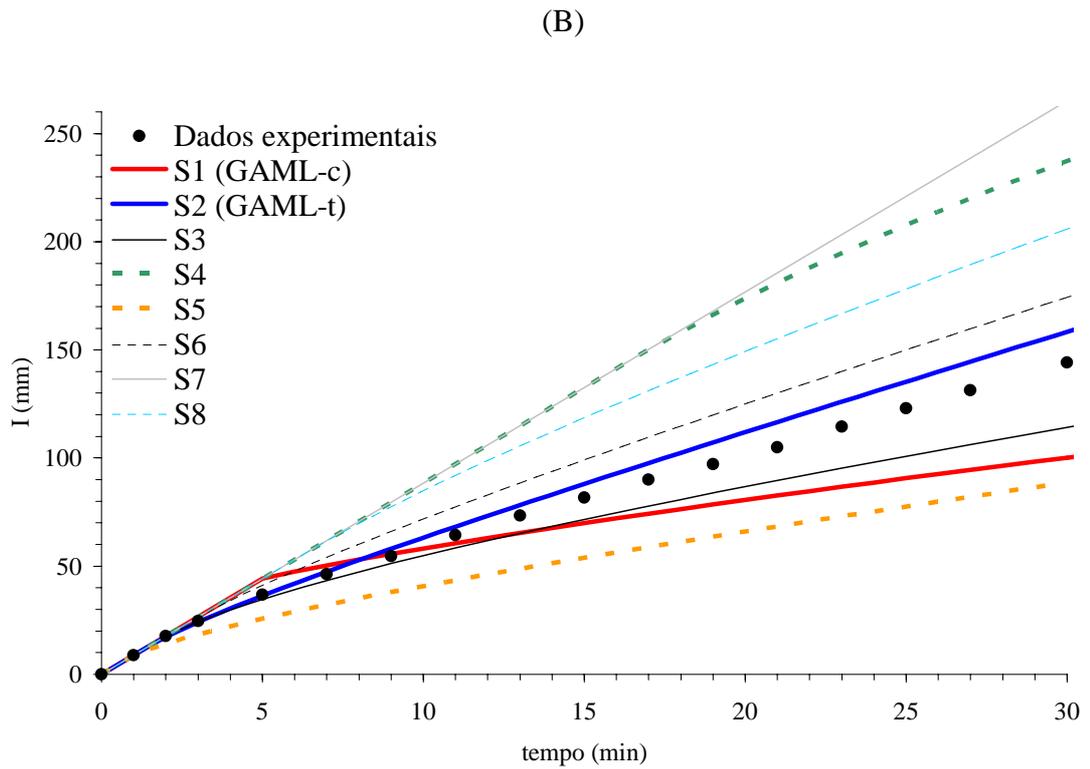
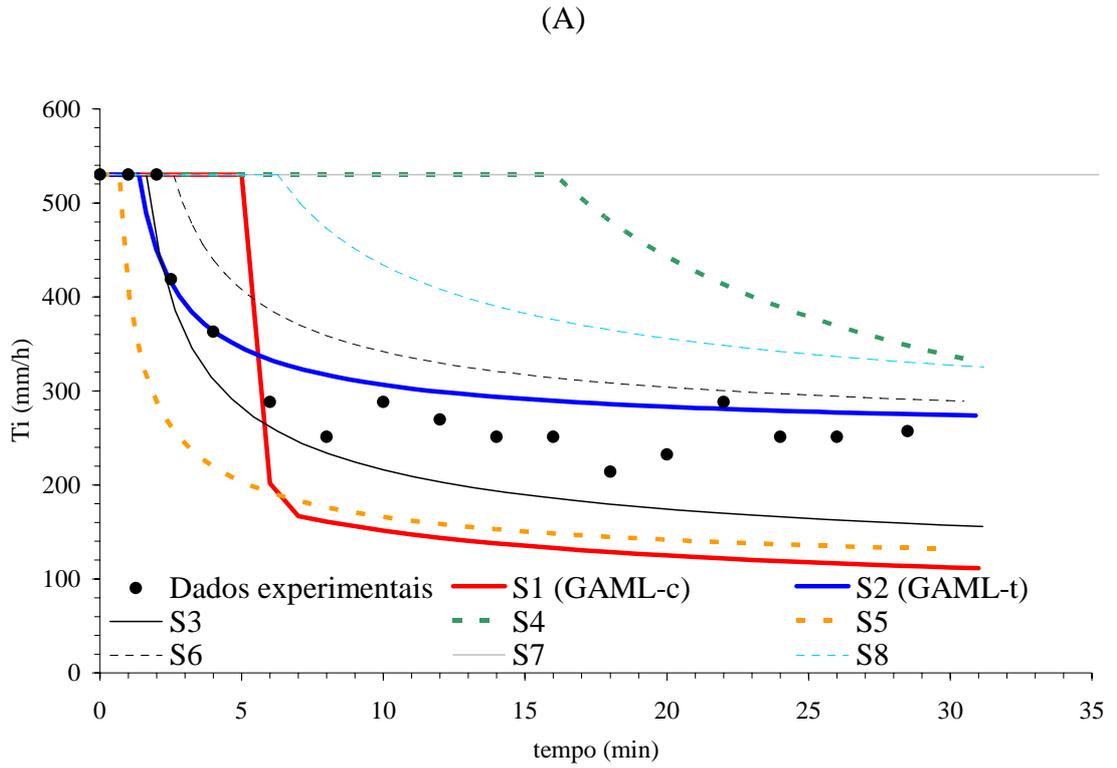
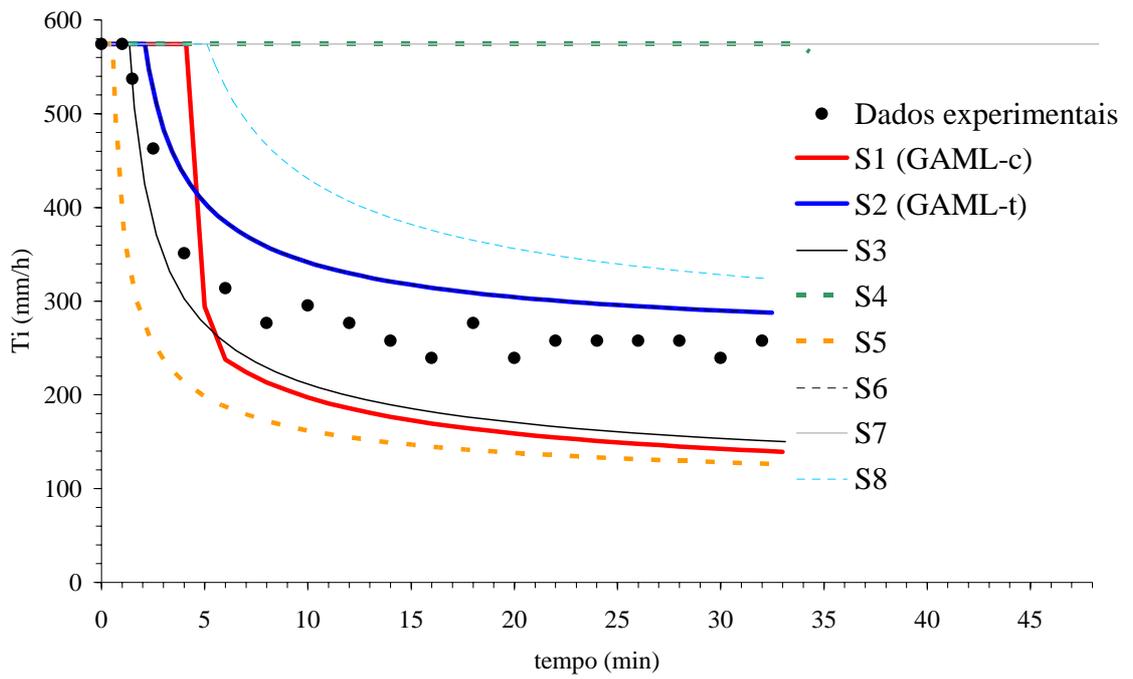


Figura 45. Taxas de infiltração (A) e lâminas infiltradas (B) medidas e simuladas no 1º teste experimental do LV.

(A)



(B)

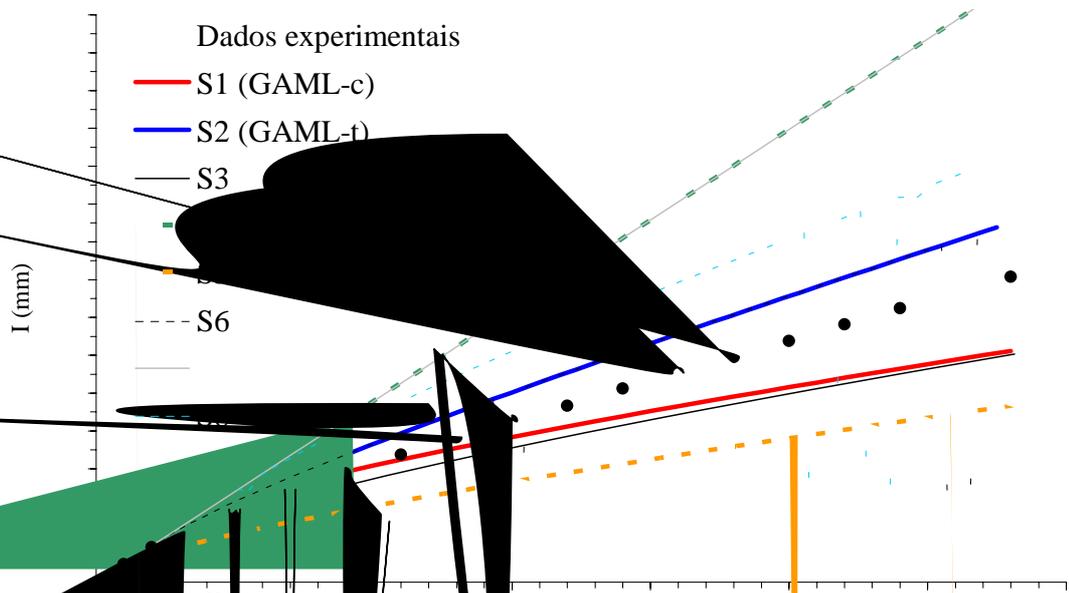
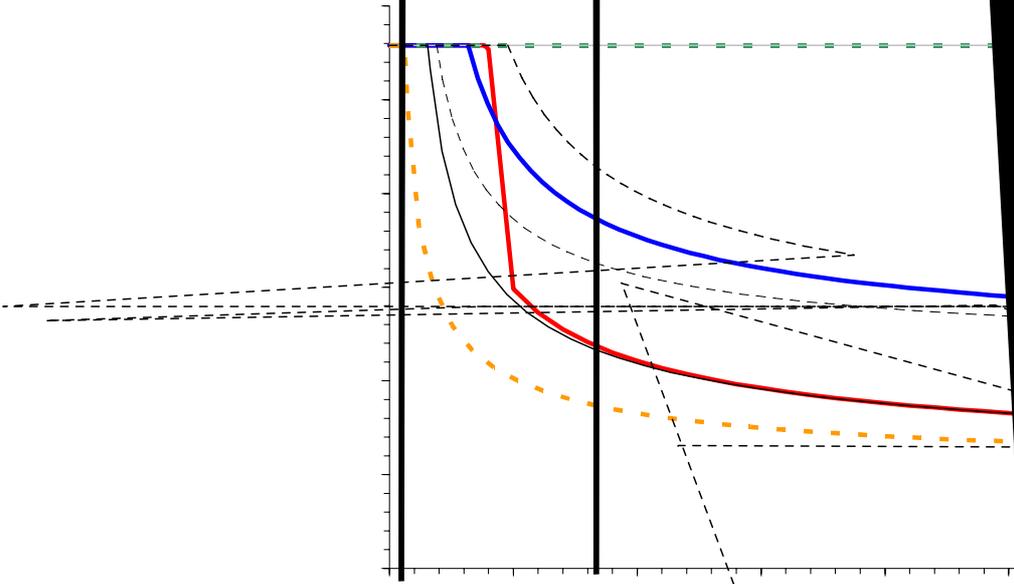


Figura 46. Taxas de infiltração (A) e lâminas infiltradas (B) medidas e simuladas no 2º teste experimental do LV.

(A)



### 4.3. Análise geral

A respeito da relação  $\theta_w/\theta_s$ , os valores obtidos no LVA (0,96), PV (0,97) e LV (0,86) foram sempre superiores aos encontrados na literatura para solos semelhantes. Contudo, ressalta-se que a utilização de solo desestruturado e re-adensado em colunas facilita a infiltração da água no perfil, além de haver escape de ar contido no solo pelas paredes da coluna de PVC. Assim, considera-se que estes valores obtidos estão dentro da normalidade.

Pôde-se observar também que tanto para condições iniciais de baixa umidade do solo (testes do LV) quanto para condições iniciais de maior umidade (solos LVA e PV), o modelo GAMI-t proveu boas estimativas da infiltração, contrariando CHONG et al. (1982) que recomendam a utilização do modelo de GA apenas em condições iniciais de baixa umidade inicial do solo.

Observou-se que as sugestões para adequação dos parâmetros de entrada do modelo de GA e GAML feitas por CECÍLIO et al. (2003), embora apresentassem boas estimativas quando aplicadas em um tipo de solo, obtiveram fraco desempenho quando aplicada em outro tipo de solo. Foi esse o caso das boas estimativas feitas por S6 no solo LV que não se repetiu no LVA e no PV; e também o caso da simulação S5 no solo PV, que apresentou desempenho fraco nos solos LV e LVA. Tal deve-se ao fato de estas adequações se basearem em estimativas dos parâmetros de entrada feitas de modo empírico, e portanto não aplicáveis em qualquer solo e qualquer situação. Assim, a utilização dessas estimativas empíricas pode acabar constituindo grave entrave à aplicação, nas apenas dos modelos de GA e GAML, mas de qualquer modelo com forte base física, conforme relatado por WILCOX et al. (1990).

O fraco desempenho, em muitos casos, de S5 e S6, que estimam  $\psi_f$  em função de características do solo, corrobora as afirmações de van der Zweep e Stone (1991), citados por YU (1999), que mostraram que a estimativa dos parâmetros de GA feitas com a utilização de características do solo é usualmente inadequada.

Observou-se que as simulações que utilizaram a Tie como representativa da condutividade hidráulica do solo acabaram por apresentar, no geral, melhores desempenhos que aquelas que utilizaram  $K_0$  determinado com o uso do permâmetro de carga constante. Como a Tie é um parâmetro cuja determinação é de maior confiabilidade que  $K_0$ , recomenda-se sua utilização em estudos relativos à infiltração de

água no solo. Todavia, é importante ressaltar que diversos estudos revelam que valores de Tie determinadas por intermédio do método de anéis concêntricos são maiores que aqueles determinados com o emprego de infiltrômetros de aspersão ou simuladores de chuva (BEN-HUR et al., 1987; SIDIRAS e ROTH, 1987; COSTA et al., 1999; COELHO et al., 2000; POTT e DE MARIA, 2003). Tal fato é devido ao encrostamento da superfície causado pelo impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície do solo, que ocorre na utilização dos simuladores de chuva e não ocorre no caso dos anéis concêntricos. Assim sendo, recomenda-se que a Tie seja determinada usando-se simulador de chuvas para a estimativa da infiltração em área submetidas a irrigação por aspersão (COSTA et al., 1999) ou sob precipitação. Considera-se que o uso de equações que estimem a redução da Tie em função da energia cinética de precipitação incidente sobre a superfície do solo, conforme realizado por SILVA e KATO (1998), possa fazer com que valores de Tie determinados pelo método dos anéis concêntricos sejam utilizados para estimativa de infiltração sob condições de precipitação. Todavia, é necessário que sejam realizadas pesquisas que comprovem tal hipótese.

Analisando-se conjuntamente todas as simulações realizadas para os nove testes experimentais, verificou-se que a única simulação que apresentou bons resultados quando aplicada a todas as classes de solo foi a S2, ou seja, o GAML-t, o que se deve a dois fatores. O primeiro fator diz respeito à estimativa de  $\psi_f$  ser feita utilizando-se a proposta fisicamente mais bem embasada, isto é, aquela feita por SLACK (1980), que considera a variação de umidade ao longo de toda a frente de umedecimento, entre os valores de umidade inicial e umidade da zona de transmissão. O segundo fator é relativo à utilização de um valor de condutividade hidráulica mais representativa de todo o perfil do solo; e também mais confiável, pelo fato de seu método de determinação não causar perturbações que acabam por alterar a estrutura do solo.

A respeito do GAML-c observam-se duas inconveniências. A primeira diz respeito à necessidade de utilização de uma rotina computacional mais robusta pra a solução de suas equações. A segunda diz respeito ao fato de não ter havido nenhuma das simulações que provesse boas estimativas em todos os solos. É de se esperar que uma melhor estimativa das características do solo, principalmente da condutividade hidráulica, faça com que esse desempenho seja melhor.

## **5. RESUMO E CONCLUSÕES**

O conhecimento do processo de infiltração da água no solo é de extrema importância para diversas áreas da engenharia de conservação de água e solo. Diversos modelos propõem simular o processo de infiltração de água no solo, destacando-se o modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML), devido à sua relativa simplicidade física e aos bons resultados verificados na estimativa da infiltração. Todavia, ainda existem limitações à aplicação do modelo GAML, destacando-se: (a) seus parâmetros de entrada não representarem efetivamente as condições reais de ocorrência da infiltração; (b) a dificuldade e pouca confiabilidade dos métodos de obtenção destes parâmetros; e (c) a incapacidade do modelo em estimar ao perfil de umidade do solo ao longo do tempo.

Do exposto, o presente trabalho teve o objetivo de melhorar a estimativa da infiltração de água no solo, considera

movimento do tipo pistão e elevando o teor de água do solo em um valor fixo igual a  $\Delta\theta$ .

Também se propôs a realização de adequações dos seguintes parâmetros de entrada do modelo de GAML: teor de água do solo na saturação ( $\theta_s$ ), condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) e potencial matricial na frente de umedecimento ( $\psi_f$ ). O conjunto de adequações propostas foi denominado GAML-t, não tendo qualquer relação com o procedimento GAML-c. Propôs-se que  $\theta_s$  fosse substituído pelo teor de água na zona de transmissão ( $\theta_w$ ); que  $K_0$  fosse substituído pela taxa de infiltração estável ( $Tie$ ) da água no solo; e que o potencial matricial na frente de umedecimento ( $\psi_f$ ) fosse calculado por uma equação baseada na condutividade hidráulica relativa ( $Kr$ ) aos teores de água inicial do solo ( $\theta_i$ ) e da zona de transmissão, e dos parâmetros pressão de borbulhamento ( $\psi_b$ ) e índice de distribuição do tamanho de poros ( $\lambda$ ), oriundos do ajuste da curva de retenção de água no solo feito pelo o modelo de Brooks & Corey, sendo  $Kr$  descrita de acordo com a equação de Burdine.

A fim de avaliar o desempenho de GAML-c e GAML-t na estimativa da infiltração de água no solo, realizou-se, em laboratório nove testes experimentais em colunas preenchidas com material de solo de três diferentes classes: Argissolo Vermelho (PV), Latossolo Vermelho (LV) e Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA). Em todos os testes experimentais foram medidas a taxa de infiltração ( $Ti$ ), lâmina infiltrada ( $I$ ) e características físicas dos solos necessárias à aplicação do modelo GAML, do procedimento GAML-c e das adequações GAML-t.

Aplicou-se o GAML-c para a estimativa dos valores experimentais considerando quatro diferentes cenários, relativos à consideração dos parâmetros de entrada  $K_0$  e  $\theta_w$ :  $K_0$  igual à  $Tie$  e  $\theta_w$  medido experimentalmente (TW);  $K_0$  determinado pelo método do permeâmetro de carga constante e  $\theta_w$  medido experimentalmente (KW);  $K_0$  igual à  $Tie$  e  $\theta_w$  igual a  $\theta_s$  (TS); e  $K_0$  determinado pelo método do permeâmetro de carga constante e  $\theta_w$  igual à  $\theta_s$  (KS).

Avaliou-se o desempenho tanto de GAML-c quanto de GAML-t, comparando-os com o modelo de GAML aplicado em sua forma original e também adequado segundo cinco diferentes propostas feitas em estudos realizados no Brasil.

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- o modelo desenvolvido (GAML-c) foi capaz de estimar o perfil de umidade do solo;

- o GAML-c, aplicado utilizando-se os parâmetros da simulação TW, proveu estimativas de infiltração aceitáveis em todos os tipos de solo estudados;
- o GAML-c ainda necessita de mais desenvolvimento e de melhor parametrização de suas variáveis de entrada;
- o uso da Tie para representar a condutividade hidráulica do perfil solo apresentou melhores resultados que o uso do valor de  $K_0$  determinado por intermédio do método do permeâmetro de carga constante;
- adequações dos parâmetros de entrada do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson baseadas em equações empíricas não apresentaram bons resultados para a estimativa da infiltração em todos os solos;
- a adequação dos parâmetros de entrada do modelo de GAML proposta (GAML-t), foi capaz de prover boas estimativas da infiltração de água em todos os solos estudados;
- dentre as adequações do modelo de GAML avaliadas, o GAML-t apresentou melhores resultados, analisando-se conjuntamente os três tipos de solo; e
- no geral, o GAML-t proveu melhores estimativas da infiltração que o GAML-c.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGASSI, M.; BRADFORD, J.M. Methodologies for interrill soil erosion studies. **Soil & Tillage Research**, v.49, p.277-287, 1999.
- AGUIAR, J.V.; LIBARDI, P.L.; SAUNDERS, L.C.U.; PAZ, V.P.S. Ajuste da equação de Holtan modificada para um solo Bruna não cálcico da região Semi-Árida. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.3, p.253-256, 1998.
- AHUJA, L.R. Modeling infiltration into crusted soils by the Green-Ampt approach. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.412-418, 1983.
- ALEXANDER, L.; SKAGGS, R.W. Predicting unsaturated hydraulic conductivity from the soil water characteristic. **Transactions of the ASAE**, v.29, n.1, p.176-184, 1986.
- ALVES, M.C.; CABEDA, M.S.V. Infiltração de água em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.753-761, 1999.
- ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A.C.T.; SOUZA, L.C.F.; GONÇALVES, M.C.; CARVALHO, D.F. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.191-196, 2003.
- ARAÚJO FILHO, J.C.; RIBEIRO, M.R. Infiltração da água em cambissolos do baixio de Irecê (BA). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.363-370, 1996.

- ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v.34, n.1, p.73-89, 1998.
- BEASLEY, D.B.; HUGGINS, L.F.; MONKE, E.J. ANSWERS: a model for watershed planning. **Transactions of the ASAE**, v. 23, p.938-944. 1980.
- BEN-HUR, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Variability of infiltration in a field with surface-sealed soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.1299-1302, 1987.
- BERTONI, L.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4.ed São Paulo: Ícone, 1999.
- BOUWER, H. Infiltration into increasing permeable soils. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.102, n.1R1, p.127-136, 1976.
- 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. Estimating the effective capillary pressure in the Green and Ampt infiltration equation. **Water Resources Research**, v.13, n.3, p.680-682, 1977.
- BRAKENSIEK, D.L., ONSTAD, C.A. Parameter estimation of the Green and Ampt infiltration equation. **Water Resources Research**, v.13, n.6, p.1009-1012, 1977.
- BRAKENSIEK, D.L., RAWLS, W.J. Agricultural management effects on soil water processes. Part II: Green and Ampt parameters for crusting soils. **Transactions of the ASAE**, v.26, n.6, p.1753-1757, 1983.
- BRANDÃO, V.S. **Infiltração de água em solos sujeitos a encrostamento**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 98p:il. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2003.
- BRANDÃO, V.S.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. **Infiltração da água no solo**. Viçosa: UFV, 2002. 98p.
- BROOKS, R.H.; COREY, A.T. **Hydraulic properties of porous media**. Hydrologic Paper #3, Colorado State University. 26p. 1964.
- 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**. Viçosa, MG: UFV, 2002. 119p:il. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2002.

CECÍLIO, R.A.; SANTOS, D.B.; SOUZA, D.O. Proposta de metodologia para obtenção da curva de calibração de umidade do solo com aparelho de TDR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33. São Pedro. **Anais**. São Pedro: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2004. (CD-ROM)

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.; PRUSKI, F.F. Reforço contra a erosão. **Cultivar Máquinas**, v.35, p.10-13, 2004.

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

CHÉRIF, R., ROBERT, J.-L.; LAGACÉ, R. Optimisation des paramètres Green et Ampt pour un modèle conceptuel pluie-infiltration-ruissellement. **Canadian Biosystems Engineering**, v.46, p.1.7-1.14, 2004.

CHILDS, E.C.; BYBORDI, M. The vertical movement of water in stratified porous material, 1. Infiltration. **Water Resources Research**, v.5, n.2, p.446-459.

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**, v.29, n.5, p.1268-1272, 1986.

CLEMMENS, A.J. Infiltration equations for border irrigation models. In: **Proceedings of ASAE Conference on Advances in Infiltration**, Chicago, IL. ASAE, St. Joseph, MI, p.266-274, 1983.

- COELHO, E.F.; CALDAS, R.C.; SANTOS, D.B.; LEDO, C.A.S. Número e espaçamento entre hastes de guia de onda para medida da umidade do solo com TDR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.215-220, 2003.
- COELHO, R.D.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N. Infiltração de água no solo: Parte I. Infiltrômetro de anéis versus infiltrômetro de aspersores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.2, p.137-141, 2000.
- CORDEIRO, J.C. **Características físico-hídricas de latossolos sob vegetação de cerrados do Brasil Central**. Seropédica, RJ: UFRRJ, 1977. 122p. Tese (mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1977.
- COSTA, É.L.; SILVA, A.M.; COLOMBO, A.; ABREU, A.R. Infiltração de água em solo, determinada por simulador de chuvas e pelo método dos anéis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.2, p.131-134, 1999.
- DE ROO, A.P.J.; WESSELING, C.G.; RITSEMA, C.J. **LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output**. Hydrological Processes, 1995.
- 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-CNPQ, 212p., 1997.
- EVANGELISTA, A.W.P. **Metodologia para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 102p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2003.
- FERREIRA, M.M. **Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos brasileiros**. Viçosa, MG: UFV, 1988. 79p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 1988.
- FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. (eds.). USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Lafayette, 1995. Paginação irregular. (Technical documentation, NSERL, Report n. 10).

- FLERCHINGER, G.N., WATTS, F.J., BLOOMSBURG, G.L. Explicit solution to Green-Ampt equation for nonuniform soils. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.114, n.2, p.561-565, 1989.
- 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.
- HACHUM, A.Y., ALFARO, J.F. Rain infiltration into layered soils: prediction. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.106, n.4, p.311-319, 1980.
- HERNANI, L.C.; FREITAS, P.L.; PRUSKI, F.F.; DE MARIA, I.C.; CASTRO FILHO, C.; LANDERS, J.C. A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C.V.; FREITAS JÚNIOR, E.; PERES, J.R.R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2002, 174p.
- HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 385p., 1980.
- HILLEL, D., GARDNER, W.R. Transient infiltration into crust topped profiles. **Soil Science**, v.109, n.2, p.69-76, 1970.
- IDIKE, F.I., LARSON, C.L., SLACK, D.C., YOUNG, R.A. Experimental evaluation of two infiltration models. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.6, p.1428-1433, 1980.
- JENNINGS, G.D.; JARRETT, A.R.; HOOVER, J.R. Evaluating the effect of puddling on infiltration using the Green and Ampt equation. **Transactions of the ASAE**, v.31, n.3, p.761-768, 1988.
- JONES, S.B.; WRAITH, J.M.; OR, D. Time domain reflectometry measurement principles and applications. **Hydrological Processes**, v.16, p.141-153, 2002.
- KIDWELL, M.R.; WELTZ, M.A.; GUERTIN, D.P. Estimation of Green-Ampt effective hydraulic conductivity for rangelands. **Journal of Range Management**, v.50, n.3, p.209-299, 1997.
- KIM, S.J.; CHUNG, H.W. Field evaluation of layered Green-Ampt infiltration model considering temporal variation of physical properties. **Transactions of the ASAE**, v.37, n.6, p.1845-1852, 1994.
- KING, K.W.; ARNOLD, J.G.; BINGER, R.L. Comparison of Green-Ampt and Curve Number methods on Goodwin Creek watershed using SWAT. **Transactions of the ASAE**, v.42, n.4, p.919-925, 1999.

- LE BISSONNAIS, Y. Soil characteristics and aggregate stability. In: Agassi, M. **Soil erosion, conservation, and rehabilitation**. New York: Marcel Dekker Inc.. 1995. p.41-60.
- 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., FARRELL, D.A. Determination of wetting front suction in the Green-Ampt equation. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.38, n.6, p.399-417, 1974.
- MEIN, R.G., LARSON, C.L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, v.9, n.2, p.384-394, 1973.
- MELLO, L.T.A. **Avaliação de metodologias para obtenção dos parâmetros do modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson**. 2003. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de 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.
- MOHAMOUD, Y.M. Evaluating the Green and Ampt infiltration parameter values for tilled and crusted soils. **Journal of Hydrology**, v.123, p.25-38, 1991.
- MOORE, I.D. Infiltration equations modified for surface effects. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.107, n.1, p.71-86, 1981.
- MOORE, I.D., EIGEL, J.D. Infiltration into two-layered soil profiles. **Transaction of the ASAE**, v.24, n.6, p.1496-1503, 1981.
- MOORE, I.D.; LARSON, C.L.; SLACK, D.C.; WILSON, B.N.; IDIKE, F.; HIRSCHI, M.C. Modelling infiltration: a measurable parameter approach. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.26, p.21-32, 1981.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models, I, A discussin of principles. **Journal of Hydrology**, v.10, p.282-290, 1970.
- NOBORIO, K.; McINNES, K.J.; HEILMAN, J.L. Measurements of cumulative infiltration and wetting front location by time domain reflectometry. **Soil Science**, v.161, n.8, p.480-483, 1996.

- OGDEN, F.J. **CASC2D Reference manual**. Department of Civil and Environmental Engineering/University of Connecticut. 83p. 1998.
- ONSTAD, C.A.; OLSON, T.C.; STONE, L.R. An infiltration model tested with monolith moisture measurements. **Soil Science**, v.116, n.1, p.13-17, 1973.
- PAIXÃO, F.J.R.; ANDRADE, A.R.S.; AZEVEDO, C.A.V.; SILVA, J.M.; COSTA, T.L.; FEITOSA, R.M. Estimativa da infiltração da água no solo através de modelos empíricos e funções não lineares. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.5, n.1, p.\_\_\_\_-\_\_\_\_, 2004.
- PALACIOS-VÉLEZ, O.L.; GANDOY-BERNASCONI, W.; CUEVAS-RENAUD, B. Geometric analysis of surface runoff and the computation order of unit elements in distributed hydrological models. **Journal of Hydrology**, v.211, p.266–274, 1998.
- PANACHUKI, E. **Infiltração de água no solo e erosão hídrica, sob chuva simulada, em sistema de integração agricultura-pecuária**. 2003. 59p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.
- PANIKAR, J.T.; NANJAPPA, G. Suction head at wet front in unsaturated-flow problems – a new definition. **Journal of Hydrology**, v.33, p.1-14, 1977.
- PONIZOVSKI, A.A.; CHUDINOVA, S.M.; PACHEPSKY, Y.A. Performance of TDR calibration model as affected by soil texture. **Journal of Hydrology**, v.218, p.35-45, 1999.
- POTT, C.A.; DE MARIA, I.C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.1, p.19-27, 2003.
- POULOVASSILIS, A. EL-GHAMRY, W.M. Hysteretic steady state soil water profiles. **Water Resources Research**, v.13, n.3, p.549-557, 1977.
- PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Sociedade Autônoma de Estudos Avançados em Física do Solo. 1996. 446p.
- 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**, v.32, n.1, p.77-84, 1997.
- RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L. Comparison between Green-Ampt and Curve Number runoff predictions. **Transactions of the ASAE**, v.29, n.6, p.1597-1599, 1986.

- 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.L., BRAKENSIEK, D.L., SIMANTON, J.R., KOHL, K.D. Development of a crust factor for a Green Ampt model. **Transactions of the ASAE**, v.33, n.4, p.1224-1228, 1990.
- RAWLS, W.J., DAVID, G., VAN MULLEN, J.A., WARD, T.J. Infiltration. In: ASCE. **Hydrology Handbook**. 2.ed. New York. p.75-124. (ASCE Manuals and Report on Engineering Practice, 28), 1996.
- 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**, v.16, p.289-298, 1992.
- RISSE, L.M.; NEARING, M.A.; ZHANG, X.C. Variability in Green-Ampt effective conductivity under fallow conditions. **Journal of Hydrology**, v.169, p.1-24, 1995.
- RODRIGUES, L.N. **Modelo para dimensionamento e para simulação do desempenho de pivô central**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 145p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade de Viçosa, 1999.
- SCHULZE, R. **Hydrology and Agrohydrology: A text to accompany the ACRU 3.00 Agrohydrological Modelling System**. 1995. (WRC report II)
- SHUKLA, M.K.; LAL, R.; UNKEFER, P. Experimental evaluation of infiltration models for different land use and soil management systems. **Soil Science**, v.168, n.3, p.178-191, 2003.
- SIDIRAS, N.; ROTH, C.H. Infiltration measurements with double-ring infiltrometers and a Simulator under different surface conditions on an Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v.9, p.161-168, 1987.
- SILVA, C.G. **Perdas de solo e água e características de infiltração em sistemas de plantio direto e convencional**. 2003. 42p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.
- SILVA, C.L.; KATO, E. Avaliação de modelos para previsão da infiltração de água em solos sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.7, p.1149-1158, 1998.
- SILVA, J.M.A. **Modelo hidrológico para o cálculo do balanço hídrico e obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas: desenvolvimento e aplicação**. Viçosa: UFV, 2003. 137p.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2003.

SILVA, L.L.; SERRALHEIRO, R.P. Determinação de equações da infiltrabilidade de um solo Mediterrânico para o dimensionamento e gestão da rega com rampas rotativas. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 7., 2005 **Comunicações**. Évora, Portugal. 2005. (CD-ROM). Disponível em [http://home.der.uevora.pt/~lilsilva/artigos/58p\\_7SILUSBA.pdf](http://home.der.uevora.pt/~lilsilva/artigos/58p_7SILUSBA.pdf)

SILVA, T.M.; COELHO, E.F.; SANTOS, D.B.; SOUZA, C.F. Avaliação de guias de onda de TDR com diferentes padrões e espaçamento entre hastes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, 2002, Salvador. **Anais**. Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002. (CD-ROM).

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.

SKAGGS, R. W. **DRAINMOD: Reference Report - Methods for Design and Evaluation of Drainage-Water Management Systems for Soils with High Water Tables**. USDA-SCS. 1980.

SKAGGS, R.W.; HUGGINS, L.E.; MONKE, E.J.; FOSTER, G.R. Experimental evaluation of infiltration equations. **Transactions of the ASAE**, v.12, n.6, p.822-828, 1969.

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.

TIMLIN, D.; PACHEPSKY, Y. Infiltration measurement using a vertical time-domain reflectometry probe and a reflection simulation model. **Soil Science**, v.167, n.1, p.1-8, 2002.

TIMM, L.C. **Avaliação de alguns modelos matemáticos para a determinação da condutividade hidráulica de solos não-saturados**. 1994. 74p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa.

- TOMBUL, M. Relationship between infiltration rate and contaminant transport in unsaturated zone. In: First International Conference on Environmental Research and Assessment. **Proceedings...** Bucureste, Romênia, 2003. Disponível em: <http://www.portiledefier.ro/icera2003/051.pdf>
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, p.574-582, 1980.
- van GENUTCHEN, M.T. A closed-form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, v.44, p.892-898, 1980.
- WANG, Q.; HORTON, R.; SHAO, M. Algebraic model for one-dimensional infiltration and soil water distribution. **Soil Science**, v.168, n.10, p.671-676, 2003.
- WANG, Q.; SHAO, M.; HORTON, R. Modified Green and Ampt models for layered soil infiltration and muddy water infiltration. **Soil Science**, v.164, n.7, p.445-453, 1999.
- WANG, X.; BENSON, C.H. Infiltration and saturated hydraulic conductivity of compacted clay. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.121, n.10, p.713-722, 1995.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. **Applications of soil physics**. Academic Press: New York, 1980. p.319-344.
- 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.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p.184-194, 1981.
- WILSON, B.N.; ODURO, P. Analytical sensitivity coefficients for the GAML infiltration model. **Transactions of the ASAE**, v.47, n.2, p.479-484, 2004.
- 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.

## **ANEXOS**

## ANEXO A – Coeficientes estatísticos para as simulações feitas pelo GAML-c

Quadro A1. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 1º teste experimental do LVA

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		$K_0, \theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		$K_0, \theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	0,99	0,93	0,99	0,92	0,99	0,98	0,99	0,97
<b>d</b>	0,92	0,91	0,86	0,88	0,99	0,98	1,00	0,97
<b>c</b>	0,92	0,85	0,85	0,81	0,99	0,96	1,00	0,94
<b>Desempenho</b>	Ótimo	M. bom	Ótimo	M. bom	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
<b>E</b>	0,75	0,67	0,57	0,54	0,97	0,94	1,00	0,91
<b>E'</b>	0,54	0,40	0,39	0,27	0,83	0,78	0,94	0,77
<b>d'</b>	0,73	0,73	0,64	0,67	0,92	0,88	0,97	0,88
<b>c'</b>	0,73	0,68	0,64	0,62	0,92	0,86	0,97	0,85
<b>Desempenho</b>	Bom	Bom	Mediano	Mediano	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
<b>REMQ</b>	27,25	70,42	35,42	82,65	9,53	30,32	3,57	36,99
<b>EMA</b>	22,29	54,94	29,16	67,28	8,07	20,54	2,83	21,67
<b>EMP</b>	23%	28%	30%	36%	9%	12%	4%	10%
<b>a</b>	0,71	0,83	0,63	0,83	1,10	0,83	0,97	0,83
<b>b</b>	3,05	-20,31	3,43	-32,04	-1,52	38,67	-0,22	18,16

Quadro A2. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 2º teste experimental do LVA

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		$K_0, \theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		$K_0, \theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	0,99	0,98	0,99	0,981	0,99	0,98	0,99	0,961
<b>d</b>	0,82	0,82	1,00	0,99	0,99	0,98	0,77	0,84
<b>c</b>	0,82	0,80	1,00	0,97	0,99	0,96	0,77	0,81
<b>Desempenho</b>	M. bom	M. bom	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	M. bom	M. bom
<b>E</b>	0,48	0,51	1,00	0,96	0,96	0,93	-1,24	0,32
<b>E'</b>	0,32	0,17	0,95	0,77	0,80	0,66	-0,41	-0,23
<b>d'</b>	0,59	0,61	0,97	0,89	0,91	0,81	0,53	0,21
<b>c'</b>	0,59	0,59	0,97	0,87	0,91	0,80	0,53	0,21
<b>Desempenho</b>	Sofrível	Sofrível	Ótimo	Ótimo	Ótimo	M. bom	Sofrível	Péssimo
<b>REMQ</b>	34,46	63,47	2,62	18,27	9,84	24,93	71,82	75,31
<b>EMA</b>	28,84	47,81	2,20	13,18	8,39	19,47	59,73	70,93
<b>EMP</b>	33%	39%	3%	15%	10%	21%	63%	85%
<b>a</b>	0,61	0,55	0,96	0,94	1,11	0,78	1,83	0,90
<b>b</b>	3,21	5,62	2,23	2,46	-1,12	29,04	-8,07	82,25

Quadro A3. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 3º teste experimental do LVA

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		K <sub>0</sub> , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		K <sub>0</sub> , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	0,99	0,93	0,99	0,93	0,99	0,95	0,99	0,95
<b>d</b>	1,00	0,95	1,00	0,95	0,96	0,95	0,97	0,95
<b>c</b>	1,00	0,88	1,00	0,88	0,96	0,90	0,96	0,90
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
<b>E</b>	1,00	0,84	0,99	0,83	0,80	0,84	0,82	0,84
<b>E'</b>	0,93	0,58	0,93	0,57	0,57	0,55	0,60	0,55
<b>d'</b>	0,97	0,77	0,97	0,77	0,81	0,72	0,82	0,73
<b>c'</b>	0,96	0,72	0,96	0,71	0,81	0,68	0,82	0,69
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Bom	Ótimo	Bom	M. bom	Bom	M. bom	Bom
<b>REMQ</b>	3,29	37,92	3,41	38,64	21,04	37,48	19,72	36,91
<b>EMA</b>	2,73	28,06	2,79	28,57	17,50	30,06	16,45	29,41
<b>EMP</b>	5%	21%	5%	21%	18%	29%	17%	28%
<b>a</b>	1,00	0,74	0,99	0,74	1,25	0,75	1,23	0,75
<b>b</b>	0,12	27,14	0,22	25,99	-3,18	53,99	-3,01	52,41

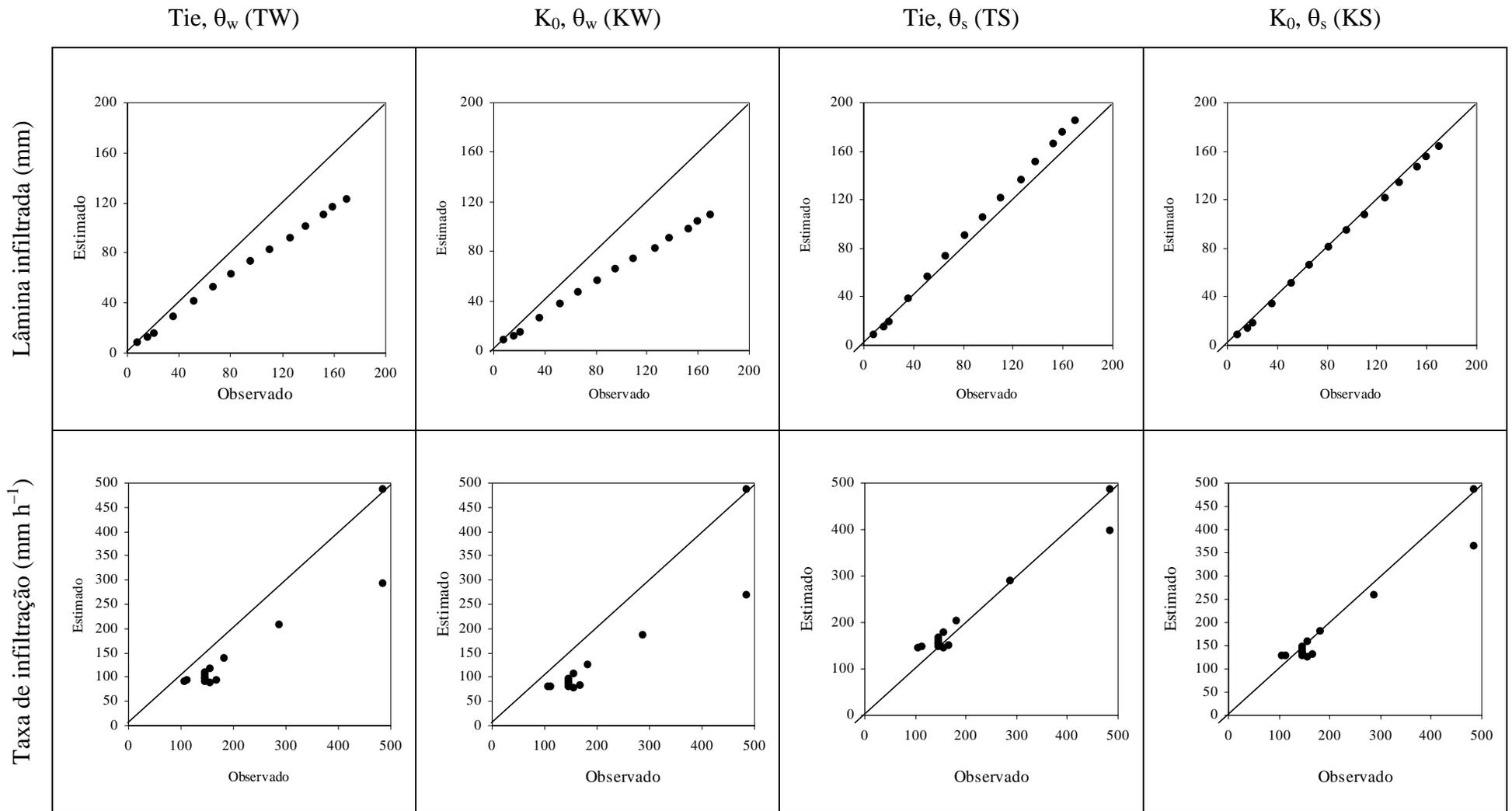
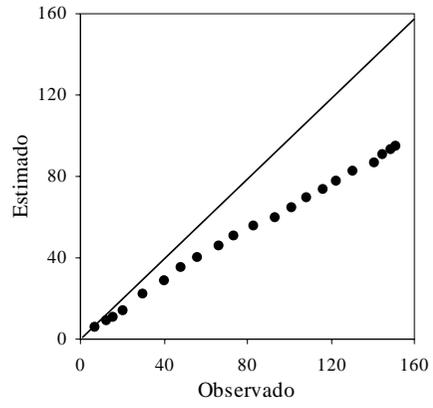


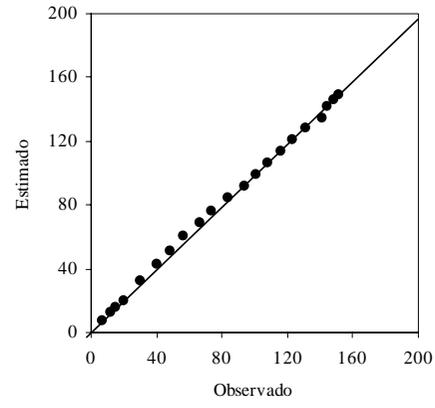
Figura A1. Plotagem dos pontos observados e estimados para Ti e I nas simulações de GAML-c para o 1º teste do LVA.

Lámina infiltrada (mm)

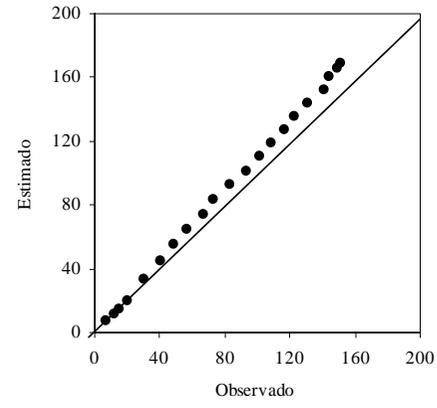
Tie,  $\theta_w$  (TW)



$K_0, \theta_w$  (KW)



Tie,  $\theta_s$  (TS)



$K_0, \theta_s$  (KS)

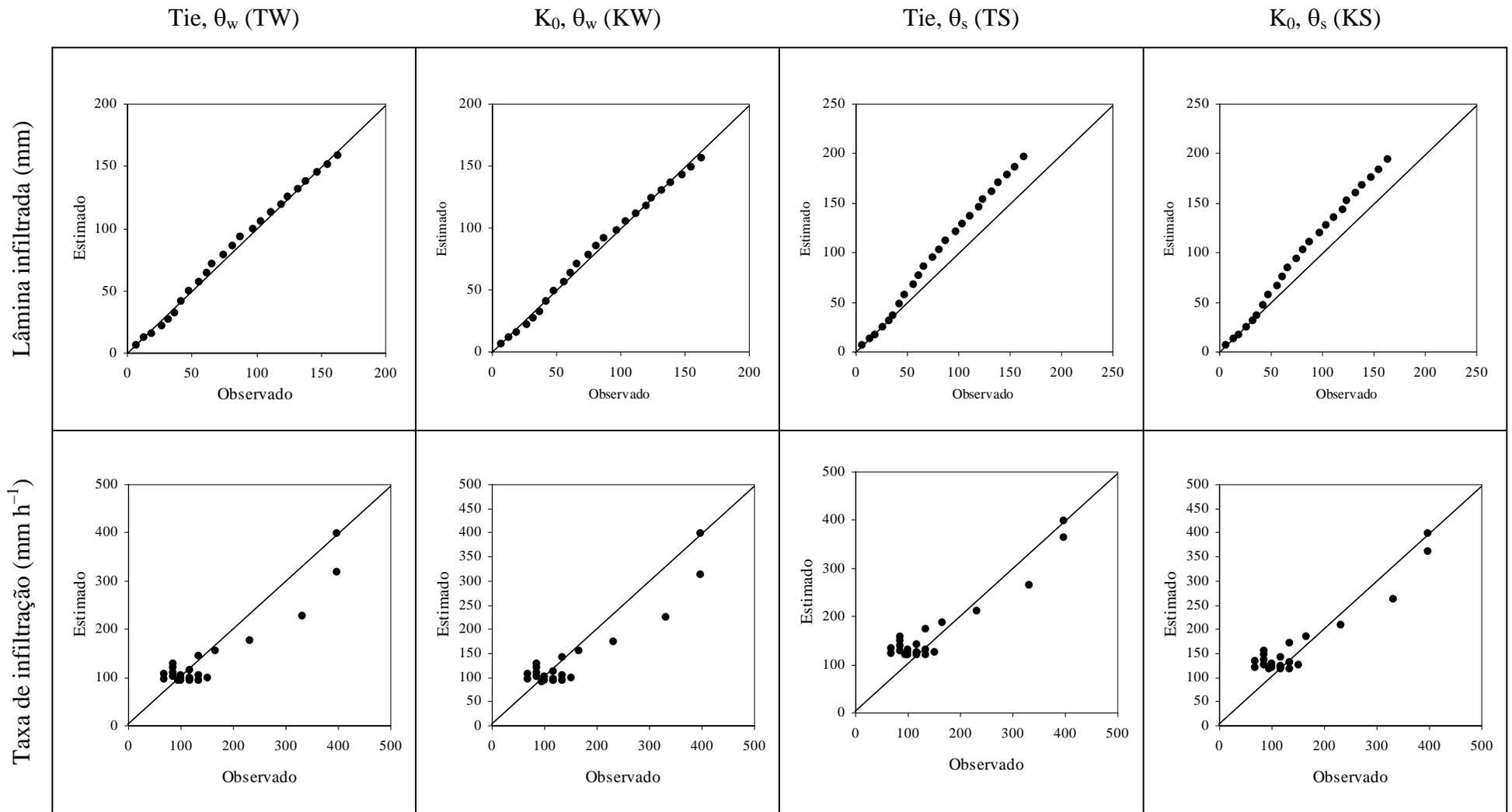


Figura A3. Plotagem dos pontos observados e estimados para Ti e I nas simulações de GAML-c para o 3º teste do LVA.

Quadro A4. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 1º teste experimental do PV

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		K <sub>0</sub> , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		K <sub>0</sub> , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	0,99	0,89	0,99	0,72	0,99	0,95	0,99	0,79
<b>d</b>	0,96	0,90	0,64	0,58	0,99	0,96	0,85	0,72
<b>c</b>	0,95	0,80	0,64	0,41	0,99	0,91	0,85	0,57
<b>Desempenho</b>	Ótimo	M. bom	Mediano	Mau	Ótimo	Ótimo	M. bom	Sofrível
<b>E</b>	0,86	0,60	0,06	-0,86	0,97	0,87	0,56	-0,04
<b>E'</b>	0,68	0,51	0,13	-0,27	0,88	0,72	0,41	0,10
<b>d'</b>	0,82	0,76	0,44	0,37	0,94	0,84	0,64	0,53
<b>c'</b>	0,82	0,68	0,44	0,26	0,94	0,80	0,64	0,42
<b>Desempenho</b>	M. bom	Bom	Mau	Péssimo	Ótimo	M. bom	Mediano	Mau
<b>REMQ</b>	13,37	37,15	34,61	80,47	6,08	21,38	23,63	60,08
<b>EMA</b>	10,27	26,40	27,79	68,72	3,90	15,02	19,01	48,81
<b>EMP</b>	14%	21%	42%	51%	5%	18%	29%	35%
<b>a</b>	0,76	0,89	0,42	0,63	1,12	0,77	0,61	0,67
<b>b</b>	2,72	-9,20	3,77	-17,74	-2,67	39,14	2,43	-3,00

Quadro A5. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 2º teste experimental do PV

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		K <sub>0</sub> , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		K <sub>0</sub> , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	0,99	0,92	0,99	0,75	0,99	0,79	0,99	0,82
<b>d</b>	1,00	0,96	0,77	0,52	0,97	0,75	0,89	0,64
<b>c</b>	1,00	0,88	0,77	0,39	0,97	0,59	0,89	0,52
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Ótimo	M. bom	Péssimo	Ótimo	Sofrível	Ótimo	Sofrível
<b>E</b>	0,99	0,81	0,43	-2,92	0,86	0,30	0,69	-1,30
<b>E'</b>	0,94	0,79	0,37	-0,81	0,72	0,43	0,55	-0,37
<b>d'</b>	0,97	0,90	0,61	0,29	0,88	0,65	0,73	0,38
<b>c'</b>	0,97	0,82	0,61	0,22	0,88	0,51	0,73	0,31
<b>Desempenho</b>	Ótimo	M. bom	Mediano	Péssimo	Ótimo	Péssimo	Bom	Péssimo
<b>REMQ</b>	2,82	18,44	26,28	83,78	12,92	35,43	19,25	64,09
<b>EMA</b>	1,92	8,76	19,10	74,18	8,50	23,40	13,80	56,21
<b>EMP</b>	3%	6%	29%	44%	11%	16%	21%	33%
<b>a</b>	1,04	1,02	0,48	1,05	1,27	0,52	0,62	1,03
<b>b</b>	0,22	-3,29	5,46	-83,94	-4,53	110,57	4,45	-61,61

Quadro A6. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 3º teste experimental do PV

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		K <sub>0</sub> , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		K <sub>0</sub> , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	0,99	0,72	0,99	0,73	0,99	0,69	0,99	0,80
<b>d</b>	0,99	0,82	0,83	0,42	0,98	0,39	0,94	0,60
<b>c</b>	0,99	0,59	0,82	0,31	0,98	0,27	0,94	0,48
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Sofrível	M. bom	Péssimo	Ótimo	Péssimo	Ótimo	Mau
<b>E</b>	0,98	0,29	0,57	-6,86	0,91	-0,20	0,83	-2,54
<b>E'</b>	0,90	0,51	0,46	-1,51	0,80	0,27	0,67	-0,62
<b>d'</b>	0,95	0,72	0,68	0,25	0,91	0,44	0,82	0,38
<b>c'</b>	0,95	0,52	0,67	0,18	0,91	0,30	0,81	0,31
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Sofrível	Bom	Péssimo	Ótimo	Sofrível	M. bom	Péssimo
<b>REMQ</b>	4,28	29,78	19,70	99,32	9,00	38,73	12,40	66,67
<b>EMA</b>	2,63	16,75	13,59	85,54	5,00	25,01	8,20	55,20
<b>EMP</b>	4%	8%	22%	37%	6%	12%	12%	24%
<b>a</b>	1,10	0,81	0,53	1,45	1,24	0,19	0,69	1,34
<b>b</b>	-1,67	56,30	6,55	-196,38	-5,05	223,33	4,86	-138,32

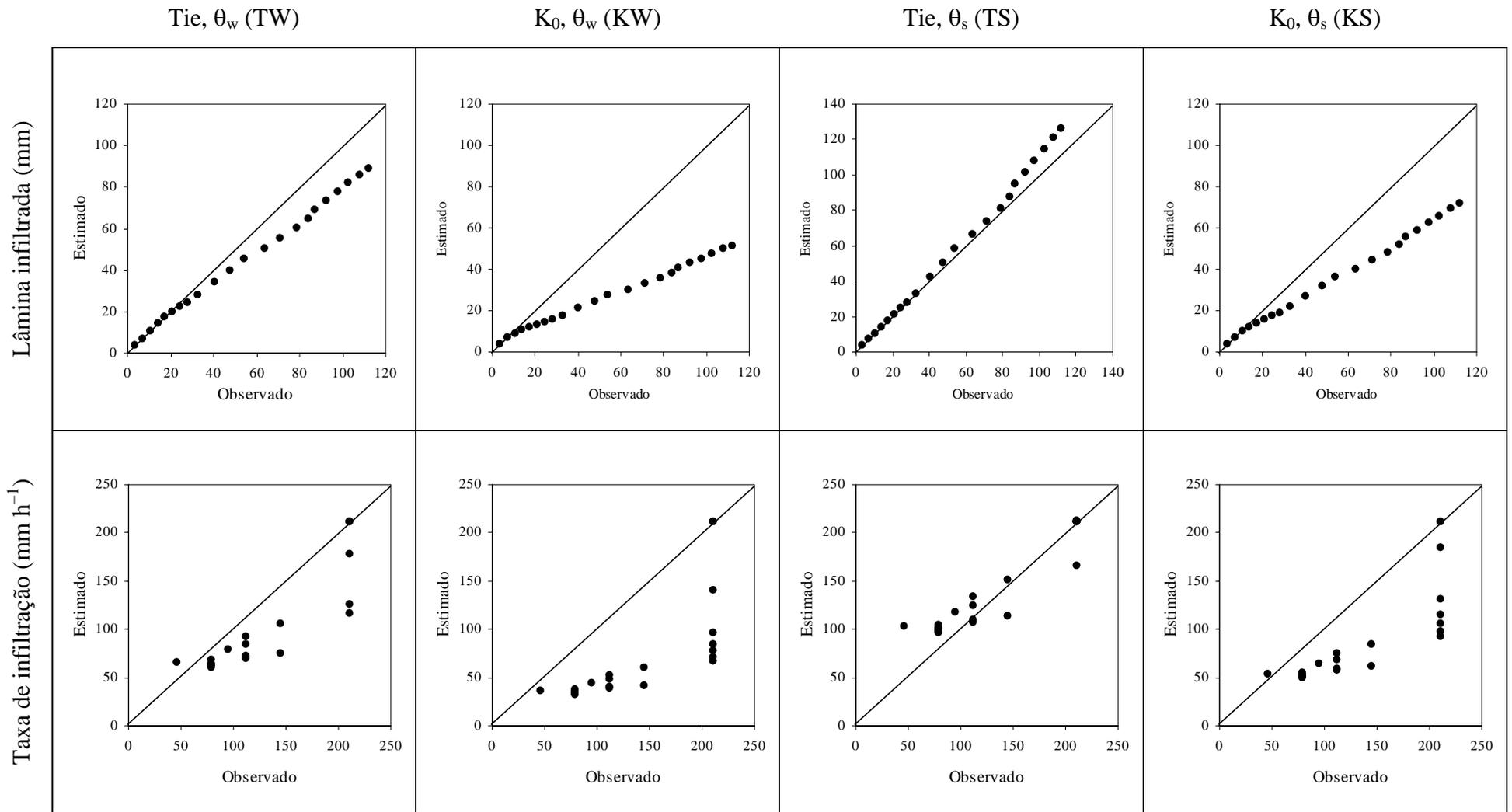


Figura A4. Plotagem dos pontos observados e estimados para Ti e I nas simulações de GAML-c para o 1º teste do PV.

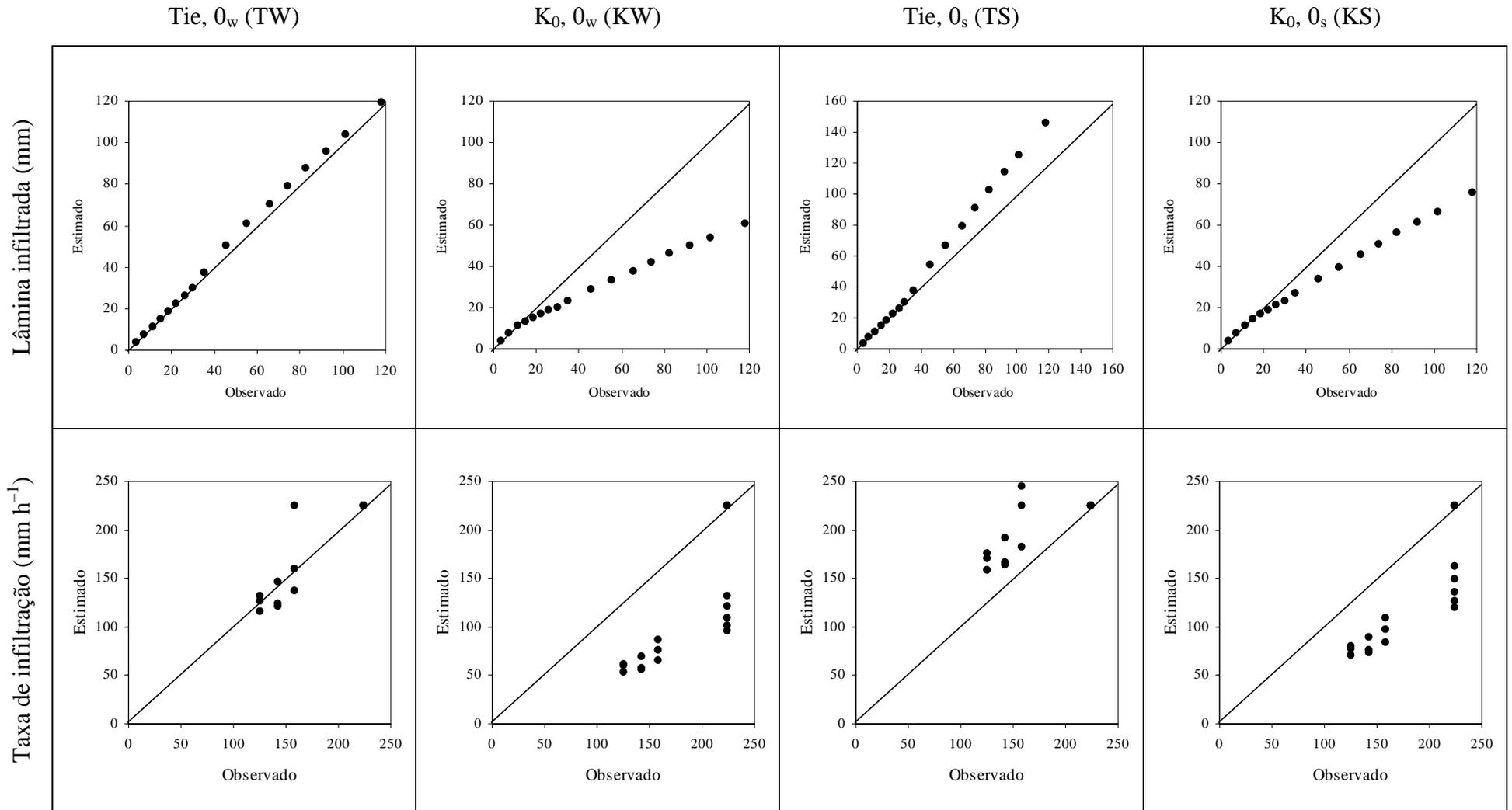


Figura A5. Plotagem dos pontos observados e estimados para Ti e I nas simulações de GAML-c para o 2º teste do PV.

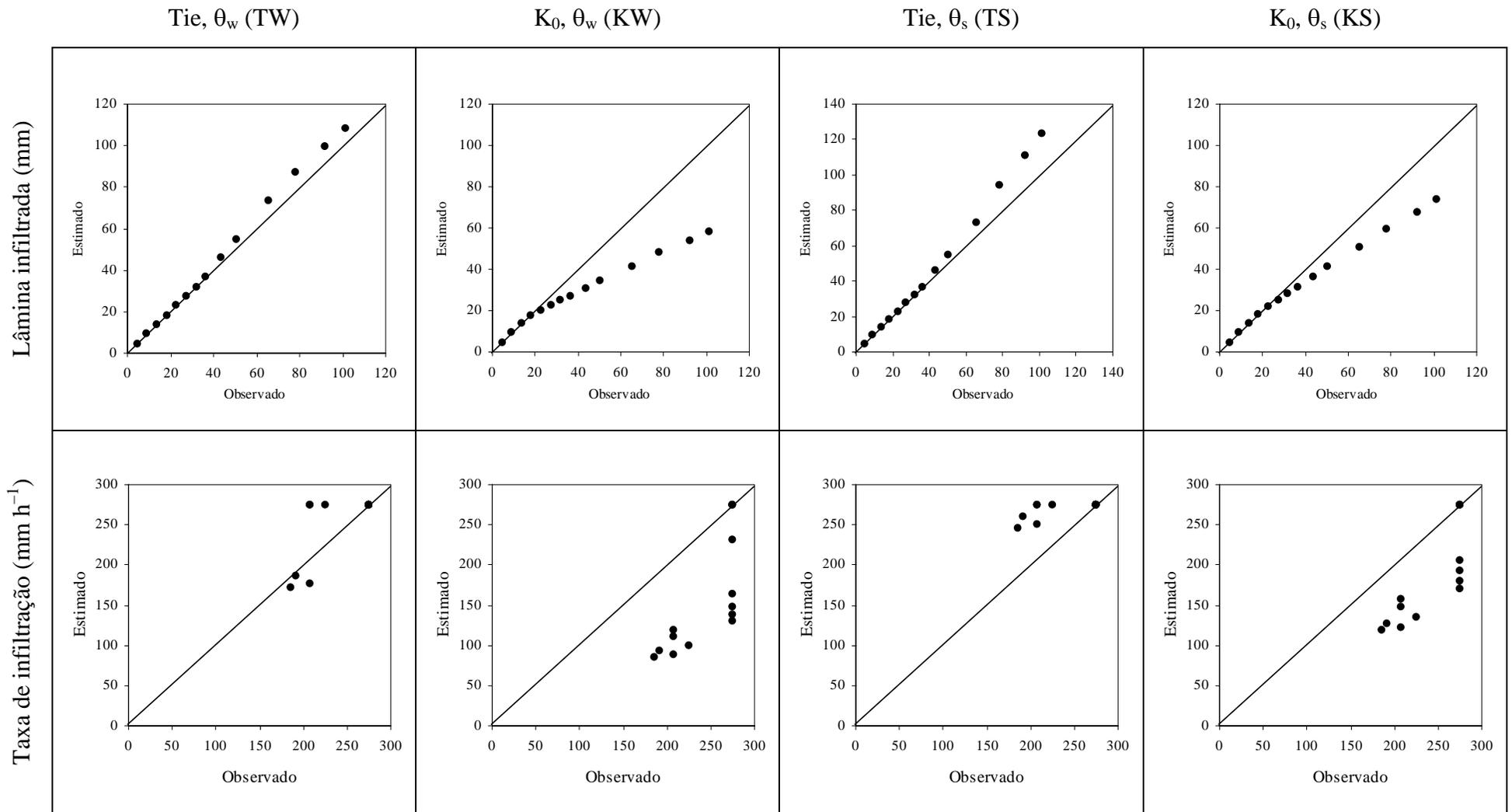


Figura A6. Plotagem dos pontos observados e estimados para Ti e I nas simulações de GAML-c para o 3º teste do PV.

Quadro A7. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 1º teste experimental do LV

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		$K_0$ , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		$K_0$ , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	0,98	0,91	0,99	0,80	0,99	0,84	0,99	0,97
<b>d</b>	0,91	0,81	0,44	0,46	0,89	0,68	0,94	0,88
<b>c</b>	0,89	0,73	0,43	0,37	0,89	0,57	0,93	0,85
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Bom	Mau	Péssimo	Ótimo	Sofrível	Ótimo	Ótimo
<b>E</b>	0,75	-0,56	-0,61	-3,36	0,31	-0,32	0,80	0,35
<b>E'</b>	0,58	-0,46	-0,24	-1,51	0,19	-0,29	0,59	0,05
<b>d'</b>	0,74	0,58	0,22	0,26	0,68	0,23	0,76	0,64
<b>c'</b>	0,73	0,53	0,22	0,21	0,68	0,19	0,76	0,62
<b>Desempenho</b>	Bom	Sofrível	Péssimo	Péssimo	Bom	Péssimo	M. bom	Mediano
<b>REMQ</b>	20,14	120,83	51,60	202,31	33,77	111,29	18,23	77,83
<b>EMA</b>	14,70	111,24	43,30	190,80	28,34	98,08	14,49	71,98
<b>EMP</b>	15%	41%	49%	66%	31%	36%	15%	26%
<b>a</b>	0,64	1,62	0,31	0,93	1,45	0,70	0,73	1,14
<b>b</b>	14,11	-268,47	8,96	-169,30	-5,60	189,89	5,85	-115,33

Quadro A8. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 2º teste experimental do LV

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		$K_0$ , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		$K_0$ , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	0,99	0,98	0,99	0,88	0,99	0,88	0,99	0,98
<b>d</b>	0,94	0,87	0,48	0,53	0,90	0,75	0,90	0,85
<b>c</b>	0,94	0,85	0,48	0,47	0,90	0,67	0,90	0,84
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Ótimo	Mau	Mau	Ótimo	Bom	Ótimo	M. bom
<b>E</b>	0,83	0,14	-0,49	-2,58	0,40	-0,11	0,69	0,18
<b>E'</b>	0,65	-0,17	-0,20	-1,42	0,23	-0,26	0,48	-0,16
<b>d'</b>	0,79	0,62	0,25	0,30	0,69	0,30	0,69	0,58
<b>c'</b>	0,79	0,61	0,24	0,27	0,69	0,26	0,69	0,58
<b>Desempenho</b>	M. bom	Mediano	Péssimo	Péssimo	Bom	Péssimo	Bom	Sofrível
<b>REMQ</b>	18,90	92,80	56,70	189,77	36,04	105,94	25,75	90,73
<b>EMA</b>	14,02	87,74	47,94	181,43	30,97	94,27	20,98	86,77
<b>EMP</b>	13%	32%	48%	62%	31%	33%	20%	31%
<b>a</b>	0,71	1,49	0,35	1,02	1,39	0,86	0,68	1,16
<b>b</b>	12,66	-224,40	9,10	-189,05	-3,53	138,72	6,96	-136,42

Quadro A9. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração feitas pelo GAML-c no 3º teste experimental do LV

Estatística	Tie, $\theta_w$ (TW)		K <sub>0</sub> , $\theta_w$ (KW)		Tie, $\theta_s$ (TS)		K <sub>0</sub> , $\theta_s$ (KS)	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	0,996	0,967	0,998	0,905	1,000	0,885	0,999	0,981
<b>d</b>	0,98	0,93	0,61	0,64	0,91	0,80	0,93	0,90
<b>c</b>	0,97	0,90	0,61	0,58	0,91	0,71	0,93	0,89
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Ótimo	Mediano	Sofrível	Ótimo	Bom	Ótimo	Ótimo
<b>E</b>	12,20	64,67	48,39	154,43	33,09	96,77	21,11	71,20
<b>E'</b>	0,77	0,25	-0,03	-0,92	0,28	-0,09	0,57	0,12
<b>d'</b>	0,87	0,72	0,35	0,39	0,71	0,40	0,75	0,66
<b>c'</b>	0,87	0,70	0,35	0,35	0,71	0,36	0,75	0,65
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Bom	Péssimo	Péssimo	Bom	Péssimo	M. bom	Mediano
<b>REMQ</b>	0,93	0,62	-0,10	-1,15	0,48	0,16	0,79	0,54
<b>EMA</b>	9,09	57,45	40,88	146,85	28,51	83,03	17,22	67,07
<b>EMP</b>	8%	22%	40%	54%	28%	32%	16%	25%
<b>a</b>	0,81	1,27	0,44	0,96	1,36	0,85	0,74	1,07
<b>b</b>	9,43	-126,03	8,75	-134,70	-3,54	128,08	6,01	-88,85

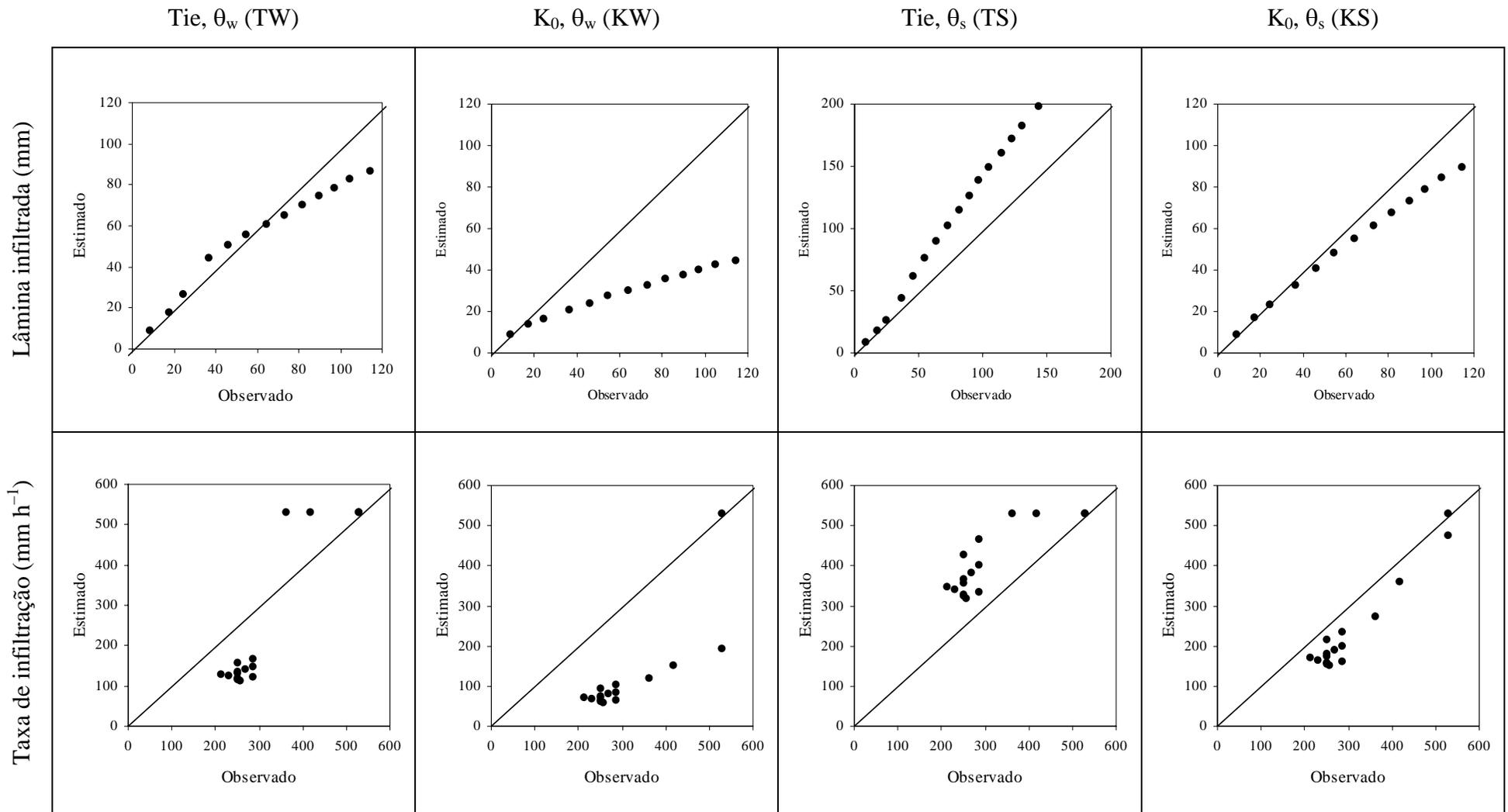


Figura A7. Plotagem dos pontos observados e estimados para Ti e I nas simulações de GAML-c para o 1º teste do LV.

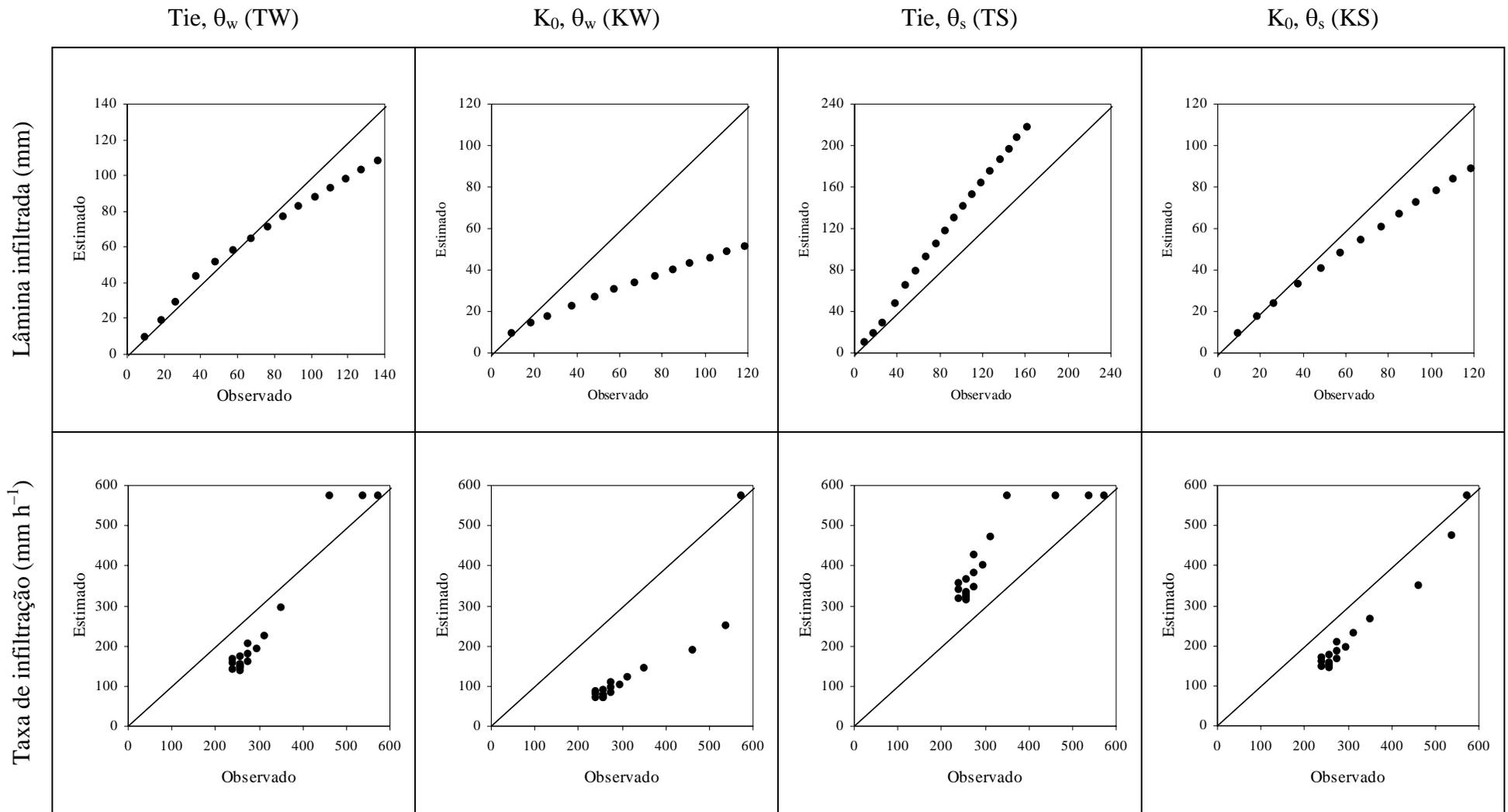


Figura A8. Plotagem dos pontos observados e estimados para Ti e I nas simulações de GAML-c para o 2º teste do LV.

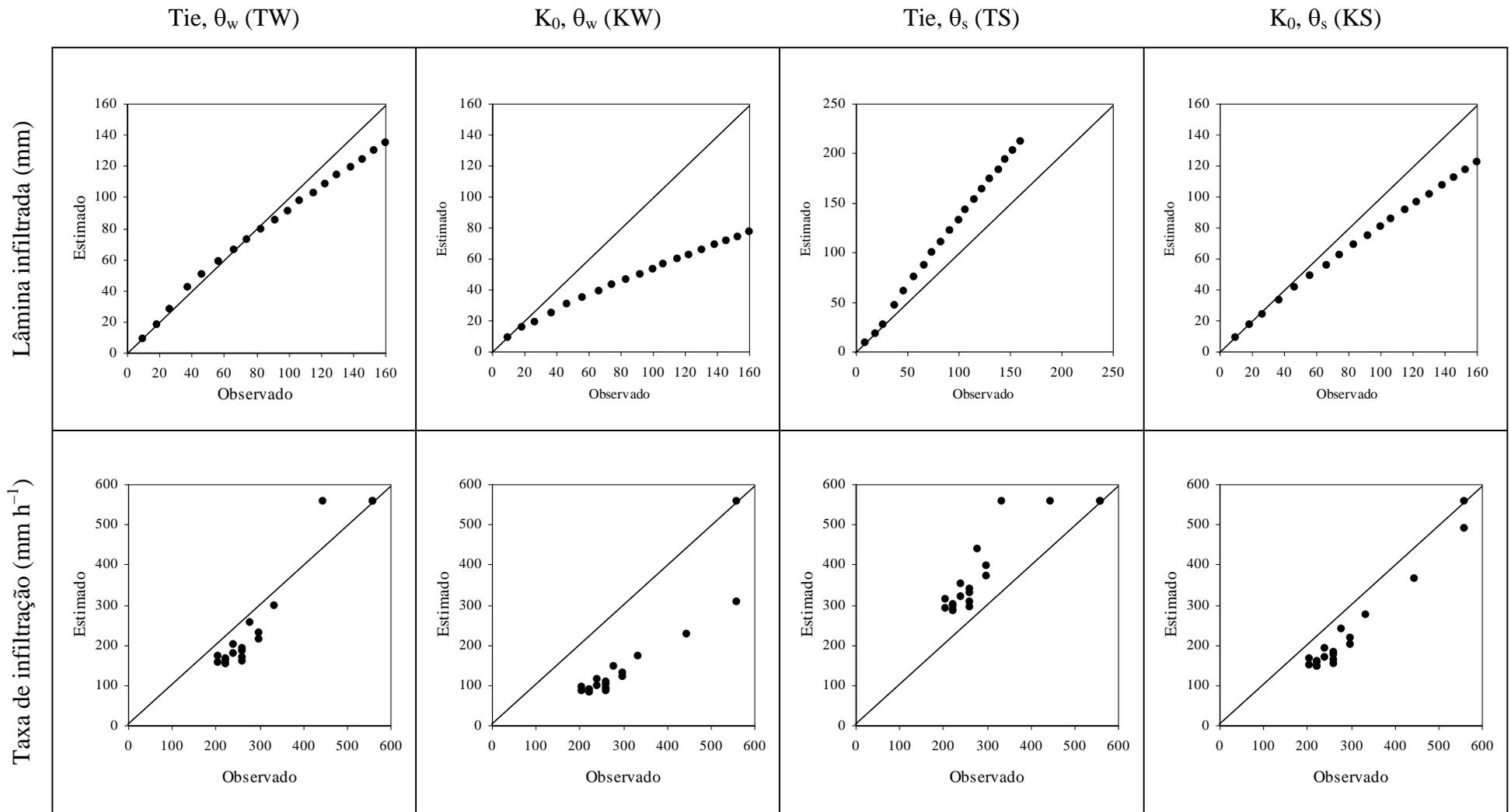


Figura A9. Plotagem dos pontos observados e estimados para Ti e I nas simulações de GAML-c para o 3º teste do LV.

**ANEXO B – Coeficientes estatísticos para as simulações feitas pelo GAML-c, GAML-t e demais adequações do modelo de GAML**

Quadro B1. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 1º teste experimental do LVA

Estatística	S2 (GAML-t)		S3		S4		S5		S6		S7		S8	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	1,00	0,938	0,999	0,931	0,999	0,86	0,99	0,88	0,99	0,86	0,99	0,77	0,99	0,95
<b>d</b>	1,00	0,88	1,00	0,95	0,86	0,88	0,84	0,87	0,78	0,80	0,72	0,69	0,99	0,96
<b>c</b>	1,00	0,82	1,00	0,88	0,86	0,76	0,84	0,77	0,78	0,69	0,72	0,53	0,98	0,91
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Muito Bom	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Bom	Sofrível	Ótimo	Ótimo
<b>E</b>	1,00	0,70	1,00	0,83	0,09	0,49	-0,18	0,46	-0,89	0,20	-2,00	-0,29	0,93	0,88
<b>E'</b>	0,96	0,61	0,96	0,72	0,07	0,38	-0,05	0,27	-0,31	0,04	-0,64	-0,23	0,75	0,72
<b>d'</b>	0,98	0,77	0,98	0,85	0,64	0,69	0,61	0,59	0,55	0,44	0,49	0,28	0,88	0,84
<b>c'</b>	0,98	0,72	0,98	0,79	0,63	0,59	0,61	0,52	0,55	0,38	0,49	0,22	0,88	0,80
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Bom	Ótimo	Muito Bom	Mediano	Sofrível	Mediano	Sofrível	Sofrível	Péssimo	Mau	Péssimo	Ótimo	Muito Bom
<b>REMQ</b>	2,51	66,72	2,34	50,59	51,58	86,96	58,95	89,45	74,50	108,77	93,79	138,25	14,32	42,57
<b>EMA</b>	1,93	36,00	1,97	25,60	44,67	57,32	50,22	67,66	62,82	88,22	78,60	113,23	12,15	25,61
<b>EMP</b>	7%	13%	5%	11%	46%	33%	50%	42%	61%	56%	75%	72%	13%	13%
<b>a</b>	1,04	0,53	1,02	0,75	1,44	0,95	1,55	0,88	1,72	0,81	1,93	0,72	1,15	0,75
<b>b</b>	-4,20	73,68	-0,60	32,37	5,91	63,58	1,54	91,90	-1,04	128,17	-3,28	170,77	-1,62	52,16

Quadro B2. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 2º teste experimental do LVA

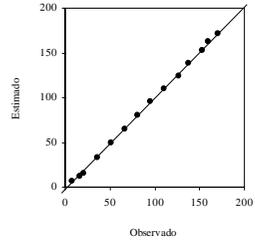
Estatística	S2 (GAML-t)		S3		S4		S5		S6		S7		S8	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>R</b>	0,999	0,977	1,000	0,970	0,994	0,710	0,998	0,753	0,996	0,828	0,995	0,783	0,999	0,974
<b>d</b>	0,99	0,73	0,74	0,84	0,52	0,56	0,50	0,52	0,71	0,77	0,61	0,68	0,98	0,98
<b>c</b>	0,99	0,72	0,74	0,82	0,51	0,40	0,49	0,39	0,71	0,64	0,61	0,54	0,98	0,95
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Bom	Bom	Muito Bom	Sufrível	Mau	Mau	Péssimo	Bom	Mediano	Mediano	Sufrível	Ótimo	Ótimo
<b>E</b>	0,96	0,50	-1,64	0,36	-8,53	-1,80	-10,17	-2,05	-1,93	-0,27	-4,35	-0,85	0,91	0,93
<b>E'</b>	0,78	0,43	-0,53	-0,19	-2,01	-1,22	-2,22	-1,50	-0,69	-0,36	-1,27	-0,74	0,70	0,68
<b>d'</b>	0,89	0,65	0,51	0,21	0,30	0,08	0,29	0,01	0,46	0,33	0,37	0,19	0,86	0,82
<b>c'</b>	0,89	0,64	0,51	0,21	0,30	0,06	0,29	0,01	0,46	0,28	0,37	0,15	0,86	0,80
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Mediano	Sufrível	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Mau	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Ótimo	Muito Bom
<b>REMQ</b>	9,67	64,62	77,83	72,75	147,98	152,39	160,25	159,14	82,06	102,77	110,89	123,90	14,59	24,27
<b>EMA</b>	9,36	32,73	64,94	68,68	127,76	128,48	136,38	144,26	71,69	78,81	96,41	100,43	12,60	18,52
<b>EMP</b>	18%	22%	68%	85%	141%	141%	147%	164%	82%	82%	109%	107%	16%	21%
<b>a</b>	0,96	0,35	1,89	0,84	2,53	0,90	2,74	0,82	1,82	1,07	2,12	1,00	1,17	0,82
<b>b</b>	-6,37	52,87	-7,99	87,02	2,77	139,83	-6,06	165,59	5,00	71,09	4,80	100,06	-1,45	25,48

Quadro B3. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 3º teste experimental do LVA

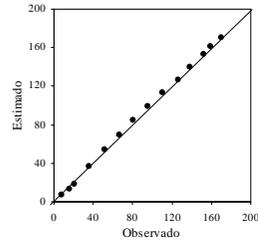
Estatística	S2 (GAML-t)		S3		S4		S5		S6		S7		S8	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	0,997	0,948	0,998	0,942	0,988	0,637	0,993	0,762	0,993	0,757	0,992	0,581	0,998	0,943
<b>d</b>	0,94	0,94	0,95	0,94	0,65	0,58	0,71	0,68	0,70	0,67	0,57	0,42	0,95	0,94
<b>c</b>	0,94	0,89	0,95	0,89	0,64	0,37	0,70	0,52	0,70	0,51	0,57	0,24	0,94	0,89
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Mediano	Péssimo	Bom	Sofrível	Bom	Sofrível	Sofrível	Péssimo	Ótimo	Ótimo
<b>E</b>	0,66	0,81	0,73	0,82	-3,39	-1,00	-2,18	-0,44	-2,31	-0,48	-6,23	-1,91	0,70	0,82
<b>E'</b>	0,44	0,51	0,50	0,52	-1,06	-0,55	-0,75	-0,39	-0,78	-0,42	-1,59	-1,07	0,47	0,51
<b>d'</b>	0,76	0,70	0,78	0,70	0,41	0,20	0,46	0,20	0,45	0,18	0,35	0,02	0,77	0,69
<b>c'</b>	0,76	0,66	0,78	0,66	0,41	0,13	0,45	0,15	0,45	0,14	0,35	0,01	0,77	0,65
<b>Desempenho</b>	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Bom	Mau	Péssimo	Mau	Péssimo	Mau	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Muito Bom
<b>REMQ</b>	27,41	40,51	24,41	39,59	98,41	132,22	83,81	112,01	85,41	113,74	126,34	159,41	25,77	40,18
<b>EMA</b>	22,92	32,50	20,42	31,77	83,95	102,76	71,33	91,77	72,63	93,60	105,70	136,93	21,50	32,53
<b>EMP</b>	24%	33%	22%	30%	90%	98%	77%	86%	78%	88%	110%	132%	23%	32%
<b>a</b>	1,32	0,76	1,29	0,72	2,04	0,69	1,91	0,75	1,93	0,74	2,44	0,52	1,30	0,72
<b>b</b>	-3,14	59,06	-3,17	58,85	-0,62	148,69	-2,23	128,14	-2,59	131,24	-10,89	207,52	-3,35	60,35

Lâmina infiltrada (mm)

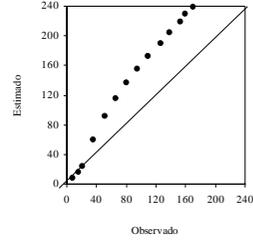
S2 (GAML-t)



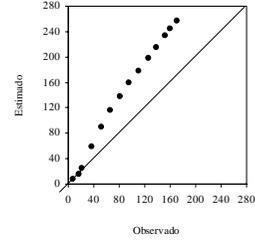
S3



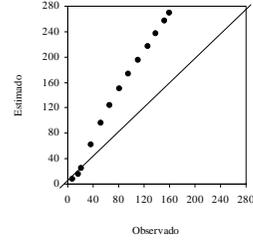
S4



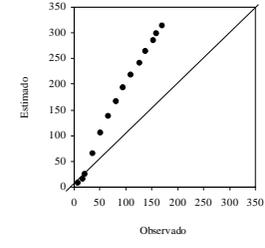
S5



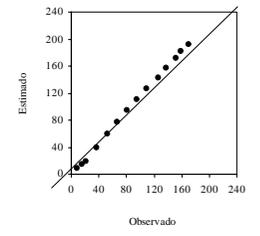
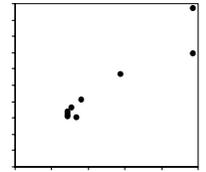
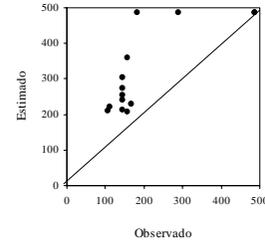
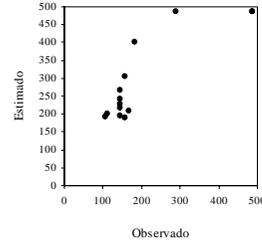
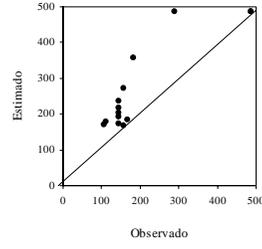
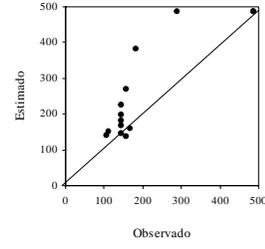
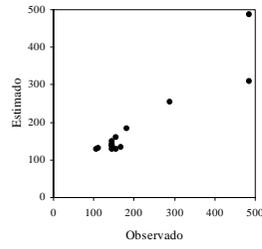
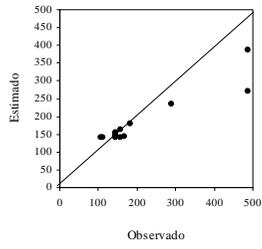
S6



S7



S8

Taxa de infiltração ( $\text{mm h}^{-1}$ )



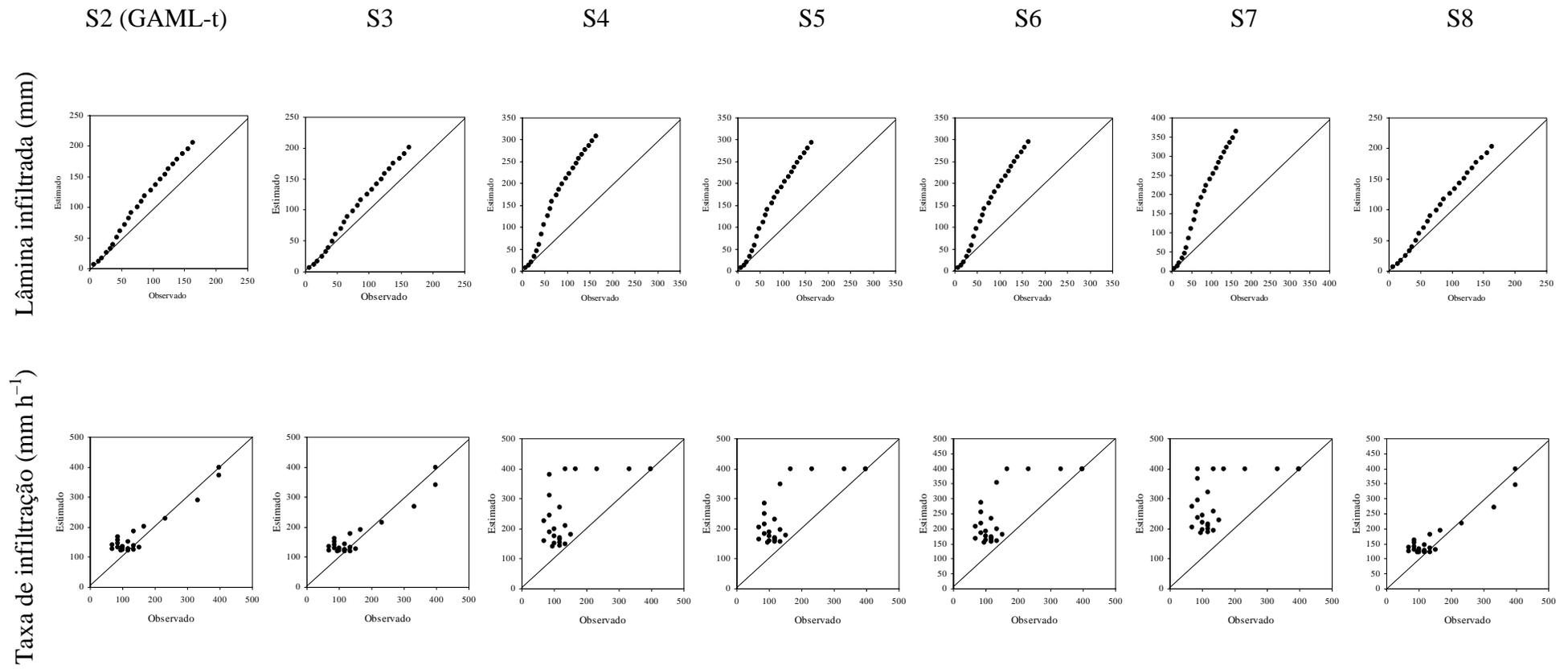


Figura B3. Plotagem dos pontos observados e estimados para Ti e I nas simulações do 3º teste do LVA.

Quadro B4. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 1º teste experimental do PV

Estatística	S2 (GAML-t)		S3		S4		S5		S6		S7		S8	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	0,997	0,838	0,999	0,812	0,991	0,325	0,999	0,952	0,996	0,782	0,990	0,219	0,998	0,952
<b>d</b>	0,99	0,85	0,87	0,74	0,82	0,05	1,00	0,97	0,87	0,55	0,82	0,00	0,99	0,95
<b>c</b>	0,99	0,71	0,87	0,60	0,82	0,02	1,00	0,93	0,86	0,43	0,81	0,00	0,99	0,91
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Bom	Ótimo	Mediano	Muito Bom	Péssimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Mau	Muito Bom	Péssimo	Ótimo	Ótimo
<b>E</b>	0,97	0,60	0,63	0,04	-0,63	-1,39	0,98	0,90	-0,04	-0,21	-0,74	-1,52	0,94	0,85
<b>E'</b>	0,82	0,50	0,44	0,12	0,04	-0,31	0,89	0,79	0,21	0,07	0,02	-0,34	0,82	0,69
<b>d'</b>	0,91	0,70	0,67	0,55	0,67	0,04	0,95	0,89	0,71	0,39	0,66	0,02	0,92	0,82
<b>c'</b>	0,91	0,58	0,67	0,45	0,66	0,01	0,95	0,85	0,71	0,31	0,66	0,01	0,91	0,78
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Sofrível	Bom	Mau	Bom	Péssimo	Ótimo	Muito Bom	Bom	Péssimo	Bom	Péssimo	Ótimo	Muito Bom
<b>REMQ</b>	6,59	37,48	21,77	57,87	45,48	91,21	4,91	18,84	36,29	64,94	46,97	93,59	8,50	22,47
<b>EMA</b>	5,72	27,05	17,84	47,36	30,78	70,89	3,61	11,48	25,33	50,32	31,53	72,69	5,81	16,94
<b>EMP</b>	12%	21%	29%	34%	35%	85%	5%	13%	30%	58%	36%	88%	7%	19%
<b>a</b>	0,95	0,55	0,65	0,68	1,90	0,03	1,09	0,91	1,71	0,37	1,94	0,00	1,17	0,73
<b>b</b>	-2,95	45,72	1,21	-2,45	-18,57	204,75	-1,17	17,76	-13,54	137,46	-19,53	210,79	-3,90	44,92

Quadro B5. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 2º teste experimental do PV

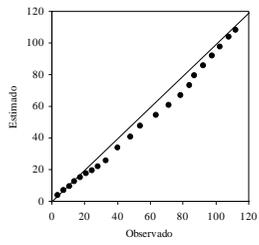
Estatística	S2 (GAML-t)		S3		S4		S5		S6		S7		S8	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	0,999	0,917	0,999	0,844	0,996	0,327	0,999	0,894	0,996	0,327	0,996	0,327	0,999	0,857
<b>d</b>	0,98	0,85	0,91	0,68	0,94	0,00	1,00	0,94	0,94	0,00	0,94	0,00	0,97	0,74
<b>c</b>	0,98	0,78	0,91	0,58	0,94	0,00	1,00	0,84	0,94	0,00	0,94	0,00	0,97	0,64
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Muito Bom	Ótimo	Sufrível	Ótimo	Péssimo	Ótimo	Muito Bom	Ótimo	Péssimo	Ótimo	Péssimo	Ótimo	Mediano
<b>E</b>	0,92	0,59	0,74	-0,97	0,63	-1,06	0,99	0,75	0,63	-1,06	0,63	-1,06	0,84	0,33
<b>E'</b>	0,79	0,56	0,57	-0,26	0,57	-0,06	0,91	0,70	0,57	-0,06	0,57	-0,06	0,71	0,41
<b>d'</b>	0,90	0,72	0,75	0,43	0,82	0,09	0,96	0,85	0,82	0,09	0,82	0,09	0,87	0,61
<b>c'</b>	0,90	0,66	0,75	0,36	0,82	0,03	0,96	0,76	0,82	0,03	0,82	0,03	0,87	0,53
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Bom	Muito Bom	Péssimo	Muito Bom	Péssimo	Ótimo	Muito Bom	Muito Bom	Péssimo	Muito Bom	Péssimo	Ótimo	Sufrível
<b>REMQ</b>	9,86	27,12	17,65	59,43	21,24	60,77	3,92	20,98	21,24	60,77	21,24	60,77	13,70	34,72
<b>EMA</b>	6,35	18,27	12,96	51,91	12,93	43,64	2,70	12,21	12,93	43,64	12,93	43,64	8,80	24,07
<b>EMP</b>	8%	13%	21%	31%	15%	31%	4%	8%	15%	31%	15%	31%	11%	17%
<b>a</b>	1,21	0,61	0,66	1,07	1,47	0,00	1,06	0,98	1,47	0,00	1,47	0,00	1,30	0,49
<b>b</b>	-3,73	89,64	3,32	-64,44	-9,28	224,71	-0,27	6,93	-9,28	224,71	-9,28	224,71	-5,23	117,16

Quadro B6. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 3º teste experimental do PV

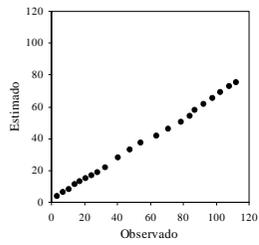
Estatística	S2 (GAML-t)		S3		S4		S5		S6		S7		S8	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	0,999	0,784	0,999	0,829	0,998	0,455	0,999	0,747	0,998	0,455	0,998	0,455	0,998	0,617
<b>d</b>	0,99	0,64	0,95	0,63	0,98	0,00	0,99	0,81	0,98	0,00	0,98	0,00	0,98	0,26
<b>c</b>	0,99	0,50	0,95	0,52	0,98	0,00	0,99	0,60	0,98	0,00	0,98	0,00	0,98	0,16
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Mau	Ótimo	Sofrível	Ótimo	Péssimo	Ótimo	Mediano	Ótimo	Péssimo	Ótimo	Péssimo	Ótimo	Péssimo
<b>E</b>	0,96	0,19	0,86	-2,09	0,92	-0,71	0,98	0,41	0,92	-0,71	0,92	-0,71	0,93	-0,37
<b>E'</b>	0,86	0,42	0,70	-0,54	0,81	0,13	0,89	0,58	0,81	0,13	0,81	0,13	0,82	0,21
<b>d'</b>	0,94	0,59	0,83	0,38	0,91	0,25	0,95	0,74	0,91	0,25	0,91	0,25	0,92	0,38
<b>c'</b>	0,94	0,46	0,83	0,31	0,91	0,11	0,95	0,55	0,91	0,11	0,91	0,11	0,92	0,23
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Mau	Muito Bom	Péssimo	Ótimo	Péssimo	Ótimo	Sofrível	Ótimo	Péssimo	Ótimo	Péssimo	Ótimo	Péssimo
<b>REMQ</b>	5,96	31,85	11,15	62,25	8,66	46,31	4,70	27,12	8,66	46,31	8,66	46,31	8,17	41,45
<b>EMA</b>	3,44	19,79	7,65	52,58	4,79	29,83	2,85	14,19	4,79	29,83	4,79	29,83	4,57	26,78
<b>EMP</b>	4%	10%	12%	23%	6%	15%	4%	7%	6%	15%	6%	15%	6%	13%
<b>a</b>	1,16	0,35	0,73	1,31	1,23	0,00	1,12	0,61	1,23	0,00	1,23	0,00	1,21	0,12
<b>b</b>	-3,18	177,94	3,78	-129,54	-4,89	274,43	-2,22	108,72	-4,89	274,43	-4,89	274,43	-4,56	242,01

Lâmina infiltrada (mm)

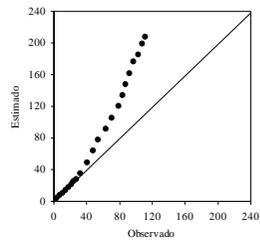
S2 (GAML-t)



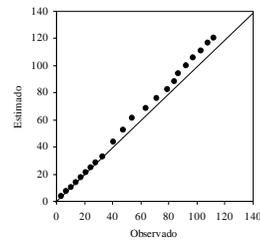
S3



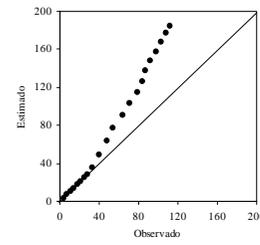
S4



S5



S6



S7

S8

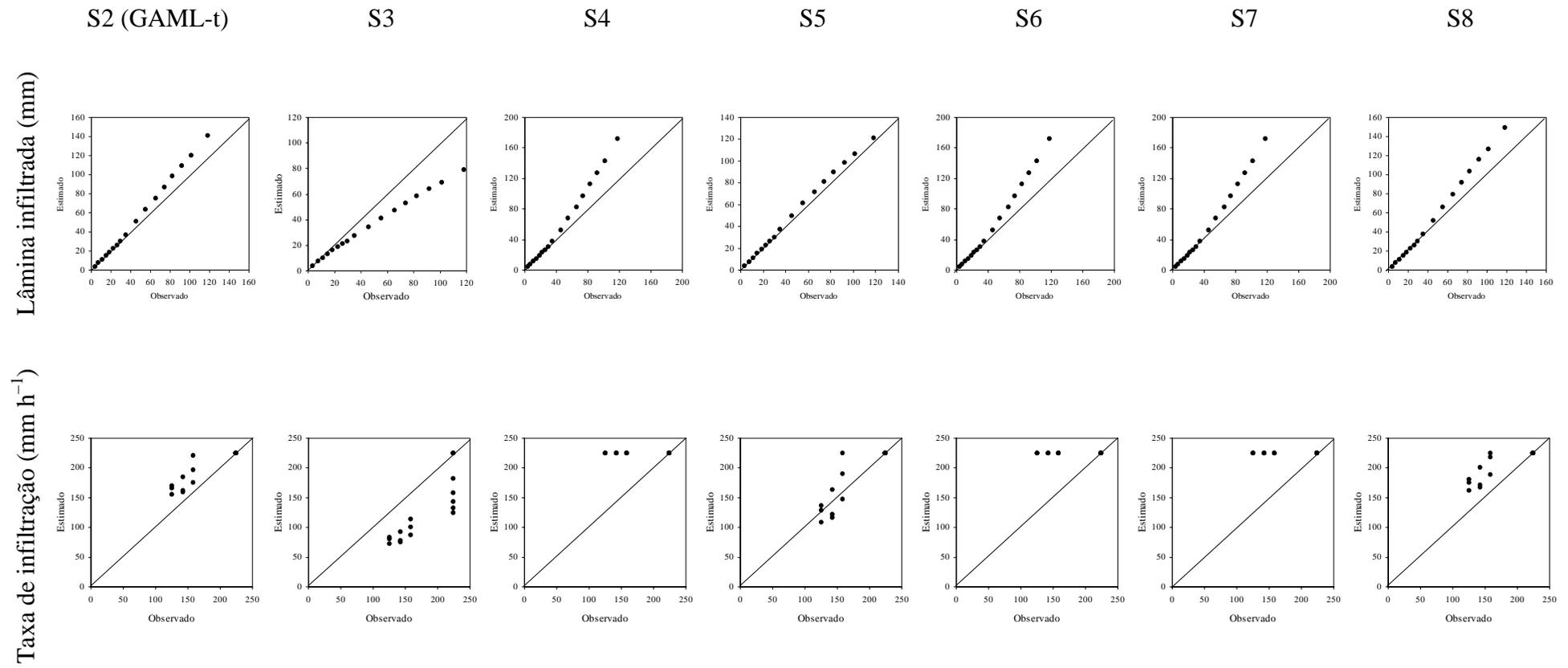


Figura B5. Plotagem dos pontos observados e estimados para  $T_i$  e  $I$  nas simulações do 2º teste do PV.

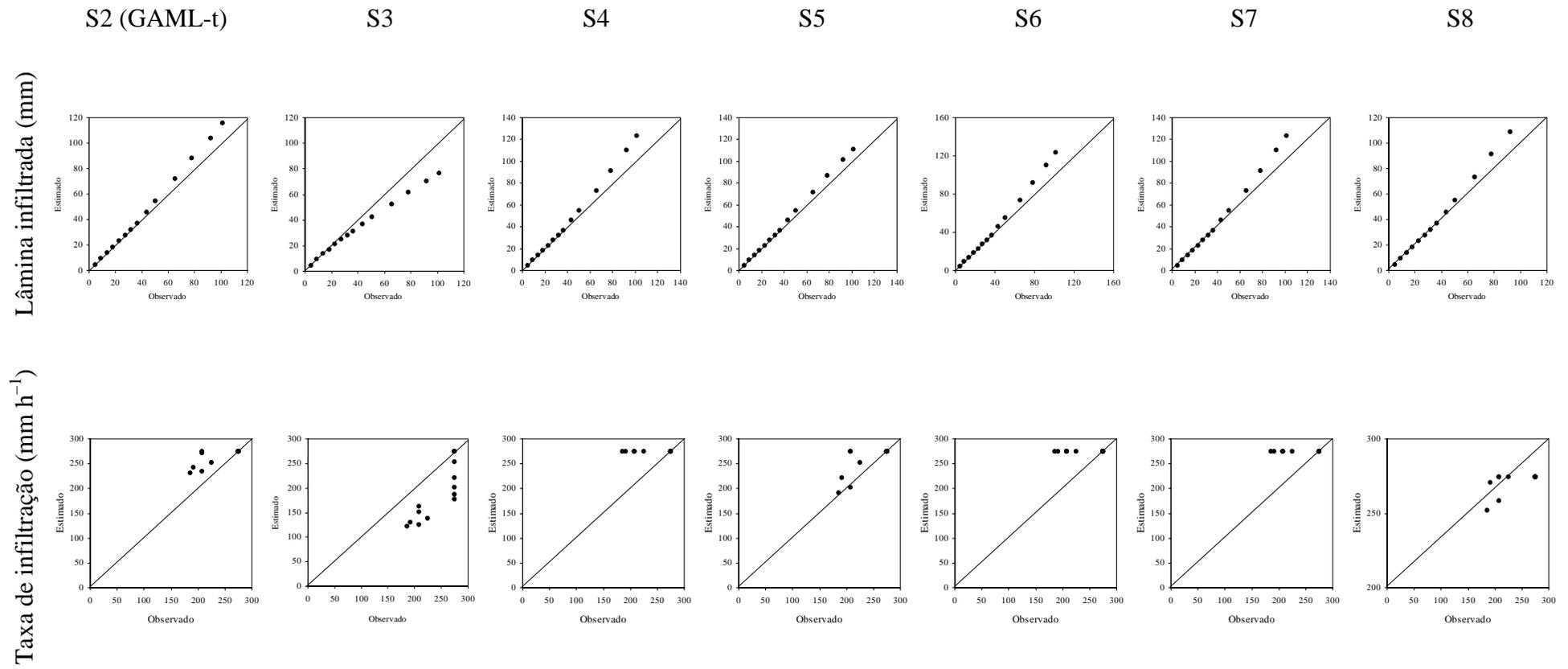


Figura B6. Plotagem dos pontos observados e estimados para  $T_i$  e  $I$  nas simulações do 3º teste do PV.

Quadro B7. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 1º teste experimental do LV

Estatística	S2 (GAML-t)		S3		S4		S5		S6		S7		S8	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	1,000	0,960	1,00	0,95	0,998	0,418	0,999	0,904	1,000	0,957	0,998	0,136	0,999	0,864
<b>d</b>	0,99	0,95	0,96	0,82	0,80	0,22	0,80	0,66	0,96	0,89	0,76	0,00	0,87	0,73
<b>c</b>	0,99	0,91	0,96	0,78	0,80	0,09	0,80	0,60	0,96	0,86	0,76	0,00	0,87	0,63
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Muito Bom	Muito Bom	Péssimo	Muito Bom	Sofrível	Ótimo	Ótimo	Muito Bom	Péssimo	Ótimo	Mediano
<b>E</b>	0,96	0,84	0,87	0,07	-0,78	-3,06	0,41	-0,68	0,80	0,61	-1,46	-5,25	0,12	-0,10
<b>E'</b>	0,83	0,57	0,68	-0,16	-0,26	-1,26	0,23	-0,56	0,57	0,31	-0,43	-1,92	0,09	-0,17
<b>d'</b>	0,92	0,73	0,82	0,56	0,58	0,01	0,54	0,41	0,81	0,57	0,55	0,00	0,66	0,30
<b>c'</b>	0,92	0,70	0,82	0,53	0,58	0,01	0,54	0,37	0,81	0,55	0,54	0,00	0,66	0,26
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Bom	Muito Bom	Sofrível	Sofrível	Péssimo	Sofrível	Péssimo	Muito Bom	Sofrível	Sofrível	Péssimo	Bom	Péssimo
<b>REMQ</b>	7,77	38,91	14,53	93,55	54,30	195,18	31,27	125,41	18,21	60,11	63,80	242,10	38,11	101,46
<b>EMA</b>	6,12	32,82	11,36	87,93	44,00	172,05	26,84	118,33	15,13	52,23	50,12	221,87	31,73	88,98
<b>EMP</b>	7%	12%	12%	31%	46%	65%	33%	40%	16%	20%	51%	85%	34%	33%
<b>a</b>	1,13	0,71	0,78	1,04	1,78	0,29	0,61	0,83	1,25	0,82	1,96	0,00	1,51	0,75
<b>b</b>	-3,87	107,66	5,03	-98,85	-14,81	390,02	3,00	-65,08	-3,64	107,72	-22,76	530,29	-7,29	167,08

Quadro B8. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 2º teste experimental do LV

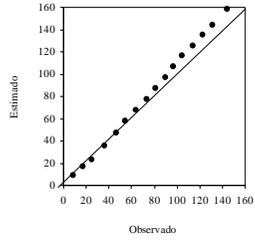
Estatística	S2 (GAML-t)		S3		S4		S5		S6		S7		S8	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>R</b>	1,000	0,987	1,00	0,96	0,998	0,132	0,999	0,942	1,000	0,987	0,998	0,271	0,999	0,917
<b>d</b>	0,97	0,94	0,93	0,80	0,72	0,00	0,75	0,61	0,97	0,94	0,72	0,00	0,88	0,79
<b>c</b>	0,97	0,93	0,93	0,78	0,72	0,00	0,75	0,58	0,97	0,93	0,72	0,00	0,88	0,73
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Muito Bom	Bom	Péssimo	Muito Bom	Sofrível	Ótimo	Ótimo	Bom	Péssimo	Ótimo	Bom
<b>E</b>	0,86	0,78	0,78	-0,03	-2,29	-6,80	0,25	-0,93	0,86	0,77	-2,29	-6,80	0,23	0,10
<b>E'</b>	0,63	0,41	0,56	-0,30	-0,68	-2,49	0,13	-0,79	0,63	0,41	-0,68	-2,49	0,13	-0,15
<b>d'</b>	0,84	0,65	0,74	0,53	0,50	0,00	0,48	0,36	0,83	0,65	0,50	0,00	0,66	0,34
<b>c'</b>	0,84	0,64	0,74	0,51	0,50	0,00	0,48	0,34	0,83	0,64	0,50	0,00	0,66	0,31
<b>Desempenho</b>	Muito Bom	Mediano	Bom	Sofrível	Mau	Péssimo	Mau	Péssimo	Muito Bom	Mediano	Mau	Péssimo	Bom	Péssimo
<b>REMQ</b>	17,43	47,42	21,98	102,07	84,21	280,28	40,19	139,40	17,54	47,69	84,21	280,28	40,84	95,42
<b>EMA</b>	14,73	44,05	17,77	97,71	67,24	261,70	34,72	134,54	14,82	44,32	67,24	261,70	34,87	86,61
<b>EMP</b>	14%	16%	17%	34%	61%	97%	38%	44%	14%	16%	61%	97%	34%	30%
<b>a</b>	1,20	0,90	0,73	1,06	2,08	0,00	0,56	0,76	1,20	0,90	2,08	0,00	1,45	0,87
<b>b</b>	-2,79	75,30	6,29	-115,97	-27,64	574,49	3,41	-58,86	-2,79	75,50	-27,64	574,48	-4,96	128,07

Quadro B9. Coeficientes estatísticos calculados para as estimativas da lâmina infiltrada e da taxa de infiltração no 3º teste experimental do LV

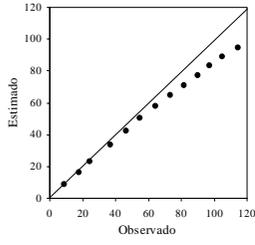
Estatística	S2 (GAML-t)		S3		S4		S5		S6		S7		S8	
	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti	I	Ti
<b>r</b>	1,000	0,949	0,999	0,970	0,997	0,160	1,000	0,919	1,000	0,985	0,997	0,328	1,000	0,918
<b>d</b>	0,94	0,88	0,96	0,88	0,70	0,00	0,79	0,68	0,98	0,96	0,70	0,00	0,89	0,82
<b>c</b>	0,94	0,84	0,96	0,85	0,70	0,00	0,79	0,62	0,98	0,95	0,70	0,00	0,89	0,76
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Muito Bom	Ótimo	Ótimo	Bom	Péssimo	Muito Bom	Mediano	Ótimo	Ótimo	Bom	Péssimo	Ótimo	Muito Bom
<b>E</b>	0,69	0,54	0,86	0,46	-2,74	-6,26	0,35	-0,36	0,92	0,87	-2,74	-6,26	0,32	0,29
<b>REMQ</b>	25,79	71,39	17,19	77,78	89,14	283,88	37,08	122,99	13,12	38,41	89,14	283,88	37,92	89,05
<b>E'</b>	0,45	0,17	0,65	0,04	-0,78	-2,45	0,19	-0,50	0,73	0,58	-0,78	-2,45	0,19	-0,03
<b>d'</b>	0,76	0,53	0,80	0,62	0,48	0,00	0,52	0,43	0,87	0,76	0,48	0,00	0,68	0,42
<b>c'</b>	0,76	0,50	0,80	0,61	0,48	0,00	0,52	0,39	0,87	0,75	0,48	0,00	0,68	0,39
<b>Desempenho</b>	Muito Bom	Sofrível	Muito Bom	Mediano	Mau	Péssimo	Sofrível	Péssimo	Ótimo	Bom	Mau	Péssimo	Bom	Péssimo
<b>EMA</b>	22,09	63,17	13,90	73,17	71,08	263,60	32,32	114,84	10,95	31,85	71,08	263,60	32,45	78,58
<b>EMP</b>	22%	24%	13%	27%	63%	107%	35%	40%	10%	13%	63%	107%	32%	30%
<b>a</b>	1,29	0,87	0,78	1,01	2,15	0,00	0,61	0,72	1,16	0,86	2,15	0,00	1,42	0,84
<b>b</b>	-3,37	100,20	5,16	-74,84	-31,05	557,92	2,54	-31,83	-3,31	72,68	-31,05	557,91	-5,01	125,35

Lâmina infiltrada (mm)

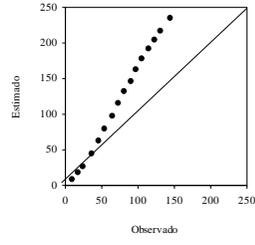
S2 (GAML-t)



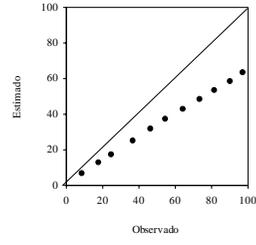
S3



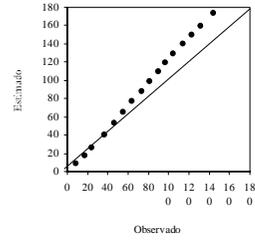
S4



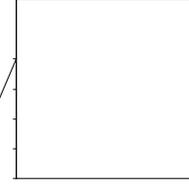
S5



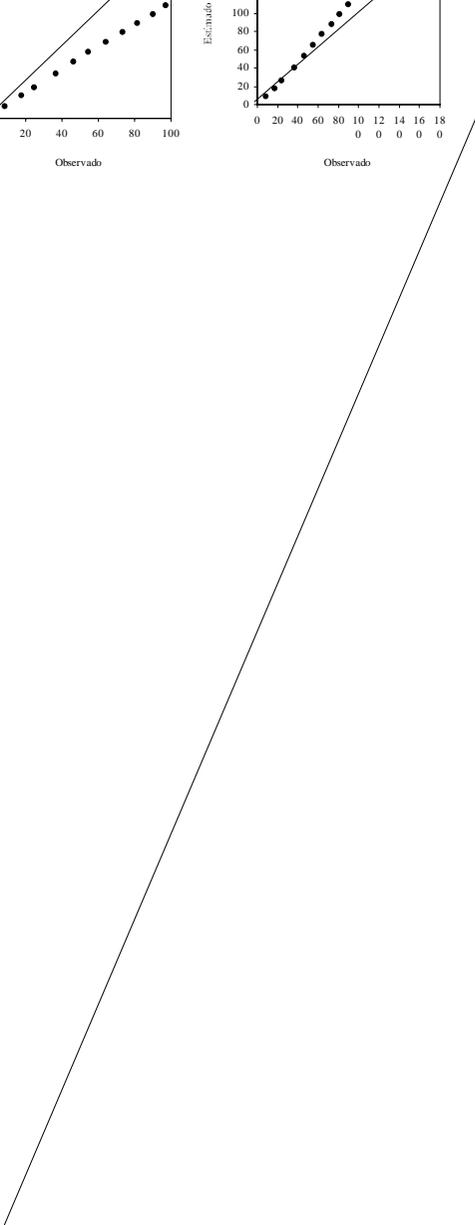
S6



S7



S8



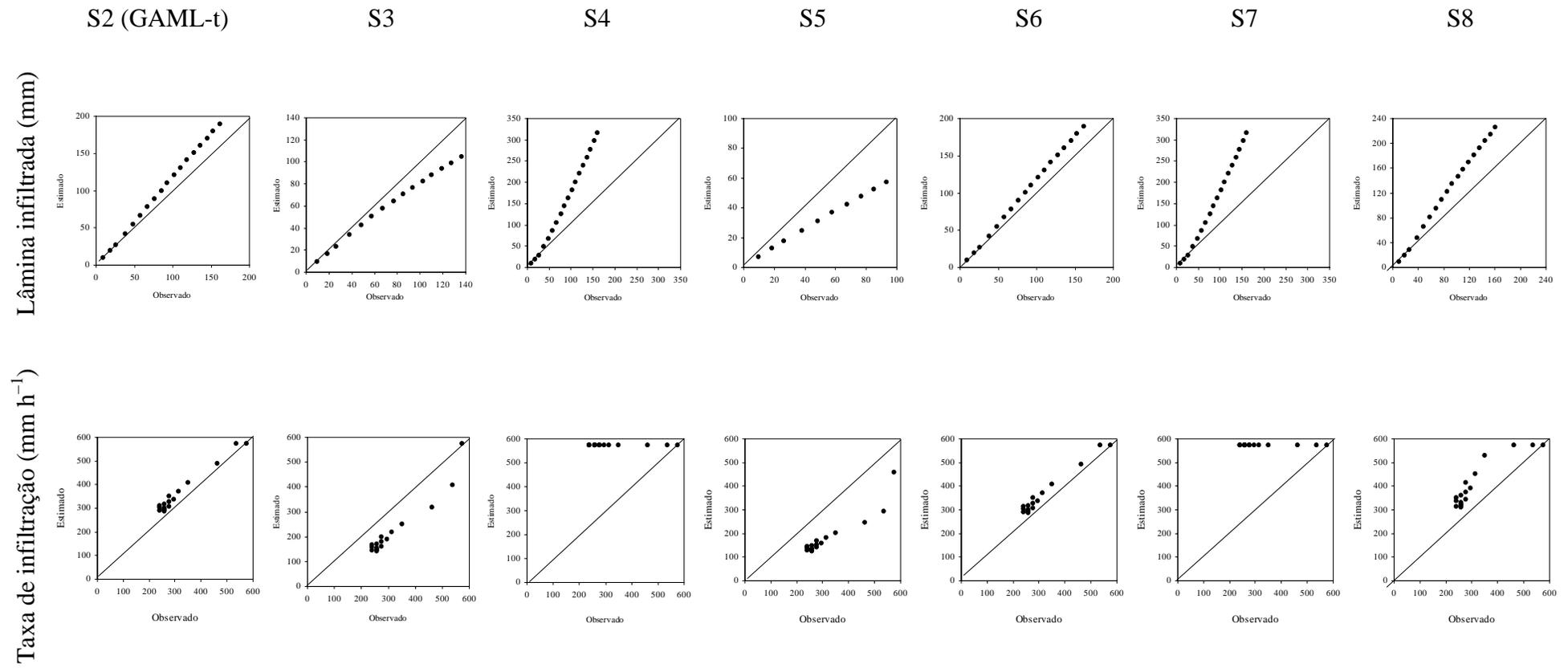


Figura B8. Plotagem dos pontos observados e estimados para  $T_i$  e  $I$  nas simulações do 2º teste do LV.

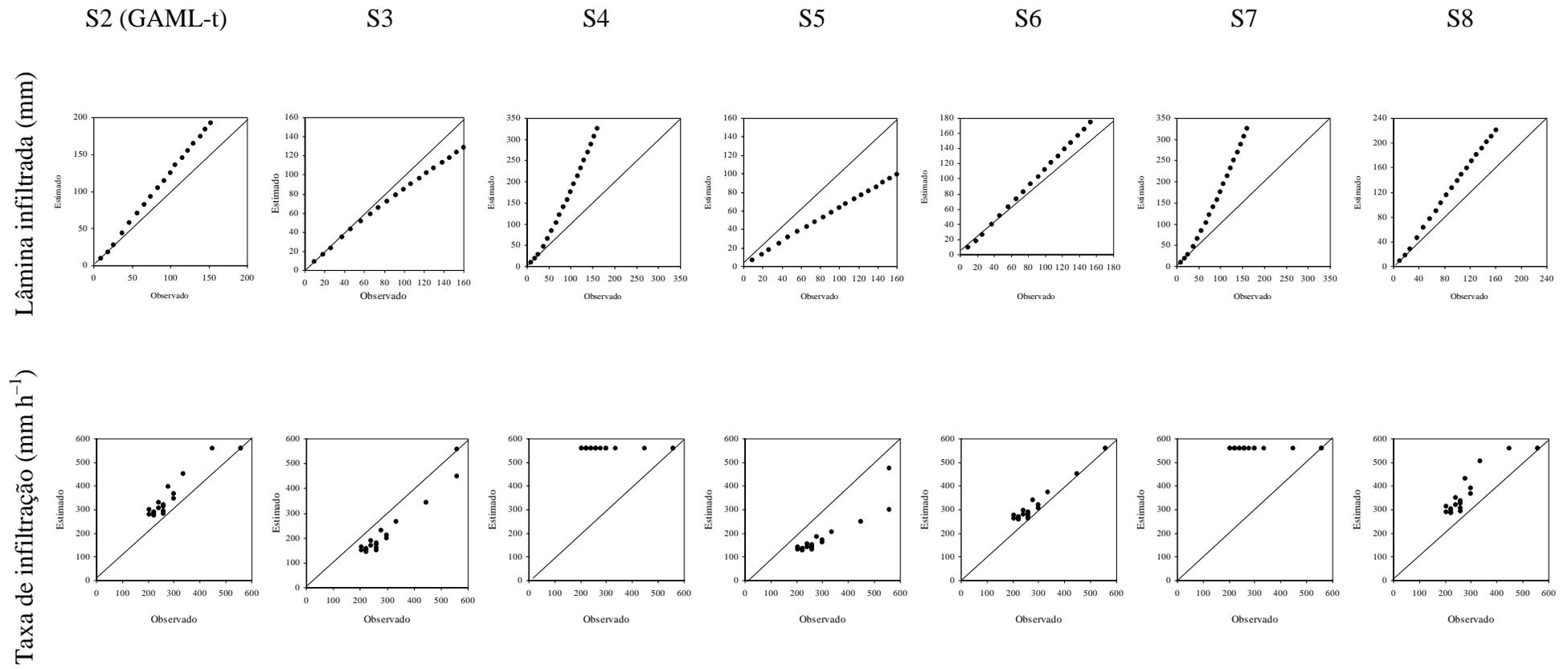


Figura B9. Plotagem dos pontos observados e estimados para  $T_i$  e  $I$  nas simulações do 3º teste do LV.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)