

WENDY FONSECA ATAIDE

**MODELAGEM DO POTENCIAL MATRICIAL NA FRENTE DE
UMEDECIMENTO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2005

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

T

A862m
2005
2005.

Ataide, Wendy Fonseca, 1979-

Modelagem do potencial matricial na frente de
umedecimento / Wendy Fonseca Ataide. – Viçosa : UFV,

xvi, 64f. : il. ; 29cm.

Inclui anexo.

Orientador: Demetrius David da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 40-43.

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

CDD 22.ed. 631.7

WENDY FONSECA ATAIDE

MODELAGEM DO POTENCIAL MATRICIAL NA FRENTE DE UMEDECIMENTO

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

Aprovada: 29 de agosto de 2005.

Prof. Mauro Aparecido Martinez
(Conselheiro)

Prof. Carlos Ernesto G. R. Schaefer
(Conselheiro)

Prof. Edvaldo Fialho dos Reis

Prof. Antônio Teixeira de Matos

Prof. Demetrius David da Silva
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade deste momento.

A minha mãe pelo amor, confiança, incentivo e dedicação incondicional.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Agrícola e ao Laboratório de Hidráulica, pela formação e pelas condições de realização deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão das bolsas de mestrado e iniciação científica, que tornaram viável a minha formação profissional.

Ao meu orientador Demetrius David da Silva pela orientação, dedicação e confiança demonstrados durante a realização deste trabalho.

Aos professores Mauro Aparecido Martinez e Carlos Ernesto G. R. Schaefer, pelas preciosas colaborações na realização deste trabalho.

Ao Roberto Avelino Cecílio pela paciência, apoio, amizade, confiança.

Aos bolsistas Denise Alves Fonseca e André Delboni pela amizade, convivência, ajuda física e moral que foram de grande importância para a condução do experimento.

Ao Elcivônio, ao meu pai e minhas irmãs. Aos avôs, tios e primos que me apoiaram na realização deste trabalho.

Aos amigos Fernando França da Cunha, Luís Gustavo Henriques do Amaral, Michel Castro Moreira e Samuel Martin pelos bons momentos de convivência.

Aos amigos do futebol Zelfran, Caratinga, Presuntinho, Rafael, Eduardo, Welson, Cristiano, Giovani, Mário, Bigas, Renato. Aos amigos do GPRH Flávio, Renata, José Márcio, Leônidas. À Kátia e ao Sady.

A todos os amigos do alojamento e da república do Tocqueville.

A todos os amigos e colegas do curso de pós-graduação e graduação na UFV.

Aos egressos do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFV Luciano, Ricardo, Viviane, Tomás, Márcio Kietz, Nori, Luís, Herony e Vicente, pela amizade, convivência e conselhos.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica, Solos e do Departamento de Engenharia Agrícola pela paciência e ajuda imprescindíveis na realização do experimento.

Ao Lanches Lú, Leão, Galpão, Moreiras, Chicken-in, festas de formandos e bailes de formatura, festas em repúblicas, festas em alojamento e demais acontecimentos sociais que também foram de suma importância para a minha formação.

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

BIOGRAFIA

WENDY FONSECA ATAIDE, filho de Sebastião Oliveira Ataide e Aparecida Maria Fonseca Ataide, nasceu em Rio Verde, Goiás, em 10 de Novembro de 1979.

Concluiu o segundo grau em 1996 na Escola Agrotécnica Federal de Rio Verde – GO.

No primeiro semestre de 1998, ingressou na Universidade Federal de Viçosa, tendo concluído o Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental em agosto de 2003.

Em agosto de 2003, iniciou o curso de mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa.

CONTEÚDO

| | Página |
|---|---------------|
| LISTA DE FIGURAS..... | vii |
| LISTA DE QUADROS..... | ix |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | xi |
| RESUMO..... | xiii |
| ABSTRACT..... | xv |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 3 |
| 2.1. Infiltração da água no solo..... | 3 |
| 2.2. Modelos de infiltração..... | 5 |
| 2.3. Pesquisas sobre os modelos de GA e GAML..... | 7 |
| 2.4. Potencial matricial na frente de umedecimento..... | 8 |
| 2.5. Utilização do TDR para acompanhamento da frente de umedecimento e determinação da umidade..... | 11 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 14 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.1. | Construção e calibração de sondas de TDR..... | 15 |
| 3.2. | Montagem das colunas de solo para os testes de infiltração..... | 17 |
| 3.3. | Simulador de chuvas..... | 20 |
| 3.4. | Testes de infiltração..... | 22 |
| 3.5. | Caracterização físico-hídrica dos solos das colunas..... | 24 |
| 3.6. | Escolha do modelo para a estimativa do potencial matricial na frente de umedecimento..... | 26 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 27 |
| 4.1. | Calibração das sondas de TDR..... | 27 |
| 4.2. | Testes de infiltração..... | 29 |
| 4.3. | Características físico-hídricas dos solos das colunas..... | 34 |
| 4.4. | Modelos estatísticos para a estimativa do potencial matricial na frente de umedecimento..... | 36 |
| 5. | CONCLUSÕES..... | 39 |
| 6. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 40 |
| | ANEXO 1..... | 44 |
| | ANEXO 2..... | 55 |
| | ANEXO 3..... | 63 |

LISTA DE FIGURAS

| | | Página |
|---|---|---------------|
| 1 | Sonda de TDR utilizada no experimento (a); recipientes utilizados na calibração das sondas de TDR (b); e leituras da constante dielétrica utilizando o equipamento TDR 100 (c)..... | 16 |
| 2 | Detalhe do preenchimento da coluna de solo, com a primeira camada de areia e brita (a); e detalhe da escarificação após o adensamento de uma camada na coluna de solo (b)..... | 18 |
| 3 | Detalhe da calha fixada na parte superior da coluna de solo utilizada para coletar o escoamento superficial..... | 19 |
| 4 | Medidor de nível da água proveniente do escoamento superficial das colunas de solo, utilizado no experimento..... | 19 |
| 5 | Simulador de chuvas utilizado no experimento..... | 21 |
| 6 | Coluna de solo utilizada no experimento (a); e detalhe das sondas instaladas na lateral das colunas (b)..... | 23 |
| 7 | Curvas de calibração das sondas de TDR utilizadas no experimento para: (a) Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA); (b) Latossolo Vermelho (LV); e (c) Argissolo Vermelho (PV)..... | 28 |
| 8 | Taxa de infiltração de água no solo em função do tempo, para os três testes realizados utilizando o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)..... | 30 |
| 9 | Taxa de infiltração de água no solo em função do tempo, para os dois testes realizados utilizando o Latossolo Vermelho (LV)..... | 31 |

| | | |
|----|--|----|
| 10 | Taxa de infiltração de água no solo em função do tempo, para os três testes realizados utilizando o Argissolo Vermelho (PV)..... | 32 |
|----|--|----|

LISTA DE QUADROS

| | | Página |
|----|---|---------------|
| 1 | Resultados das análises físicas e do carbono orgânico dos solos utilizados no experimento..... | 15 |
| 2 | Valores de intensidade de precipitação (I_p) e de taxa de infiltração estável (T_{ie}) para os diferentes testes realizados..... | 33 |
| 3 | Duração dos testes (d , em min) e infiltração acumulada (I , mm) para as três classes de solo utilizadas..... | 34 |
| 4 | Valores de condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), porosidade (total, macro e micro), teor de água na zona de transmissão (θ_w) e teor de água inicial (θ_i) para os diferentes testes e classes de solos..... | 35 |
| 5 | Dados utilizados na calibração das sondas de TDR para o LVA..... | 45 |
| 6 | Dados utilizados na calibração das sondas de TDR para o LV..... | 48 |
| 7 | Dados utilizados na calibração das sondas de TDR para o PV..... | 51 |
| 8 | Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (T_i) relativos ao primeiro teste do LVA..... | 55 |
| 9 | Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (T_i) relativos ao segundo teste do LVA..... | 56 |
| 10 | Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (T_i) relativos ao terceiro teste do LVA..... | 57 |
| 11 | Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (T_i) | 58 |

| | | |
|----|---|----|
| | relativos ao primeiro teste do LV..... | |
| 12 | Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) relativos ao segundo teste do LV..... | 59 |
| 13 | Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) relativos ao primeiro teste do PV..... | 60 |
| 14 | Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) relativos ao segundo teste do PV..... | 61 |
| 15 | Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) relativos ao terceiro teste do PV..... | 62 |
| 16 | Análise de variância da regressão do potencial matricial na frente de umedecimento em função da porosidade total, condutividade hidráulica do solo saturado e porcentagem de silte..... | 63 |
| 17 | Análise de variância da regressão do potencial matricial na frente de umedecimento em função da condutividade hidráulica do solo saturado e porcentagem de silte..... | 63 |
| 18 | Análise de variância da regressão do potencial matricial na frente de umedecimento em função da condutividade hidráulica do solo saturado e macroporosidade..... | 63 |
| 19 | Análise de variância da regressão do potencial matricial na frente de umedecimento em função da condutividade hidráulica do solo saturado e porcentagem de areia..... | 64 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado | Unidade |
|-----------------------|---|---------------------|
| A | Porcentagem de areia | |
| A_m | Área da seção transversal do módulo contendo o solo | cm^2 |
| C | Porcentagem de argila | |
| H_0 | Carga hidráulica constante na superfície do solo | mm |
| i | Gradiente hidráulico | cm cm^{-1} |
| I | Infiltração acumulada | mm |
| I_p | Intensidade de precipitação | mm h^{-1} |
| $K = K(?)$ | Condutividade hidráulica para meio não saturado | mm h^{-1} |
| K_0 | Condutividade hidráulica do solo saturado | mm h^{-1} |
| K_a | Constante dielétrica aparente | adimensional |
| K_e | Condutividade hidráulica efetiva | mm h^{-1} |
| $K_r = \frac{K}{K_0}$ | Condutividade hidráulica relativa | mm h^{-1} |
| K_w | Condutividade hidráulica na zona de transmissão | mm h^{-1} |
| L_f | Profundidade da frente de umedecimento | mm |
| Ms | Massa do solo seco + massa do cilindro | g |

| | | |
|----------------------------------|---|------------------------------|
| μ | Massa de solo úmido + massa do cilindro | g |
| q | Fluxo de água | cm s^{-1} |
| S | Porcentagem de silte | |
| T_i | Taxa de infiltração | mm h^{-1} |
| T_{ie} | Taxa de infiltração estável | mm h^{-1} |
| Vol | Volume de água recolhido na proveta | cm^3 |
| $Vol_{\text{água}(60\text{cm})}$ | Volume de água presente na amostra de solo quando submetida a uma tensão de 60 cm de coluna de água | cm^3 |
| Vol_T | Volume do cilindro preenchido por solo | cm^3 |
| θ | Teor de água volumétrico do solo | $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ |
| θ_i | Teor de água volumétrico do solo no início do processo de infiltração | $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ |
| θ_s | Teor de água volumétrico do solo correspondente à saturação | $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ |
| θ_w | Teor de água volumétrico do solo na zona de transmissão | $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ |
| λ | Índice representativo da distribuição do tamanho dos poros (Equação de Brooks e Corey) | adimensional |
| ϕ | Porosidade total | $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ |
| ϕ_{micro} | Microporosidade | $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ |
| ϕ_{macro} | Macroporosidade | $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ |
| ψ_b | Pressão de borbulhamento | cm |
| ψ_e | Potencial matricial equivalente à pressão de entrada de ar | mm |
| ψ_m | Potencial matricial na frente de umedecimento | mm |
| ψ_{sa} | Potencial matricial correspondente à pressão de saída de ar | cm |
| $\psi(\theta_i)$ | Potencial matricial correspondente ao teor de água inicial do solo | mm |

RESUMO

ATAIDE, Wendy Fonseca, M.S., Universidade Federal de Viçosa, Agosto de 2005.
Modelagem do potencial matricial na frente de umedecimento. Orientador:
Demetrius David da Silva. Conselheiros: Fernando Falco Pruski, Mauro Aparecido
Martinez e Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer.

Infiltração é o processo pelo qual a água passa da superfície para o interior do solo, sendo dependente da carga hidráulica na superfície, do teor de água inicial, da textura, da estrutura, da condutividade hidráulica e da porosidade do solo. Diversos modelos se propõem a estimar este processo, dentre os quais se destaca o de Green-Ampt modificado por Mein e Larson (GAML), baseado numa análise física do processo. Embora seja bastante utilizado, este modelo apresenta como desvantagem a dificuldade de obtenção de seus parâmetros de entrada, principalmente do potencial matricial na frente de umedecimento (ψ_m). Assim sendo, este trabalho teve como objetivos: obter as variáveis necessárias à estimativa do potencial matricial na frente de umedecimento, utilizando-se para tal o modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson, e estabelecer modelo matemático que relacione o potencial matricial na frente de umedecimento com as características físicas e a condutividade hidráulica do solo saturado, para sua aplicação no modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson. Foram utilizadas três classes de solos (Latosolo Vermelho - Amarelo – LVA; Latossolo Vermelho – LV; e Argissolo Vermelho – PV). Estes solos foram secos ao ar, destorroados e peneirados em peneira de malha 10 mm, sendo posteriormente acondicionados em colunas de PVC de 200 mm de diâmetro e 800 mm de altura, de modo que a densidade do solo ficasse próxima daquela

observada em campo. Na lateral das colunas, foram instaladas horizontalmente sondas de TDR para a determinação do teor de água e para o acompanhamento da frente de umedecimento. Aplicou-se água sobre a superfície das colunas sob taxa constante, por meio de um simulador de chuvas, sendo que o excesso escoado superficialmente foi conduzido para uma caixa de coleta na qual foi instalado um medidor de nível denominado Thalimedes. O volume infiltrado foi determinado por diferença entre o volume precipitado e o escoado. Após a realização dos testes, foram coletadas amostras de solo para determinação da granulometria, densidade do solo, porosidade, macroporosidade e microporosidade. Foram determinados, ainda, os teores volumétricos de água na zona de transmissão e no início do processo e a condutividade hidráulica do solo saturado. O potencial matricial foi calculado por intermédio de um rearranjo no modelo de GAML, considerando a taxa de infiltração estável (T_{ie}) como representativa da condutividade hidráulica do solo saturado e o teor volumétrico de água na zona de transmissão em lugar do teor volumétrico de água correspondente à saturação. De posse dos valores de ψ_m e das características do solo, foram ajustados modelos de regressão, sendo a escolha do melhor modelo feita por meio dos coeficientes de determinação (R^2), pela significância dos parâmetros no modelo, pelo menor número de variáveis envolvidas e pela facilidade de obtenção dessas variáveis (características do solo). Os valores de condutividade hidráulica do solo saturado, de porcentagem de silte e de macroporosidade foram significativos em todos os modelos nos quais foram utilizados. A T_{ie} não foi significativa em nenhum dos modelos. Todas as equações obtidas utilizando-se a porcentagem de silte em combinação com outras variáveis apresentaram bons resultados na modelagem do ψ_m , sendo que, os melhores resultados foram obtidos para o modelo que relaciona o ψ_m com a porosidade, a condutividade hidráulica do solo saturado e a porcentagem de silte.

ABSTRACT

ATAIDE, Wendy Fonseca, M.S., Universidade Federal de Viçosa, August 2005. **Modeling of the pressure head at the wetting front.** Adviser: Demetrius David da Silva. Committee Members: Fernando Falco Pruski, Mauro Aparecido Martinez and Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer.

Infiltration is the process by which water passes through the soil surface down to the soil, being dependent on hydraulic load in the surface, on the antecedent moisture, on texture, structure, soil hydraulic conductivity and soil porosity. Several models aim to estimate this process, among which the Green-Ampt modified by Mein and Larson (GAML) model is based on a physical analysis of the process. Although it is frequently used, this model has a limitation for obtaining input parameters, such as the potential head at the wetting front (ψ_m). This work aimed to obtain the ψ_m for GAML model for soils typical of tropical areas, using three classes of soils (Red-Yellow Oxisol, Red Ultisol and Red Oxisol). These soils were air-dried, ground and sieved through 10 mm mesh sieve, placed in PVC columns of 200 mm diameter and 800 mm height, so that the soil density was similar to the field. In the lateral of the columns, horizontal TDR probes were installed for the moisture determination and for the monitoring of the wetting front. The water was applied to the surface of the columns at a constant rate by means of a rain simulator device and the excess drained superficially, was collected and measured in a box using a “Thalimedes” device. The infiltrated volume was calculated by the difference among the precipitate volume and the runoff. After the tests, soil samples were collected for

determination of the texture, soil density, porosity, macroporosity, microporosity, volumetric moisture (before and after the tests) and soil hydraulic conductivity. The pressure head at the wetting front was calculated through an adjustment in the GAML model, considering the rate of stable infiltration (T_{ie}) as representative of the hydraulic conductivity, and the transmission zone moisture instead of the moisture saturation. Once having the ψ_m values and soil characteristics, regression models were adjusted, choosing the best fit by R^2 , significance of parameters, less number of variables and easy of obtaining soil variables. The soil hydraulic conductivity values, percentage of silt and macroporosity were all significant for all equations. T_{ie} was not significant in none of the equations. All the obtained equations using the amount of silt in combination with another variable showed good results in the ψ_m modeling. The best fitted equation was the one which related the ψ_m with the porosity, the soil hydraulic conductivity and the percentage of silt.

1. INTRODUÇÃO

Infiltração é o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo, sendo dependente, fundamentalmente, da carga hidráulica disponível na superfície, da textura, da estrutura, da densidade, da condutividade hidráulica, da porosidade e do teor de água no solo, quando do início do processo.

A compreensão do processo de infiltração tem muitas aplicações na hidrologia, principalmente no estudo do escoamento superficial, da erosão hídrica e no transporte de contaminantes (GANDOLFI e SAVI, 2000). A melhoria das condições de infiltração da água no solo é importante na recarga dos aquíferos subterrâneos, acarretando aumento no escoamento de base e redução nas vazões máximas dos cursos d'água.

Devido à complexidade e à grande importância prática da infiltração, diversos autores desenvolveram trabalhos de modelagem desse processo com base em modelos empíricos ou teóricos, dentre os quais se destaca o de Green-Ampt modificado por Mein e Larson (GAML), baseado numa análise física do processo.

Embora seja bastante utilizado, este modelo apresenta como desvantagem a dificuldade de obtenção de seus parâmetros de entrada, principalmente do potencial matricial na frente de umedecimento (ψ_m).

O potencial matricial da água do solo origina-se nas forças de capilaridade e adsorção da matriz do solo. Essas forças atraem e ligam a água ao solo, diminuindo sua energia potencial para valores inferiores daquele da água pura (estado de referência). Assim, o potencial matricial, que ocorre em solos não saturados, é negativo.

Apesar da grande aceitação do modelo GAML, poucas pesquisas têm sido feitas visando propor uma melhor definição de determinação de seus parâmetros de entrada sob condições de solos tropicais. Devido à dificuldade de obtenção destes parâmetros e a carência de informações envolvendo solos tropicais, torna-se necessário maiores estudos que permitam a obtenção dos mesmos com base em características do solo que possam ser facilmente obtidas, tais como a textura, a densidade e a porosidade do solo.

Neste sentido, este trabalho teve como objetivos:

- Obter as variáveis necessárias para a estimativa do potencial matricial na frente de umedecimento, utilizando-se para tal o modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson; e
- Estabelecer modelo matemático que relacione o potencial matricial na frente de umedecimento com as características físicas e a condutividade hidráulica do solo saturado, para sua aplicação no modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Infiltração da água no solo

O processo de infiltração é de importância prática pois, muitas vezes, determina o balanço de água na zona radicular e o escoamento superficial, responsável pela erosão hídrica. Assim, o conhecimento do processo e sua relação com as características do solo são de fundamental importância para o eficiente manejo do solo e da água nos cultivos agrícolas (REICHARDT, 1996).

À medida que a água infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão se umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há suprimento de água, o perfil de umidade tende a saturação em toda a profundidade, sendo a camada superficial, naturalmente, a primeira a saturar. Quando cessa o suprimento de água, isto é, deixa de haver infiltração, a água se redistribui no interior do solo, evoluindo para um perfil com menores teores de água próximo à superfície e maiores nas camadas mais profundas.

Muitos são os fatores que interferem na infiltração da água no solo, dentre os quais destacam-se aqueles relacionados com as características do solo e da cobertura vegetal, bem como aqueles relacionados às características da precipitação.

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

Os fatores ligados ao solo incluem a textura do solo, suas propriedades morfológicas (densidade, teor de matéria orgânica, porosidade e tipo de argila) e químicas, sua umidade, sua capacidade de retenção de água e a condutividade hidráulica.

Os fatores relacionados à superfície são aqueles que interferem no movimento da água através da superfície do solo. Estão associados à cobertura da superfície, às suas condições (natural ou modificada pelo homem) e à sua capacidade de armazenar água (armazenamento superficial).

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

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

A melhoria das condições de infiltração da água no solo promove a recarga de lençóis d'água subterrâneos, acarretando aumento no escoamento de base e redução nas vazões de enchente dos cursos d'água. PRUSKI et al. (1997) consideram o entendimento do processo de infiltração e de suas relações com as propriedades do solo fundamental para a solução de problemas relativos às áreas de irrigação, drenagem, conservação do solo e da água e controle do escoamento superficial, sendo de grande importância para o manejo do solo e da água. BERNARDO (1995) ressalta a importância do conhecimento da infiltração da água no solo na elaboração de projetos de irrigação e na definição do manejo agrícola em sistemas irrigados.

Os solos apresentam grande variabilidade espacial, ainda que dentro de pequenas áreas. Como resultado disto e também das variações temporais das propriedades do solo, a infiltração é um processo muito complexo, que pode ser descrito apenas de forma aproximada, mediante o uso de modelos matemáticos (CECÍLIO et al., 2003).

O processo de infiltração da água no solo ainda continua complexo mesmo quando é assumido que o solo é um meio homogêneo com teor de água inicial uniforme. Para muitos eventos de precipitação existe um período inicial durante o qual toda a precipitação se infiltra no solo. Durante este período a capacidade de infiltração decresce, até tornar-se menor que a intensidade de precipitação; a partir deste momento, a água começa a acumular-se sobre a superfície do solo e o escoamento superficial pode ocorrer (MEIN e LARSON, 1973).

2.2. Modelos de infiltração

Os modelos que descrevem a infiltração da água no solo podem ser teóricos ou empíricos. Os empíricos têm a vantagem de permitir relacionar os parâmetros do modelo com as características do solo, sem que estes obrigatoriamente tenham significado físico, e englobar na sua determinação alguns fatores que são difíceis de serem considerados nos modelos teóricos, como por exemplo, a heterogeneidade do solo. A principal desvantagem do emprego de modelos empíricos é que os parâmetros ajustados somente são válidos para as condições em que eles foram determinados, ou seja, não podem ser adotados para outros tipos de solo. Já os modelos teóricos são baseados na teoria física do escoamento em meios porosos, que é descrito pela Equação de Richards ou pela Equação de Darcy.

Os modelos empíricos requerem informações simples, porém exigem calibração para cada condição de solo, sendo os mais utilizados o de Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton e Holtan. Por outro lado, os modelos teóricos resultam de detalhada descrição física do processo, exigindo parâmetros de entrada relacionados às características do solo. Os mais difundidos são os modelos de Philip, desenvolvido a partir da Equação de Richards, e de Green-Ampt, desenvolvido a partir da Equação de Darcy.

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

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

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

em que

T_i = taxa de infiltração da água no solo, mm h^{-1} ;

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

ψ_m = potencial matricial do solo na frente de umedecimento, mm; e

L_f = profundidade da frente de umedecimento, mm.

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

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

em que

I = infiltração acumulada, mm;

θ_s = teor de água volumétrico do solo correspondente à saturação, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; e

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

Explicitando-se L_f na Equação 2 e substituindo-o na Equação 1, obtém-se a Equação 3, que é conhecida como modelo de Green-Ampt (GA).

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

Como no desenvolvimento do modelo de Green e Ampt é considerada a existência de uma lâmina de água na superfície, este somente é válido para condições após o empoçamento de água na superfície do solo. MEIN e LARSON (1973), por sua vez, modificaram o modelo de Green e Ampt para permitir a sua aplicação em condições anteriores ao empoçamento da água na superfície do solo. A partir de então, o modelo de Green-Ampt passou a ser conhecido como modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson (GAML).

Embora MEIN e LARSON (1973) tenham utilizado condições diferentes na derivação do seu modelo, estes autores encontraram equação idêntica à original proposta por Green e Ampt, apenas com a escala de tempo transladada para considerar a infiltração antes do empoçamento.

Os modelos de GA e de GAML são, atualmente, os mais utilizados para a simulação da infiltração, entretanto, eles necessitam de parâmetros de entrada de obtenção complexa como o potencial matricial na frente de umedecimento (θ_m), a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) e o teor de água volumétrico do solo correspondente à saturação (θ_s). Para o desenvolvimento dos modelos, os autores idealizaram o processo de infiltração visando simplificar os cálculos. No entanto, esse processo idealizado não acontece na prática, pois a variabilidade das características físicas do solo, tanto espacial quanto temporal, é muito grande, causando distorção do perfil de umedecimento do solo.

MOREL-SEYTOUX e KHANJI (1974) desenvolveram uma equação de infiltração a qual tinha essencialmente a mesma forma do modelo de Green-Ampt mas sem muitas de suas restrições. Esta equação leva em conta o efeito viscosidade e foi derivada sem a suposição do efeito pistão na frente de umedecimento.

2.3. Pesquisas sobre os modelos de GA e GAML

Vários autores propuseram modificações na forma de determinação dos parâmetros de entrada dos modelos de GA e de GAML. O primeiro autor a propor correções nos parâmetros do modelo GA foi BOUWER (1966). Desde então, várias outras proposições foram apresentadas e isso fez com que diversos autores (CHU, 1995; LIMA e SILANS, 1999; PARLANGE et al., 2002; SULEIMAN e SWARTZENDURUBER, 2002; CECÍLIO et al., 2003 e MELLO, 2003) estudassem os parâmetros físicos dos modelos de GA e GAML.

O teor de água do solo na zona de transmissão (θ_w), de um modo geral, é menor do que o teor de água do solo saturado (θ_s), o qual corresponde ao valor da porosidade total do solo (ϕ). Isso acontece devido ao aprisionamento de ar nos poros no momento do umedecimento do solo, impedindo a completa saturação da zona de transmissão. Diversos pesquisadores (ONSTAD et al., 1973; BRAKENSIEK e ONSTAD, 1977; SLACK, 1980; CECÍLIO et al., 2003; MELLO, 2003) propuseram a utilização de valores para θ_w variando entre $0,76 \theta_s$ e $0,94 \theta_s$.

A condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_w) também é menor do que a condutividade hidráulica de um solo saturado (K_0) devido à menor umidade naquela zona. Bouwer, citado por RAWLS et al. (1983), propôs o valor de K_w correspondente a $0,5 K_0$. SILVA e KATO (1998) sugerem o uso da taxa de infiltração estável (Tie) no lugar de K_0 no modelo de GAML.

MELLO (2003), trabalhando com Latossolo Vermelho-Amarelo, estudou várias proposições para obtenção dos parâmetros do modelo de GA e encontrou que as melhores simulações do processo de infiltração foram obtidas quando o valor de K_0 foi considerado igual à Tie e o potencial matricial calculado em função da textura e da porosidade total do solo.

Trabalhando com solos típicos de regiões tropicais, SILVA e KATO (1998) avaliaram os modelos de GA e GAML, com e sem cobertura vegetal morta, e concluíram, de maneira semelhante a SLACK (1980), que as predições foram prejudicadas sob

condições de solo nu. No entanto, em condições de cobertura morta, as predições relativas ao processo de infiltração foram boas.

SALES et al. (1999) avaliaram a associação da Tie com outras propriedades físicas das camadas superficial e subsuperficial de um Latossolo Roxo e de um Argissolo Vermelho-Amarelo (solos característicos de regiões tropicais), encontrando que tanto a condutividade hidráulica do solo saturado quanto a densidade do solo se mostraram adequadas para estimar a Tie desses solos. Resultado semelhante, envolvendo a densidade do solo, foi encontrado por MIYAZAKI (1996).

2.4. Potencial matricial na frente de umedecimento

Dos parâmetros de entrada do modelo de Green-Ampt, o valor de ψ_m é o de mais difícil determinação. Devido à desuniformidade do teor de água do solo no início do processo de infiltração e das propriedades físicas do mesmo ao longo do seu perfil, a frente de umedecimento não é abrupta, como pressuposto no desenvolvimento do modelo (RODRIGUES, 1999) e, assim sendo, diversos autores indicam alternativas para o cálculo de ψ_m .

BRAKENSIEK (1977) utilizou na determinação do potencial matricial na frente de umedecimento a equação desenvolvida por MOREL-SEYTOUX e KHANJI (1974), que pode ser assim reescrita:

$$\psi_m = \int_0^{\psi_i} k_r d\psi_m \quad (4)$$

em que k_r (mm h^{-1}) é a condutividade hidráulica relativa, definida como a relação entre a condutividade hidráulica para meio não-saturado e a condutividade hidráulica do meio saturado.

A equação anterior pode ser dividida em duas partes, como se segue

$$\psi_m = \int_{\psi_{sa}}^{\psi_i} k_r d\psi_m + \int_0^{\psi_{sa}} d\psi_m = \psi_{sa} + \int_{\psi_{sa}}^{\psi_i} k_r d\psi_m \quad (5)$$

em que ψ_{sa} é o potencial matricial correspondente à pressão de saída de ar, em cm.

BRAKENSIEK (1977) considera que o valor de k_r pode ser descrito da seguinte forma:

$$k_r = \left(\frac{\theta_{sa}}{\theta_m} \right)^{\lambda} \quad (6)$$

em que $\lambda = 2 + 3\lambda$ e λ é o índice representativo da distribuição do tamanho dos poros da equação de Brooks e Corey (adimensional).

O valor de θ_{sa} corresponde à metade do valor do potencial matricial equivalente à pressão de entrada de ar (θ_e), que por sua vez se equipara aproximadamente à pressão de borbulhamento (θ_b), ou seja,

$$\theta_{sa} = \frac{\theta_e}{2} = \frac{\theta_b}{2} \quad (7)$$

Substituindo as equações 6 e 7 na 5 e considerando ainda que $|\psi(\theta_i)| = \infty$, ou seja, o solo inicialmente está extremamente seco, encontra-se

$$\theta_m = \frac{2 + 3\lambda}{1 + 3\lambda} \left(\frac{\theta_b}{2} \right) \quad (8)$$

Esta equação foi adotada por RAWLS et al. (1983). KIM e CHUNG (1994) também utilizaram a Equação 8 para avaliar o modelo de GA considerando variações temporais das propriedades físicas do solo.

BRAKENSIEK (1977), avaliando dados experimentais, sugeriu que o valor de θ_m possa ser calculado em função da pressão de borbulhamento (ψ_b , em cm), da seguinte forma:

$$\theta_m = 0,76 \theta_b \quad (9)$$

MOORE et al. (1980) definiram o potencial matricial na frente de umedecimento como a média entre os potenciais matriciais relativos ao teor de água inicial (θ_i) e ao máximo teor de água atingido na zona de transmissão (θ_w). Assim, pode ser determinado por:

$$\Psi_m = \int_{K_r(\theta_i)}^{K_r(\theta_s)} \frac{\psi(k_r)}{K_r(\theta_w) - K_r(\theta_i)} dk_r \quad (10)$$

em que k_r é definida como:

$$k_r(?) = \frac{k(?)}{k_0} \quad (11)$$

Considerando que a condutividade hidráulica na zona de transmissão é menor que a condutividade hidráulica do solo saturado, SLACK (1980) chegou à seguinte equação:

$$\psi_m = \frac{?_e [k_r(?_s)^a - k_r(?_i)^a]}{a [K_r(?_s) - K_r(?_i)]} \quad (12)$$

em que $a = \left(\frac{b+3}{2b+3} \right)$, e b é o expoente da equação de Campbell, adimensional.

IDIKE et al. (1980), utilizando dados de 27 localidades de Minnesota – US, obtiveram o ψ_m em função do teor de água volumétrico do solo (θ , em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) de acordo com a seguinte equação:

$$\psi_m = 0,1728 \cdot \theta^{-5,794} \quad R^2 = 0,898 \quad (13)$$

MEIN e LARSON (1973) sugerem que o potencial matricial na frente de umedecimento pode ser obtido pela área sob a curva de potencial matricial (ψ_m) x condutividade hidráulica relativa (K_r). Como o módulo do potencial matricial pode tornar-se muito alto quando $K_r=0$, os autores optaram por utilizar como limite inferior da integral o valor de 0,01, ou seja,

$$\psi_m = \int_{0,01}^{1,0} \psi_m dK_r \quad (14)$$

YU (1999), trabalhando com o modelo de GA, determinou o potencial matricial na frente de umedecimento (em mm) utilizando-se a equação:

$$\psi_m = \frac{B}{K_e} \quad (15)$$

em que

B = parâmetro estimado usando medidas de taxa de precipitação e escoamento superficial, $\text{mm}^2 \text{h}^{-1}$; e

K_e = condutividade hidráulica efetiva, mm h^{-1} .

Rawls e Brakensiek, citados por KING et al. (1999), utilizando vários tipos de solos, realizaram análise de regressão relacionando o potencial matricial na frente de umedecimento (ψ_m , em mm) como função da porosidade (ϕ), da porcentagem de areia (A) e da porcentagem de argila (C).

$$\begin{aligned} \psi_m = & \exp(6,5309 - 7,3256 \phi + 0,001583 C^2 \\ & + 3,809479 \phi^2 + 0,000344 A C - 0,049837 A \phi \\ & + 0,001608 A^2 \phi^2 + 0,001602 C^2 \phi^2 - 0,000014 A^2 C \\ & - 0,00348 C^2 \phi - 0,0008 A^2 \phi) \end{aligned} \quad (16)$$

Van Mullem, citado por RAWLS et al. (1996), sugere que o valor de ψ_m (em cm) seja calculado com base na condutividade hidráulica do solo saturado (K_0 , em cm h^{-1}), a partir da expressão

$$\psi_m = 4,903 (K_0 + 0,02)^{-0,4932} \quad (17)$$

2.5. Utilização do TDR para acompanhamento da frente de umedecimento e determinação da umidade

O TDR (time domain reflectometry, reflectometria no domínio do tempo) é uma técnica que pode ser utilizada para medição do teor de água, em volume, em meios porosos. Baseia-se na emissão/reflexão de um pulso eletromagnético, que se propaga ao longo de uma sonda (hastes paralelas) inserida no solo, para determinar a constante dielétrica aparente do solo, a qual sofre variação expressiva com o teor de água.

A técnica de reflectometria no domínio do tempo tem sido utilizada durante décadas para a localização de defeitos em cabos elétricos. A adaptação do TDR para determinar a água no solo em condições de campo e laboratório foi apresentada por TOPP et al. (1980), quando a medida do tempo de percurso de uma onda eletromagnética foi relacionada com o teor de água do solo, por meio de uma equação polinomial de terceiro grau, para diferentes tipos de solos.

Os fabricantes fornecem curvas de calibração do equipamento de TDR com base em solos de diferentes texturas e densidades, geralmente de clima temperado. A calibração no local de aplicação da técnica é recomendável, principalmente quando se deseja saber o valor absoluto do teor de água do solo, devido às diferenças existentes quanto a esses atributos. Além disso, os solos tropicais apresentam maiores teores de óxidos de ferro e de manganês, que influenciam a propagação da onda eletromagnética (BASSOI, 2001).

TOMASELLI (1997) trabalhou com cinco tipos de solos e verificou que a curva de calibração disponibilizada no manual do fabricante não é válida para todos os tipos de solos.

A calibração do TDR (relação entre o conteúdo de água e a constante dielétrica aparente do solo) vem sendo amplamente estudada e várias abordagens de calibração já foram apresentadas na literatura.

Usando solos de diferentes texturas, TOPP et al. (1980) verificaram que a constante dielétrica aparente do solo (K_a , adimensional) foi influenciada principalmente pelo teor de água em volume do solo (θ , em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), sendo pouco dependente do tipo de solo, da densidade e da temperatura do solo. Assim, a maioria dos tipos de solo poderia ser representada pela relação empírica entre K_a e θ a partir da equação:

$$\theta = -0,053 + 0,029 K_a - 0,00055 K_a^2 + 0,0000043 K_a^3 \quad (18)$$

No entanto, JONES et al. (2002) afirmam que esta equação não é adequada para solos orgânicos e para solos minerais com conteúdo elevado de matéria orgânica ou de argila. Conforme os autores, diversos fatores influenciam a determinação de K_a , tais como: porosidade, densidade do solo, temperatura e frequência de medição.

TOMMASELLI e BACCHI (2001) obtiveram a curva de calibração de um equipamento de TDR TRASE System I, para cinco solos da região de Piracicaba, SP. As curvas obtidas foram comparadas com a curva genérica fornecida por TOPP et al. (1980) e com a curva fornecida pelo fabricante do aparelho. Os autores concluíram que a curva fornecida pelo fabricante não é aplicável para a determinação do conteúdo de água nos cinco solos estudados, assim como a curva fornecida por TOPP et al. (1980). As curvas obtidas individualmente para cada tipo de solo apresentaram boa precisão num intervalo de 0,10 a 0,40 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

TOPP et al. (1982) desenvolveram um procedimento para determinar a localização da frente de umedecimento usando o TDR. O procedimento envolve a determinação da

reflexão da onda eletromagnética da frente de umedecimento que produz uma mudança abrupta na impedância ao longo da sonda de TDR.

Destacam-se as seguintes vantagens da determinação da umidade do solo via TDR, entre outras: (i) medições em tempo real; (ii) independente, na maioria dos casos, da textura, temperatura e salinidade; (iii) não destrói a amostra nem a estrutura do solo; (iv) conveniência para multiplexização e automação, por permitir medidas isoladas em diversos locais com apenas um medidor e diversas sondas.

Uma fonte potencial de erro nas medidas obtidas com o TDR é a formação de fendas no solo ao redor das hastes, originadas durante sua instalação ou pela formação de trincas no solo devido ao ressecamento do mesmo. O desalinhamento entre as hastes também pode afetar a precisão com que o tempo de percurso é determinado e, portanto, o paralelismo entre as hastes deve ser observado (HILLEL, 1998). Outra limitação do uso deste método é o alto custo do equipamento.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Visando a determinação do potencial matricial na frente de umedecimento para aplicação no modelo de GAML, foram realizados, no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Viçosa (UFV), testes de infiltração em colunas de solos com perfis homogêneos. Foram utilizadas três classes de solo: Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Vermelho (LV) e Argissolo Vermelho (PV), sendo realizados três testes para cada solo. A escolha destes solos se deu devido à diversidade em suas características físicas e por serem predominantes em regiões tropicais.

O material de solo Latossolo Vermelho-Amarelo – LVA (0-22 cm) foi coletado nas imediações da localidade “Tiro de Guerra”, no município de Viçosa, MG, o Latossolo Vermelho – LV (0-22 cm) na área do CEPET (central de experimentação, pesquisa e extensão do triângulo mineiro), no município de Capinópolis, MG, e o Argissolo Vermelho – PV (0-22 cm) na base da serra de São Geraldo, no município de São Geraldo, MG.

Os materiais de solo foram secos ao ar e peneirados em malha com abertura de 10 mm, valor mínimo recomendado por AGASSI e BRADFORD (1999) para se efetuar estudos em condições de laboratório.

Foi realizada a análise textural para cada tipo de solo (Quadro 1). Amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) foram caracterizadas segundo o procedimento de rotina do Laboratório de Física do Solo de Departamento de Solos da UFV, que consiste em dispersão mecânica lenta durante 16 horas a 50 rpm usando-se NaOH 0,1 mol L⁻¹ como agente dispersante. As areias foram separadas e quantificadas após peneiramento e as frações silte + argila e argila, após a separação por sedimentação, foram quantificadas por

pipetagem. A densidade de partículas (d_r , kg dm^{-3}) foi determinada usando o método do balão volumétrico usando como agente penetrante o álcool etílico (EMBRAPA, 1997). A argila dispersa em água (A.D.A.) foi determinada pelo método da pipeta. O carbono orgânico (C.O.) foi determinado pelo método de Walkley-Black.

Quadro 1 – Resultados das análises físicas e do carbono orgânico dos solos utilizados no experimento

| Solo | Areia grossa | Areia fina | Silte | Argila | A.D.A. | C.O. | d_r | Estrutura |
|------|--------------|------------|-------|--------|--------|-------|-------|---------------------|
| | | | | | | | | |
| LVA | 0,13 | 0,10 | 0,07 | 0,70 | 0,47 | 1,746 | 2,29 | Granular |
| LV | 0,26 | 0,52 | 0,02 | 0,20 | 0,12 | 1,356 | 2,74 | Blocos subangulares |
| PV | 0,07 | 0,09 | 0,25 | 0,59 | 0,33 | 1,334 | 2,60 | Granular |

3.1. Construção e calibração de sondas de TDR

Para a determinação do teor de água e acompanhamento do avanço da frente de umedecimento nas colunas de solo foi utilizada a técnica do TDR e, para isso, foram confeccionadas sondas de TDR. Estas sondas apresentavam três hastes de aço inoxidável de 0,15 m de comprimento e 0,0033 m de diâmetro, espaçadas de 0,022 m (Figura 1a).

As sondas foram construídas para serem acopladas ao equipamento TDR100, da Campbell Scientific, ou a um conjunto de multiplexadores do tipo SMDX da mesma empresa. Utilizou-se um resistor de 15 Ω , conectando em série a haste central ao terminal positivo do cabo coaxial. O resistor é indispensável para o funcionamento da sonda quando acoplada ao multiplexador.

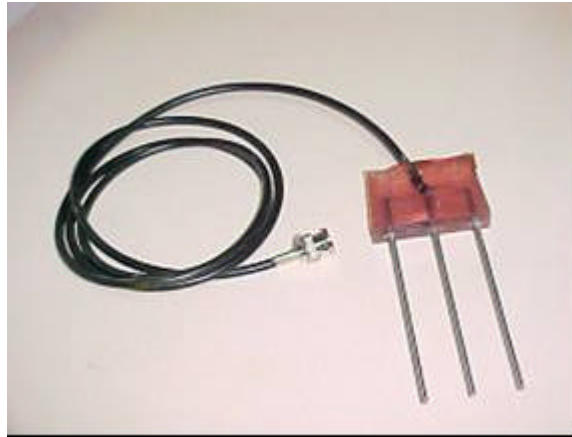
Após a construção das sondas de TDR foi realizada a calibração das mesmas. Para tal, amostras do solo foram destorroadas, secas ao ar e peneiradas em malha com abertura de 10 mm, sendo em seguida acondicionadas em recipientes construídos com segmentos de tubos de PVC, de massa conhecida, com 0,25 m de comprimento e 0,10 m de diâmetro. O acondicionamento foi feito até a altura de 0,20 m, de forma que a densidade do solo dentro dos tubos de PVC se aproximasse daquela encontrada em campo. Foram realizadas três repetições para cada solo utilizado.

Na parte inferior das colunas foi instalado um tampão perfurado com um furo de cerca de 0,01 m para facilitar a drenagem da água. Foi instalada sobre este furo uma tela de malha fina para evitar a perda de solo. As sondas tiveram suas massas determinadas e foram inseridas, verticalmente, no solo (Figura 1b). As colunas foram, então, levadas a um recipiente com água de forma que ocorresse a sua completa saturação.

Em seguida, realizou-se a determinação da massa das colunas desde a saturação até um teor de água próximo do ponto de murchamento permanente. No momento de cada

determinação da massa foram realizadas leituras da constante dielétrica aparente do solo (K_a), utilizando o equipamento TDR100 (Figura 1c).

(a)



(b)



(c)



Figura 1 – Sonda de TDR utilizada no experimento (a); recipientes utilizados na calibração das sondas de TDR (b); e leituras da constante dielétrica utilizando o equipamento TDR100 (c).

Foram realizadas três leituras de K_a , considerando a média entre as leituras, ao final de cada intervalo de uma hora durante o período diurno (das 8 às 18 horas). Os intervalos foram aumentados à medida que ocorria a secagem do solo. Após a última determinação de massa e K_a , obteve-se a massa total do solo seco e o teor de água volumétrico final do solo nas colunas por meio do método padrão de estufa. Com base nas massas do solo seco, dos tubos de PVC e das sondas de TDR, além da densidade do solo e das massas úmidas determinadas diariamente, obteve-se os valores do teor de água gravimétrico (U_g , $g\ g^{-1}$) e volumétrico (θ , $cm\ cm^{-1}$) do solo a cada determinação de K_a (COELHO et al., 2001). Associando-se os valores de θ aos valores de K_a determinados, foi realizada a calibração das sondas de TDR, por meio do ajuste de um modelo polinomial do terceiro grau (TOPP et al., 1980).

3.2. Montagem das colunas de solo para os testes de infiltração

Foram montadas colunas de solos construídas com tubos de PVC de 0,2 m de diâmetro e 0,8 m de altura, sendo divididas em oito módulos de 0,1 m. Os módulos foram presos entre si utilizando borrachas de câmaras de ar de pneu de automóvel cortadas com cerca de 0,06 m de altura. Foi utilizada cola de silicone para uma perfeita vedação entre os módulos.

Na parte inferior da coluna foi encaixado um tampão de PVC de 0,2 m de diâmetro, perfurado com um furo simples, para que a água infiltrada pudesse percolar livremente. Uma camada de cerca de 0,05 m de areia e brita foi colocada no fundo da coluna a fim de facilitar a drenagem da água. Uma manta de bidim foi colocada sobre esta camada para evitar a perda de solo da camada superior. Foi colada areia grossa na parede interna da coluna, utilizando adesivo plástico para PVC, a fim de evitar a ocorrência de caminho preferencial para a passagem da água (Figura 2a).

A massa de solo para preencher cada módulo foi determinada visando a obtenção da densidade observada no campo, e a ela foi acrescentada a quantidade de água necessária para se atingir um teor de água intermediário entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. O solo foi deixado em repouso por 24 horas para a homogeneização do teor de água, sendo, então, colocado nos módulos e adensado em camadas de 0,05 m. Antes de se iniciar o adensamento da camada seguinte, a superfície da camada adensada foi escarificada com o objetivo de retirar o espelhamento formado pelo disco de compactação e minimizar as interferências que pudessem afetar a movimentação da água

no solo causada pela mudança de camada (Figura 2b). Os testes foram iniciados logo após o adensamento.

(a)



(b)



Figura 2 – Detalhe do preenchimento da coluna de solo, com a primeira camada de areia e brita (a); e detalhe da escarificação após o adensamento de uma camada na coluna de solo (b).

No módulo superior da coluna de solo foi fixada uma calha feita com PVC, visando direcionar o escoamento superficial (Figura 3). Esta calha foi coberta com material plástico evitando que a água da chuva fosse coletada em lugar daquela proveniente do escoamento superficial. O escoamento superficial foi direcionado para um reservatório que foi conectado a outro reservatório pelo princípio de vasos comunicantes e, neste, instalado um registrador de nível, denominado Thalimedes, usado para registrar a variação da altura de lâmina d'água a cada minuto (Figura 4). A utilização de dois reservatórios visou minimizar erros de leitura do Thalimedes, já que a água proveniente do escoamento superficial cairia diretamente sobre a bóia do registrador de nível caso fosse utilizado somente um reservatório.

Foram montadas e utilizadas três colunas diferentes para cada tipo de solo, sendo que cada coluna foi considerada como um teste independente. Esse procedimento se tornou necessário devido à dificuldade de reprodução das características dentro das colunas de solo, impossibilitando a utilização de um valor médio para cada solo.



Figura 3 – Detalhe da calha fixada na parte superior da coluna de solo utilizada para coletar o escoamento superficial.



Figura 4 – Medidor de nível da água proveniente do escoamento superficial das colunas de solo, utilizado no experimento.

3.3. Simulador de chuvas

Para aplicação da chuva 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 (NSERL/USDA-ARS) (Figura 5). O simulador apresenta cinco bocais do tipo Veejet 80.100, espaçados de 1,10 m. Na realização deste trabalho utilizou-se somente um bico, sendo os demais tampados no momento da realização dos testes. Estes bocais estavam presos a uma haste cujo ajuste permitia alterar a intensidade de aplicação da chuva.

Para se obter maiores intensidades de aplicação o ajuste era feito de forma que os bocais ficassem menos tempo parados fora da abertura na calha do simulador, ou mais tempo quando se desejava obter intensidades menores. Desta forma, não era necessário alterar a pressão de serviço do bocal para modificar a intensidade de aplicação da chuva, o que garantia que o diâmetro das gotas de água se mantinha constante. A pressão de serviço foi regulada por meio de um manômetro instalado na entrada do corpo do simulador. A pressão utilizada foi de 34,5 kPa. Verificações periódicas foram realizadas visando a manutenção de uma intensidade de aplicação de água praticamente constante.

O fornecimento de água para o simulador de chuvas foi feito por um conjunto moto-bomba Schneider de $\frac{3}{4}$ CV, que trabalhava afogado. Para garantir o suprimento de água foram utilizadas duas caixas d'água de 500 litros, ligadas por meio de vasos comunicantes.

Visando aumentar a uniformidade de aplicação da chuva durante a realização dos testes o simulador foi circundado por uma lona plástica para evitar a ação do vento.

O simulador de chuvas foi ajustado para que fossem aplicadas intensidades de precipitação altas o suficiente para gerar escoamento superficial nas colunas de solo. Os valores de intensidade de precipitação (I_p , em mm h^{-1}) foram obtidos antes da realização de cada teste.

Para o LVA os valores de I_p variaram de 397,7 a 486,1 mm h^{-1} de um teste para outro. Já para o PV a variação foi de 210,8 a 274,4 mm h^{-1} e para o LV de 557,9 a 574,5 mm h^{-1} .

BRANDÃO (2003), trabalhando com colunas de solo de 0,025 m de diâmetro, em experimento visando avaliar a taxa de infiltração em solos sujeitos ao encrostamento, utilizou valores de I_p de 130,0 a 158,8 mm h^{-1} para o PV, de até 228,0 mm h^{-1} para o LVA e de até 563,2 mm h^{-1} para o Neossolo Quartzarênico.



Figura 5 - Simulador de chuvas utilizado no experimento.

3.4. Testes de infiltração

Foram instaladas horizontalmente 12 sondas de TDR na lateral das colunas de solo, tendo sido utilizada massa para calafetar na instalação das sondas visando uma perfeita vedação (Figura 6). As quatro sondas superiores foram espaçadas de 0,10 m, enquanto que as inferiores foram espaçadas de 0,05 m. Um maior espaçamento das sondas na parte superior das colunas decorre do fato de no início do processo de infiltração a velocidade de avanço da frente de umedecimento ser mais alta não permitindo verificar diferenças expressivas na umidade de uma sonda para outra quando o espaçamento é pequeno.

A água foi aplicada em cada coluna de solo, isoladamente, por meio do simulador de chuvas. As superfícies das colunas foram cobertas com uma manta sintética de alta permeabilidade (Bidim) com a finalidade de proteger o solo da ação das gotas de chuva, reduzindo o efeito do selamento superficial.

Na primeira sonda, localizada na parte superior da coluna de solo, foram feitas leituras de K_a de minuto em minuto, até que se percebeu a estabilização da umidade, passando-se então a fazer leituras na sonda localizada imediatamente abaixo, repetindo-se o mesmo procedimento para as subseqüentes. Todas as leituras foram gravadas em microcomputador, utilizado na aquisição dos dados, para posterior determinação do tempo gasto para que a frente de umedecimento atingisse as diferentes profundidades. Considerou-se que a frente de umedecimento havia atingido a profundidade da sonda a partir do momento em que houve repetições da leitura de K_a feita pelo aparelho de TDR.

A taxa de infiltração foi determinada de forma indireta, com base na diferença entre a taxa de aplicação de água pelo simulador de chuvas na coluna e a taxa de escoamento superficial. A variação de nível na caixa de coleta foi medida a cada minuto e convertida em volume escoado, multiplicando-se esta variação pela área da caixa de coleta. O volume escoado foi, então, convertido em lâmina escoada. A taxa de escoamento superficial foi determinada dividindo-se a lâmina escoada pelo intervalo de tempo entre as leituras.

Para a determinação da taxa de infiltração estável da água no solo (T_{ie}) os testes foram conduzidos até o momento em que houve repetições da leitura de K_a da sonda inferior da coluna de solo.

(a)



(b)

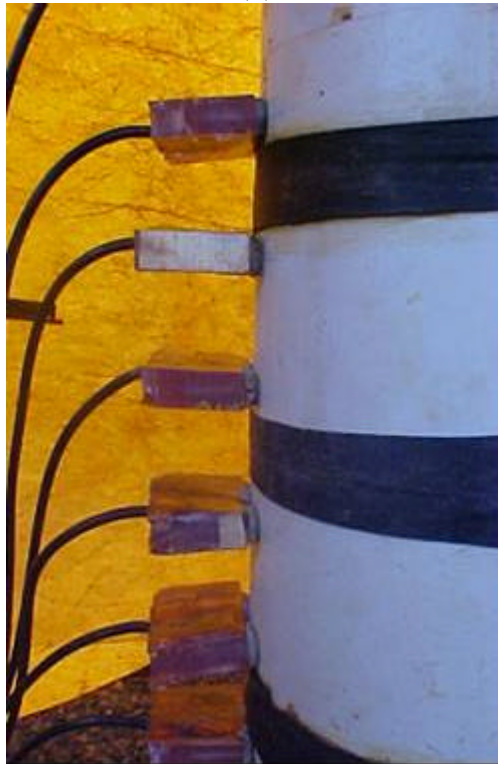


Figura 6 – Coluna de solo utilizada no experimento (a); e detalhe das sondas instaladas na lateral das colunas (b).

3.5. Caracterização físico-hídrica dos solos das colunas

Ao final do teste de infiltração, os módulos foram separados. Na parte inferior de cada módulo foi presa uma manta de bidim com o auxílio de borracha de câmara de ar de pneu de automóvel. Os módulos foram, então, colocados para saturar em reservatório preenchido com água até $\frac{3}{4}$ da altura dos mesmos, por um período de dois dias, garantido a saturação de baixo para cima. Após esse período, os módulos foram retirados do reservatório de água e, por meio de uma borracha de câmara de ar de pneu de automóvel, foi fixado outro módulo na sua parte superior. Uma manta de Bidim foi colocada sobre a superfície do solo e utilizando-se a coluna de Mariote para a manutenção de uma lâmina d'água constante sobre a superfície foi possível determinar a condutividade hidráulica efetiva do solo, de acordo com a seguinte equação:

$$K_e = -\frac{q}{i} \quad (19)$$

em que q é o fluxo (cm s^{-1}) e i o gradiente hidráulico (cm cm^{-1}). O numerador e denominador da Equação 19 foram calculados utilizando-se as expressões:

$$q = \frac{\text{Vol}}{A_m \cdot t} = \frac{4 \cdot \text{Vol}}{\pi \cdot d^2 \cdot t} \quad (20)$$

$$i = -\left(\frac{1+L_m}{L_m}\right) = -\left(\frac{1}{L_m} + 1\right) \quad (21)$$

em que:

A_m = área da seção transversal do módulo contendo o solo, cm^2 ;

Vol = volume de água recolhido na proveta, cm^3 ;

d = diâmetro da seção transversal contendo o solo, cm ;

t = intervalo de tempo decorrido entre a coleta do volume, s ;

l = altura da lâmina de água sobre o módulo, cm ; e

L_m = altura do módulo, cm .

O valor de K_e , determinado na temperatura ambiente, foi recalculado na temperatura de referência de 20°C , obtendo-se assim a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), por meio da equação:

$$K_0 = K_e \frac{\eta_e}{\eta_{20}} \quad (22)$$

em que η_e e η_{20} são as viscosidades dinâmicas da água na temperatura ambiente e a 20 °C, respectivamente, em centipoise.

Após a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado, esperou-se a completa drenagem da lâmina d'água presente na superfície do solo e retirou-se uma amostra para determinação do teor de água volumétrico do solo correspondente à saturação (porosidade total do solo), obtido pelo método padrão de estufa.

Para a determinação da microporosidade e densidade do solo, foram enterrados verticalmente em cada módulo dois cilindros de metal de aproximadamente 0,058 m de diâmetro e 0,05 m de altura. Estes cilindros foram levados a uma bandeja com água para que ocorresse a saturação de baixo para cima evitando a ocorrência do aprisionamento de ar.

Os cilindros foram mantidos na bandeja por 24h e, então, levados à mesa de tensão, onde foram submetidos à tensão de 0,6 m.c.a. Após 48h na mesa de tensão, os cilindros foram pesados e levados para estufa a 100 °C por 24h até que o solo estivesse totalmente seco, sendo então novamente pesados.

Depois de descartado o solo, os cilindros foram novamente pesados e, desta forma, foi possível calcular a microporosidade de cada coluna de acordo com a equação:

$$\phi_{\text{micro}} = \frac{\text{Vol}_{\text{água}(60\text{ cm})}}{\text{Vol}_T} = \frac{\text{Mu} - \text{Ms}}{d_{\text{água}}} \cdot \frac{1}{\text{Vol}_T} \quad (23)$$

em que

ϕ_{micro} = microporosidade, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;

$\text{Vol}_{\text{água}(60\text{ cm})}$ = volume de água presente na amostra de solo quando submetida a uma tensão de 0,6 m de coluna de água, cm^3 ;

Vol_T = volume do cilindro preenchido por solo, cm^3 ;

Mu = massa do solo úmido + massa do cilindro, g;

Ms = massa do solo seco + massa do cilindro, g; e

$d_{\text{água}}$ = densidade da água considerada igual a $1,00 \text{ g cm}^{-3}$.

A macroporosidade (ϕ_{macro}) foi determinada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

3.6. Escolha do modelo para a estimativa do potencial matricial na frente de umedecimento

No modelo de GAML foi considerado o valor da T_{ie} no lugar de K_0 e θ_w no lugar de θ_s , uma vez que tais considerações têm apresentado bons resultados em solos tropicais (SILVA e KATO, 1998; CECÍLIO et al., 2003; MELLO, 2003).

O valor do potencial matricial na frente de umedecimento foi obtido, para cada teste de infiltração, explicitando-se o θ_m na Equação 3 e usando-se os dados de T_{ie} , θ_w , θ_i , I e T_i obtidos experimentalmente.

De posse dos valores de θ_m , das características físicas e da condutividade hidráulica do solo saturado, foram realizadas análises de regressão múltipla utilizando-se o programa estatístico SAEG, com o objetivo de se obter equações ajustadas aos dados obtidos, tendo como variável dependente o potencial matricial na frente de umedecimento e como variáveis independentes as características do solo (densidade, taxa de infiltração estável, condutividade hidráulica do solo saturado, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, textura, teor de água volumétrico da zona de transmissão e teor de água volumétrico inicial do solo). Procedimento semelhante foi realizado por DERNADIN (1990) para a estimativa da erodibilidade de solos brasileiros.

Diferentes modelos estatísticos, com diversas combinações entre as variáveis independentes foram testados. Para isso foi utilizada a opção “backward” do software SAEG que permite a eliminação de variáveis do modelo que apresentem efeitos menos significativos. Este processo iniciou-se pela checagem da significância dos coeficientes do modelo de regressão. Por meio do teste t, eliminou-se, em cada passo, a variável independente que apresentou o efeito menos significativo dentre aquelas utilizadas. O processo prosseguiu até a situação em que havia apenas uma variável independente no modelo. Essa variável apresentava o efeito mais significativo dentre aquelas utilizadas.

Para a escolha do melhor modelo, observou-se, o efeito significativo das variáveis utilizadas e o maior valor do coeficiente de determinação (R^2). Algumas vezes, modelos com somente uma variável independente apresentaram baixo coeficiente de determinação e por isso não foram recomendados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Calibração das sondas de TDR

A variação do teor de água em volume (θ) em função da constante dielétrica aparente (K_a) para os três solos utilizados está apresentada na Figura 7. As equações ajustadas, apresentadas na Figura 7, foram utilizadas para a conversão dos valores de K_a , obtidos nas leituras do TDR, em valores do teor de água em volume, os quais foram utilizados no modelo de GAML para a obtenção do potencial matricial na frente de umedecimento.

Os dados de K_a e θ obtidos na calibração das sondas de TDR estão apresentados no Anexo 1. Na obtenção das equações ajustadas na calibração das sondas de TDR os valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos foram de 0,985 para o LVA, 0,974 para o LV e 0,995 para o PV, indicando que as equações representaram bem os valores experimentais.

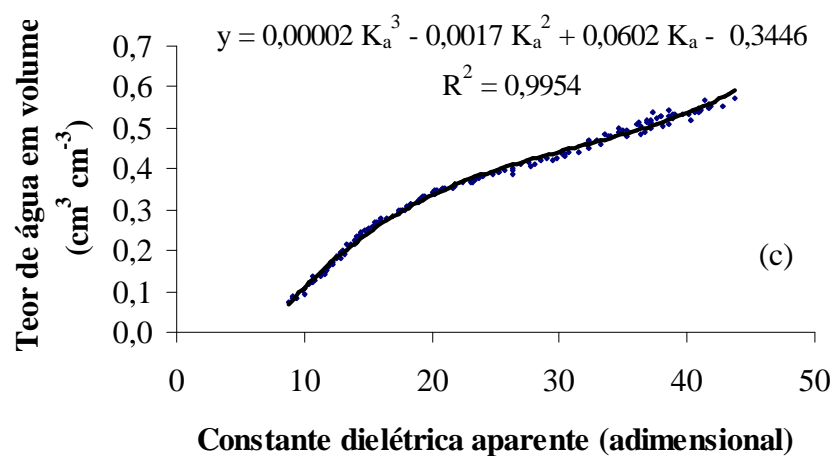
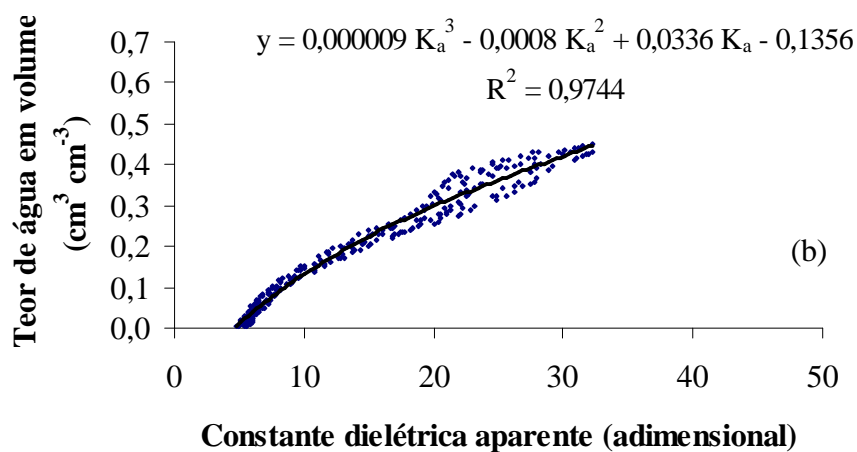
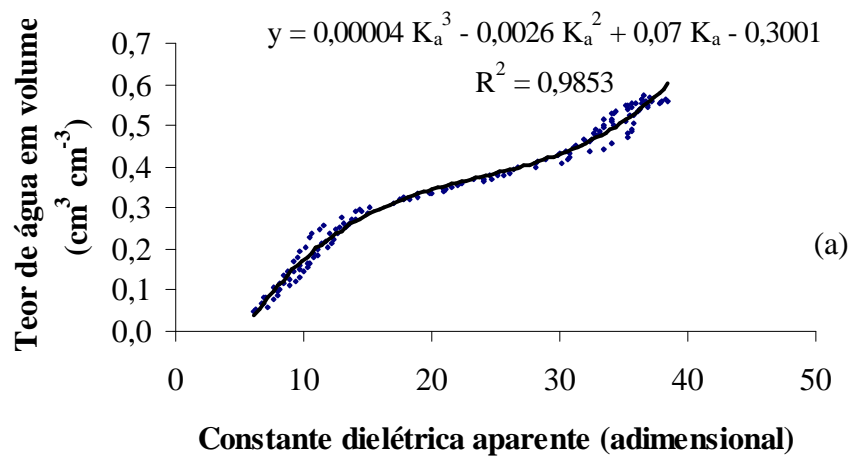


Figura 7 – Curvas de calibração das sondas de TDR utilizadas no experimento para: (a) Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA); (b) Latossolo Vermelho (LV); e (c) Argissolo Vermelho (PV).

4.2. Testes de infiltração

Nas Figuras 8 a 10 estão apresentados os gráficos relacionando a taxa de infiltração de água em função do tempo para os diferentes testes e para os três solos utilizados. Os dados de variação da taxa de infiltração em função do tempo utilizados para a obtenção das Figuras 8 a 10 estão apresentados no Anexo 2.

Para a obtenção da T_{ie} foi realizada uma análise gráfica e, posteriormente, uma média dos últimos valores observados da taxa de infiltração.

O simulador de chuvas apresentou problema de desgaste em suas engrenagens durante a realização do terceiro teste do LV, não sendo possível a utilização deste teste no presente trabalho. Foram, então, considerados apenas dois testes para o LV.

O LVA e o LV, apesar de apresentarem elevados valores de taxa de infiltração, apresentaram escoamento superficial desde o início dos testes de infiltração (Figuras 8 e 9, respectivamente). Elevados valores de intensidade de precipitação suplantaram a capacidade de infiltração destes solos fazendo com que o escoamento superficial fosse observado desde o início do processo de infiltração.

Para o PV (Figura 10) observa-se que no início do processo de infiltração toda a água aplicada pelo simulador de chuva infiltrou no solo, sendo então a taxa de infiltração igual à intensidade de precipitação (comportamento observado pela linha horizontal no início do processo de infiltração). Neste intervalo de tempo não se observou escoamento superficial. Este comportamento decorre do fato da capacidade de infiltração, definida como a máxima quantidade de água que pode infiltrar no solo em um dado intervalo de tempo, ser maior que a intensidade de precipitação no início do processo.

Os valores de intensidade de precipitação (I_p) e da taxa de infiltração estável (T_{ie}) obtidos para os diferentes testes e classes de solo estão apresentados no Quadro 2. A intensidade de precipitação foi medida antes da realização de cada teste, sendo que os valores apresentados são as médias de três leituras realizadas. Observa-se no Quadro 2 que as intensidades de precipitação variaram de 210,8 a 574,5 mm h⁻¹. Essa variação nos valores de I_p foi necessária devido a diferença textural entre os solos utilizados e a necessidade de ocorrência do escoamento superficial.

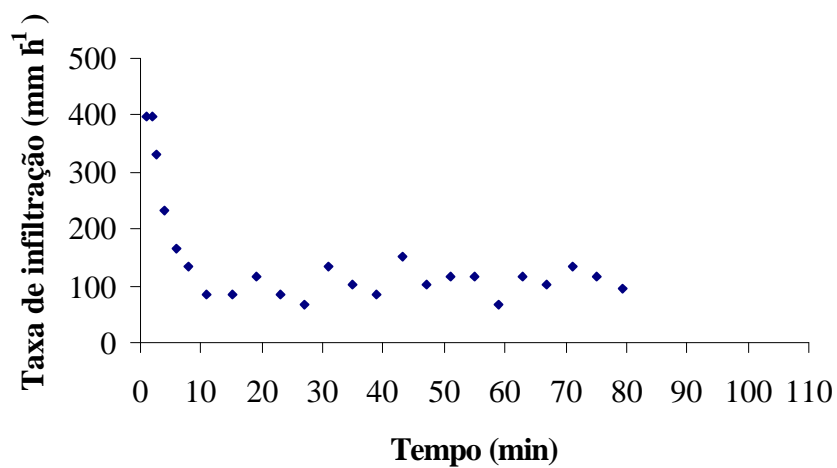
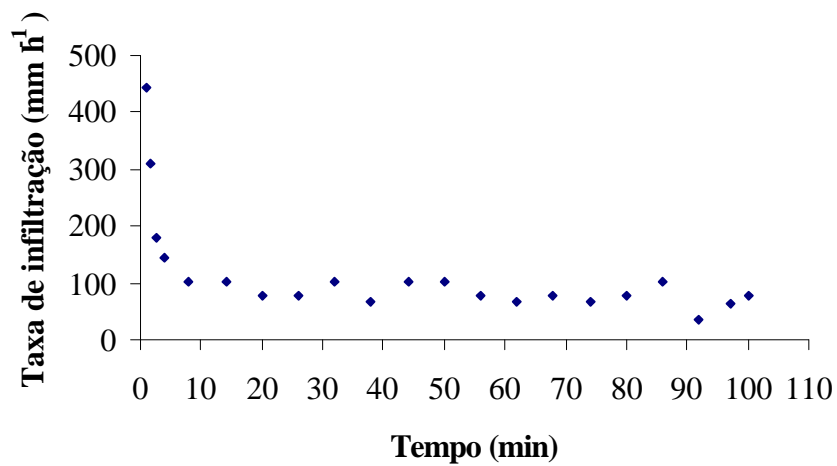
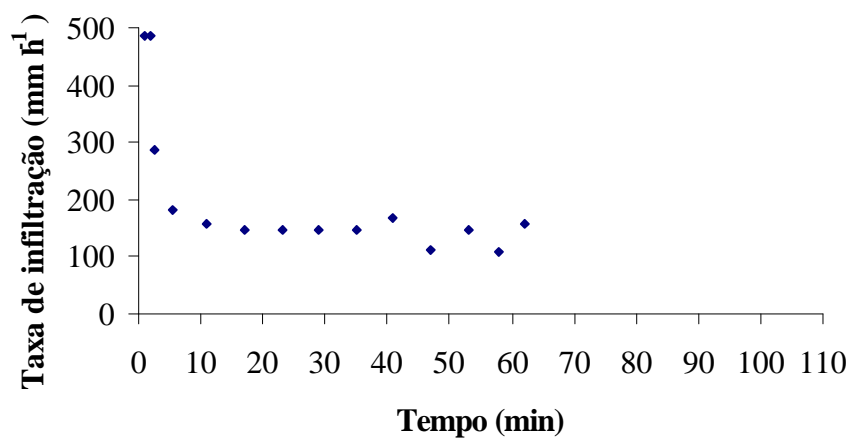


Figura 8 – Taxa de infiltração de água no solo em função do tempo, para os três testes realizados utilizando o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA).

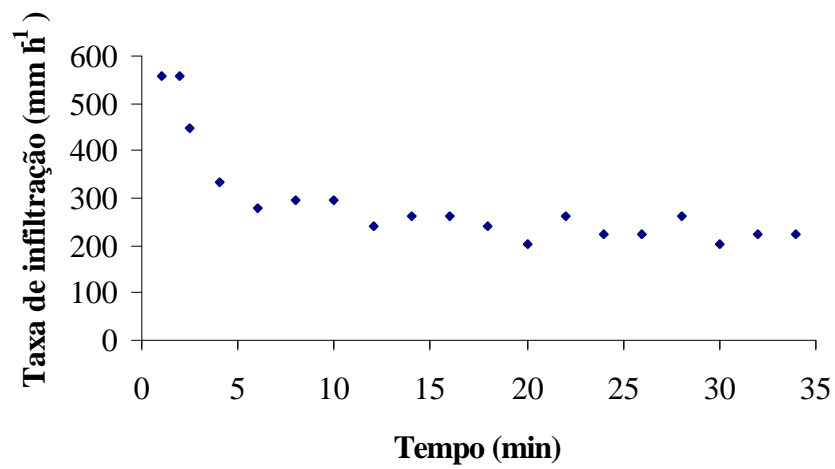
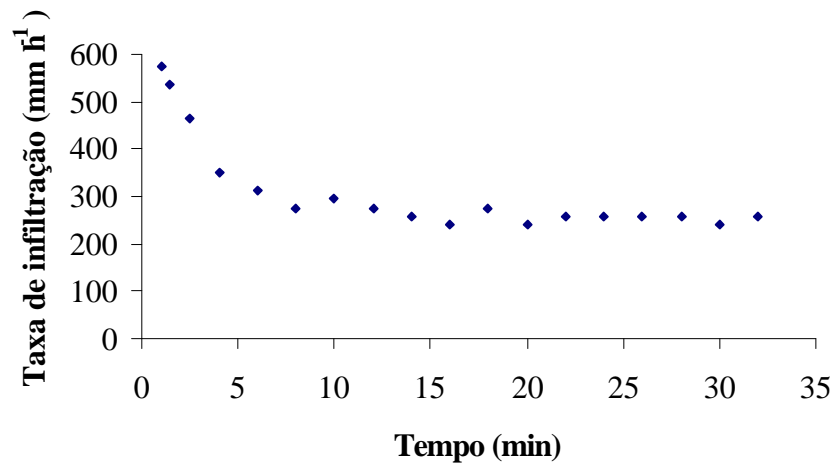


Figura 9 – Taxa de infiltração de água no solo em função do tempo, para os dois testes realizados utilizando o Latossolo Vermelho (LV).

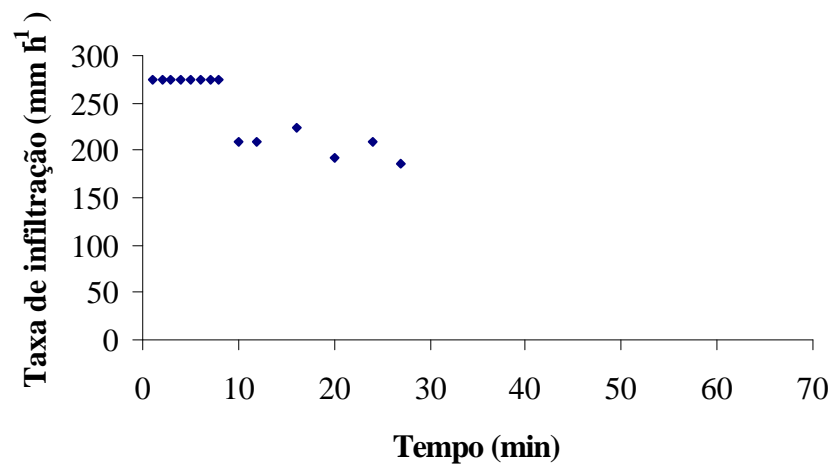
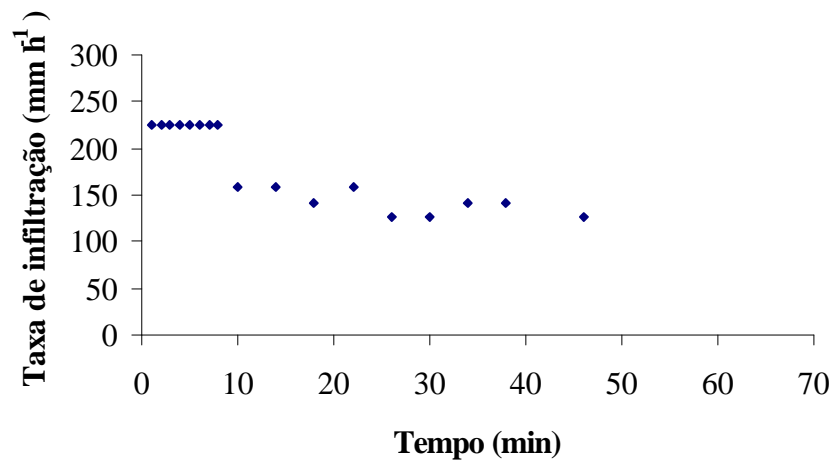
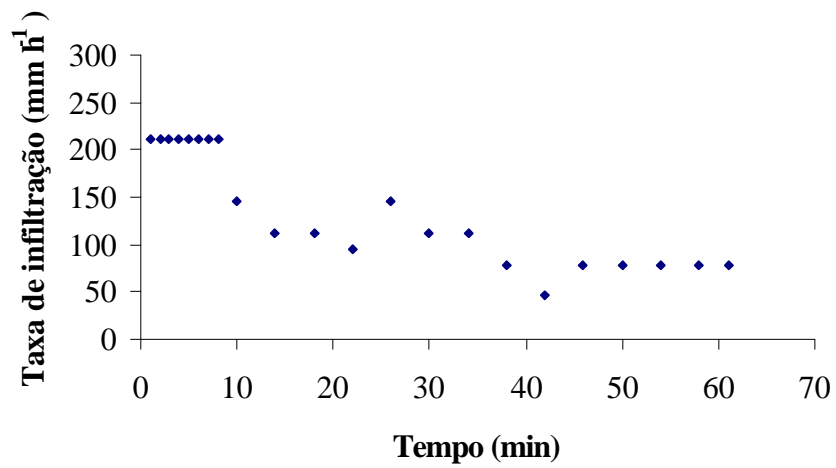


Figura 10 – Taxa de infiltração de água no solo em função do tempo, para os três testes realizados utilizando o Argissolo Vermelho (PV).

Quadro 2 – Valores de intensidade de precipitação (I_p) e de taxa de infiltração estável (Tie) para os diferentes testes realizados

| Testes | I_p (mm h^{-1}) | | | Tie (mm h^{-1}) | | |
|--------|------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|
| | LVA | LV | PV | LVA | LV | PV |
| 1 | 486,1 | 574,5 | 210,8 | 130,3 | 253,3 | 78,9 |
| 2 | 441,9 | 557,9 | 224,7 | 72,5 | 227,4 | 132,4 |
| 3 | 397,7 | - | 274,4 | 107,6 | - | 195,7 |
| Média | 441,9 | 566,2 | 236,6 | 103,5 | 240,4 | 135,7 |

Os maiores valores de taxa de infiltração estável foram aqueles observados para o LV. Este solo apresenta textura arenosa, ou seja, possui maior quantidade de macroporos que os de textura fina (argilosos) e, conseqüentemente, apresentou maiores valores de taxa de infiltração.

No caso do LVA, os elevados valores de Tie são devido ao alto grau de desenvolvimento e estabilidade da estrutura microgranular, determinada pelos agentes cimentantes (óxidos de Fe e Al e matéria orgânica) presentes neste solo.

O PV, com elevado grau de estruturação em blocos, apresentou elevados valores de Tie , auxiliado ainda pelo fato deste solo apresentar elevados teores de óxidos de ferro. Estes óxidos, ao se ligarem às lâminas de caulinita, promovem desorganização destas lâminas favorecendo o processo de infiltração.

A variação nos valores de Tie para o PV, observada no Quadro 2, pode ser decorrente da dificuldade de reprodução das mesmas condições para os diferentes testes, como por exemplo a densidade do solo dentro das colunas.

BRANDÃO (2003) obteve para diferentes níveis de energia cinética da chuva valores de Tie variando de 70,3 a 260,7 mm h^{-1} para o LVA, de 74,5 a 442,9 mm h^{-1} para o Neossolo Quartzarênico e de 26,1 a 166,2 mm h^{-1} para o PV.

SILVA e KATO (1998), avaliando a taxa de infiltração estável em um Latossolo Vermelho-Amarelo, utilizando simulador de chuvas (com intensidade de aplicação de aproximadamente 90 mm h^{-1}), encontraram para solo sem cobertura o valor de 61,3 mm h^{-1} e para solo com cobertura morta valor igual a 76,3 mm h^{-1} . Os autores atribuíram esta diferença à formação de encrostamento superficial nos solos sem cobertura vegetal.

No Quadro 3 estão apresentados os valores de duração dos testes e infiltração acumulada para os diferentes testes e classes de solos. A dificuldade de obtenção das mesmas condições para a realização dos testes, tais como, intensidade de precipitação e reprodutibilidade da mesma densidade do solo dentro das colunas para os diferentes testes pode ter influenciado nos valores de duração dos testes e de infiltração acumulada.

Quadro 3 – Duração dos testes (d, em min) e infiltração acumulada (I, mm) para as três classes de solo utilizadas

| Solo | Teste | Duração do teste (min) | Infiltração acumulada (mm) |
|------|-------|------------------------|----------------------------|
| LVA | 1 | 64 | 170,1 |
| LVA | 2 | 101 | 151,5 |
| LVA | 3 | 82 | 163,3 |
| LV | 1 | 33 | 161,4 |
| LV | 2 | 35 | 160,4 |
| PV | 1 | 61 | 112,1 |
| PV | 2 | 46 | 118,4 |
| PV | 3 | 27 | 101,5 |

O LVA foi dentre os solos estudados aquele que apresentou os maiores valores de duração dos testes bem como da infiltração acumulada. A boa estruturação deste solo, devido à presença de óxidos de ferro e alumínio, favoreceu o processo de infiltração.

No LV, apesar da duração do teste ser pequena a taxa de infiltração é muito alta devido ao fato deste solo apresentar textura grossa, fazendo com que a infiltração acumulada apresente valores elevados.

O PV apresentou os menores valores de infiltração acumulada dentre os solos utilizados no experimento apesar de apresentar alta taxa de infiltração ainda que menor que os latossolos.

4.3. Características físico-hídricas dos solos das colunas

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), a porosidade (total, macro e micro), o teor de água volumétrico na zona de transmissão (θ_w) e o teor de água volumétrico no início do processo de infiltração (θ_i) para os diferentes testes e classes de solos estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Valores de condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), porosidade (total, macro e micro), teor de água na zona de transmissão (θ_w) e teor de água inicial (θ_i) para os diferentes testes e classes de solos

| Solo | Teste | K_0 (mm h ⁻¹) | Porosidade (cm ³ cm ⁻³) | | | θ_w (cm ³ cm ⁻³) | θ_i (cm ³ cm ⁻³) |
|------|-------|--------------------------------|--|-------|-------|---|---|
| | | | Total | Micro | Macro | | |
| LVA | 1 | 112,1 | 0,540 | 0,416 | 0,124 | 0,521 | 0,327 |
| LVA | 2 | 109,0 | 0,537 | 0,406 | 0,131 | 0,509 | 0,320 |
| LVA | 3 | 90,2 | 0,534 | 0,450 | 0,084 | 0,524 | 0,318 |
| LV | 1 | 86,7 | 0,477 | 0,211 | 0,266 | 0,413 | 0,108 |
| LV | 2 | 67,0 | 0,474 | 0,224 | 0,250 | 0,424 | 0,093 |
| PV | 1 | 29,1 | 0,543 | 0,464 | 0,079 | 0,523 | 0,300 |
| PV | 2 | 50,7 | 0,542 | 0,422 | 0,120 | 0,528 | 0,297 |
| PV | 3 | 83,2 | 0,541 | 0,434 | 0,107 | 0,525 | 0,289 |

Foi observada uma menor variabilidade entre os valores de K_0 , obtidos nos diferentes testes experimentais realizados, nos latossolos em relação ao argissolo. Este comportamento pode ter sido influenciado pela própria estrutura granular dos latossolos em relação à estrutura em blocos do argissolo. A estrutura em blocos subangulares presentes no PV favorece a formação de caminhos preferenciais ao escoamento de água. Uma vez formado esses caminhos preferenciais, o valor de K_0 pode variar consideravelmente de um teste para outro. O valor de argila dispersa em água (33% para o PV) também pode ter influenciado na variabilidade dos valores de K_0 para este solo, pois a A.D.A. pode entupir os poros dificultando a passagem da água. Alguns problemas operacionais de determinação de K_0 também podem ter favorecido para a alta variabilidade entre estes valores.

O LV, por ser um solo de textura arenosa, apresentou maiores valores de macroporosidade em relação aos valores de microporosidade. Este solo apresentou, ainda, os menores valores de porosidade total (ϕ) dentre os três solos utilizados no experimento.

Para o LVA e o PV os valores de macroporosidade foram menores que os de microporosidade. Estes solos apresentaram valores semelhantes de porosidade total.

Em condições de solo saturado a macroporosidade é um importante fator que influencia a condutividade hidráulica do solo. Apesar de o LV apresentar os maiores valores de macroporosidade a condutividade hidráulica do solo saturado deste solo esteve menor do que aquela observada para LVA. O menor valor de K_0 foi observado no PV (29,1 mm h⁻¹), corresponde ao menor valor de macroporosidade (0,079 cm³ cm⁻³).

SILVA e KATO (1997) avaliaram a infiltração em um Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso sujeito a três condições diferentes de manejo: sistema de cultivo

tradicional, plantio direto e cerrado virgem. No sistema plantio direto os valores de microporosidade, de macroporosidade e de porosidade total observados pelos autores estiveram próximos daqueles obtidos no presente trabalho para o mesmo solo (0,4, 0,2 e 0,6 cm³ cm⁻³, respectivamente).

Os valores do teor de água volumétrico na zona de transmissão (θ_w) encontrados neste trabalho estiveram entre 0,87 a 0,98 dos valores de teor de água volumétrico correspondente a saturação (θ_s). MELLO (2003) trabalhando com Latossolo Vermelho-Amarelo encontrou que o teor de água volumétrico na zona de transmissão, determinada ao final do teste de infiltração, variou de 0,76 a 0,94 de θ_s .

4.4. Modelos estatísticos para a estimativa do potencial matricial na frente de umedecimento

De todos os modelos testados, estão apresentados, aqueles cujos valores de R² foram superiores a 0,90 e cujos parâmetros da equação apresentaram efeitos significativos, pelo menos em nível de 5% de probabilidade. Os resultados da análise da variância da regressão para os referidos modelos estão apresentados no Anexo 3. Estes modelos tiveram como variável dependente o potencial matricial na frente de umedecimento (ψ_m) e como independente algumas características físicas além da condutividade hidráulica do solo saturado.

$$|\psi_m| = -1151,78 + 3122,53 \cdot \phi - 4,27 \cdot K_0 + 1767,23 \cdot S \quad R^2 = 0,98 \quad (24)$$

$$|\psi_m| = 267,51 - 3,39 \cdot K_0 + 2049,38 \cdot S \quad R^2 = 0,95 \quad (25)$$

$$|\psi_m| = 1040,66 - 7,10 \cdot K_0 - 1953,09 \cdot \phi_{\text{macro}} \quad R^2 = 0,92 \quad (26)$$

$$|\psi_m| = 1066,85 - 7,73 \cdot K_0 - 591,59 \cdot A \quad R^2 = 0,92 \quad (27)$$

em que:

ψ_m = potencial matricial na frente de umedecimento, mm;

ϕ = porosidade total, cm³ cm⁻³;

ϕ_{macro} = macroporosidade, cm³ cm⁻³;

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

S = porcentagem de silte;

A = porcentagem de areia; e

*,** = significativos em níveis de 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

Observou-se, pelo teste t, que os efeitos da condutividade hidráulica do solo saturado, da porcentagem de silte e da macroporosidade foram significativos, em nível de 5% de probabilidade, em todos os modelos em que foram utilizados.

Dentre as variáveis utilizadas para a modelagem do potencial matricial na frente de umedecimento a taxa de infiltração estável foi a única que não apresentou efeito significativo (em nível de 5 % de probabilidade), não sendo, portanto, adequada para a obtenção de θ_m nas condições em que este trabalho foi realizado.

O sinal positivo da constante que multiplica a porosidade total (Equação 24) indica uma relação direta entre este parâmetro com o potencial matricial na frente de umedecimento. Quanto maior a microporosidade maior é a energia com que a água está retida na matriz do solo e, com isso, maior é o valor, em módulo, do potencial matricial na frente de umedecimento. O contrário acontece com a macroporosidade, multiplicada por constante de sinal negativo (Equação 26). Maiores valores de microporosidade em relação aos de macroporosidade justificam o sinal positivo do parâmetro porosidade total.

A influência da porcentagem de areia no comportamento do potencial matricial na frente de umedecimento está associada ao aumento da macroporosidade. Desta forma, quanto maior a presença de areia, tanto menor, em módulo, o valor do potencial matricial na frente de umedecimento, o que explica o valor negativo da constante que multiplica a porcentagem de areia. O oposto pode ser verificado para a porcentagem de silte, uma vez que estas partículas preenchem os vazios do solo, aumentando a retenção capilar e a adsorção de água no perfil do solo.

A condutividade hidráulica do solo saturado apresentou uma relação inversa com o potencial matricial na frente de umedecimento, sendo que o aumento de uma unidade desta propriedade implica num decréscimo de, no máximo, 7,73 unidades de θ_m (Equação 27). O conhecimento da relação da condutividade hidráulica com o potencial matricial é de extrema importância na caracterização do movimento da água no solo.

Os melhores resultados foram obtidos para os modelos que relacionaram o potencial matricial na frente de umedecimento em função da porosidade total, da condutividade hidráulica do solo saturado e da porcentagem de silte (Equação 24) e para

aquele que relacionou o potencial matricial em função da condutividade hidráulica e da porcentagem de silte (Equação 25).

Desta forma, a partir de equações ajustadas e do conhecimento de algumas características do solo, é possível estimar o potencial matricial na frente de umedecimento para sua aplicação no modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pôde-se concluir, para as condições em que o trabalho foi realizado, que:

- A condutividade hidráulica do solo saturado, a porcentagem de silte e a macroporosidade foram as variáveis que mais explicaram a variação do potencial matricial na frente de umedecimento em solos tropicais;
- A taxa de infiltração estável não apresentou efeito significativo, em nenhum dos modelos ajustados, mostrando não ser adequada para a modelagem do potencial matricial na frente de umedecimento;
- A porosidade total, a microporosidade, a porcentagem de silte, o teor de água na zona de transmissão e o teor de água inicial do solo apresentaram relação direta com o potencial matricial na frente de umedecimento. A condutividade hidráulica do solo saturado, a macroporosidade e a porcentagem de areia apresentaram relação inversa com o potencial matricial na frente de umedecimento; e
- A porcentagem de silte quando utilizada em combinação com outras variáveis apresentou bons resultados na modelagem do potencial matricial na frente de umedecimento, sendo que o melhor modelo foi aquele no qual o potencial matricial na frente de umedecimento está relacionado com a porosidade total, a condutividade hidráulica do solo saturado e a porcentagem de silte.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGASSI, M.; BRADFORD, J.M. Methodologies for interrill soil erosion studies. **Soil and Tillage Research**, v.49, p.277-287, 1999.
- BASSOI, L. H. **Uso da técnica de reflectometria no domínio de tempo para medir a água no solo**. Revista ITEM Irrigação e Tecnologia Moderna. N. 51, 2001.
- BERNADO, S. **Manual de Irrigação**. 5. ed. Viçosa, MG:UFV, 596 p, 1995.
- BOUWER, H. Infiltration of water into nonuniform soil. **Journal Irrigation and Drain. Div.**, 95(4): 451-462, 1966.
- 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.
- BRANDÃO, V. S. **Infiltração de água em solos sujeitos a encrostamento**. Viçosa, MG: UFV. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, 68 p. 2003.
- CECILIO, 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.
- CHU, S.T. Effect of initial water content on Green-Ampt parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 38, n. 3, p. 839-841, 1995.

- COELHO, E. F.; ANDRADE, C. L. T.; OR, D.; LOPES, L. C.; SOUZA, C. F. Desempenho de diferentes guias de onda para uso com analisador de umidade TRASE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 5, n. 1, p. 81-87, 2001.
- DERNADIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. Piracicaba, SP: ESALq, 1990. 80p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1990.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 212p. 1997.
- GANDOLFI, C.; SAVI, F. A., Mathematical model for the coupled simulation of surface runoff and infiltration. **Journal Agriculture Eng. Resources**, 75: 49-55, 2000.
- GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Studies on soil physics. Flow of air and water through soils. **Journal of Agricultural Science**, v.4, n.1, p.1-24, 1911.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, p. 771, 1998.
- IDIKE, F.I.; LARSON, C.L.; SLACK, D.C.; YOUNG, R.A. Experimental evaluation of two infiltration models. **Transactions of the ASAE**. 1428-1433. 1980.
- JONES, S.B.; WRAITH, J.M.; OR, D. Time domain reflectometry measurement principles and applications. **Hydrological Processes**, v.16, p.141-153, 2002.
- 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.; BINGNER, R. L. Comparision 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.
- LIMA, C.A.G.; SILANS, A.P. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2311-2320, dez. 1999.
- MEIN, R.G., 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 diferentes metodologias de obtenção dos parâmetros do modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson**. Viçosa, MG: UFV. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, 77 p. 2003.
- MIYAZAKI, T. Bulk density dependence of air entry suctions and saturated hydraulic conductivities of soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 161, n. 8, p. 484-490, Aug. 1996.
- MOORE, I. D., LARSON, C. L. SLACK, D. C. Predicting infiltration and micro-relief surface storage for cultivated soils. Bulletin n. 102, **Water Resources Research Center**, University of Minnesota, Minneapolis, MN. 122p. 1980.

- MOREL-SEYTOUX, H. J.; KHANJI, J. Derivation of an equation of infiltration. **Water Resources Research**, v.10, p.795-800, 1974.
- 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.
- PARLANGE, J.Y.; BARRY, D.A.; HAVERKAMP, R. Explicit infiltration equations and the Lambert W-function. **Advances in Water Resources**, n. 25, p. 1119-1124, 2002.
- PRUSKI, F.F.; VENDRAME, V.; OLIVEIRA, E.F.; BALBINO, L.C.; FERREIRA, P.A.; WERLANG, L.; CARVALHO, L.T. Infiltração da água num latossolo roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.1, p.77-84, 1997.
- RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L.; SONI, B. Agricultural management effects on soil water process Part I: soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 26, n. 6, p. 1747-1752, 1983.
- RAWLS, W.J., 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.
- REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: USP/ESALQ. Depto. Física e Meteorologia, 505p., 1996.
- 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.
- SALES, L.E.O.; FERREIRA, M.M.; OLIVEIRA, M.S.; CURI, N. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.34, n.11, p.2091-2095, 1999.
- SILVA, C.L.; KATO, E. Avaliação de modelos para previsão da infiltração de água em solos sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 7, 1998.
- SILVA, C.L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 2, 1997.
- SLACK, D.C. Modeling infiltration under moving sprinkler irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 23, n. 3, p. 596-600, 1980.
- SULEIMAN, K.A.; SWARTZENDRUBER, D. Measurement of saturated hydraulic conductivity of surface soil in the field with a small-plot sprinkling infiltrometer. **Journal of Hydrology**, v.272, p 203-212, 2002.
- TOMASELLI, J. T. G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (time-domain reflectometry)**. Piracicaba. 109 p. Tese Doutorado – Centro Nacional de Energia na Agricultura, Universidade de São Paulo. 1997

- TOMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, V. 36, N. 9, p. 1145-1154, set. 2001.
- TOOP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**. V. 16, N. 3, p. 574-582, 1980.
- TOOP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications to wetting fronts and steep gradients. **Soil Science Society American**. V. 46, p. 672-678, 1982.
- 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. 89-97, 1999.

ANEXO 1

Quadro 5 – Dados utilizados na calibração das sondas de TDR para o LVA

| Leituras | Sondas | Média Ka | Massa (g) | Teor de água volumétrico (m³ m⁻³) |
|-----------------|---------------|-----------------|------------------|--|
| 1 | 1 | 37,106 | 1933,0 | 0,570 |
| | 2 | 38,281 | 1957,1 | 0,565 |
| | 3 | 36,587 | 1942,7 | 0,572 |
| 2 | 1 | 36,712 | 1925,7 | 0,561 |
| | 2 | 37,939 | 1951,5 | 0,559 |
| | 3 | 36,416 | 1937,6 | 0,566 |
| 3 | 1 | 37,120 | 1924,5 | 0,560 |
| | 2 | 38,497 | 1950,2 | 0,557 |
| | 3 | 36,401 | 1935,6 | 0,564 |
| 4 | 1 | 36,477 | 1920,8 | 0,556 |
| | 2 | 37,769 | 1947,3 | 0,554 |
| | 3 | 36,010 | 1928,7 | 0,556 |
| 5 | 1 | 35,374 | 1916,1 | 0,550 |
| | 2 | 36,844 | 1941,6 | 0,548 |
| | 3 | 35,618 | 1926,3 | 0,553 |
| 6 | 1 | 35,192 | 1914,8 | 0,549 |
| | 2 | 36,868 | 1940,4 | 0,546 |
| | 3 | 35,616 | 1917,9 | 0,544 |
| 7 | 1 | 35,310 | 1907,3 | 0,540 |
| | 2 | 36,276 | 1935,4 | 0,540 |
| | 3 | 34,176 | 1903,5 | 0,528 |
| 8 | 1 | 34,347 | 1903,2 | 0,536 |
| | 2 | 36,187 | 1933,2 | 0,538 |
| | 3 | 33,477 | 1890,9 | 0,513 |
| 9 | 1 | 34,133 | 1899,7 | 0,532 |
| | 2 | 36,090 | 1931,2 | 0,536 |
| | 3 | 33,407 | 1874,6 | 0,495 |

Quadro 5 – Cont.

| Leituras | Sondas | Média Ka | Massa (g) | Teor de água volumétrico (m ³ m ⁻³) |
|----------|--------|----------|-----------|---|
| 10 | 1 | 33,990 | 1886,1 | 0,516 |
| | 2 | 35,508 | 1923,1 | 0,527 |
| | 3 | 33,101 | 1867,3 | 0,486 |
| 11 | 1 | 34,069 | 1880,9 | 0,510 |
| | 2 | 35,807 | 1919,7 | 0,523 |
| | 3 | 33,092 | 1861,8 | 0,480 |
| 12 | 1 | 34,199 | 1874,2 | 0,503 |
| | 2 | 35,187 | 1910,3 | 0,512 |
| | 3 | 32,742 | 1857,6 | 0,475 |
| 13 | 1 | 33,481 | 1870,7 | 0,499 |
| | 2 | 35,794 | 1906,3 | 0,507 |
| | 3 | 32,486 | 1849,3 | 0,466 |
| 14 | 1 | 32,780 | 1863,9 | 0,491 |
| | 2 | 35,690 | 1892,6 | 0,492 |
| | 3 | 32,028 | 1847,4 | 0,464 |
| 15 | 1 | 32,656 | 1856,1 | 0,482 |
| | 2 | 35,589 | 1888,0 | 0,487 |
| | 3 | 31,106 | 1832,3 | 0,447 |
| 16 | 1 | 31,862 | 1843,8 | 0,468 |
| | 2 | 35,366 | 1884,8 | 0,483 |
| | 3 | 28,918 | 1806,4 | 0,417 |
| 17 | 1 | 32,275 | 1838,9 | 0,463 |
| | 2 | 35,369 | 1876,8 | 0,474 |
| | 3 | 28,074 | 1799,3 | 0,409 |
| 18 | 1 | 31,279 | 1828,2 | 0,450 |
| | 2 | 34,034 | 1860,7 | 0,456 |
| | 3 | 26,703 | 1790,0 | 0,398 |
| 19 | 1 | 30,468 | 1816,1 | 0,437 |
| | 2 | 33,400 | 1847,2 | 0,440 |
| | 3 | 24,560 | 1773,6 | 0,380 |
| 20 | 1 | 30,811 | 1813,2 | 0,433 |
| | 2 | 32,393 | 1844,4 | 0,437 |
| | 3 | 24,106 | 1766,6 | 0,372 |
| 21 | 1 | 30,025 | 1810,8 | 0,431 |
| | 2 | 30,858 | 1831,9 | 0,423 |
| | 3 | 23,357 | 1762,8 | 0,368 |
| 22 | 1 | 29,789 | 1806,9 | 0,426 |
| | 2 | 30,659 | 1827,4 | 0,418 |
| | 3 | 22,352 | 1755,3 | 0,359 |
| 23 | 1 | 28,348 | 1795,4 | 0,413 |
| | 2 | 30,128 | 1821,1 | 0,411 |
| | 3 | 21,502 | 1749,1 | 0,352 |
| 24 | 1 | 26,351 | 1778,4 | 0,394 |
| | 2 | 28,141 | 1808,6 | 0,396 |
| | 3 | 20,971 | 1743,0 | 0,345 |

Quadro 5 – Cont.

| Leituras | Sondas | Média Ka | Massa (g) | Teor de água volumétrico (m ³ m ⁻³) |
|----------|--------|----------|-----------|--|
| 25 | 1 | 25,165 | 1770,2 | 0,385 |
| | 2 | 26,154 | 1796,1 | 0,382 |
| | 3 | 18,978 | 1733,4 | 0,334 |
| 26 | 1 | 25,159 | 1766,7 | 0,381 |
| | 2 | 25,615 | 1792,7 | 0,378 |
| | 3 | 17,790 | 1724,5 | 0,324 |
| 27 | 1 | 22,213 | 1746,5 | 0,358 |
| | 2 | 24,696 | 1783,3 | 0,368 |
| | 3 | 15,220 | 1705,8 | 0,303 |
| 28 | 1 | 22,072 | 1742,9 | 0,353 |
| | 2 | 23,999 | 1778,8 | 0,362 |
| | 3 | 14,441 | 1700,0 | 0,296 |
| 29 | 1 | 21,111 | 1737,1 | 0,347 |
| | 2 | 20,960 | 1761,1 | 0,342 |
| | 3 | 14,118 | 1695,2 | 0,291 |
| 30 | 1 | 19,887 | 1728,1 | 0,337 |
| | 2 | 19,966 | 1754,6 | 0,335 |
| | 3 | 12,942 | 1684,7 | 0,279 |
| 31 | 1 | 17,849 | 1714,4 | 0,321 |
| | 2 | 18,941 | 1746,5 | 0,326 |
| | 3 | 11,533 | 1668,2 | 0,260 |
| 32 | 1 | 17,440 | 1712,4 | 0,319 |
| | 2 | 18,307 | 1742,5 | 0,321 |
| | 3 | 11,294 | 1659,5 | 0,250 |
| 33 | 1 | 14,574 | 1687,7 | 0,291 |
| | 2 | 17,011 | 1733,0 | 0,310 |
| | 3 | 10,644 | 1647,3 | 0,236 |
| 34 | 1 | 13,684 | 1672,1 | 0,273 |
| | 2 | 14,932 | 1711,1 | 0,285 |
| | 3 | 10,476 | 1641,2 | 0,229 |
| 35 | 1 | 13,129 | 1663,5 | 0,263 |
| | 2 | 14,071 | 1701,5 | 0,275 |
| | 3 | 10,157 | 1617,8 | 0,203 |
| 36 | 1 | 12,756 | 1654,1 | 0,253 |
| | 2 | 13,531 | 1690,7 | 0,262 |
| | 3 | 9,730 | 1610,3 | 0,194 |
| 37 | 1 | 12,507 | 1651,7 | 0,250 |
| | 2 | 13,371 | 1688,4 | 0,260 |
| | 3 | 9,533 | 1596,7 | 0,179 |
| 38 | 1 | 12,099 | 1640,4 | 0,237 |
| | 2 | 13,209 | 1680,7 | 0,251 |
| | 3 | 9,259 | 1588,5 | 0,169 |
| 39 | 1 | 11,752 | 1625,8 | 0,220 |
| | 2 | 12,722 | 1670,9 | 0,240 |
| | 3 | 8,820 | 1568,3 | 0,146 |

Quadro 5 – Cont.

| Leituras | Sondas | Média Ka | Massa (g) | Teor de água volumétrico (m³ m⁻³) |
|-----------------|---------------|-----------------|------------------|--|
| 40 | 1 | 11,379 | 1618,5 | 0,212 |
| | 2 | 12,322 | 1657,1 | 0,224 |
| | 3 | 8,406 | 1560,8 | 0,138 |
| 41 | 1 | 11,083 | 1606,4 | 0,198 |
| | 2 | 12,115 | 1649,4 | 0,215 |
| | 3 | 8,198 | 1541,8 | 0,116 |
| 42 | 1 | 10,775 | 1600,7 | 0,192 |
| | 2 | 11,864 | 1637,6 | 0,202 |
| | 3 | 7,726 | 1534,9 | 0,108 |
| 43 | 1 | 10,258 | 1578,1 | 0,166 |
| | 2 | 11,150 | 1621,7 | 0,184 |
| | 3 | 6,862 | 1511,0 | 0,081 |
| 44 | 1 | 9,748 | 1573,7 | 0,161 |
| | 2 | 10,786 | 1616,6 | 0,178 |
| | 3 | 6,651 | 1501,5 | 0,070 |
| 45 | 1 | 9,651 | 1565,6 | 0,152 |
| | 2 | 10,491 | 1606,5 | 0,167 |
| | 3 | 6,121 | 1482,6 | 0,049 |

Quadro 6 – Dados utilizados na calibração das sondas de TDR para o LV

| Leituras | Sondas | Média Ka | Massa (g) | Teor de água volumétrico (m ³ m ⁻³) |
|----------|--------|----------|-----------|--|
| 1 | 1 | 32,280 | 2073,2 | 0,431 |
| | 2 | 32,229 | 2051,9 | 0,449 |
| | 3 | 31,429 | 2026,1 | 0,445 |
| 2 | 1 | 32,002 | 2069,4 | 0,427 |
| | 2 | 31,519 | 2046,9 | 0,444 |
| | 3 | 30,826 | 2021,2 | 0,439 |
| 3 | 1 | 31,716 | 2067,3 | 0,424 |
| | 2 | 31,237 | 2043,7 | 0,440 |
| | 3 | 30,050 | 2019,2 | 0,437 |
| 4 | 1 | 31,544 | 2063,2 | 0,420 |
| | 2 | 30,552 | 2037,3 | 0,433 |
| | 3 | 28,094 | 2014,1 | 0,431 |
| 5 | 1 | 31,095 | 2061,6 | 0,418 |
| | 2 | 29,677 | 2035,4 | 0,431 |
| | 3 | 27,616 | 2012,3 | 0,429 |
| 6 | 1 | 30,905 | 2057,0 | 0,413 |
| | 2 | 29,907 | 2029,9 | 0,424 |
| | 3 | 26,761 | 2006,8 | 0,422 |
| 7 | 1 | 29,226 | 2044,9 | 0,399 |
| | 2 | 28,230 | 2008,0 | 0,399 |
| | 3 | 25,765 | 1996,3 | 0,410 |
| 8 | 1 | 28,828 | 2036,3 | 0,389 |
| | 2 | 27,864 | 2000,9 | 0,391 |
| | 3 | 25,096 | 1985,2 | 0,397 |
| 9 | 1 | 27,884 | 2017,2 | 0,367 |
| | 2 | 27,429 | 1992,4 | 0,382 |
| | 3 | 25,043 | 1979,4 | 0,390 |
| 10 | 1 | 27,781 | 2010,3 | 0,360 |
| | 2 | 26,606 | 1972,6 | 0,359 |
| | 3 | 24,465 | 1965,1 | 0,374 |
| 11 | 1 | 27,481 | 2003,4 | 0,352 |
| | 2 | 26,268 | 1963,4 | 0,349 |
| | 3 | 23,743 | 1949,0 | 0,355 |
| 12 | 1 | 26,904 | 1999,4 | 0,347 |
| | 2 | 25,319 | 1959,0 | 0,344 |
| | 3 | 23,547 | 1946,1 | 0,351 |
| 13 | 1 | 26,207 | 1985,8 | 0,332 |
| | 2 | 24,855 | 1942,4 | 0,325 |
| | 3 | 23,198 | 1937,4 | 0,341 |
| 14 | 1 | 25,642 | 1979,1 | 0,324 |
| | 2 | 24,484 | 1939,9 | 0,322 |
| | 3 | 22,587 | 1934,2 | 0,338 |
| 15 | 1 | 24,917 | 1969,2 | 0,313 |
| | 2 | 23,124 | 1921,4 | 0,301 |
| | 3 | 22,747 | 1924,6 | 0,326 |

Quadro 6 – Cont.

| Leituras | Sondas | Média Ka | Massa (g) | Teor de água volumétrico (m ³ m ⁻³) |
|----------|--------|----------|-----------|--|
| 16 | 1 | 22,897 | 1946,4 | 0,287 |
| | 2 | 22,260 | 1914,7 | 0,293 |
| | 3 | 21,329 | 1902,0 | 0,300 |
| 17 | 1 | 22,056 | 1938,0 | 0,277 |
| | 2 | 21,007 | 1901,3 | 0,278 |
| | 3 | 20,816 | 1896,0 | 0,293 |
| 18 | 1 | 21,900 | 1934,9 | 0,274 |
| | 2 | 20,566 | 1895,6 | 0,272 |
| | 3 | 20,299 | 1885,8 | 0,281 |
| 19 | 1 | 20,296 | 1921,5 | 0,259 |
| | 2 | 19,733 | 1887,3 | 0,262 |
| | 3 | 19,245 | 1877,5 | 0,271 |
| 20 | 1 | 20,036 | 1916,3 | 0,253 |
| | 2 | 18,967 | 1878,6 | 0,252 |
| | 3 | 18,611 | 1869,6 | 0,262 |
| 21 | 1 | 18,850 | 1912,1 | 0,248 |
| | 2 | 18,299 | 1870,6 | 0,243 |
| | 3 | 16,973 | 1858,5 | 0,249 |
| 22 | 1 | 18,194 | 1904,7 | 0,239 |
| | 2 | 17,733 | 1864,9 | 0,237 |
| | 3 | 16,601 | 1855,3 | 0,246 |
| 23 | 1 | 17,638 | 1899,5 | 0,234 |
| | 2 | 16,913 | 1858,7 | 0,230 |
| | 3 | 15,696 | 1843,5 | 0,232 |
| 24 | 1 | 17,331 | 1895,1 | 0,229 |
| | 2 | 16,757 | 1856,5 | 0,227 |
| | 3 | 15,190 | 1838,9 | 0,226 |
| 25 | 1 | 16,879 | 1888,6 | 0,221 |
| | 2 | 15,074 | 1837,5 | 0,205 |
| | 3 | 13,643 | 1819,7 | 0,204 |
| 26 | 1 | 14,925 | 1869,1 | 0,199 |
| | 2 | 13,688 | 1819,0 | 0,184 |
| | 3 | 13,085 | 1813,2 | 0,196 |
| 27 | 1 | 14,344 | 1861,7 | 0,191 |
| | 2 | 12,606 | 1807,6 | 0,171 |
| | 3 | 10,734 | 1779,5 | 0,157 |
| 28 | 1 | 13,052 | 1846,3 | 0,173 |
| | 2 | 11,506 | 1792,4 | 0,154 |
| | 3 | 10,027 | 1771,5 | 0,148 |
| 29 | 1 | 12,795 | 1843,6 | 0,170 |
| | 2 | 11,026 | 1788,7 | 0,150 |
| | 3 | 9,741 | 1765,7 | 0,141 |
| 30 | 1 | 11,569 | 1829,5 | 0,154 |
| | 2 | 9,739 | 1770,1 | 0,129 |
| | 3 | 8,826 | 1754,1 | 0,127 |

Quadro 6 – Cont.

| Leituras | Sondas | Média Ka | Massa (g) | Teor de água volumétrico (m ³ m ⁻³) |
|----------|--------|----------|-----------|---|
| 31 | 1 | 10,851 | 1819,2 | 0,142 |
| | 2 | 9,027 | 1758,3 | 0,115 |
| | 3 | 8,217 | 1742,4 | 0,114 |
| 32 | 1 | 9,555 | 1800,1 | 0,121 |
| | 2 | 8,641 | 1752,0 | 0,108 |
| | 3 | 7,605 | 1730,7 | 0,100 |
| 33 | 1 | 9,118 | 1792,0 | 0,111 |
| | 2 | 7,934 | 1739,7 | 0,094 |
| | 3 | 7,329 | 1724,1 | 0,093 |
| 34 | 1 | 8,199 | 1774,3 | 0,091 |
| | 2 | 7,461 | 1731,4 | 0,085 |
| | 3 | 6,809 | 1713,6 | 0,080 |
| 35 | 1 | 7,442 | 1765,2 | 0,081 |
| | 2 | 6,930 | 1713,1 | 0,064 |
| | 3 | 6,371 | 1703,0 | 0,068 |
| 36 | 1 | 7,143 | 1754,9 | 0,069 |
| | 2 | 6,615 | 1707,8 | 0,058 |
| | 3 | 6,182 | 1695,5 | 0,059 |
| 37 | 1 | 7,116 | 1750,9 | 0,065 |
| | 2 | 6,600 | 1704,0 | 0,054 |
| | 3 | 6,111 | 1691,7 | 0,055 |
| 38 | 1 | 6,659 | 1740,7 | 0,053 |
| | 2 | 6,469 | 1696,7 | 0,045 |
| | 3 | 5,926 | 1682,3 | 0,044 |
| 39 | 1 | 6,553 | 1736,1 | 0,048 |
| | 2 | 6,317 | 1692,0 | 0,040 |
| | 3 | 5,763 | 1678,8 | 0,040 |
| 40 | 1 | 6,424 | 1728,1 | 0,039 |
| | 2 | 6,245 | 1687,1 | 0,034 |
| | 3 | 5,546 | 1671,8 | 0,032 |
| 41 | 1 | 6,267 | 1723,2 | 0,033 |
| | 2 | 6,033 | 1679,5 | 0,026 |
| | 3 | 5,368 | 1666,1 | 0,025 |
| 42 | 1 | 5,997 | 1713,1 | 0,022 |
| | 2 | 5,801 | 1674,1 | 0,020 |
| | 3 | 5,134 | 1658,5 | 0,016 |
| 43 | 1 | 5,760 | 1708,0 | 0,016 |
| | 2 | 5,505 | 1665,4 | 0,010 |
| | 3 | 5,240 | 1654,3 | 0,011 |
| 44 | 1 | 5,647 | 1701,1 | 0,008 |
| | 2 | 5,496 | 1665,1 | 0,009 |
| | 3 | 4,919 | 1650,2 | 0,006 |
| 45 | 1 | 5,572 | 1698,7 | 0,005 |
| | 2 | 5,372 | 1662,4 | 0,006 |
| | 3 | 4,872 | 1649,8 | 0,006 |

Quadro 7 – Dados utilizados na calibração das sondas de TDR para o PV

| Leituras | Sondas | Média Ka | Massa (g) | Teor de água volumétrico (m ³ m ⁻³) |
|----------|--------|----------|-----------|--|
| 1 | 1 | 41,722 | 1994,6 | 0,556 |
| | 2 | 43,716 | 2002,0 | 0,572 |
| | 3 | 41,446 | 2025,0 | 0,567 |
| 2 | 1 | 37,257 | 1977,9 | 0,537 |
| | 2 | 42,817 | 1986,2 | 0,554 |
| | 3 | 38,545 | 2002,4 | 0,541 |
| 3 | 1 | 39,008 | 1974,6 | 0,533 |
| | 2 | 41,923 | 1984,0 | 0,551 |
| | 3 | 40,624 | 1999,4 | 0,538 |
| 4 | 1 | 38,962 | 1971,8 | 0,530 |
| | 2 | 41,649 | 1981,2 | 0,548 |
| | 3 | 38,802 | 1995,3 | 0,533 |
| 5 | 1 | 38,563 | 1968,6 | 0,527 |
| | 2 | 40,885 | 1979,3 | 0,546 |
| | 3 | 37,895 | 1992,0 | 0,530 |
| 6 | 1 | 37,640 | 1967,0 | 0,525 |
| | 2 | 41,091 | 1978,1 | 0,545 |
| | 3 | 37,868 | 1990,7 | 0,528 |
| 7 | 1 | 37,099 | 1962,2 | 0,519 |
| | 2 | 40,976 | 1972,7 | 0,539 |
| | 3 | 36,793 | 1982,3 | 0,519 |
| 8 | 1 | 37,011 | 1959,4 | 0,516 |
| | 2 | 40,181 | 1970,4 | 0,536 |
| | 3 | 37,217 | 1980,4 | 0,516 |
| 9 | 1 | 36,228 | 1957,2 | 0,514 |
| | 2 | 39,645 | 1968,5 | 0,534 |
| | 3 | 36,759 | 1979,0 | 0,515 |
| 10 | 1 | 34,653 | 1945,0 | 0,500 |
| | 2 | 38,868 | 1960,0 | 0,524 |
| | 3 | 36,021 | 1972,1 | 0,507 |
| 11 | 1 | 34,921 | 1939,5 | 0,493 |
| | 2 | 40,263 | 1956,3 | 0,520 |
| | 3 | 36,368 | 1968,9 | 0,503 |
| 12 | 1 | 33,521 | 1929,7 | 0,482 |
| | 2 | 38,551 | 1948,3 | 0,511 |
| | 3 | 35,221 | 1961,9 | 0,495 |
| 13 | 1 | 33,801 | 1926,2 | 0,478 |
| | 2 | 38,090 | 1944,1 | 0,506 |
| | 3 | 34,684 | 1956,4 | 0,489 |

Quadro 7 – Cont.

| Leituras | Sondas | Média Ka | Massa (g) | Teor de água volumétrico (m ³ m ⁻³) |
|----------|--------|----------|-----------|--|
| 14 | 1 | 32,351 | 1917,0 | 0,468 |
| | 2 | 37,169 | 1938,2 | 0,499 |
| | 3 | 34,038 | 1949,9 | 0,482 |
| 15 | 1 | 32,352 | 1913,3 | 0,464 |
| | 2 | 36,672 | 1930,8 | 0,491 |
| | 3 | 32,844 | 1938,8 | 0,469 |
| 16 | 1 | 32,190 | 1910,1 | 0,460 |
| | 2 | 36,315 | 1924,7 | 0,484 |
| | 3 | 32,259 | 1924,4 | 0,453 |
| 17 | 1 | 30,766 | 1893,0 | 0,441 |
| | 2 | 35,332 | 1919,9 | 0,479 |
| | 3 | 31,561 | 1913,5 | 0,440 |
| 18 | 1 | 30,230 | 1887,5 | 0,434 |
| | 2 | 33,157 | 1905,0 | 0,462 |
| | 3 | 28,026 | 1889,3 | 0,413 |
| 19 | 1 | 28,999 | 1880,6 | 0,426 |
| | 2 | 30,190 | 1885,0 | 0,439 |
| | 3 | 27,739 | 1883,5 | 0,406 |
| 20 | 1 | 28,513 | 1877,1 | 0,423 |
| | 2 | 30,370 | 1881,8 | 0,435 |
| | 3 | 26,391 | 1879,3 | 0,401 |
| 21 | 1 | 27,553 | 1869,9 | 0,414 |
| | 2 | 30,419 | 1877,4 | 0,430 |
| | 3 | 26,335 | 1867,3 | 0,388 |
| 22 | 1 | 27,037 | 1867,4 | 0,411 |
| | 2 | 29,831 | 1874,9 | 0,427 |
| | 3 | 24,058 | 1862,5 | 0,382 |
| 23 | 1 | 25,705 | 1855,8 | 0,398 |
| | 2 | 29,446 | 1869,6 | 0,421 |
| | 3 | 21,786 | 1843,0 | 0,360 |
| 24 | 1 | 25,251 | 1848,5 | 0,390 |
| | 2 | 26,347 | 1847,6 | 0,396 |
| | 3 | 20,698 | 1830,4 | 0,346 |
| 25 | 1 | 23,180 | 1836,6 | 0,376 |
| | 2 | 25,181 | 1843,1 | 0,391 |
| | 3 | 20,361 | 1826,1 | 0,341 |
| 26 | 1 | 23,330 | 1831,5 | 0,371 |
| | 2 | 24,839 | 1837,1 | 0,384 |
| | 3 | 20,227 | 1823,9 | 0,338 |

Quadro 7 – Cont.

| Leituras | Sondas | Média Ka | Massa (g) | Teor de água volumétrico (m ³ m ⁻³) |
|----------|--------|----------|-----------|---|
| 27 | 1 | 22,367 | 1827,2 | 0,366 |
| | 2 | 23,687 | 1831,8 | 0,378 |
| | 3 | 19,091 | 1813,0 | 0,326 |
| 28 | 1 | 21,844 | 1821,4 | 0,359 |
| | 2 | 23,324 | 1828,5 | 0,375 |
| | 3 | 18,852 | 1807,8 | 0,320 |
| 29 | 1 | 20,923 | 1816,9 | 0,354 |
| | 2 | 23,004 | 1823,7 | 0,369 |
| | 3 | 18,277 | 1801,8 | 0,313 |
| 30 | 1 | 20,929 | 1813,5 | 0,350 |
| | 2 | 23,135 | 1820,6 | 0,366 |
| | 3 | 18,029 | 1799,5 | 0,311 |
| 31 | 1 | 20,326 | 1809,2 | 0,345 |
| | 2 | 21,833 | 1815,7 | 0,360 |
| | 3 | 17,819 | 1789,3 | 0,299 |
| 32 | 1 | 19,990 | 1805,1 | 0,341 |
| | 2 | 21,657 | 1810,6 | 0,354 |
| | 3 | 17,694 | 1787,3 | 0,297 |
| 33 | 1 | 19,241 | 1796,6 | 0,331 |
| | 2 | 20,169 | 1802,7 | 0,345 |
| | 3 | 16,923 | 1775,4 | 0,283 |
| 34 | 1 | 18,902 | 1787,0 | 0,320 |
| | 2 | 19,442 | 1790,4 | 0,331 |
| | 3 | 16,439 | 1771,0 | 0,278 |
| 35 | 1 | 18,294 | 1781,6 | 0,314 |
| | 2 | 18,898 | 1784,8 | 0,325 |
| | 3 | 15,562 | 1762,1 | 0,268 |
| 36 | 1 | 17,628 | 1770,1 | 0,301 |
| | 2 | 18,387 | 1774,4 | 0,313 |
| | 3 | 15,640 | 1759,6 | 0,265 |
| 37 | 1 | 17,466 | 1767,8 | 0,298 |
| | 2 | 18,407 | 1773,0 | 0,312 |
| | 3 | 15,421 | 1754,2 | 0,259 |
| 38 | 1 | 15,943 | 1749,6 | 0,278 |
| | 2 | 17,704 | 1761,7 | 0,299 |
| | 3 | 15,057 | 1750,2 | 0,255 |
| 39 | 1 | 15,752 | 1743,0 | 0,270 |
| | 2 | 17,381 | 1756,1 | 0,292 |
| | 3 | 14,397 | 1736,5 | 0,239 |

Quadro 7 – Cont.

| Leituras | Sondas | Média Ka | Massa (g) | Teor de água volumétrico (m ³ m ⁻³) |
|----------|--------|----------|-----------|---|
| 40 | 1 | 14,675 | 1726,0 | 0,251 |
| | 2 | 15,901 | 1735,8 | 0,269 |
| | 3 | 14,574 | 1731,8 | 0,234 |
| 41 | 1 | 14,436 | 1720,8 | 0,245 |
| | 2 | 15,499 | 1729,1 | 0,262 |
| | 3 | 14,079 | 1719,4 | 0,220 |
| 42 | 1 | 13,991 | 1702,8 | 0,224 |
| | 2 | 14,869 | 1718,1 | 0,249 |
| | 3 | 13,877 | 1715,3 | 0,215 |
| 43 | 1 | 13,384 | 1693,1 | 0,213 |
| | 2 | 14,069 | 1705,1 | 0,234 |
| | 3 | 12,755 | 1689,7 | 0,186 |
| 44 | 1 | 13,046 | 1684,0 | 0,203 |
| | 2 | 13,686 | 1689,2 | 0,216 |
| | 3 | 12,586 | 1685,7 | 0,181 |
| 45 | 1 | 12,893 | 1678,0 | 0,196 |
| | 2 | 13,409 | 1684,1 | 0,210 |
| | 3 | 12,189 | 1674,9 | 0,169 |
| 46 | 1 | 12,491 | 1668,1 | 0,185 |
| | 2 | 13,088 | 1668,0 | 0,192 |
| | 3 | 11,912 | 1669,6 | 0,163 |
| 47 | 1 | 12,141 | 1656,1 | 0,171 |
| | 2 | 12,823 | 1658,2 | 0,181 |
| | 3 | 11,637 | 1657,3 | 0,149 |
| 48 | 1 | 11,874 | 1647,9 | 0,162 |
| | 2 | 12,228 | 1644,3 | 0,165 |
| | 3 | 11,532 | 1652,1 | 0,143 |
| 49 | 1 | 11,481 | 1633,7 | 0,146 |
| | 2 | 11,814 | 1634,4 | 0,154 |
| | 3 | 10,882 | 1636,5 | 0,125 |
| 50 | 1 | 10,730 | 1624,9 | 0,136 |
| | 2 | 11,339 | 1620,9 | 0,139 |
| | 3 | 10,349 | 1630,7 | 0,119 |
| 51 | 1 | 10,477 | 1611,6 | 0,121 |
| | 2 | 10,693 | 1606,2 | 0,122 |
| | 3 | 9,945 | 1615,7 | 0,102 |
| 52 | 1 | 9,971 | 1599,8 | 0,107 |
| | 2 | 10,007 | 1582,1 | 0,094 |
| | 3 | 9,160 | 1603,8 | 0,088 |
| 53 | 1 | 9,163 | 1578,4 | 0,083 |
| | 2 | 9,327 | 1572,6 | 0,084 |
| | 3 | 8,797 | 1590,3 | 0,073 |

ANEXO 2

Quadro 8 – Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) relativos ao primeiro teste do LVA

| Tempo (min) | Infiltração acumulada (mm) | Taxa de infiltração (mm h⁻¹) |
|------------------------|---------------------------------------|--|
| 1 | 8,1 | 486,1 |
| 2 | 16,2 | 486,1 |
| 3 | 21,0 | 288,3 |
| 8 | 36,2 | 182,7 |
| 14 | 51,9 | 156,4 |
| 20 | 66,4 | 145,4 |
| 26 | 80,9 | 145,4 |
| 32 | 95,5 | 145,4 |
| 38 | 110,0 | 145,4 |
| 44 | 126,8 | 167,4 |
| 50 | 138,0 | 112,4 |
| 56 | 152,5 | 145,4 |
| 60 | 159,7 | 106,9 |
| 64 | 170,1 | 156,4 |

Quadro 9 – Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) relativos ao segundo teste do LVA

| Tempo (min) | Infiltração acumulada (mm) | Taxa de infiltração (mm h⁻¹) |
|------------------------|---------------------------------------|--|
| 1 | 7,4 | 441,9 |
| 2 | 12,5 | 310,0 |
| 3 | 15,5 | 178,1 |
| 5 | 20,3 | 145,1 |
| 11 | 30,5 | 101,2 |
| 17 | 40,6 | 101,2 |
| 23 | 48,5 | 79,2 |
| 29 | 56,4 | 79,2 |
| 35 | 66,5 | 101,2 |
| 41 | 73,4 | 68,2 |
| 47 | 83,5 | 101,2 |
| 53 | 93,6 | 101,2 |
| 59 | 101,5 | 79,2 |
| 65 | 108,3 | 68,2 |
| 71 | 116,3 | 79,2 |
| 77 | 123,1 | 68,2 |
| 83 | 131,0 | 79,2 |
| 89 | 141,1 | 101,2 |
| 95 | 144,6 | 35,2 |
| 99 | 148,8 | 62,7 |
| 101 | 151,5 | 79,2 |

Quadro 10 – Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) relativos ao terceiro teste do LVA

| Tempo (min) | Infiltração acumulada (mm) | Taxa de infiltração (mm h⁻¹) |
|------------------------|---------------------------------------|--|
| 1 | 6,6 | 397,7 |
| 2 | 13,3 | 397,7 |
| 3 | 18,8 | 331,8 |
| 5 | 26,5 | 232,9 |
| 7 | 32,1 | 166,9 |
| 9 | 36,6 | 133,9 |
| 13 | 42,2 | 84,5 |
| 17 | 47,8 | 84,5 |
| 21 | 55,7 | 117,4 |
| 25 | 61,3 | 84,5 |
| 29 | 65,8 | 68,0 |
| 33 | 74,8 | 133,9 |
| 37 | 81,5 | 101,0 |
| 41 | 87,1 | 84,5 |
| 45 | 97,2 | 150,4 |
| 49 | 103,9 | 101,0 |
| 53 | 111,7 | 117,4 |
| 57 | 119,5 | 117,4 |
| 61 | 124,1 | 68,0 |
| 65 | 131,9 | 117,4 |
| 69 | 138,6 | 101,0 |
| 73 | 147,6 | 133,9 |
| 77 | 155,4 | 117,4 |
| 82 | 163,3 | 94,4 |

Quadro 11 – Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) relativos ao primeiro teste do LV

| Tempo (min) | Infiltração acumulada (mm) | Taxa de infiltração (mm h⁻¹) |
|------------------------|---------------------------------------|--|
| 1 | 9,6 | 574,5 |
| 2 | 18,5 | 537,2 |
| 3 | 26,2 | 462,8 |
| 5 | 37,9 | 351,1 |
| 7 | 48,4 | 313,8 |
| 9 | 57,6 | 276,6 |
| 11 | 67,5 | 295,2 |
| 13 | 76,7 | 276,6 |
| 15 | 85,3 | 258,0 |
| 17 | 93,3 | 239,3 |
| 19 | 102,5 | 276,6 |
| 21 | 110,5 | 239,3 |
| 23 | 119,1 | 258,0 |
| 25 | 127,7 | 258,0 |
| 27 | 136,3 | 258,0 |
| 29 | 144,9 | 258,0 |
| 31 | 152,8 | 239,3 |
| 33 | 161,4 | 258,0 |

Quadro 12 – Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) relativos ao segundo teste do LV

| Tempo (min) | Infiltração acumulada (mm) | Taxa de infiltração (mm h⁻¹) |
|------------------------|---------------------------------------|--|
| 1 | 9,3 | 557,9 |
| 2 | 18,6 | 557,9 |
| 3 | 26,0 | 446,2 |
| 5 | 37,2 | 334,5 |
| 7 | 46,5 | 278,6 |
| 9 | 56,4 | 297,3 |
| 11 | 66,3 | 297,3 |
| 13 | 74,3 | 241,4 |
| 15 | 83,0 | 260,0 |
| 17 | 91,7 | 260,0 |
| 19 | 99,7 | 241,4 |
| 21 | 106,5 | 204,2 |
| 23 | 115,2 | 260,0 |
| 25 | 122,6 | 222,8 |
| 27 | 130,0 | 222,8 |
| 29 | 138,7 | 260,0 |
| 31 | 145,5 | 204,2 |
| 33 | 152,9 | 222,8 |
| 35 | 160,4 | 222,8 |

Quadro 13 – Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) relativos ao primeiro teste do LV

| Tempo (min) | Infiltração acumulada (mm) | Taxa de infiltração (mm h⁻¹) |
|------------------------|---------------------------------------|--|
| 1 | 3,5 | 210,8 |
| 2 | 7,0 | 210,8 |
| 3 | 10,5 | 210,8 |
| 4 | 14,1 | 210,8 |
| 5 | 17,6 | 210,8 |
| 6 | 21,1 | 210,8 |
| 7 | 24,6 | 210,8 |
| 8 | 28,1 | 210,8 |
| 10 | 32,9 | 144,8 |
| 14 | 40,4 | 111,9 |
| 18 | 47,8 | 111,9 |
| 22 | 54,2 | 95,4 |
| 26 | 63,9 | 144,8 |
| 30 | 71,3 | 111,9 |
| 34 | 78,8 | 111,9 |
| 38 | 84,0 | 78,9 |
| 42 | 87,1 | 45,9 |
| 46 | 92,4 | 78,9 |
| 50 | 97,6 | 78,9 |
| 54 | 102,9 | 78,9 |
| 58 | 108,1 | 78,9 |
| 61 | 112,1 | 78,9 |

Quadro 14 – Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) relativos ao segundo teste do PV

| Tempo (min) | Infiltração acumulada (mm) | Taxa de infiltração (mm h⁻¹) |
|------------------------|---------------------------------------|--|
| 1 | 3,7 | 224,7 |
| 2 | 7,5 | 224,7 |
| 3 | 11,2 | 224,7 |
| 4 | 15,0 | 224,7 |
| 5 | 18,7 | 224,7 |
| 6 | 22,5 | 224,7 |
| 7 | 26,2 | 224,7 |
| 8 | 30,0 | 224,7 |
| 10 | 35,3 | 158,8 |
| 14 | 45,8 | 158,8 |
| 18 | 55,3 | 142,3 |
| 22 | 65,9 | 158,8 |
| 26 | 74,3 | 125,8 |
| 30 | 82,7 | 125,8 |
| 34 | 92,2 | 142,3 |
| 38 | 101,7 | 142,3 |
| 46 | 118,4 | 125,8 |

Quadro 15 – Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) relativos ao terceiro teste do PV

| Tempo (min) | Infiltração acumulada (mm) | Taxa de infiltração (mm h⁻¹) |
|------------------------|---------------------------------------|--|
| 1 | 4,6 | 274,4 |
| 2 | 9,1 | 274,4 |
| 3 | 13,7 | 274,4 |
| 4 | 18,3 | 274,4 |
| 5 | 22,9 | 274,4 |
| 6 | 27,4 | 274,4 |
| 7 | 32,0 | 274,4 |
| 8 | 36,6 | 274,4 |
| 10 | 43,5 | 208,5 |
| 12 | 50,5 | 208,5 |
| 16 | 65,5 | 225,0 |
| 20 | 78,3 | 192,0 |
| 24 | 92,2 | 208,5 |
| 27 | 101,5 | 186,5 |

ANEXO 3

Quadro 16 - Análise de variância da regressão do potencial matricial na frente de umedecimento em função da porosidade total, condutividade hidráulica do solo saturado e porcentagem de silte

| Fontes de Variação | GL | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F |
|---------------------------|-----------|--------------------------|-----------------------|----------|
| Devido a Regressão | 3 | 589896.3 | 196632.1 | 79.94 |
| Resíduo | 4 | 9839.079 | 2459.770 | |

Quadro 17 - Análise de variância da regressão do potencial matricial na frente de umedecimento em função da condutividade hidráulica do solo saturado e porcentagem de silte

| Fontes de Variação | GL | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F |
|---------------------------|-----------|--------------------------|-----------------------|----------|
| Devido a Regressão | 2 | 571032.8 | 285516.4 | 49.74 |
| Resíduo | 5 | 28702.59 | 5740.518 | |

Quadro 18 - Análise de variância da regressão do potencial matricial na frente de umedecimento em função da condutividade hidráulica do solo saturado e macroporosidade

| Fontes de Variação | GL | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F |
|---------------------------|-----------|--------------------------|-----------------------|----------|
| Devido a Regressão | 2 | 551122.6 | 275561.3 | 28.34 |
| Resíduo | 5 | 48612.76 | 9722.551 | |

Quadro 19 - Análise de variância da regressão do potencial matricial na frente de umedecimento em função da condutividade hidráulica do solo saturado e porcentagem de areia

| Fontes de Variação | GL | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F |
|---------------------------|-----------|--------------------------|-----------------------|----------|
| Devido a Regressão | 2 | 548866.3 | 274433.1 | 26.97 |
| Resíduo | 5 | 50869.13 | 10173.83 | |