

**EMPREGO DE TOMÓGRAFO PORTÁTIL DE RAIOS GAMA PARA AVALIAÇÃO DO
AVANÇO DA FRENTE DE MOLHAMENTO**

P. F. Sousa^{1,*}, J. M. Naime², S. Crestana², A. L. B. Cavalcante¹

¹ *Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasília, Distrito Federal*

² *Embrapa Instrumentação, Rua XV de Novembro, 1452, 13560-970, São Carlos, São Paulo*

* *Autor correspondente, e-mail: patriciafiguereidodesousa@gmail.com*

Resumo: A modelagem do comportamento hidráulico de meios porosos não saturados por meio do emprego de soluções analíticas e/ou numéricas da equação de fluxo tem por intuito estimar o movimento de água durante a infiltração imposto por um dado gradiente hidráulico. Neste trabalho tal análise será feita com base na retroanálise de dados presentes na literatura para a variação temporal de teor de umidade volumétrica durante a realização de ensaio de infiltração em coluna de Latossolo Vermelho Distroférico monitorado por tomógrafo de raios gama. A metodologia utilizada nesta pesquisa baseia-se no emprego de uma solução analítica da Equação de Richards para o caso de fluxo vertical em amostra de solo não saturada. Os resultados obtidos mostraram o potencial da solução empregada em estimar o perfil de umidade volumétrica ao longo da coluna ensaiada.

Palavras-chave: Solução Analítica da Equação de Richards, Solos Não Saturados, Tomografia, Infiltração.

USE OF PORTABLE GAMMA-RAY TOMOGRAPHY FOR WETTING FRONT FEED RATE ASSESSMENT

Abstract: The modeling of the hydraulic behavior of unsaturated porous media by the use of analytical and/or numerical solutions of the flow equation aims to estimate the water movement during the infiltration imposed by a given hydraulic gradient. In this work such analysis will be made based on the back-analysis of data present in the literature for the temporal variation of volumetric moisture content during the performance of infiltration test on a Dystrophic Red Latosol monitored by gamma-ray tomography. The methodology used in this research is based on the use of an analytical solution of the Richards equation for the case of vertical flow in unsaturated soil sample. The results showed the potential of the solution employed to estimate the volumetric moisture profile along the rehearsed column.

Keywords: Analytical Solution Richards Equation, Unsaturated Soils, Tomography, Infiltration.

1. Introdução

O entendimento do movimento de água e solutos na zona não saturada do solo é de grande interesse para as diversas áreas relativas à Ciência do Solo, como Agricultura, Hidrologia e Geotecnia. Conhecer o solo na condição não saturada significa, entre outras coisas, compreender como a presença de água afeta, de forma transiente, as propriedades físicas e hidráulicas do meio.

Dentre as propriedades hidráulicas que se destacam para a compreensão do fluxo de água no solo, pode-se listar: a capacidade de armazenamento de água no solo definida pela função de retenção e a variação da condutividade hidráulica não saturada do meio como as mais importantes.

Geralmente, tais propriedades são aferidas por métodos experimentais que medem o teor de umidade volumétrica e/ou a sucção do solo. Dos diversos procedimentos existentes para medida do teor de umidade volumétrica, ressalta-se a técnica de atenuação de raios gama por não perturbar a estrutura da amostra e por permitir a seleção da seção ou volume do corpo-de-prova a ser estudado, de forma precisa e em poucos minutos (NAIME et al., 2002).

Dentro desta temática, neste trabalho será apresentado uma metodologia para avaliação da função de teor de umidade volumétrico variando no tempo e espaço por meio da retroanálise de dados de ensaio de infiltração em uma coluna de latossolo desestruturado.

2. Materiais e Métodos

Os dados a serem utilizados nas análises apresentadas neste documento, diz respeito a medidas da variação do teor de umidade volumétrico ao longo do processo de infiltração, obtidas por tomografias do solo durante a imposição do movimento de água. Esses dados são oriundos de ensaios realizados em tomógrafo portátil de raios gama com fonte radioativa de Amerício-241 e sistema de varredura de 3ª geração. O referido equipamento (Figura 1) foi construído, calibrado e validado por Naime et al. (2001).

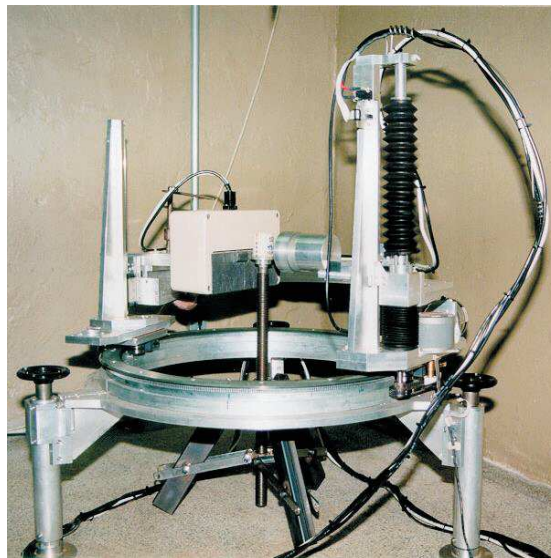


Figura 6. Sistema mecânico de varredura do tomógrafo (Naime et al., 2001).

Em um dos testes realizados no tomógrafo desenvolvido pelo autor citado para avaliar a efetividade do equipamento para medir a umidade, o erro entre a umidade obtida por esse equipamento e pelo método gravimétrico foi de 0,82%, um valor considerado bom para aferição indireta dessa propriedade.

2.1. Solo estudado

A amostra de LVdf avaliada é oriunda da Microbacia de Ribeirão Canchim, Fazenda da Embrapa localizada no município de São Carlos, estado de São Paulo. Conforme apresentado por Naime (2001), a textura desse solo é composta de 45% de argila, 13% de silte e 42% de areia. Sendo que, a fração de argila desse solo é constituída de caulinita, mineral 1:1.

Antes da realização do ensaio de infiltração, Naime (2001) preparou o solo coletado, destorroando-o e secando-o em estufa durante 24 horas a 105 °C. Após essa etapa, o solo foi passado em uma peneira de 1 mm, sendo colocado em um tubo de PVC de 40 mm de diâmetro e 150 mm de altura. Mais detalhes sobre o tomógrafo e os procedimentos de ensaio de infiltração podem ser encontrados no texto da tese de Naime (2001).

No gráfico da Figura 2 são apresentados os valores dos teores de umidades volumétricos medidos ao longo do tempo de ensaio uma amostra de Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf), na qual, o acompanhamento do avanço da infiltração foi feito em uma única seção à 93,5 mm do topo da coluna de solo ensaiada. Para realização desses ensaios de infiltração foi imposta uma lâmina d'água constante de 5 mm no topo da amostra. O primeiro ponto do ensaio foi obtido 2 minutos após o início da infiltração. Neste gráfico, o intervalo de conclusão entre uma varredura tomográfica e a posterior é sempre de 4 minutos.

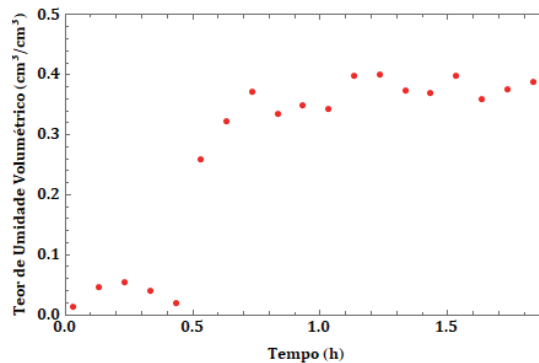


Figura 7. Perfil de umidade durante a infiltração de água a 93,5 mm do topo da amostra.

2.2. Descrição do modelo teórico

Para modelar o avanço da frente de molhagem durante a infiltração a partir dos dados experimentais apresentados na Figura 2, foi utilizado uma das soluções analíticas da Equação de Richards que foi proposta por Cavalcante e Zornberg (2017a) para o caso de fluxo de vertical não saturado em coluna de solo, cujo teor de umidade volumétrico se mantém constante no topo da amostra ao longo do tempo de ensaio. A solução apresentada pelos autores citados baseia-se em assumir que os valores de difusividade hidráulica e velocidade advectiva são constantes durante o movimento de água no solo. Isso permite obter uma função para o teor de umidade volumétrico variando no tempo e no espaço. Outros detalhes sobre a solução citada acima podem ser obtidos no trabalho de Cavalcante e Zornberg (2017a) e Cavalcante e Zornberg (2017b).

2.3. Realização do ajuste da curva de infiltração

A realização do ajuste da curva de variação temporal do teor de umidade volumétrico pela função apresentada no trabalho de Cavalcante e Zornberg (2017a) para caso 1 aos dados exibidos na Figura 2, foi feito com o auxílio do software *Wolfram Mathematica* utilizando o comando de ajuste *NonlinearFitModel*. Os dados de entrada do modelo foram: posição avaliada sendo igual a seção das leituras realizadas pelo tomógrafo, 0,0935 m, teor de umidade volumétrico aplicado no topo da coluna como sendo igual ao valor do teor de umidade saturado assumido por Naime (2001), 45% com o teor de umidade inicial da coluna assumindo o menor valor de teor de umidade volumétrico medido durante o ensaio, neste caso, para a amostra avaliada igual a 1,4%. A descrição completa dessas etapas pode ser obtida no trabalho de Sousa (2019).

3. Resultados e Discussão

Os dados apresentados no gráfico da Figura 2 foram ajustados a solução analítica da Equação de Richards apresentada por Cavalcante e Zornberg (2017) para uma coluna semi-infinita cujo teor de umidade volumétrico no topo é mantido constante durante o ensaio, conforme descrito nas subseções 2.2 e 2.3 desse trabalho. Os valores de difusividade hidráulica, velocidade advectiva, intervalo de confiança (IC), erro padrão e coeficiente de determinação (R^2) obtidos do ajuste são descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros obtidos no ajuste dos pontos de variação temporal do teor de umidade.

Parâmetro	Valor obtido	Erro Padrão	IC
Difusividade (m^2/h)	$11,5 \cdot 10^{-2}$	0,018	$7,7 \cdot 10^{-2}$ - $15,3 \cdot 10^{-2}$
Velocidade advectiva (m/h)	$1,6 \cdot 10^{-1}$	0,009	$1,4 \cdot 10^{-1}$ - $1,8 \cdot 10^{-1}$
R^2		0,98	

A curva ajustada aos dados experimentais expostos na Figura 2 é apresentada na Figura 3(a). Nota-se que a solução utilizada se ajustou muito bem aos dados experimentais. Na Figura 3(b) é

plotado o envelope de confiabilidade deste ajuste para um nível de confiança de 95%, junto com a linha média dos parâmetros obtidos diretamente do ajuste do modelo.

O uso do conceito de intervalo de estimativas prováveis vem se tornando cada vez mais comum na engenharia, para o estudo do movimento de água, tal conceito é muito pertinente porque permite traçar, para um nível de confiança desejado, uma zona de comportamento provável da função de teor de umidade volumétrico dependente do tempo, o que permite, mesmo com uma quantidade pequena de amostras, encontrar uma zona que melhor caracterize a população estudada, no caso, o LVdf da região em que amostra foi colhida.

A estimativa do avanço da frente de molhamento com base na função de teor de umidade volumétrico variável no tempo e no espaço obtida pela retroanálise dos dados do ensaio de infiltração para a amostra de LVdf é apresentada nas Figuras 3(c) e 3(d).

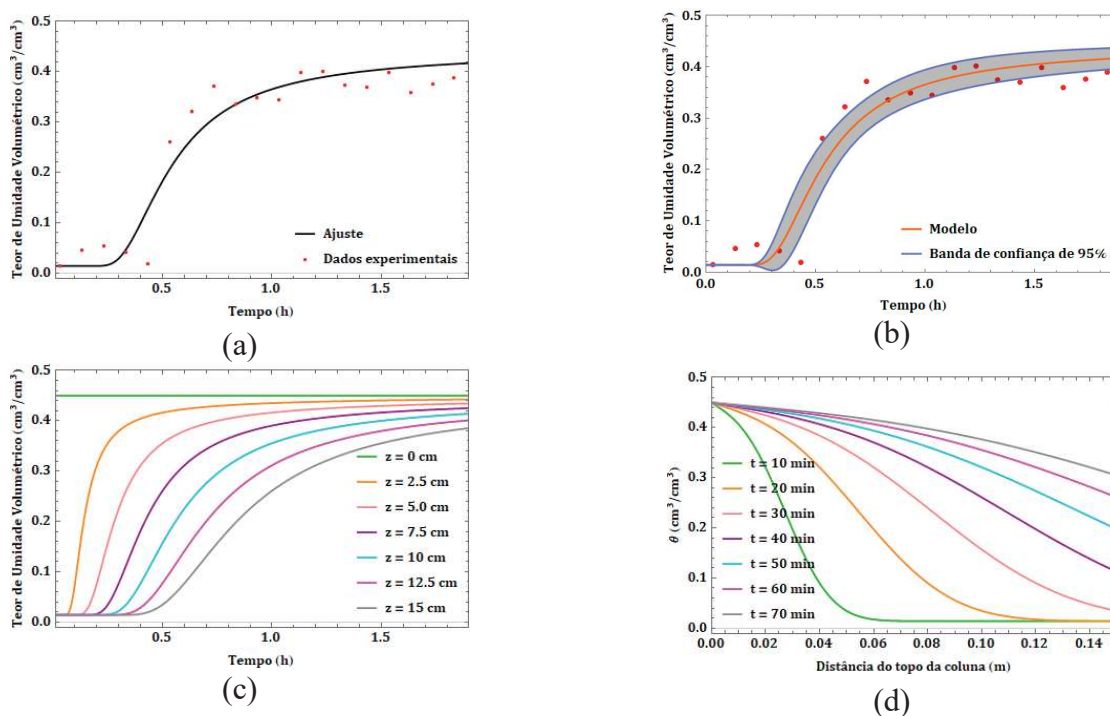


Figura 8. Resultados obtidos pela aplicação do modelo de Cavalcante & Zornberg (2017) aos dados da variação do teor de umidade ao longo do tempo em uma amostra de LVdf. Para: (a) Ajuste do modelo de variação do teor de umidade volumétrico de Cavalcante & Zornberg (2017a), (b) Banda de confiança de 95% para a função ajustada, (c) Perfil de umidade em instantes variados ao longo da coluna de solo e, (d) Estimativa da variação temporal do teor de umidade volumétrico em diferentes seções do corpo-de-prova.

Pela análise do gráfico apresentado na Figura 3(c), pode-se observar que há uma redução no gradiente de umidade com o incremento da profundidade, sendo máximo imediatamente abaixo do topo da coluna ensaiada. Para a amostra analisada, o teor de umidade da base da coluna de solo só começa a sofrer variação do seu valor inicial cerca de 30 minutos após o início do ensaio de infiltração. Neste modelo, o teor de umidade volumétrico se mantém constante no topo da coluna ao longo do ensaio, como também pode ser observado nesta figura através da observação da reta verde. Pela previsão da curva ajustada, ao final das medições do ensaio de infiltração (última leitura realizada), o teor de umidade volumétrico na base da amostra possivelmente é de 38,9%, não atingindo o valor de teor de umidade volumétrico saturado estabelecido para amostra por Naime (2001) – (45%) – o que indica, junto com a análise visual dos pontos do patamar superior da Figura (2), que possivelmente o valor da porosidade da amostra é inferior a este valor. No trabalho de Varandas (2011), o valor desta propriedade para amostras de LVdf de uma área de pastagem, estava entre 41,1 e 42,6%. Neste solo, a baixa capacidade de retenção de água observada pode ser

justificada pela presença do argilomineral caulinita no solo.

Pela análise da Figura 3(d), é possível notar que, ao longo do tempo de ensaio a linha da função de teor de umidade volumétrico vai ficando cada vez mais horizontal, ou seja, o teor de umidade volumétrico vai se tornando mais uniforme ao longo da coluna de solo durante o andamento do ensaio, tendendo para o valor do teor de umidade volumétrico imposto no topo da coluna ensaiada, conforme é esperado pela física do fenômeno estudado.

4. Conclusões

De forma geral, a modelagem do comportamento hidráulico de meios porosos não saturados por meio do emprego de soluções analíticas da equação de fluxo tem por intuito estimar propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas de forma simples e precisa com uma menor quantidade de ensaios possíveis, representando uma provável diminuição de custos e tempo nas campanhas de caracterização do meio. Os principais resultados obtidos a partir da aplicação do modelo analítico aos dados experimentais do ensaio de infiltração monitorado por tomografia, permitiram prever as curvas de avanço da frente de umidade, além de aferir a duas importantes propriedades hidráulicas, a velocidade advectiva e a difusividade hidráulica. Variáveis que estão relacionadas, dentre outras coisas, a permeabilidade do solo e a capacidade de retenção do meio, como mostrado por Cavalcante & Zornberg (2017a).

O desenvolvimento deste trabalho teve como intuito principal contribuir com a compreensão e a difusão da aplicabilidade desta importante solução matemática para os estudos relativos a problemas de fluxo na região não saturada do solo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF), a Embrapa Instrumentação e a Universidade de Brasília (UnB) pelo apoio dado durante a realização da pesquisa que subsidiou a produção deste trabalho.

Referências

- CAVALCANTE, A.L.B.; ZORNBERG, J.G. Efficient Approach to Solving Transient Unsaturated Flow Problems. I: Analytical Solutions. *International Journal of Geomechanics*, v. 17(7), p. 04017013. 2017a.
- CAVALCANTE, A.L.B.; ZORNBERG, J.G. Efficient Approach to Solving Transient Unsaturated Flow Problems. II: Numerical Solutions. *International Journal of Geomechanics*, v. 17(7), p. 04017014. 2017b.
- NAIME, J. M. Um novo método para estudos dinâmicos, in situ, da infiltração da água na região não saturada do solo. 2001. 145 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2001.
- NAIME, J. M. et al. Tomógrafo de Campo dedicado a estudos de parâmetros físicos da Infiltração da Água no Solo. *Comunicado Técnico – Embrapa*, 2001. v. 42, p. 7, 2001.
- NAIME, J. M. et al. Propriedades Hidráulicas do Solo determinadas através da atenuação de Raios Gama. *Comunicado Técnico – Embrapa*, 2002. v. 48, p. 5, 2002.
- SOUSA, P. F. Determinação das propriedades hidráulicas de solos não saturados a partir de ensaios de infiltração utilizando tomografias de raios gama. 2019. 82 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2019.
- VARANDAS, J. M. M. Avaliação da qualidade física do solo em uma escala de microbacia. 2011. X 88 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 2011.