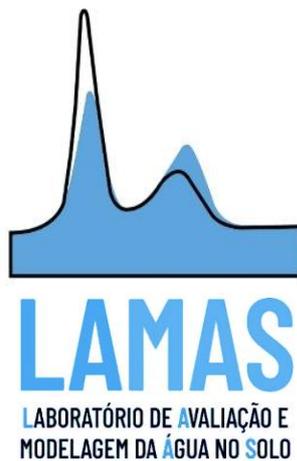


# SIMULAÇÃO DE FLUXOS DE ÁGUA E SOLUTOS NO SOLO



**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Simulação de fluxos de água e solutos no solo  
[livro eletrônico] / organização Wenceslau  
Geraldes Teixeira, Aline Mari Huf dos Reis,  
Alba Leonor da Silva Martins. -- 1. ed. --  
Rio de Janeiro : Ed. dos Autores, 2022.  
PDF.

Vários colaboradores.  
Bibliografia.  
ISBN 978-65-00-57503-3

1. Agricultura 2. Água - Aspectos ambientais  
3. Água - Qualidade 4. Hidrologia 5. Solos -  
Análise 6. Solos - Composição 7. Solos - Conservação  
8. Solos - Poluição I. Teixeira, Wenceslau Geraldes.  
II. Reis, Aline Mari Huf dos. III. Martins, Alba  
Leonor da Silva.

22-137001

CDD-577.6

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Água : Aspectos ambientais : Ecologia : Ciências  
da vida 577.6

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

Foto Capa: Ricardo Arcanjo de Lima



## SUMÁRIO

<b>Prefácio</b>	-
Dinâmica da umidade do solo em pastagens com diferentes níveis de ocorrência da periodontite bovina em Boca do Acre, Amazonas	1
Balanço hídrico em canavial na Amazônia Central: Presidente Figueiredo – AM	7
Taxa de recarga do aquífero em áreas de Latossolo Amarelo sem vegetação na Região Nordeste do Pará – Amazônia	13
Estimativa de recarga da água subterrânea na ilha de São Luís-MA: análise de uma série temporal de 27 anos	18
Caracterização e regime hídrico de uma área com vegetação florestal no Jardim Botânico do Rio de Janeiro	24
Balanço hídrico em áreas de pastagens do médio Vale do Rio Paraíba do Sul, Valença-RJ	30
Modelagem no HYDRUS, balanço Hídrico: Bacia do Bonfim, Petrópolis-RJ	35
Ajuste de equações de retenção de água em latossolos amarelos muito argilosos da Amazônia central	39
Ajuste de equações de retenção de água em solos do Sudoeste da Amazônia	44
Predição da resistência à penetração do solo em um sistema agroflorestal com dendê na Amazônia por meio do Hydrus-1D	51
Simulação da dinâmica de nitrato e potássio pelo modelo HYDRUS-1D em solos da região canavieira de Piracicaba	56

## **Prefácio**

A economia verde, a agricultura regenerativa e o reconhecimento da importância de preservar o solo e água tem sido debatida e gerado políticas públicas que demandam um contínuo avanço do conhecimento do comportamento da água no solo e a da quantificação dos componentes do balanço hídrico, em diferentes sistemas de uso da terra.

Os estudos que compõe esse volume são resultados do curso de Modelagem de Fluxos de Água e Solutos no Solo, oferecido como disciplina dos Programas de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PEAMB e DEAMB) da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) com a participação de discentes, professores e pesquisadores no tema de modelagem de fluxos hídricos (Universidade de Utrecht – Holanda, Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA, Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, Universidade Federal de Lavras – UFLA, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ), assim como a participação de discentes de outras Universidades (Unesp – Jaboticabal; Esalq – USP, UFRJ e UFRRJ).

Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Rien van Genuchten pela participação efetiva ministrando palestras durante o curso, bem como participando na avaliação dos trabalhos do Workshop de Fluxos de Água e Solutos no Solo realizado em 07 de dezembro de 2021, quando os trabalhos que compõe este volume foram apresentados e discutidos.

Gostaríamos de agradecer aos revisores dos trabalhos pelo tempo e contribuições disponibilizados para o aprimoramento dos textos.

O uso da modelagem como ferramenta de entendimento de processos relacionados aos fluxos de água e íons na natureza é uma linha de pesquisa que já tomou caminhos próprios com oficinas, simpósios, congressos específicos sobre o tema, conta também com revistas específicas sobre esta temática de pesquisa.

Esperamos com este volume incentivar e inspirar que outros estudos na quantificação dos componentes do balanço hídrico e dos processos de fluxos de água e íons na zona vadosa dos solos se ampliem no Brasil.

Os Editores

Wenceslau Geraldes Teixeira

Aline Mari Huf dos Reis

Alba Leonor da Silva Martins

## Dinâmica da umidade do solo em pastagens com diferentes níveis de ocorrência da periodontite bovina em Boca do Acre, Amazonas

Soil water dynamics in pastures with different levels of occurrence of bovine periodontitis in Boca do Acre, Amazonas

**Fernando Igne Rocha<sup>(1)</sup>; Ederson C. Jesus<sup>(2)</sup>; Alexandre Ortega Gonçalves<sup>(3)</sup>; Aline P. de Oliveira<sup>(3)</sup>; Wenceslau Gerales Teixeira<sup>(3)</sup>**

(1) Doutorando em Agronomia – Ciência do Solo / UFRRJ, Seropédica, RJ, [fernando.igne@hotmail.com](mailto:fernando.igne@hotmail.com) (apresentador do trabalho); (2) Pesquisador Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ; (3) Pesquisador Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ.

**RESUMO:** O aumento da pressão antrópica sobre os ecossistemas naturais para uso e exploração tem trazido mudanças drásticas na dinâmica natural de sazonalidade hídrica, bem como uma menor taxa efetiva de evapotranspiração, o que modifica os parâmetros de conteúdo de água no solo. O uso de modelos de fluxos hídricos pode ser uma ferramenta valiosa para monitorar o impacto do uso antropogênico do solo. Essas ferramentas também podem ser aliadas na investigação de fatores desencadeantes de problemas de saúde que possam estar relacionados ao teor de umidade do solo. Nesta linha, desde a década de 60 observações de campo por patologistas animais sugerem que a periodontite bovina - uma doença multifatorial e polimicrobiana com uma etiologia ainda não totalmente descrita - ganha maior ocorrência após as estações úmidas, com eventos temporários de saturação do solo. Este estudo visou explorar o uso do software HYDRUS-1D para simular os fluxos de água no solo em pastos recentes ( $\leq 7$  anos) e antigos ( $\geq 20$  anos) de fazendas na região de Boca do Acre, Amazônia Ocidental, sendo uma de alta e outra de baixa incidência da enfermidade (HSL e LSL, respectivamente). Em geral, as pastagens do sistema LSL são mais heterogêneas umas às outras em relação aos valores médios anuais de retenção de água do que aquelas encontradas entre as pastagens do sistema HSL, o que pode estar associado a um menor período de exposição dos bovinos a condições de distúrbio pela microbiota, reduzindo a chance de infecções.

**Palavras-chave:** Clima do solo, HYDRUS-1D, Enfermidade em bovinos.

**ABSTRACT:** Increasing human pressure on natural ecosystems for use and exploitation has brought drastic changes in the natural dynamics of water seasonality, as well as a lower evapotranspiration, which modifies the parameters of water content in the soil. The use of water flow models can be a valuable tool to monitor the impact of anthropogenic land use. These tools can also be allies in the investigation of health problem triggers that may be related to soil

moisture content. Along these lines, since the 1960s field observations by animal pathologists suggest that bovine periodontitis disease - a multifactorial, polymicrobial disease with an etiology not yet fully described - gains greater occurrence after wet seasons with temporary soil saturation events. This study aimed to explore the use of HYDRUS-1D software to simulate soil water dynamics and fluxes in recent ( $\leq 7$  years) and old ( $\geq 20$  years) pastures of farms in the region of Boca do Acre, Western Amazonia, being one of high and one of low severity level of the disease (HSL and LSL, respectively). Overall, the pastures of the LSL system are more heterogeneous to each other regarding to average annual water retention values than those found among the pastures of the HSL system, which may be associated with a shorter period of exposure of cattle to disturbance conditions by the microbiota, reducing the chance of infections.

**Keywords:** Soil climate; HYDRUS-1D; Cattle disease.

### INTRODUÇÃO

A conversão da floresta em pastagem tem um impacto direto nos fluxos de água do solo, devido às transformações na dinâmica hidrológica (DOS SANTOS et al., 2018; NÓBREGA et al., 2017). Também, a pecuária extensiva pode promover uma maior exposição do solo a ciclos de umedecimento e secagem (LAURANCE et al., 2002), diminuindo a porosidade, infiltração de água, causando degradação da estrutura do solo (TEIXEIRA et al., 1996).

A utilização de ferramentas computacionais para o monitoramento da dinâmica da água no solo se faz importante devido ao baixo custo e precisão dos modelos de simulação, apoiando a tomada de decisões sobre os impactos da intensificação do uso da terra (ARTS; VAN DER WAL; ADAMS, 2015). Mais ainda, a aplicação destas ferramentas pode apoiar na compreensão do comportamento de doenças em sistemas manejados, com observada relação com a sazonalidade da água, como é o caso da periodontite bovina "cara-inchada dos bovinos - CIB", uma doença

bacteriana multifatorial, reportada como um distúrbio em consequência da alteração microbiana em solos e forragem após a remoção da cobertura florestal (DÖBEREINER et al., 2000). Desde os anos 60, observações de campo e dados não publicados de patologistas animais sugerem que a doença, cujos desencadeadores ainda não foram totalmente compreendidos, ganha maior ocorrência após as estações úmidas, com eventos temporários de saturação do solo.

Aqui, utilizamos o software HYDRUS-1D para simular a dinâmica e os fluxos de água do solo em pastagens da região da Amazônia Ocidental, na cidade de Boca do Acre (Amazonas, Brasil). Através de relatórios locais, foi selecionada uma propriedade com alto nível de severidade da enfermidade, e outra com baixo nível de severidade, ambas com pastagens recente e antiga. Utilizaram-se dados climáticos diários de uma série temporal de 7 anos para verificar possíveis correlações entre os parâmetros hidráulicos do solo, sazonalidade da água, e a possível diferença na susceptibilidade dos pastos à ocorrência da doença. A hipótese deste estudo é que, embora sob o mesmo domínio de Latossolos, as diferenças específicas nas propriedades físicas dos solos entre as áreas de alta e baixa severidade de doenças dão a estes sistemas distintas respostas à sazonalidade da água, sendo um possível condicionador de desencadeamento das infecções no gado na propriedade de alta incidência.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os dados meteorológicos foram obtidos da base oficial do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da estação meteorológica automática Boca do Acre/AM, Brasil, sob o número A110, contemplando o período de 2011 a 2018, com periodicidade de dados diária.

Para calcular a evapotranspiração ( $ET_0$ ), foi utilizado o método Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), que inclui os elementos meteorológicos: temperatura média do ar ( $^{\circ}C$ ), umidade relativa (%), radiação solar global ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ ) e velocidade do vento a 2 metros de altura ( $m\ s^{-1}$ ). No caso de lacunas de dados pluviométricos, foram utilizados dados de estações pluviométricas pertencentes ao banco de dados do [HIDROWEB/ANA](http://hidroweb.ana.gov.br) (<http://hidroweb.ana.gov.br>) localizado no mesmo município de estudo. Para outros elementos meteorológicos para o cálculo da  $ET_0$ , os dados foram estimados pelo modelo NASAPOWER (STACKHOUSE JR et al., 2018) com base nas coordenadas geográficas da estação meteorológica INMET anteriormente utilizada.

A evapotranspiração potencial da cultura ( $ET_c$ ) foi calculada a partir da evapotranspiração de referência

( $ET_0$ ) e do coeficiente de cultura ( $K_c$ ). Os valores  $K_c$  para dois estágios (início:  $\leq 90$  dias, e formação:  $> 90$  dias) das pastagens foram 0,8 e 1,0, respectivamente (SANCHES et al., 2019). O software HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK; VAN GENUCHTEN, 2008; SIMUNEK) foi usado para simular a dinâmica e os fluxos diários de água ao longo dos anos de 2011-2018, com base no tempo desde a conversão da floresta em pastagem recente. Para realizar a simulação no HYDRUS-1D, além dos dados meteorológicos, e os parâmetros hidráulicos do solo, foi utilizado o parâmetro da equação van Genuchten - Mualem para descrever a relação entre o conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ) e o potencial ( $h$ ) exibido na Tabela 1. Através do RETC (Retention Curve Software) (LEIJ et al., 1992), os dados da curva de retenção de água do solo realizados na faixa de 0, -10, -30, -60, -100, -330, -1100 e -1500 kPa de potencial hídrico ( $h$ ) para cada horizonte de solo. Os parâmetros ajustados foram  $\theta_r$ : umidade volumétrica residual,  $\theta_s$ : umidade volumétrica na saturação,  $\alpha$ : parâmetro empírico relacionado ao valor da pressão de entrada de ar,  $n$ : parâmetro empírico relacionado à largura de distribuição do tamanho dos poros. A condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) foi estimada, com base na experiência no solo amazônico, em cerca de  $70\ cm\ dia^{-1}$ . Aqui, estimamos os parâmetros para horizontes de solo de até 60 cm de profundidade, a fim de cobrir a profundidade média efetiva do sistema radicular da forragem (ALENCAR et al., 2009). O valor do parâmetro de conectividade dos poros ( $l$ ) foi assumido como sendo (0,5). O coeficiente de determinação  $R^2$  e o erro quadrático médio da raiz (RMSE) foram utilizados para avaliar o desempenho do modelo para cada um dos parâmetros hidráulicos obtidos do horizonte do solo dos perfis do solo. A área de alto nível de severidade da doença recebeu a sigla de HSL, e a de baixa incidência LSL. Ambos os sistemas estão sob o domínio de Latossolo Amarelo, no entanto possuem distinções referentes aos níveis categóricos mais específicos.

## RESULTADO E DISCUSSÃO

Usando os parâmetros do volume de água residual e na constatados na Tabela 1, foi possível obter a porcentagem prevista de volume vazio preenchido com água (ou seja, grau de saturação, doravante GS) para as camadas de solo de 10 cm e 30 cm durante o período de simulação de 8 anos. As pastagens recentes no sistema HSL foram altamente afetadas pela dinâmica de precipitação anual em ambas as camadas de solo, evidenciando uma variação sazonal de cerca de 50% no GS ao longo do ano durante a série temporal avaliada (estação úmida, máx =  $\sim 90\%$ ; estação seca, mín =  $\sim 40\%$ ). Ainda no sistema HSL,

valores de até 80% de GS a 10 e 30 cm foram observados em toda a estação chuvosa, tanto em pastagens recentes quanto nas antigas. Valores mínimos de cerca de 40% foram registrados nas estações secas em pastagens recentes, bem como na profundidade de 30 cm do perfil do solo de pastagens antigas, que registraram um GS mínimo de ~ 50% na camada de 10 cm para o mesmo período do ano. Isto se deve provavelmente ao fato acima mencionado de que as pastagens recentes têm um conteúdo de areia fina maior do que as pastagens antigas, que por sua vez têm maior porosidade total e conteúdo de argila ao longo dos 30 cm de profundidade. Dadas estas informações, pode-se definir que as pastagens (recentes e antigas) do sistema LSL são mais heterogêneas entre si do que as pastagens HSL quanto a amplitude de variação do GS para a mesma profundidade de solo. Tanto em 10 cm como em 30 cm o GS nas pastagens antigas é 20% menor na comparação das pastagens para o mesmo período do ano, enquanto os valores para as pastagens do sistema HSL permaneceram semelhantes em ambas as profundidades.

Finalmente, considerando que a periodontite bovina é uma doença multifatorial (DÖBEREINER et al., 2000), é plausível indicar que o presente estudo se limitou a fornecer sinais a respeito da heterogeneidade de resposta à dinâmica da água das pastagens das fazendas relatadas com um histórico de alta e baixa incidência de periodontite bovina, respectivamente, embora compartilhando o mesmo domínio pedológico e climatológico. Assim, é encorajada a inclusão das propriedades químicas do solo ao longo do perfil, bem como o monitoramento do microbioma do contínuo solo-planta-animal associado aos parâmetros da água, a fim de aumentar a compreensão sobre a possível relação entre o efeito da sazonalidade das chuvas e as transformações no clima do solo com o início da periodontite no gado.

## CONCLUSÕES

O uso da simulação de fluxos hidráulicos pelo software HYDRUS-1D apresentou ser uma poderosa ferramenta para identificar variações relevantes na dinâmica de água do solo entre as fazendas de alta e baixa incidência da periodontite bovina. Os valores simulados do grau de saturação do solo foram mais similares entre as pastagens recente e velha da fazenda de alta incidência do que nas pastagens de baixa incidência, o que pode ser um condicionante para um maior período de exposição do gado a uma situação homogênea de distúrbio da microbiota do solo.

## AGRADECIMENTOS

A USAID/NAS (PEER project 4-299, USAID agreement AID-OAA-A-11-00012) pelo financiamento do projeto. Ao CNPq pela bolsa de produtividade de ECJ e WGT, e pela bolsa de estudo de doutorado a FIR. A CAPES/PDSE, pela concessão da bolsa de doutorado-sanduiche ao primeiro autor. A Gabriela Dias e Letícia Pimentel, pelo apoio nos ajustes das equações de retenção de água no solo.

## REFERÊNCIAS

- ALENCAR, C. A. B. DE; CUNHA, F. F. DA; MARTINS, C. E.; CÓSER, A. C.; ROCHA, W. S. D. DA; ARAÚJO, R. A. S. Irrigação de pastagem: atualidade e recomendações para uso e manejo. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 38, p. 98–108, 2009.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- ARTS, K.; VAN DER WAL, R.; ADAMS, W. M. Digital technology and the conservation of nature. *Ambio*, v. 44, n. 4, p. 661–673, 2015.
- DÖBEREINER, J.; DUTRA, I. S.; ROSA, I. V.; BLOBEL, H. “Cara inchada” of cattle, an infectious, apparently soil antibiotics-dependant periodontitis in Brazil. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, v. 20, n. 2, p. 47–64, 2000.
- DOS SANTOS, V.; LAURENT, F.; ABE, C.; MESSNER, F. Hydrologic response to land use change in a large basin in Eastern Amazon. *Water*, v. 10, n. 4, p. 429, 2018.
- LAURANCE, W. F.; ALBERNAZ, A. K. M.; SCHROTH, G.; FEARNside, P. M.; BERGEN, S.; VENTICINQUE, E. M.; DA COSTA, C. Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of biogeography*, v. 29, n. 5-6, p. 737–748, 2002.
- LEIJ, F. J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; YATES, S. R.; RUSSELL, W. B.; KAVEH, F. RETC: A computer program for analyzing soil water retention and hydraulic conductivity data. Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. University of California, Riverside, p. 263–272, 1992.
- NÓBREGA, R. L. B.; GUZHA, A. C.; TORRES, G. N.; KOVACS, K.; LAMPARTER, G.; AMORIM, R. S. S.; COUTO, E.; GEROLD, G. Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture on soil hydro-physical properties, evapotranspiration, and streamflow on the Amazonian agricultural frontier.

PloS one, v. 12, n. 6, p. e0179414, 2017.

SANCHES, A. C.; SOUZA, D. P. DE; JESUS, F. L. F. DE; MENDONÇA, F. C.; GOMES, E. P. Crop coefficients of tropical forage crops, single cropped and overseeded with black oat and ryegrass. *Scientia Agricola*, v. 76, p. 448–458, 2019.

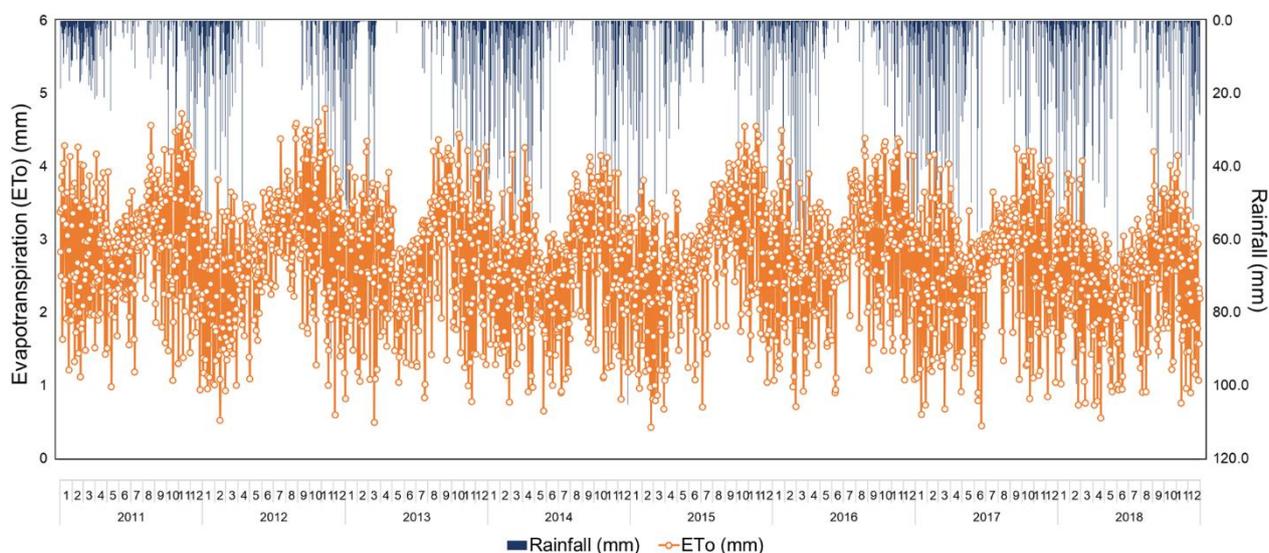
STACKHOUSE JR, P. W.; ZHANG, T.; WESTBERG, D.; BARNETT, A. J.; BRISTOW, T.; MACPHERSON, B.; HOELL, J. M.; HAMILTON, B. A. POWER release 8 (with GIS applications) methodology (data parameters, sources, & validation). v. Documentat, 2018.

TEIXEIRA, W. G.; PEREIRA, E. G.; CRUZ, L. A.; BUENO, N. Influência do uso nas características físico-químicas de um latossolo amarelo, textura muito argilosa, Manaus, AM. Embrapa Amazônia Ocidental-Artigo em anais de congresso (ALICE). Anais...In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996.

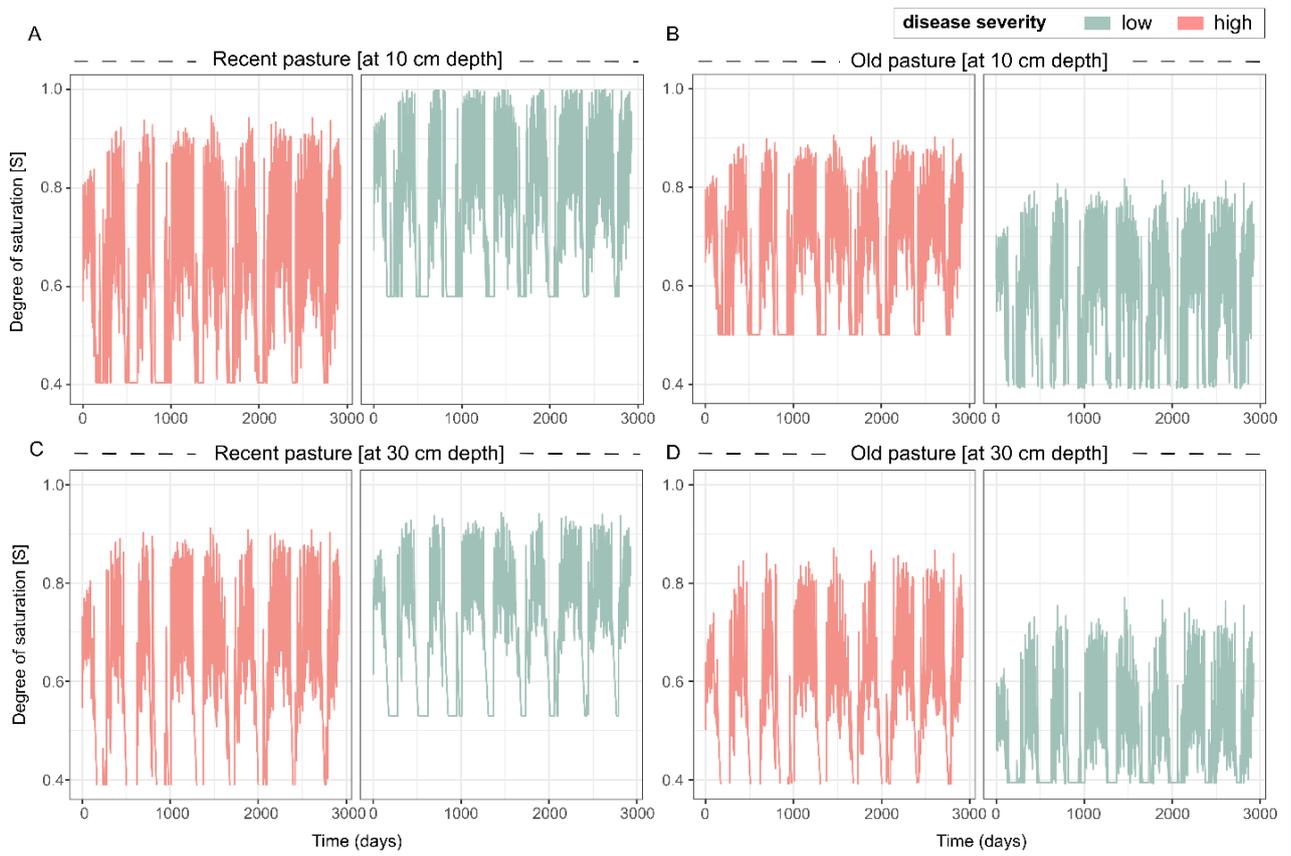
**Tabela 1.** Parâmetros de van Genuchten-Mualem para as propriedades hidráulicas dos perfis do solo de pastagens recentes e antigas dos sistemas HSL e LSL em Boca do Acre, Amazonas, Brasil.

Nível de severidade <sup>1</sup>	Idade da pastagem	Horizonte	Camada (cm)	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\theta_r$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$n$	$R^2$	RMSE
Alto (HSL)	$\leq 7$ anos	A	0-7	0,2679	0,1048	0,1252	1,4539	0,9216	0,0141
		BA	7-38	0,2779	0,1045	0,0827	1,5926	0,9551	0,0120
	20 anos	A	0-12	0,3261	0,1586	0,0732	1,5692	0,9446	0,0128
		Bw1	20-48	0,4341	0,1614	0,0642	1,8213	0,9734	0,0157
Baixo (LSL)	$\leq 7$ anos	A	0-8	0,4487	0,2311	0,1728	1,3088	0,9715	0,0105
		Bt1	22-44	0,4896	0,2546	0,1967	1,5216	0,9918	0,0067
	30 anos	AB	6-13	0,3035	0,0156	0,0641	1,2667	0,9705	0,0136
		BA	13-36	0,2428	0,0955	0,0215	2,9955	0,9600	0,0124

<sup>1</sup> Nível de severidade da periodontite bovina com base na avaliação clínica e na história da fazenda.  $\theta_r$ : umidade volumétrica residual,  $\theta_s$ : umidade volumétrica na saturação,  $\alpha$ : parâmetro empírico relacionado ao valor da pressão de entrada de ar,  $n$ : parâmetro empírico relacionado à largura de distribuição do tamanho dos poros,  $R^2$ : coeficiente de determinação, e RMSE: erro quadrático médio da raiz.



**Figura 1.** Dinâmica temporal das chuvas diárias e evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) no período de 2011 e 2018 para a região da Boca do Acre, Amazonas, Brasil.5



**Figura 2.** Medição diária do grau de saturação do solo (GS%) a 10 cm e 30 cm de profundidade ao longo dos anos 2011-2018 em pastos recentes e antigos de alta (HSL) e baixa (LSL) incidência de periodontite bovina na região da Boca do Acre, Amazonas, Brasil.

## Balço hídrico em canavial na Amazônia Central: Presidente Figueiredo – AM

Water balance in sugar cane plantations in central Amazon: Presidente Figueiredo - AM.

**Aline Mari Huf dos Reis<sup>(1)</sup>; Léticia Guimarães Pimentel<sup>(1)</sup>; Alexandre Ortega Gonçalves<sup>(2)</sup>; Gilvan Coimbra Martins<sup>(3)</sup>; Fabrcio Resende Fregonezi<sup>(4)</sup>; Wenceslau Geraldes Teixeira<sup>(5)</sup>**

(1) Bolsista ZARC - Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, aline.huf@colaborador.embrapa.br; (2) Pesquisador Embrapa Solos/Meio ambiente, alexandre.ortega@embrapa.br; (3) Pesquisador Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM, gilvan.martins@embrapa.br; (4) Gerência Agrícola - Jayoro, Presidente Figueiredo, AM; fabricio@jayoro.com.br; (5) Pesquisador Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, wenceslau.teixeira@embrapa.br

**RESUMO:** A cana-de-açúcar é uma planta cultivada em todas as regiões do Brasil em razão de sua boa adaptabilidade quanto ao clima e tipo de solo. Para entender a dinâmica e disponibilidade de água e particionar o balanço hídrico do canavial nos seus diferentes componentes (evaporação, transpiração e transmissão da água no solo). Com o objetivo de estimar os volumes de água nos componentes do balanço se utilizou de técnicas de modelagem de fluxos em sistemas agrícolas. O estudo foi realizado num canavial crescendo num Latossolo Amarelo muito argiloso, pertence à Fazenda Jayoro, no município de Presidente Figueiredo. A simulação do balanço hídrico foi realizada com o software HYDRUS-1D, que utiliza dados de precipitação, retenção de água, evaporação e transpiração e parâmetros fisiológicos da cana de açúcar quanto à absorção de água e distribuição do sistema radicular. Para validação e ajuste dos dados foram utilizados dados da umidade volumétrica média diária provenientes de dois sensores capacitivos instalados a 20 cm de profundidade. O ciclo de cultivo da cana-de-açúcar durou 347 dias, iniciado de 1 de setembro de 2017 a 13 de agosto de 2018. A precipitação totalizou 2427 mm durante esse período. A evapotranspiração real estimada totalizou 485 mm e o total de água percolada no solo foi de 2020 mm. A diferença de água armazenada no solo entre o início e o final do ciclo foi de 37 mm foi somada ao valor de água percolada (2020 mm) e evapotranspiração (485 mm), resultando em 2542 mm. Contudo, esse valor ultrapassou o valor de precipitação (2427 mm), apresentando 115 mm excedente, ou seja, 4,7% de erro no balanço de massa simulado.

**Palavras-chave:** Solo argiloso; precipitação; dinâmica da água.

**ABSTRACT:** Sugarcane is mainly presented as an alternative in the biofuels sector. It is a cultivated plant in all regions of Brazilian territory due to its good adaptability to climate and soil conditions. Flow modeling techniques were used in order to understand the dynamics and availability of water, as well as partition the water balance of the sugarcane plantation into its different components (evaporation, transpiration, and soil water transmission). The study was carried out in a sugarcane plantation growing on a very clayey Ferralsol, belonging to the Jayoro Farm, present in the county of Presidente Figueiredo (Amazonas State - Brazil). The water balance simulation was performed with the HYDRUS-1D software, which uses precipitation, water retention, evaporation, and transpiration data. Volumetric water content from two capacitive sensors was used to validate and adjust data. The sugarcane growing cycle lasted 347 days. Total precipitation was 2427 mm during this period. The total estimated evapotranspiration and cumulative bottom flux were equal to 295 mm and 2256 mm respectively.

**Keywords:** clayey soil, precipitation, water dynamics.

## INTRODUÇÃO

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021), a cana-de-açúcar possui alto potencial na produção de etanol e demais subprodutos, sendo considerada excelente alternativa no setor de biocombustíveis e de produção sustentável no país.

É inegável a boa adaptabilidade da cana-de-açúcar nas diversas regiões do país, o que faz surgir usinas por todo o território nacional, bem como a geração de empregos e renda. As regiões norte e nordeste são responsáveis pela maior parte da colheita nacional entre agosto e março, apresentando uma estimativa de

produção de 47.547 toneladas de cana-de-açúcar para a safra 21/22 (CONAB, 2021).

Algumas condições edafoclimáticas são essenciais para o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar. A temperatura deve estar entre 18 e 31°C, e água disponível no solo no período vegetativo são características primordiais para a boa produtividade. A profundidade efetiva e a textura do solo são propriedades físicas importantes a serem consideradas em uma área em que se deseja cultivar a cana-de-açúcar (Barreto et al., 2006).

O objetivo do trabalho foi particionar o volume de precipitação durante o período estudado na evaporação, transpiração, recarga do aquífero, alteração e variação do volume de água armazenado no perfil de solo considerado. A dinâmica da umidade volumétrica estimada e avaliada na profundidade de 0-20 cm foi utilizada para avaliação dos ajustes do modelo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no talhão denominado Usina da Fazenda Jayoro localizada em Presidente Figueiredo (AM). O clima do município é do tipo Am segundo a classificação de Köppen, apresentando temperatura média anual igual a 25,5°C. As chuvas são distribuídas de forma irregular durante os meses do ano, variando entre 2000 e 2500 mm por ano, apresentando um curto período seco. A umidade relativa média do ar é cerca de 85%. O solo do local é Latossolo Amarelo de textura muito argilosa (Rodrigues et al, 2001).

Instalou-se um sistema automático de coleta de dados composto de um coletor de dados Campbell CR1000 (Campbell, Inglaterra). Sensores capacitivos (FDR, modelo CS-650, com haste de 30 cm, Campbell, Inglaterra) avaliavam, na profundidade de 0-20 cm, a umidade volumétrica do solo, com registros em médias horárias transformados em médias diárias. A mesma estação coletava os dados de precipitação pluvial (TR525 – Texas, EUA). Para o cômputo da evapotranspiração de referência diária (ET<sub>o</sub> - mm dia<sup>-1</sup>) utilizou-se dados oficiais de estação meteorológica padrão do Instituto Nacional de Meteorologia instalada no município de Presidente Figueiredo – Praças das Torres (INMET, 2021), em que os dados de radiação solar foram obtidos pelo *NasaPower Project* (Stackhouse, 2021).

Os valores de umidade volumétrica foram calibrados para o Latossolo Amarelo muito argiloso pela equação proposta por Teixeira et al. (2010).

### Simulação no Hydrus-1D

Inicialmente, no menu *Main process* selecionaram-se as opções de simulação de fluxo de água (*Water flux*), absorção de água pelas raízes (*root*

*water uptake*) e crescimento das raízes (*Root growth*). Realizou-se tanto a simulação direta quanto a inversa. Para a discretização dos dados de entrada no modelo Hydrus, todas as informações foram padronizadas para a unidade em centímetros (cm).

Para a simulação foi considerado um perfil de 200 cm de profundidade sendo considerado a camada de 0 a 20 cm com propriedades hidráulicas distintas da camada de 21 a 200 cm. A discretização do tempo foi diária (*days*), sendo o dia inicial igual a um e o final 347. Na seção dos critérios de iteração do modelo utilizou-se 10 como número máximo de iterações e não se alterou mais nenhuma informação do quadro.

As propriedades hidráulicas destas duas camadas (Tabela 1) foram descritas pelo modelo bimodal (Equação 1) de Durner (1994).

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

Em que  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são, respectivamente, as umidades volumétricas residuais e na saturação;  $\alpha$  e  $n$  são parâmetros empíricos;  $w_2$  é um fator de peso para cada moda. Dessa forma, foi possível descrever a função da curva de retenção de água (CRA). Os valores utilizados para a equação de Durner na simulação direta estão descritos na Tabela 1 e foram obtidos por Pimentel et al. (2022).

Como condições de fronteira para o limite superior (*upper boundary conditions*) adotou-se as condições atmosférica (médias diárias) e sem ocorrência de escurrimentos (*run offs*), (*Atmospheric BC with Surface Layer*) admitindo um empoçamento da água na superfície do solo até 10 cm. Para as condições de fronteira inferior (*Lower boundary conditions*) foi selecionado drenagem livre (*Free Drainage*), pela elevada profundidade do lençol freático na área. As condições iniciais de simulação foram baseadas no conteúdo de umidade volumétrica do solo, estimado com valores dos sensores FDR. O crescimento de raízes (*Root growth*) foi estimado ser uniforme (*Root depth*) atingindo 10 cm de profundidade até o trigésimo dia após o plantio, tendo sido assumido seu crescimento ter atingido 30 cm de profundidade a partir do trigésimo primeiro, 40 cm de profundidade a partir do nongentésimo primeiro, e 60 cm de profundidade a partir do centésimo nongentésimo primeiro dia até o final do ciclo. Para a simulação da absorção de água pelas raízes escolheu-se o modelo de Feddes (Feddes et al., 1978) e sem ocorrência de estresse salino. Os valores dos parâmetros de Feddes foram: P0=-10 cm; PO<sub>pt</sub>=-15 cm; P2H=-150 cm; P2L=-500 cm; P3=-12000 cm; r2H=0,3 cm/dia; r2L=0,02 cm/dia, não sendo escolhido os parâmetros padrão internos ao programa HYDRUS para cana-de-açúcar. A utilização do modelo de Feddes para absorção de água pelas raízes permite penalizar a taxa

de absorção para valores próximos da saturação do solo.

Para o cálculo da evapotranspiração do canal (ETc - mm dia<sup>-1</sup>) utilizaram-se os valores de ETo (calculada pela equação de Penman-Monteith segundo Allen et al., 1998) multiplicados pelos coeficientes de cultivo (*kc* - adimensional) para cada fase do ciclo. Assim, os valores de *kc* utilizados foram 0,4 (até 21° dia); 0,75 (do 22 ao 181° dia); 1,1 (do 182 ao 241° dia); 1,25 (do 242 ao 301° dia) e 0,70 (do 302 ao 347° dia), baseado nos resultados apresentados por Doorenbos e Pruitt (1977). A ETc foi particionada em transpiração e evaporação de todo o período, a fim de inseri-los na janela *Time variable boundary conditions*. Assumiu-se que até o décimo dia depois do plantio a transpiração foi zero, sendo que a evaporação correspondeu ao valor total calculado para a evapotranspiração. Do 11° até o 20° dia considerou-se que a evaporação correspondeu a 70% da evapotranspiração, sendo que, a transpiração corresponde a diferença entre o valor total da evapotranspiração e a evaporação. Do 21° ao 30° dia a evaporação foi de 60% da evapotranspiração. Do 31° o 60° dia a evaporação do canal foi cerca de 40% da evapotranspiração considerada. Do 61° ao 250° dia a evaporação foi de 30% do valor da evapotranspiração. Do 251° ao 310° dia a evaporação foi de 20% do valor da evapotranspiração. Do 311° ao 347° dia a evaporação retornou a ser 30% da evapotranspiração.

Na seção de editor gráfico (*graphical editor*) indicou-se a distribuição das duas camadas consideradas no perfil (*Material distribution*), sendo inserido um ponto de observação (*node*) a 20 cm da superfície. Esse ponto será utilizado para comparar os valores de umidade volumétrica simulados pelo programa e avaliados pelos sensores FDR CS650.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A umidade média do solo registrada no dia do plantio foi de 0,396 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. Contudo, o valor da umidade inicial simulada pelo Hydrus-1D no modo direto foi de 0,486 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, e 0,414 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> pela simulação inversa (Figura 1). Os demais resultados da simulação direta não foram apresentados, uma vez que os valores de umidade simulada ficaram muito distantes dos valores medidos pelos sensores, apresentando um RMSE = 0,080. Dessa forma, a simulação inversa apresentou resultados mais próximos dos valores medidos (RMSE = 0,022) e, portanto, foi a simulação adotada para finalizar o estudo. Os parâmetros hidráulicos do solo obtidos para a simulação inversa estão descritos na Tabela 1.

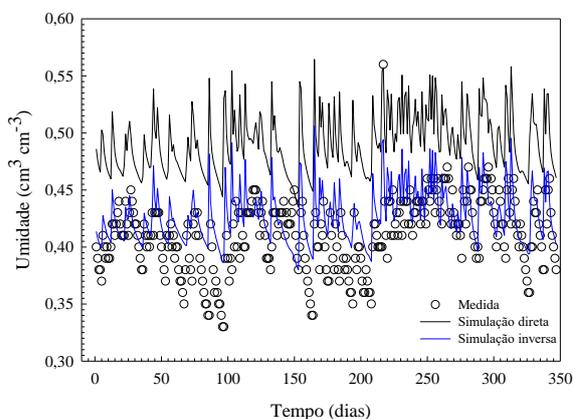


Figura 1 – Umidades medida e simuladas no Hydrus-1D

A precipitação total do período de cultivo foi de 2427 mm. Na Figura 2 apresenta-se a distribuição da chuva ao longo do ciclo da cana-de-açúcar. Nota-se que a maior precipitação pluvial (102 mm) ocorreu por volta da metade do ciclo (dia 165).

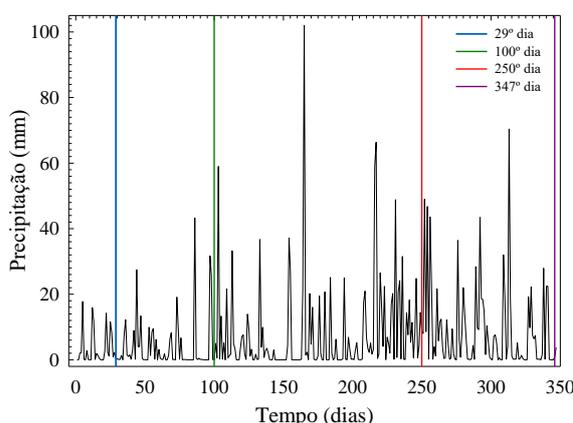
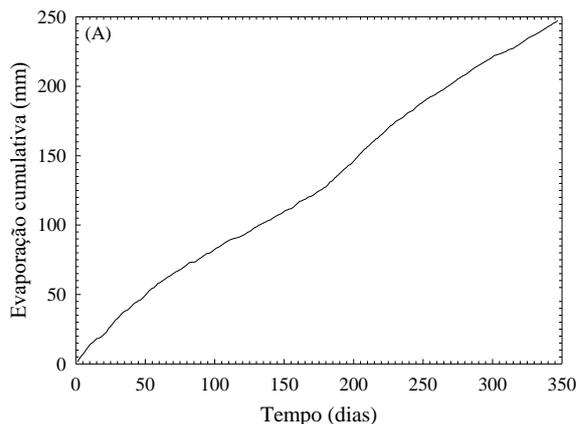
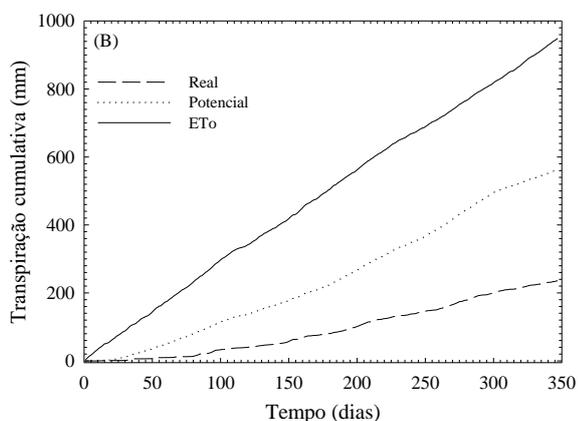


Figura 2 – Precipitação diária no período de 1 de setembro de 2017 a 13 de agosto de 2018.

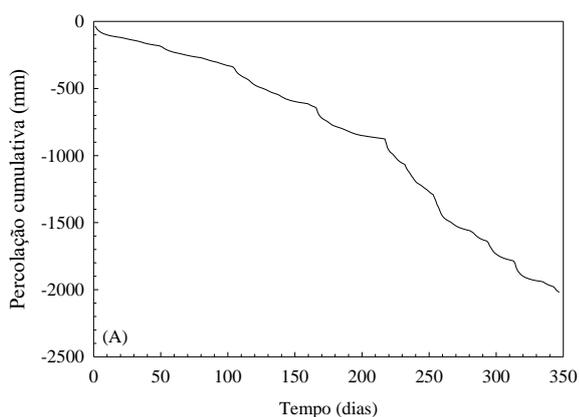
A evaporação acumulada no período foi de 249 mm (Figura 3A). Sabendo-se que a transpiração ocorre através dos estômatos existentes nas folhas, que permitem a comunicação entre a parte interna da planta e a atmosfera, a transpiração real foi igual a 236 mm (Figura 3B), sendo próximo ao valor de evaporação do solo. A evapotranspiração potencial (ETo) totalizou 949 mm.





**Figura 3** – A) Evaporação cumulativa simulada. <sup>1</sup>B) Evapotranspiração potencial cumulativa (ETo), transpiração cumulativa real e potencial simulada.

A simulação inversa apresentou uma percolação cumulativa da água no solo de 2020 mm (Figura 3A).



**Figura 3** – (A) Percolação cumulativa obtida pela simulação inversa.

O HYDRUS também simulou a quantidade de água armazenada no solo durante todo o período avaliado, o qual continha 885 mm inicialmente e finalizou o ciclo da cana com 848 mm.

Realizando-se o balanço hídrico dos resultados obtidos tem-se um erro de 4,7% no balanço de massa, o que não é o ideal, mas aceitável.

## CONCLUSÕES

A simulação do balanço hídrico climatológico para o canal demonstrou a variação da umidade do solo ao longo do período avaliado, bem como a simulação do crescimento das raízes através dos processos fisiológicos de transpiração da planta. A simulação inversa apresentou o menor RMSE para os valores de umidade obtidos em relação aos valores medidos em campo. Contudo, o erro obtido no

balanço de massa deveria ser menor, mesmo assim foi possível verificar a dinâmica da água e o crescimento das raízes ao longo do ciclo da cana-de-açúcar na Fazenda Jayoro.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio e parceria no Projeto Jayoro S.A. WGT agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G. et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.

BARRETO, A. G. O. P. et al. Produção de Etanol: uma opção competitiva para o aproveitamento de áreas alteradas no leste do Pará. Piracicaba: Universidade de São Paulo (USP), 2006.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar, Brasília, DF, v. 8, n. 3, novembro de 2021.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Rome: FAO, paper 33, p. 197. 1977.

FEDDES, R. A.; KOWALIK, P. J., ZARADNY, H. Simulation of field water use and crop yield, John Wiley & Sons, New York, NY, p. 194-209, 1978.

INMET. Dados meteorológicos da estação automática Presidente Figueiredo – Praça das Torres (D0038). Disponível em <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A611>. Acesso em 01 de nov de 2021.

RODRIGUES, T. E. et al. Caracterização e classificação dos solos do município de Presidente Figueiredo, Estado do Amazonas. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, Documento 123, 2001. 50p.

ŠIMŮNEK, J. et al. Hydrus-1D Manual. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Department of Environmental Science. University of California, Riverside, 2013.

STACKHOUSE, P. W. **The Power Project. Nasa Prediction of Worldwide Energy Resources, 2021.** Disponível em: <<https://power.larc.nasa.gov/>>. Acesso em: abril de 2022.

<sup>1</sup> Evapotranspiração potencial (ETo) calculada com dados do INMET e equação de Penman-Monteith; transpiração potencial estimada a partir da ETo multiplicada pelos coeficientes de cultivo  $K_c$  da cana-de-açúcar em diferentes fases e estimativas do índice de

área foliar; transpiração real estimada em função da evapotranspiração de referência e disponibilidade de água para absorção pelo sistema radicular.

TEIXEIRA, W. G. & BHERING, S. B. Retenção da água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards. In: Manual de métodos de análise de solo / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TEIXEIRA, W. G. Land use systems effects on soil physical and hydraulic properties of a clayey

Ferralsol in the Central Amazon. 2001. Bayreuther Bodenkundliche Berichte. Bayreuth, v.72, 1-255 p.

TOPP, G. C. et. al. Electromagnetic determination of soil water content measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res., Washington D.C., v.16, p. 574-582, 1980.

Tabela 1 – Parâmetros de fluxo de água para o Latossolo Amarelo obtidos a partir da curva de retenção apresentada por Pimentel et al. (2022), e os parâmetros obtidos pela simulação inversa.

Material	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	$w_2$	$\alpha_2$	$n_2$	$l$	$K_s$
Simulação direta									
1	0,199	0,566	0,499	10,893	0,754	0,5	1,18	0,5	75
2	0,175	0,58	0,282	1,412	0,41	0,00008	8,094	0,5	75
Simulação inversa									
1	0,199	0,566	0,499	10,893	0,754	0,500	1,180	0,5	200
2	0,175	0,580	0,282	1,412	0,410	0,000	8,094	0,5	200

$\theta_r$  e  $\theta_s$  são, respectivamente, as umidades residual e na saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $\alpha$  e  $n$  são parâmetros empíricos;  $w_2$  é um fator de peso para cada moda;  $K_s$  é a condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{cm dia}^{-1}$ );  $l$  é um fator de tortuosidade do meio poroso.

## Taxa de recarga do aquífero em áreas de Latossolo Amarelo sem vegetação na Região Nordeste do Pará - Amazônia

Aquifer recharge rate in areas of Yellow Ferralsol without vegetation in the Northeast Region of Pará - Amazon

Luciana Cruz Bianco <sup>(1)</sup>, Wenceslau Geraldês Teixeira <sup>(2)</sup>, Rodrigo Sondermann Muniz <sup>(3)</sup>, Alexandre Ortega Gonçalves <sup>(2)</sup>, Antônio José de Abreu Pina <sup>(4)</sup>

(1) Mestranda - PEAMB - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ; (2) Pesquisador, Embrapa Solos, RJ; (3) Doutor Engenheiro Agrônomo, Prefeitura Municipal de São João do Meriti - RJ; (4) Gerente Agrícola - Marborges Agroindústria, Moju-PA.

**RESUMO:** A recarga dos aquíferos é um processo hidrológico, no qual a água infiltra no solo através da zona insaturada até a zona saturada ou aquífero. Os fluxos de água podem ser modificados por qualquer alteração, como é o caso da ocupação de terras na Amazônia por cultivos agrícolas. O estudo foi realizado perto da cidade de Moju, Belém (PA) e tem como objetivo realizar uma simulação com o HYDRUS-1D para estimar a recarga da água subterrânea através da zona não saturada. Com a simulação de um cenário sem vegetação com dados de precipitação de um período de 715 dias, foi possível observar as taxas de recarga do aquífero. Os resultados permitiram observar as propriedades do perfil de solo, e a umidade do solo devido a dinâmica do fluxo de água e precipitação. A precipitação e recarga dos aquíferos mais elevados estão entre os meses de novembro a maio. Os fluxos de recarga variaram entre 30 e 46 mm/dia nos dias mais intensos de precipitação, enquanto na média anual não passam de 10 mm/dia.

**Palavras-chave:** Hydrus; Água Subterrânea; ciclo hidrológico.

**ABSTRACT:** The groundwater recharge is a hydrological process, where the water infiltrates through the unsaturated zone to the saturated zone. The water flows can be modified by any change, as is the case of land occupation in the Amazon by agricultural crops. The study was carried out near the city of Moju, Belém (PA) and aims to perform a simulation with the HYDRUS-1D to estimate the groundwater recharge through the unsaturated zone. The simulation in a without vegetation scenery, with precipitation data of 715 days, it was possible to observe the soil profile recharge rates.

The results allowed us to observe the properties of the soil profile, and the soil moisture content due to the dynamics of water flow and precipitation. The recharge flows range from 30 mm/day to 46 mm/day on the most intense days in the annual average, they do not exceed 10 mm/dia.

**Keywords:** Hydrus; groundwater; hydrologic cycle.

### INTRODUÇÃO

A retirada da vegetação nativa e a implantação de cultivos anuais, por exemplo, modificam a dinâmica de uso e manejo do solo, alterando sua estrutura e os fluxos hidráulicos.

Observa-se cada vez mais que a ocupação de terras na Amazônia vem aumentando nas últimas décadas, com a substituição da floresta primária por cultivos agrícolas, alterando as propriedades do solo (SENNA et al., 2014).

A recarga dos aquíferos por meios naturais recebe a água precipitada que infiltra no solo em direção ao aquífero. A infiltração e a percolação no interior do solo são comandadas pelas tensões capilares e pela gravidade. No solo, parte da água proveniente da infiltração é absorvida pelas raízes e será utilizada no metabolismo da planta, sendo que um percentual retornará à atmosfera pela transpiração, uma parte é evaporada tanto do solo ou quando a água é interceptada pelas folhas, e o restante percola para o lençol freático (Filho, 2008). Nas áreas sem vegetação o processo de retorno da água para a atmosfera é somente através da evaporação da água do solo.

O uso das águas subterrâneas nas últimas décadas vem crescendo por diversos fatores como avanço das técnicas de perfuração de poços; redução dos custos de extração; menor susceptibilidade climática; melhor qualidade das águas subterrâneas; o aumento da demanda de recursos hídricos; e a degradação das águas superficiais (REBOUÇAS, 2006).

Os aquíferos freáticos rasos estão fortemente ligados à dinâmica da atmosfera, as variações de temperatura e precipitação, e podem levar a evaporação, absorção de água pelas raízes das plantas e, portanto, a diferentes taxas de recarga da água subterrânea (Raidla et al., 2016).

Com o objetivo de estimar a recarga da água subterrânea e sua passagem pela zona insaturada, o presente estudo utilizará modelos numéricos para estimar o fluxo da recarga das águas subterrâneas. O

HYDRUS-1D é um modelo matemático baseado na equação de Richards para as estimativas no tempo e no espaço da umidade e potencial da água no solo, possibilitando as estimativas dos fluxos de recarga e estimativas do transporte de solutos (Gonçalves et al., 2007; Šimůnek et al., 2009).

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado próximo a cidade de Moju, que fica a 264 km de distância ao sudoeste de Belém (PA). O grupo Marborges S.A. possui áreas com plantio de dendezais, áreas com vegetação natural e áreas sem vegetação em processo de renovação de plantios. Este estudo foi feito simulando os fluxos em áreas sem vegetação.

A presença da cobertura vegetal torna-se importante para manter as taxas de elevada infiltração encontradas nestes solos.

O clima em Mojú (PA) é tropical úmido ou superúmido, sem estação seca, sendo a temperatura média do mês mais quente superior a 18 °C, e o total das chuvas do mês mais seco é superior a 60 mm, com precipitações maiores de março a agosto (Andrade, 2017).

O solo da área é caracterizado como um Latossolo Amarelo distrófico, de textura média e relevo plano (Muniz, 2017). Os Latossolos Amarelos da região nordeste do Pará, Amazônia, são profundos ou muito profundos, bem drenados, ácidos a muito ácidos com textura argilosa, muito argilosa ou média. Esses Latossolos apresentam teores medianos de óxidos de ferro e teor de alumínio trocável frequentemente alto (Muniz, 2017).

Em estudo anterior foi feita a parametrização do modelo HYDRUS-1D, utilizando modelagem inversa com dados de uma série histórica de potencial matricial (leitura realizada com tensiômetros) avaliados diariamente por um período de 373 dias (Muniz, 2017).

Muniz (2017) disponibiliza em seu estudo os parâmetros do modelo de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980) para o Latossolo Amarelo, textura média, predominante na região, sendo esta a mesma área do presente estudo. No estudo de Muniz (2017) os parâmetros meteorológicos de entrada foram a precipitação e evapotranspiração diária de um período de 373 dias (período de 01/08/2009 a 08/08/2010). Para as condições de fronteira inferiores, considerou-se a condição de drenagem livre.

Na Tabela 1 apresentam-se os parâmetros hidráulicos ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $K_s$ ,  $\lambda$ ) do modelo unimodal de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980) obtidos por simulação inversa desenvolvida por Muniz (2017).

**Tabela 1.** Coeficientes da equação unimodal de van Genuchten-Mualem para o Latossolo Amarelo, textura

média - Mojú - Pará (Muniz,2017).

Parâmetros hidráulicos	Horizonte 01	Horizonte 02	Horizonte 03
$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	3,48E-05	3,767E-02	5,62E-04
$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	6,37E-01	3,75E-01	7,39E-01
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	9,189E-02	2,42E-02	3,02E-02
$n$	1,27E+00	1,54E+00	1,41E+00
$K_s$ (cm dia <sup>-1</sup> )	9,75E+01	9,30E+01	1,07E+02
$\lambda$ ou $L$	0,5	0,5	0,5

$\theta_r$ : Umidade volumétrica residual do solo;  $\theta_s$ : umidade volumétrica na saturação do solo;  $K_s$ : condutividade hidráulica do solo saturado;  $\alpha$  e  $n$ : parâmetros de ajuste da curva;  $L$ : - parâmetro de conectividade de poros normalmente adotado com o valor de 0,5 (Mualem, 1976).

Como condição de fronteira superior foram utilizados os parâmetros meteorológicos diários de precipitação e evaporação do período de 715 dias (período de 01/08/2009 a 16/07/2011).

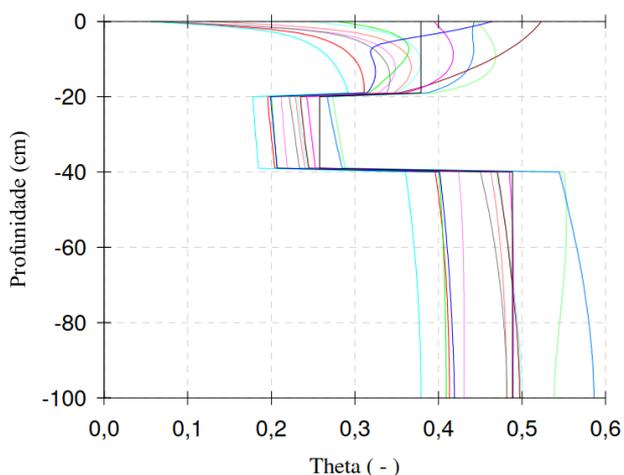
No cálculo para evaporação potencial foram utilizados dados de radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar obtida de uma estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021), localizada na cidade de Tomé-Açu - Pará (Estação INMET A213). Para o cálculo de evaporação, utilizou-se a equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) e os resultados foram adicionados no HYDRUS-1D. Os dados de precipitação foram obtidos de pluviômetros instalados no local do monitoramento por Muniz (2017). Na modelagem realizada, foi considerado um cenário sem vegetação ("terra nua - bare soil") para a modelagem numérica dos fluxos no período estudado. Os dados das estimativas da evaporação e das recargas do aquífero acumulada e diária foram os componentes do balanço hídrico da zona não-saturada do solo, e foi desenvolvida uma simulação dos fluxos subterrâneos e da recarga via processo inverso.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Propriedades Hidráulicas do perfil de solo

Na Figura 1 pode-se observar o teor de água no solo e sua variação ao longo do tempo. O gráfico mostra que nos primeiros 20 cm, temos uma grande variação do teor de água no solo ao longo do perfil, isso ocorre pelas variações atmosféricas, como evaporação, tratando-se de um solo sem cobertura vegetal. Em seguida a água passa por uma camada de solo (20-40 cm) onde o volume de água ( $\theta$ ) é menor indicando menor retenção na matriz dessa camada de solo, seguindo para a camada de 40-100 cm o teor de

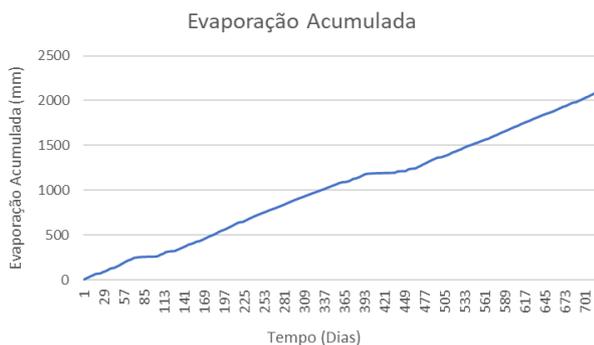
água ( $\theta$ ) aumenta mostrando que as partículas de solo retêm mais água nessa camada.



**Figura 1.** Variação do volume de água ( $\theta$ ) em profundidade do solo para o período de 01/08/2009 a 16/07/2011 para a cidade de Mojú - Pará.

### Precipitação, Evaporação e Recarga da Água Subterrânea

Os dados da área de estudo em Mojú, PA, apresentam valores do total de precipitação de 6224 mm em 715 dias. No período de 01/08/2009 a 01/08/2010 (365 dias), foram registrados 3338 mm, e 2886 mm no período de 01/08/2010 a 16/07/2011 (350 dias). A evaporação acumulada no período foi de 2086 mm, mostrando que 33,5% da precipitação retornou à atmosfera, como apresentado na Figura 2.



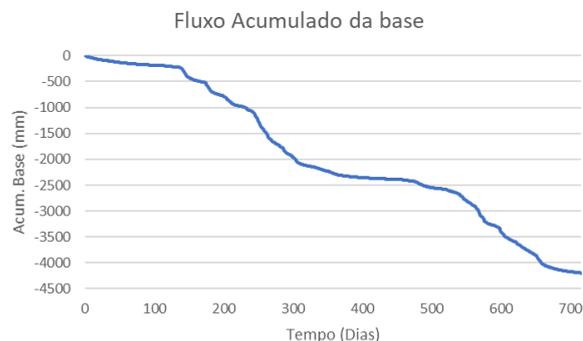
**Figura 2.** Evaporação acumulada para o período de 01/08/2009 a 16/07/2011 para a cidade de Mojú - Pará

Kunert et al. (2017) realizaram estudo na Amazônia Central, onde ocorreu 2303 mm de precipitação anual (100%), sendo 1360 mm (59%) foram devolvidos à atmosfera por evaporação e transpiração.

No cenário estudado de uma área sem vegetação, a ausência da taxa de transpiração pode ser notada ao verificar o valor de evaporação de 33,5%, comparada com 59% de evaporação e transpiração encontrada na Amazônia Central (Kunert et al., 2017).

A recarga do aquífero no período de 715 dias foi de 4195 mm (Figura 3). A precipitação total do

mesmo período foi de 6224 mm, quase totalizando dois anos, com uma média próxima de 3100 mm. Os municípios de Bujaru e Barcarena, próximos a área de estudo localizada em Mojú, apresentaram precipitação acumulada média anual de 4.186 mm e 3.307 mm respectivamente (Santos, 2017).



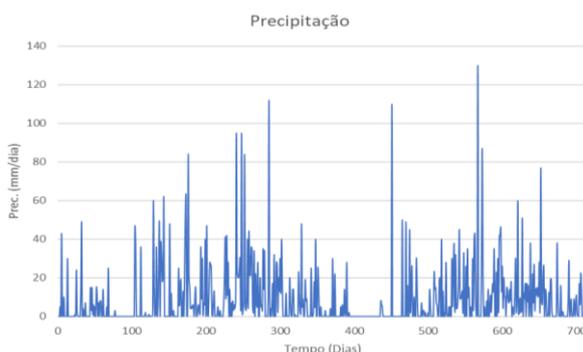
**Figura 3.** Simulação da recarga do aquífero em áreas de Latossolo Amarelo, em Mojú - PA.

Na sequência, apresentam-se os resultados diários da recarga de aquífero, precipitação e evaporação.

As taxas de precipitação mais intensas foram nos dias 143, 176, 241, 248, 252, 285, 451, 567 e 573 com valores variando entre 84 a 130 mm por dia (Figura 4). Seguindo as taxas de precipitação, os dias mais intensos de recarga do aquífero ocorrem nos dias 144, 177, 249, 253, 286, 568 e 574, subsequentes às taxas intensas de precipitação (Figura 5). Os dias citados estão nos meses de novembro a maio, que apresentaram maior intensidade de chuvas.

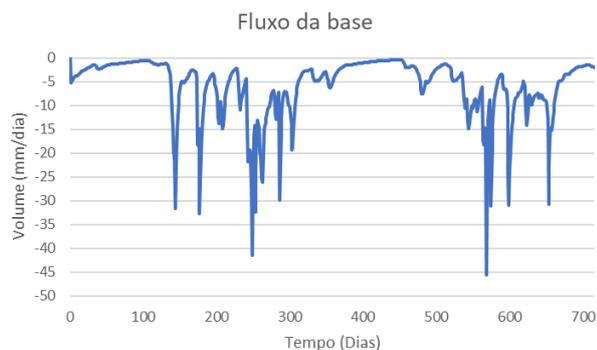
Na evaporação potencial (Figura 6) podemos observar que nos dias após as altas taxas de precipitação, as taxas de evaporação se mantêm altas entre os dias 144-149, com taxas de 4,2 a 4,7 mm/dia, nos dias 241-250, taxas de 2,6 a 3,9 mm/dia e nos dias 567-573, temos taxas de 3,6 a 4,2 mm/dia.

A recarga dos aquíferos sofre variações de acordo com as diferentes taxas de precipitação e evaporação durante o ano, como consequência temos períodos com maiores volumes de água infiltrada que eventualmente alcançaram a zona saturada do perfil de solo. Os fluxos de recarga variaram entre 30 e 46 mm/dia nos períodos de maior precipitação, enquanto boa parte do ano não ultrapassa 10 mm/dia.

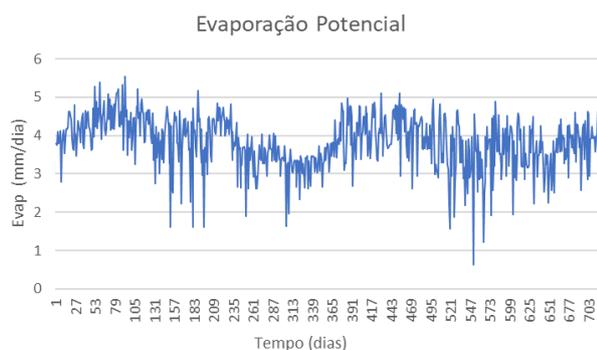


**Figura 4.** Precipitação diária para o período de 01/08/2009 a

16/07/2011 para a cidade de Mojú - Pará.



**Figura 5.** Recarga do aquífero simulada em Latossolo Amarelo, sem vegetação em Mojú - PA.



**Figura 6.** Evaporação Potencial do período de 01/08/2009 a 16/07/2011 para a cidade de Mojú - Pará.

## CONCLUSÕES

No período do estudo, a recarga do aquífero foi estimada em 4195 mm. Tendo uma variação entre 30 mm/dia e 46 mm/dia.

A recarga apresentou valores elevados, pois o cenário considerado era sem vegetação, apenas com perdas de água por evaporação. Em áreas vegetadas naturais e plantadas se espera um menor fluxo para os aquíferos.

No futuro, este trabalho se expandirá para uma simulação de recarga de aquífero com cenário de plantação de palma de óleo, estimando também a evapotranspiração e os fluxos de íons de ferro em áreas sem vegetação e áreas com palma de óleo.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos pelo apoio na coleta e análise dos dados, à equipe da Marborges, à disponibilidade dos estudos desenvolvidos pelo Dr. Rodrigo Sondermann Muniz e a equipe da Embrapa Solos.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy, 1998.

ANDRADE, V.M.S., CORDEIRO, I.M.C.C., SCHWARTZ, G., RANGEL VASCONCELOS, L.G.T., OLIVEIRA, F.A. Considerações sobre clima e aspectos edafoclimáticos da mesorregião nordeste paraense. In: CORDEIRO, I.M.C.C., RANGEL VASCONCELOS, L.G.T., SCHWARTZ, G., OLIVEIRA, F.A. (Org.), Nordeste paraense: panorama geral e uso sustentável das florestas secundárias. 1. ed. Edufra, Belém, pp. 59-96. 2017.

FILHO, J. M. Ocorrência das Águas Subterrâneas In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed., rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM; LABHIIH, 2008. 812 p. 2008.

GONÇALVES, M. C. RAMOS, T. B., SIMÚNEK, J., NEVES, M. J., MARTINS, J. C., PIRES, F. P., LEITÃO, P. Modelação da dinâmica da água e dos sais num Aluviosolo regado com águas de diferente qualidade: ensaio de validação do modelo HYDRUS-1D com observações em monólitos. Revista de Ciências Agrárias, 2017. v.30, n.2.

INMET. «Banco de dados meteorológicos». Consultado em 13 de fevereiro de 2022.

KUNERT, N., APARECIDO, L. M. T., WOLFF, S., HIGUCHI, N., DOS SANTOS, J., DE ARAUJO, A. C., TRUMBORE, S. A revised hydrological model for the Central Amazon: The importance of emergent canopy trees in the forest water budget. Agricultural and Forest Meteorology, 2017. v. 239, pp. 47-57.

MACHADO, A. L. S.; PACHECO, J. B. Serviços Eossistêmicos e o Ciclo Hidrológico da Bacia Hidrográfica Amazônica. Geonorte, 2010. v. 1, p. 71-89, 2010.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resource Research. 1976. v.12 (3), pp. 513-522.

MUNIZ, R.S. Alterações do Fluxo Hídrico e seus Efeitos na Dinâmica do Ferro e na Estrutura de um Latossolo Amarelo na Amazônia. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ. 2017. 142 p.

RAIDLA, V., KERN, Z., PÄRN, J., BABRE, A., ERG, K., IVASK, J., KALVĀNS, A., KOHĀN, B., LELGUS, M., MARTMA, T., MOKRIK, R., POPOVS, K., & VAIKMĀE, R. A  $\delta^{18}\text{O}$  isoscape for the shallow groundwater in the Baltic Artesian Basin. Journal of Hydrology, v. 542, 254-267, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.004>

REBOUÇAS, A. C. Águas Subterrâneas. In: REBOUÇAS, A. C; BRAGA, B; TUNDISI, J.G. (Orgs). Águas doces no Brasil: Capital ecológico, uso

e conservação. 3. ed. São Paulo: Escrituras editora, 2006.

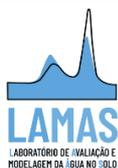
SANTOS, H.G., JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H.C., OLIVEIRA, V.A., LUMBRERAS, J.F., COELHO, M.R., ALMEIDA, J.A., CUNHA, T.J.F., OLIVEIRA, J.B. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. revisada e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 353p. 2013.

SANTOS, M. R. S. A precipitação climática na mesorregião metropolitana de Belém e suas implicações socioambientais. Pós-Graduação em Ciências Ambientais. Dissertação. UFPA 152 pág. 2017.

SENNA, M.C.A., COSTA, M.H., DAVIDSON, E.A., NOBRE, C.A. Modeling the impact of net primary production dynamics on post-disturbance Amazon savannization. Anais da Academia Brasileira de Ciências (Impresso), v. 86, pp. 621-632. 2014.

ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; SAITO, M. H.; SAKAI, M.; VAN GENUCHTEN, M. T. The HYDRUS-1D Software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated Media. Version 4.08. Riverside, USA: University of California, Department of Environmental Sciences, 2009. 332p.

van GENUCHTEN, M.TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Society of America Journal, v.44, pp. 892 - 898. 1980.



# Workshop de Simulação de Fluxos de Água e Solutos no Solo

Embrapa Solos e Universidade do Estado do Rio de Janeiro

## Estimativa de recarga da água subterrânea na ilha de São Luís-MA: análise de uma série temporal de 27 anos

Groundwater recharge estimate on the island of São Luís - MA: analysis of a 27-year time series

**Alba Leonor da Silva Martins<sup>(1)</sup>; Wenceslau Geraldes Teixeira<sup>(2)</sup>; Edgar Shinzato<sup>(3)</sup>  
Marlen Barros e Silva<sup>(4)</sup>; Rogério Valença Ferreira<sup>(5)</sup>; Alexandre Ortega Gonçalves<sup>(6)</sup>**

(1) Pesquisadora Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, alba.leonor@embrapa.br (apresentadora do trabalho); (2) Pesquisador Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, wenceslau.teixeira@embrapa.br; (3) Pesquisador do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Rio de Janeiro, RJ, edgar.shinzato@cprm.gov.br; (4) Professora da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), marlenbarros2012@gmail.com; (5) Pesquisador do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Rio de Janeiro, RJ, rogerio.ferreira.gov.br; (6) Pesquisador Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, alexandre.ortega@embrapa.br

**RESUMO:** Os estudos de modelagem para avaliação da recarga dos aquíferos são essenciais à gestão dos recursos hídricos. A vulnerabilidade das águas subterrâneas constitui uma preocupação na ilha de São Luís (MA), onde a salinização pela intrusão da água do mar nos aquíferos pode estar associada à sobre extração de água subterrânea e redução dos níveis do aquífero em áreas costeiras em decorrência da excessiva perfuração de poços. Esse estudo objetivou estimar a recarga da água subterrânea na ilha de São Luís a partir da análise de uma série temporal de 1994 a 2020 com o uso do Hydrus-1D. Os resultados durante os 27 anos de simulação apresentaram uma taxa de recarga média de 1.333 mm/ano e uma taxa de recarga acumulada (*cumulative bottom flux*) de 36.000 mm. O balanço hídrico para os dois anos mais secos apresentou, respectivamente, taxas de recargas de 504 e 571 mm/ano e o mais chuvoso 2105 mm/ano.

**Palavras-chave:** Hydrus-1D; modelo de simulação de fluxos; aquífero.

**ABSTRACT:** Modeling studies to assess aquifer recharge are essential for water resources management. The vulnerability of groundwater in aquifers is a concern on the island of São Luís (MA) where salinization caused by seawater intrusion in aquifers can be associated with groundwater overdraft and lowered water levels in coastal areas because of excessive well drilling. This study aimed to estimate groundwater recharge on the island of São Luís from the analysis

of a time series from 1994 to 2020 using Hydrus 1D. The results over the 27-year simulation showed an average recharge rate 1.333 mm/year and cumulative bottom flux reached 36.000 mm. The water balance for the two driest showed respectively recharge rates of 504 and 571 mm/year and wettest years 2105 mm/year.

**Keywords:** Hydrus-1D; flow simulation model; aquifer.

### INTRODUÇÃO

No ciclo hidrológico, o estudo de avaliação da recarga dos aquíferos é essencial para fins de gestão dos recursos hídricos e de transporte de poluentes e constitui um componente laborioso para a quantificação em uma determinada área, sendo consequência das variabilidades temporal e espacial das chuvas e das características dos materiais geológicos superficiais e profundos, topografia, vegetação e uso do solo. Sem sua adequada avaliação, os aquíferos podem ser explorados além dos limites sustentáveis para uma determinada região ou mesmo serem submetidos a elevado risco de contaminação em função do uso da água (Fagundes, 2010).

De acordo com Santos (2012), a recarga dos aquíferos pode ser estimada por várias metodologias: métodos diretos como o balanço hídrico, modelos físicos e determinísticos ou métodos indiretos (zona insaturada) como a oscilação piezométrica, traçadores ambientais ou artificiais e estimativa Darcyana, modelagens numéricas ou soluções numéricas das equações que regem o escoamento em meios porosos.

Modelos de simulação de fluxos de água são utilizados para simular processos hídricos na zona insaturada (vadosa) do solo, sendo também requisito para o entendimento dos processos de drenagem e recarga dos lençóis freáticos.

A ilha de São Luís, constituída pelos municípios de São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa, apresenta a maior concentração populacional do estado do Maranhão, estimada em 1.409.162 habitantes (IBGE, 2017). De acordo com Sousa (2021) o sistema de abastecimento urbano na ilha de São Luís mostra que os mananciais superficiais representam 56,86% do abastecimento da área, contra 43,14% dos mananciais subterrâneos.

A contribuição da água subterrânea para o abastecimento urbano da ilha de São Luís é garantida, principalmente, pelos sistemas produtores do Paciência (I e II) e do Sacavém, compostos por poços tubulares que exploram os recursos hídricos dos aquíferos Barreiras e Itapecuru, respectivamente. Outros conjuntos de poços, em menor escala geográfica, garantem o abastecimento urbano.

Considerando a vulnerabilidade das águas subterrâneas em aquíferos, a preocupação com o controle das águas aumenta pelo fato de São Luís ser uma ilha, onde a salinização pela água do mar nos aquíferos pode ser provocada por bombeamento nas áreas próximas ao litoral em decorrência da excessiva perfuração de poços.

Diante do exposto, esse estudo objetivou estimar a recarga da água subterrânea na ilha de São Luís (MA) a partir da análise de uma série temporal de 27 anos (1994 a 2020) com o uso da modelagem no Hydrus-1D.

## MATERIAL E MÉTODOS

Esse estudo de modelagem da recarga da água subterrânea na ilha de São Luís consiste na continuidade da etapa realizada em 2017–2018 onde foram realizadas avaliações da velocidade de infiltração básica (VIB), retenção da água e condutividade hidráulica saturada (Kfs) nos solos da ilha, através da parceria entre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), com apoio da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) e do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).

A ilha de São Luís está situada na região costeira do Estado do Maranhão, limitando-se ao norte com o Oceano Atlântico; ao sul, com a baía de São José e o Estreito dos Mosquitos; a leste com a baía de São José e a oeste com a baía de São Marcos.

O clima local, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Aw', com índice pluviométrico médio em torno de 2.000 mm/ano.

A área selecionada para o estudo da modelagem se localiza próxima a um dos poços tubulares da Companhia de Águas e Esgoto do Maranhão (CAEMA), no bairro do Sacavém (latitude 583481 e longitude 9716888). A área está inserida na bacia hidrográfica do rio Bacanga sobre o aquífero

Itapecuru. O solo do local foi classificado como um Argissolo Vermelho–Amarelo pelos autores, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018).

Na etapa realizada entre 2017 a 2018, a VIB foi determinada com um infiltrômetro de anel (*single ring*) e a Kfs pelo método do Permeâmetro de Guelph (Teixeira et al., 2020). A análise de retenção de água no solo foi realizada conforme Teixeira e Bhering (2017) com a determinação da umidade volumétrica nos potenciais: 0, 1, 3, 6, 10, 33, 100, 1.500 kPa, sendo os dados em função do potencial ajustados para a equação de van Genuchten (1980) utilizando o software RETC 6.02 (van Genuchten et al., 1991). As funções hidráulicas do solo foram consideradas segundo os modelos de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980), relacionando o potencial matricial do solo com a umidade volumétrica, e expressando-se a condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica.

A modelagem de forma direta realizada no programa HYDRUS-1D, utiliza o modelo numérico pelo método dos elementos finitos para a simulação da dinâmica de água, vapor, solutos e calor em meios porosos (Šimůnek et al., 2013). O fluxo de água no solo ou fluxo em meio poroso insaturado é descrito pela equação de Richards (Richards, 1931), uma extensão da equação de Darcy, com a condutividade expressa em função da sucção matricial (Hillel, 1998). O modelo unidimensional para o fluxo vertical incorpora o termo (*Sink*) relativo à extração de água pelas raízes e contempla a evapotranspiração.

Na estimativa de recarga do modelo foi assumido um perfil vertical unidimensional na profundidade do lençol freático de 20 m. Esse perfil, caracterizado com textura franco-arenosa, foi separado em duas camadas no HYDRUS, a primeira a 20 cm da superfície e a segunda camada foi considerada até a altura do lençol freático a 20 m. Acima do lençol foi estabelecida uma franja capilar a uma altura de 10 cm. Assumiu-se que as distribuições de raízes se comportam linearmente uniforme da superfície até a profundidade máxima de enraizamento de 60 cm e combinaram com o modelo de resposta ao estresse hídrico de Feddes et al. (1978) modificado por van Genuchten (1987) para incluir estresse osmótico que explica a absorção de água pela raiz da pastagem, vegetação presente na área de estudo.

Como condições de fronteira superior, foram estabelecidas as condições atmosféricas variáveis (evapotranspiração potencial e precipitação efetiva) sem escoamento superficial e para as condições de fronteira inferior, foi considerada a drenagem livre. Para o cálculo da evapotranspiração potencial foram utilizados dados de radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar empregando-se a equação de Penman-Monteith

(Allen et al., 1998). Os dados meteorológicos foram obtidos de diversas estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020) e outras (ANA Hidroweb, Nasa Power) para complementação da série temporal de 1994 a 2020.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados foram discutidos conforme van Genuchten et al. (2014).

O padrão de chuva apresentou um índice com dois períodos bastante distintos, um chuvoso (de janeiro a junho) e outro de estiagem (de julho a dezembro), típico da região da ilha de São Luís. No período simulado, a menor taxa média anual de precipitação pluvial ocorreu em 2012 com 1.133 mm/ano e a mais elevada ocorreu em 2009 com 2.847 mm/ano (Figura 1).

A Figura 2 mostra a taxa de transpiração cumulativa (16.523 mm) para a recarga durante os 27 anos de simulação.

O fluxo de recarga anual (Figura 3) e a taxa de transpiração cumulativa de água pela raiz (Figura 2) mostram a estreita correlação com os dados de precipitação (Figura 1), sendo crescente a recarga quando a precipitação é mais elevada.

A taxa de recarga mais alta corresponde à taxa máxima de precipitação que ocorreu no ano de 2009. A taxa de recarga média durante os 27 anos foi de aproximadamente 1.333 mm/ano e a taxa de recarga acumulada (*cumulative bottom flux*) nesse período foi de 36.000 mm (Figura 4). O balanço hídrico para os dois anos mais secos apresentou, respectivamente, taxas de recargas de 504 e 571 mm/ano e o mais chuvoso 2.105 mm/ano (Figura 3), demonstrando a importância de se considerar um período histórico para os cálculos de recarga e não apenas a média anual de precipitação local. Observa-se que no ano de 1994 (Figura 3) a recarga mais elevada pode ter ocorrido devido ao teor de umidade muito alto no perfil inicial do HYDRUS, por isso, não foi considerada na discussão como sendo a maior.

## CONCLUSÕES

Nos cálculos das taxas de recarga torna-se importante considerar um período histórico das variações de precipitação local e não apenas uma média anual da precipitação para evitar subestimativas ou superestimativas e que os aquíferos sejam explorados além dos limites sustentáveis para uma determinada região. Neste estudo, a média da recarga para os 27 anos foi 1.333 mm/ano e correspondeu a precipitação média de 2.164 mm/ano. No ano mais seco, a precipitação média foi de 1.133mm/ano e contribuiu para uma recarga de 571

mm/ano, enquanto no mais chuvoso a precipitação média de 2.847 mm/ano contribuiu para uma recarga de 2.105 mm/ano.

## AGRADECIMENTOS

A Aline Mari Huf dos Reis pela contribuição na elaboração e formatação dos gráficos.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, p. 1-333, 1998.

ANA. Agência Nacional das Águas. HIDROWEB. Portal do SNIRH- Sistema Nacional de informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 12 dez. 2021.

FAGUNDES, J.R.T. **Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos-SP**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2010. 397 p.

FEDDES, R.A.; KOWALIK, P.J.; ZARADNY, H. **Simulation of field water use and crop yield**. Wageningen, PUDOC, 1978. (Simulation Monograph Series).

HILLEL, D. Environmental soil physics. San Diego: Academic, 1998. 757p.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Censo Demográfico, 2017. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em: 12 dez. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – INMET. Normais Climatológicas (1994/2020). Brasília - DF, 2020.

NASA POWER. Power Data access Viewer - Meteorological Data. Disponível em: <<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (nasa.gov)>. Acesso em: 12 dez. 2021.

RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through Porous Mediums. **Journal of Applied Physics**, 1, 318-333, 1931 <http://dx.doi.org/10.1063/1.1745010>.

ŠIMŮNEK. **Manual do Hydrus-1D**. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple

Solutes in Variably-Saturated Media Department of Environmental Sciences., University of California Riverside, 2013.

SANTOS, R.M. dos. **Recarga de águas subterrâneas em ambientes de Cerrado: Estudo com base em modelagem numérica e simulação hidrológica em uma bacia experimental.** Tese (Doutorado). Universidade de Brasília. 2012. 195 p.

SANTOS, H.G., JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBRETERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; ARAÚJO FILHO, J.C. de; OLIVEIRA, J. B. de CUNHA, T.J.F. 2018. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5ed. Brasília-DF: Embrapa. 553p. (also available at: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181677/1/SiBCS-2018-ISBN9788570358172.epub.>).

SOUSA. C. J. da SILVA de. **Caracterização dos aquíferos na Ilha do Maranhão: reconhecimento, levantamento de áreas estratégicas e contribuições ao processo de gestão.** Tese (Doutorado). Universidade de Brasília. 2021. 254 p.

TEIXEIRA, W.G.; BHERING, S. **Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards.** In: TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (ed.). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 34-46.

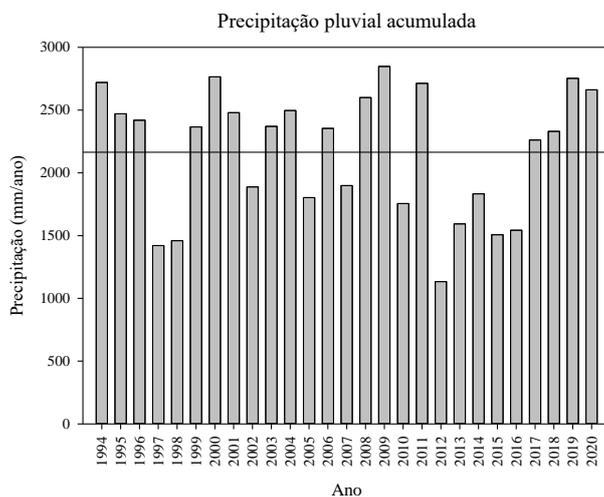
TEIXEIRA, W.G., OTTONI, M.V.; ARMINDO, R.A.; MARTINS, A.L. da S.; LUMBRETERAS, J.F.; SILVA, A.C. da; SILVA, M.B. e; FERREIRA, R.V.; SHINZATO, E. 2020. **Estimativas e avaliação da velocidade de infiltração e da condutividade hidráulica saturada em solos do estado do Maranhão.** In Silva, M.B. e; Lumbreteras, J.F.; Oliveira, V.A. de; Coelho, M.R. (eds). Guia de campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC do Maranhão. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa. E-book. cap. 15 (disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/218466/1/Guia-de-campo-da-XIII-RCC-Maranhao.epub.>>).

van GENUCHTEN, M.T. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** *Soil Science Society America Journal*: 44, 892-89, 1980.

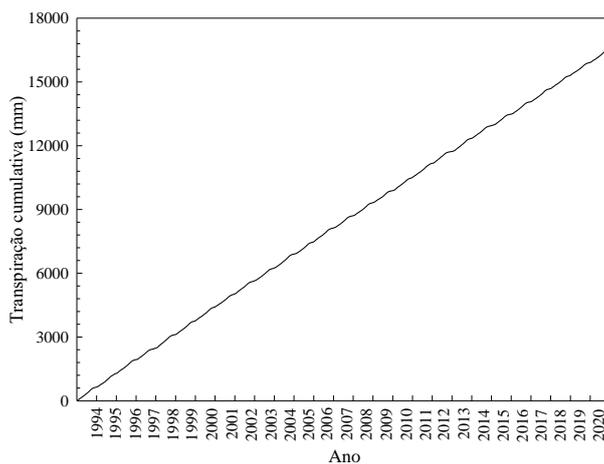
van GENUCHTEN, M. T. **A numerical model for water and solute movement in and below the root zone.** Unpublished Research Report, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA, 1987.

van GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.** US Salinity Lab., USDA, Riverside, CA, 1991.

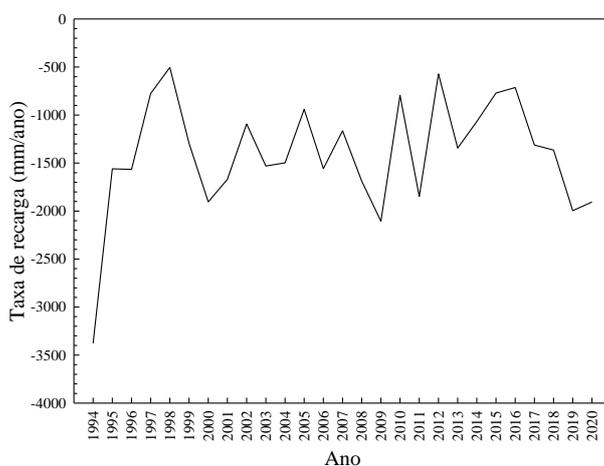
van GENUCHTEN, M.T; NAVEIRA-COTTA, C.; SKAGGS, T.H.; RAOOF, A.; PONTEDEIRO, E.M. **The Use of Numerical Flow and Transport Models in Environmental Analyses.** Chapter 15. 2014. In: TEIXEIRA, W.G.; CEDDIA, M.B.; OTTONI, M.V.; DONNAGEMMA, G.K. Application of Soil Physics in Environmental Analyses Measuring, Modelling and Data Integration. Springer International Publishing Switzerland 2014, 499 p.



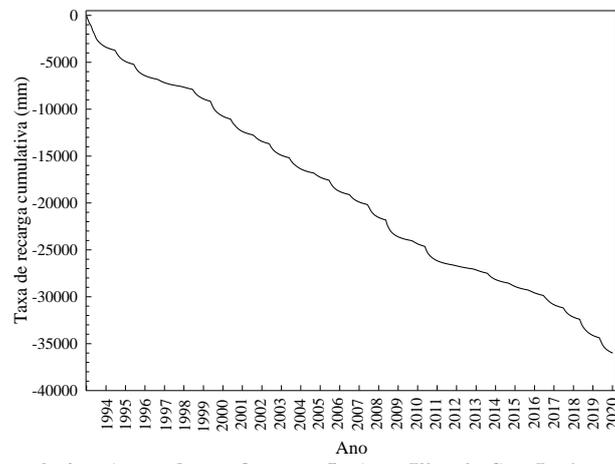
**Figura 1.** Precipitação pluvial acumulada de taxas anuais para a recarga na Ilha de São Luís para o período de 1994 a 2020.



**Figura 2.** Taxa de transpiração cumulativa para a recarga na Ilha de São Luís para o período de 1994 a 2020.



**Figura 3.** Taxa de recarga anual (*bottom flux*) na Ilha de São Luís para o período de 1994 a 2020.



**Figura 4.** Taxa de recarga cumulativa (*cumulative bottom flux*) na Ilha de São Luís para o período de 1994 a 2020.

## Caracterização e regime hídrico de uma área com vegetação florestal no Jardim Botânico do Rio de Janeiro

Description and water regime of an area with forest vegetation in the Botanical Garden of Rio de Janeiro

**Patrícia Guedes Pimentel**<sup>(1)</sup>; **Wenceslau Gerales Teixeira**<sup>(2)</sup>; **Alexandre Ortega Gonçalves**<sup>(3)</sup>

(1) Doutoranda em Engenharia Ambiental pela UERJ, Rio de Janeiro, RJ, [engpatriciapimentel@gmail.com](mailto:engpatriciapimentel@gmail.com); (2) Pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ e Doutor em Geoecologia pela Universidade de Bayreuth, Alemanha [wenceslau.teixeira@embrapa.br](mailto:wenceslau.teixeira@embrapa.br); (3) Pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ e Doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela USP, São Paulo, SP [alexandre.ortega@embrapa.br](mailto:alexandre.ortega@embrapa.br)

**RESUMO:** O entorno do Jardim Botânico do Rio de Janeiro (JBRJ) é caracterizado por uma densa ocupação populacional que, conseqüentemente, modificou determinadas características da região, a exemplo do aumento da impermeabilização do solo afetando diretamente o ciclo hidrológico local. Juntamente aos problemas de drenagem existentes no bairro, observam-se eventos de alagamentos e inundações cada vez mais frequentes. O presente estudo tem como objetivo caracterizar o regime hídrico de uma amostra de solo do Jardim Botânico para que, futuramente, seja possível quantificar o balanço hídrico da região e determinar a influência dos tipos de solos e da vegetação no ciclo hidrológico. Para isso, foi utilizado o programa HYDRUS-1D e informações de uma amostra de solo localizada no Roseiral do JBRJ. As simulações foram realizadas em uma série histórica de 20 anos, no período compreendido entre 2000 e 2020. Os resultados permitiram estimar os componentes do balanço hídrico da amostra que envolvem a evapotranspiração real da vegetação. A pesquisa demonstrou grande relevância para a compreensão da influência do JBRJ no bairro em questão. Em estudos futuros, espera-se estimar de forma mais precisa os dados de entrada na simulação, que certamente irão conferir resultados mais satisfatórios.

**Palavras-chave:** Simulação; ciclo hidrológico; HYDRUS-1D.

**ABSTRACT:** The surroundings of the Rio de Janeiro Botanical Garden (JBRJ) are due to a dense population occupation that, consequently, changed certain characteristics of the region, an example of the increase in soil sealing directly affecting the local hydrological cycle. Alongside the drainage problems in the neighborhood, there are increasingly frequent flooding events. This study aims to characterize the water regime of a soil sample from the Botanical Garden so that, in the future, it will be possible to quantify the water balance of the region and determine the influence of soil types and vegetation

on the hydrological cycle. For this, it was used in the HYDRUS-1D program and information from a soil sample located in Roseiral do JBRJ. The simulations were carried out over a 20-year historical series, with no period between 2000 and 2020. The results allowed us to estimate the components of the water balance of the sample that involve the actual evapotranspiration of the vegetation. Great specialized research for understanding the understanding of the JBRJ in the neighborhood in question. In future studies, it is expected to estimate the input data more accurately in the simulation, which aims to provide more satisfactory results.

**Keywords:** Simulation; hydrological cycle; HYDRUS-1D.

### INTRODUÇÃO

O município do Rio de Janeiro abriga diversas áreas protegidas, dentre elas os jardins botânicos normatizados pela Resolução CONAMA n° 339 de 25 de setembro de 2003 – baseada nas atribuições conferidas pelos Arts. 6° e 8°, da Lei n° 6.938 de 31 de agosto de 1981 e regulamentada pelo Decreto no 99.274 de 6 de junho de 1990.

De acordo com Miranda (2009) existem 34 jardins botânicos catalogados no Brasil, que estão distribuídos da seguinte forma: Norte (3), Nordeste (5), Centro-oeste (3), Sudeste (16) e Sul (7). Considerados de boa estrutura e enquadrados na categoria B da Resolução CONAMA n° 339/2003, estão os jardins botânicos de São Paulo e do Rio de Janeiro.

O Jardim Botânico do Rio de Janeiro (JBRJ) conta com o Horto Florestal, Jardim Japonês, Jardim Sensorial, Bromeliário, Cactário, Orquidário, Roseiral, Insetívoras, Herbário, Museu do Meio Ambiente – reservado para exposições temporárias, Centro de Visitantes, Núcleo de Educação Ambiental, Patrimônio Histórico e Cultural, e outros espaços naturalmente ricos e com informações valiosas da história do lugar.

No entorno do JBRJ, observam-se áreas densamente urbanizadas que foram sendo ocupadas no decorrer dos anos e que, aliado aos problemas de drenagem existentes no bairro, contribuem para a ocorrência de eventos de alagamentos e inundações cada vez mais frequentes na região.

Considerando o exposto, o objetivo da presente pesquisa é caracterizar o regime hídrico a partir de uma amostra de solo do Jardim Botânico para que, futuramente, seja possível quantificar o balanço hídrico da região e determinar a influência dos tipos de solos e da vegetação no ciclo hidrológico local.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para realizar a pesquisa, foram necessários os dados iniciais de latitude e os valores das variáveis meteorológicas de temperatura e precipitação. Os dados de evapotranspiração foram estimados com base no estudo de Monteiro et al. (2016) que utiliza apenas a temperatura como parâmetro de calibração, com a possibilidade de aplicação para diversas condições climáticas do país.

Com relação aos dados diários de precipitação, estes foram obtidos no portal da Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (GEO-Rio), e compilados no período entre 2000 e 2020, caracterizando uma série histórica de 20 anos.

É válido mencionar que o trabalho foi desenvolvido remotamente, considerando a Pandemia de Covid-19 presente desde 2020. Assim, foram coletadas informações da área de estudo por meio de materiais disponibilizados pela Embrapa Solos e outras fontes de pesquisa, foi selecionado o perfil de solo localizado em um dos canteiros do Roseiral Pedro Cachimbo.

Para a modelagem hidrológica, foi utilizado o Hydrus-1D que simula o fluxo de água no solo, resolvendo numericamente a equação de Richards na direção vertical (Equação 1).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

em que:  $\theta$  é o conteúdo volume de água ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) no solo,  $t$  é o tempo (min),  $\psi$  é a tensão matricial (cm),  $K$  é a condutividade hidráulica ( $\text{cm min}^{-1}$ ) do solo e  $z$  é a coordenada vertical (positiva para cima).

O Hydrus-1D é um modelo consolidado para a predição do fluxo de água no solo, portanto para a primeira etapa da modelagem determinou-se a simulação de fluxo de água (*Water Flow*) e absorção de água pela raiz (*Root Water Uptake*). Em seguida, para a determinação das informações geométricas, a pesquisa foi delimitada em um único tipo de solo com duas camadas para o balanço de massa, e profundidade máxima de 150 cm.

Na sequência, foram adicionadas as informações de tempo com base na série histórica coletada no portal da GEO-Rio, referente ao pluviômetro mais

próximo localizado no Jôquei Clube. A série histórica de 20 anos perfaz um total de 7671 dias analisados. Os dados de evapotranspiração real precisaram ser ajustados conforme o coeficiente de cultivo local (vegetação arbórea), por meio da Equação 2, apresentada por Doorenbos e Pruitt (1977).

$$Kc = \frac{ETc}{ETo} \quad (2)$$

em que:  $Kc$  é o coeficiente de cultura (adimensional),  $ETc$  é a evapotranspiração da cultura ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) e  $ETo$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

Portanto, a partir do estudo de Monteiro et al. (2016) – a evapotranspiração da cultura ( $ETc$ ) e os coeficientes de cultivo ( $Kc$ ) de mudas florestais tropicais e o estudo de Funari e Pereira Filho (2020) – a evapotranspiração potencial em uma área do bioma de Mata Atlântica na Região Metropolitana de São Paulo, verificou-se que o coeficiente de cultura para o tipo de cobertura do solo em análise possui valor médio de 0,69. Neste caso, adotou-se para a presente pesquisa  $Kc$  igual a 0,70.

A estimativa dos valores de evaporação e transpiração teve como referência os dados diários calculados de  $ETc$ . Assim, estipulou-se que para a evaporação o valor corresponderia a 1/3 da  $ETc$  e para a transpiração seria adotado 2/3 da  $ETc$ .

Para a seleção dos tempos de impressão (*Print Times*) capazes de gerar informações mais detalhadas nos *outputs*, foram escolhidos os seis dias com precipitações mais expressivas, ou seja, datas que refletem possíveis eventos de alagamentos na região.

Na etapa referente ao critério de iteração adotou-se 10 como número máximo de iterações. Quanto ao Modelo Hidráulico do Solo, foram mantidos os valores como padrão. O Manual do Hydrus-1D (Šimůnek et al., 2013) explica que as aplicações de modelos de fluxo insaturado muitas vezes assumem funções de valor único (*No Hysteresis*) para  $\theta(h)$  e  $K(h)$ , para caracterizar as propriedades hidráulicas em um determinado ponto no perfil do solo. Para este estudo, não foram considerados valores de histerese e o modelo adotado para caracterização hidráulica foi o unimodal de van Genuchten (1980).

Em seguida foram estimados os parâmetros de fluxo de água  $\theta_r$  (umidade volumétrica residual),  $\theta_s$  (umidade volumétrica na saturação),  $\alpha$  e  $n$  (parâmetros de ajuste) em função dos atributos do solo. Para o cálculo de cada parâmetro, foram utilizados os dados percentuais de areia, silte, argila e carbono orgânico (CO), extraídos do material “Identificação de limitações pedológicas e ambientais causadoras da degradação de áreas do Jardim Botânico do Rio de Janeiro” de autoria de Calderano Filho et al. (1992).

As Funções de Pedotransferência – do inglês *Pedotransfer Functions* (PTFs), são funções matemáticas modeladas e validadas que possibilitam

estimar atributos de difícil obtenção por meio de propriedades de mais fácil acesso, como por exemplo, dados de densidade do solo, de textura, carbono orgânico, CTC. Segundo Gomes (2014) a expressão criada por Bouma (1989) significa “transformando dados que possuímos em dados que necessitamos”.

Com base na quantidade de variáveis independentes e da faixa de variação dos valores do solo, optou-se por utilizar a equação de Tomasella e Hodnett (1998) para estimar a densidade aparente do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ) – do inglês *Bulk Density* (BD), apresentada pela Equação 3 a seguir:

$$BD = 1,578 - 0,054 \times (\% CO) - 0,006 \times (\% silte) - 0,004 (\% argila) \quad (3)$$

Os valores de areia, silte e argila foram, respectivamente, iguais a 41, 16,5 e 42,5%, apresentando-se dentro dos intervalos apresentados por Tomasella e Hodnett (1998) para esta PTF. Portanto, o resultado para a estimativa da densidade aparente foi de 1,249, sendo adotado o valor de  $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ .

Para estimar pela PTF, os parâmetros de fluxo de água, utilizou-se o estudo de Tomasella et al (2000) que apresenta os valores texturais médios de 21,82% (0 - 74,6%) para areia grossa, 18,78% (0 - 93%) para areia fina, 15,70% (0 - 71%) para silte, 43,73 % (1,70 - 96%) para argila, 9,133 g/kg (0,063 – 59,500 g/kg) carbono orgânico e 1,2742 g/cm (0,7800 – 1,9100 g/cm) densidade aparente.

De modo similar, estes intervalos médios também atendem aos valores obtidos pela amostra e foram inseridos no HYDRUS-1D. Os valores aproximados dos parâmetros de van Genuchten foram 0,193 ( $\theta_r$ ), 0,545 ( $\theta_s$ ), 0,519 ( $\alpha$ ) e 1,321 (n).

Os dados referentes ao perfil da amostra, descrição morfológica, e análises físicas e químicas extraídos de Calderano Filho et al. (1992) estão representados na Tabela 1. O Roseiral está situado em área de vegetação arbórea e passou por um processo de revitalização no ano de 2014.

DESCRIÇÃO DO PERFIL	
CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	Cambissolo Tb Distrófico Epieutrófico A
LOCALIZAÇÃO	Roseiral “Pedro Cachimbo” Seção 1, Canteiro 22-E
SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL	Coletado em área plana, com 0,2% de declive sob o plantio de rosas (que se estende para áreas de vegetação arbórea)
ALTITUDE	3,3 metros
MATERIAL ORIGINÁRIO	Sedimentos areno-silto-argilosos com depósitos de materiais de áreas circunvizinhas
DRENAGEM	Moderada/Imperfeitamente drenado
VEGETAÇÃO PRIMÁRIA	Mata Atlântica
USO ATUAL	Roseiral

CLIMA	Am - Clima tropical úmido ou subúmido
RAÍZES	Abundantes no Ap; comuns no Bi; raras no II C1, com diâmetro menor que 0,1 cm.

**Tabela 2** - Descrição do perfil de solo no Roseiral. Fonte: Adaptado de Calderano Filho et al. (1992).

O Manual Técnico de Pedologia do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2007) descreve as fases de drenagem do solo. Sabendo que a amostra selecionada no estudo está caracterizada entre moderada e imperfeitamente drenada, pode-se inferir que a permeabilidade do solo é lenta.

O teste de permeabilidade recomendado para caracterizar o solo fornece a velocidade da água no interior da massa do solo (IBGE, 2007). Considerando que a condutividade hidráulica ( $K_s$ ) não pôde ser medida em campo, foi observado o intervalo que deveria estar compreendido o valor a ser estimado por PTF, com base nos critérios de *Irrigated land use: land classification* (1953).

Portanto, a amostra classificada como lenta deve se enquadrar no intervalo entre 0,8 cm/h a 2,0 cm/h. A condutividade hidráulica ( $K_s$ ) teve como base a equação de Wösten et al. (1999) que considera os valores percentuais de silte, argila, carbono orgânico, densidade aparente e solo superficial (*topsoil*) – este último estipulado nulo por ser uma amostra de subsuperfície (Equação 4). Sendo assim, o valor de  $K_s$  foi estimado em 40 cm/dia.

$$Ks = \exp \exp [ 7.755 + 0.0352 \times silte + 0.93 \times solo\ superficial - 0.967 \times BD^2 - 0.000484 \times argila^2 - 0.000322 \times silte^2 + \frac{0.001}{silte} - \frac{0.0748}{CO} - 0.643 \times \ln \ln (silte) - 0.01398 \times BD \times argila - 0.1673 \times BD \times CO + 0.02986 \times solo\ superficial \times argila - 0.03305 \times solo\ superficial \times silte ] \quad (4)$$

Foram determinadas as condições de contorno superior e inferior da simulação. Para a superior adotou-se a condição atmosférica com escoamento superficial devido ao histórico de alagamentos da região. Já na condição inferior foi utilizada a opção de drenagem livre (*Free Drainage*), por não serem conhecidas as características do lençol freático (variação com o tempo e profundidade).

Além disso, foram necessários ajustes nos *Feddes Parameters*, ou seja, nas taxas de absorção das raízes em determinadas condições. O valor da carga de pressão abaixo da qual as raízes começam a extrair água do solo foi ajustado para -1 e o valor da carga de pressão abaixo da qual as raízes começam a extrair água na taxa máxima possível ficou em -10.

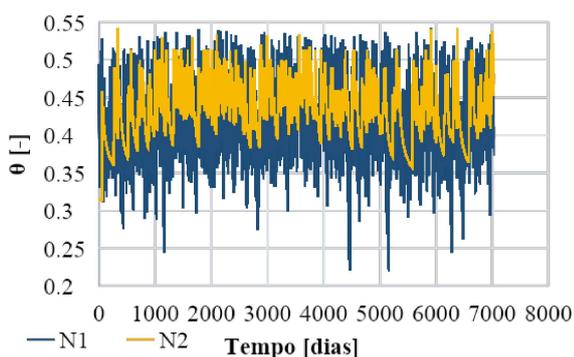
Sabe-se ainda que a distribuição espaço-temporal da absorção de água pela raiz (*Root Water Uptake*) depende da distribuição das raízes e da absorção compensatória das regiões mais úmidas da zona radicular. Nesse sentido, as alterações mais expressivas ocorreram nos demais parâmetros: valor

da carga de pressão limite abaixo do qual as raízes não podem mais extrair água na taxa máxima, na condição máxima de transpiração e o valor abaixo do qual cessa a absorção de água pela raiz.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a simulação no HYDRUS-1D, foi possível estimar os componentes do balanço hídrico da amostra que envolvem a evapotranspiração real das plantas. No editor gráfico do perfil do solo, foram definidos dois pontos de observação: N1 localizado mais próximo à superfície com aproximadamente 5 cm de profundidade, e N2 em cerca de 100 cm de profundidade, considerando um perfil homogêneo de 150 cm.

À medida que a água se infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão se umedecendo, alterando gradativamente o perfil de umidade. A Figura 1 ilustra a variação da umidade volumétrica do solo no período observado. Verifica-se então que, quanto mais próximo da superfície, mais expressivas são as variações de umidade, enquanto em maiores profundidades há menor variação dos valores de umidade no solo.



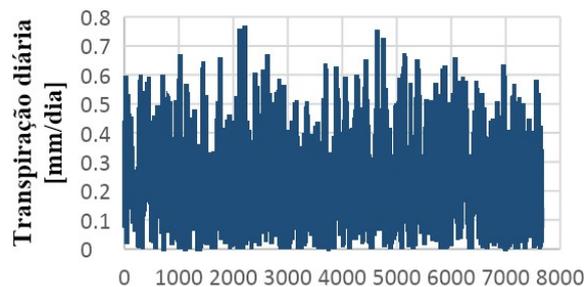
**Figura 1** – Variação da umidade volumétrica em duas profundidades no solo, em uma análise de 20 anos.

O gráfico de variação de umidade volumétrica, permite avaliar que as condições apresentadas estão condizentes com as características naturais de umidade do solo. No entanto, é válido mencionar que enquanto houver contribuição de água na superfície, o perfil de umidade tende à saturação ao longo de sua profundidade.

A análise da Figura 1 demonstra que o perfil de umidade tem relação direta com as demais parcelas do balanço hídrico, uma vez que apenas parte da umidade é drenada para as camadas mais profundas do solo, e o restante é transferido para a atmosfera ou escoado.

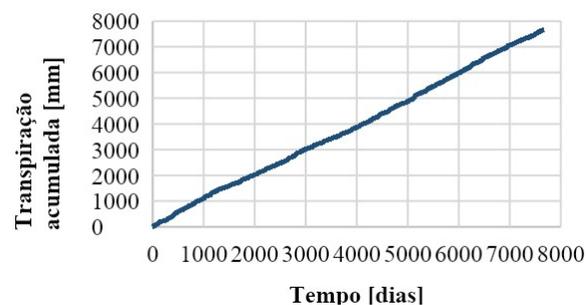
Na sequência, buscou-se analisar a absorção real de água pela raiz a fim de estimar para onde estão sendo destinados os volumes precipitados. Sabe-se que a transpiração ocorre a partir do gradiente de concentração de vapor de água entre as folhas e a atmosfera. A Figura 2 ilustra graficamente o

comportamento da absorção real de água pela raiz, que demonstra nos elevados picos, valores transpirados em torno de  $0,77 \text{ mm dia}^{-1}$  aproximadamente.



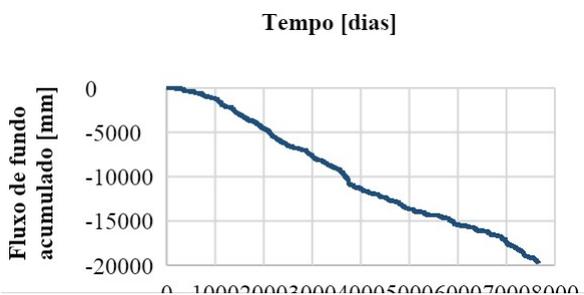
**Figura 2** – Variação da transpiração diária, com base em 20 anos de dados analisados

Os valores acumulados de absorção de água pela raiz no período de 20 anos, são apresentados na Figura 3. Nela, observa-se que o crescimento da curva está diretamente associado à transpiração realizada pela vegetação na área de estudo, a qual chegou a 7700 mm aproximadamente.



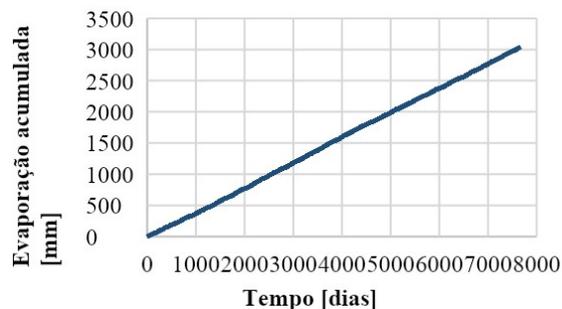
**Figura 3** – Transpiração real em valores acumulados.

A Figura 4 mostra o valor acumulado de água de 19780 mm que chega ao final do perfil do solo. O conhecimento desta informação permite avaliar algumas hipóteses com relação à recarga de mananciais na região.



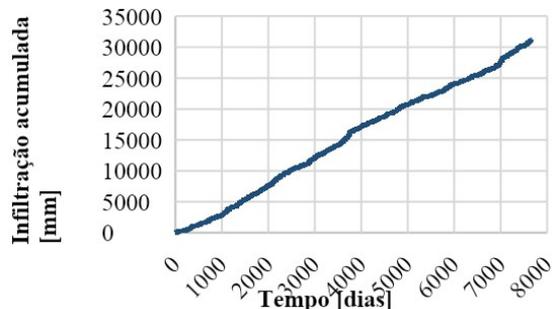
**Figura 4** – Valor acumulado do fluxo de fundo

Considerando que o valor aproximado de precipitação acumulada no período em questão foi 31300 mm, foram gerados gráficos que possibilitem representar as demais parcelas estimadas para o balanço hídrico da área de estudo. Nesse sentido, a Figura 5 ilustra o valor acumulado da evaporação que está estimada em 3040 mm.



**Figura 5** – Evaporação real em valores acumulados.

De modo similar, a Figura 6 apresenta o valor acumulado de infiltração com 31200 mm, que relacionado ao valor do fluxo de água que se encontra no fundo do perfil (*Cumulative Bottom Flux*) de 19800 mm, estima-se então que 11420 mm infiltraram passando pelas camadas do perfil, ficando retidos no solo ou sendo desviados.

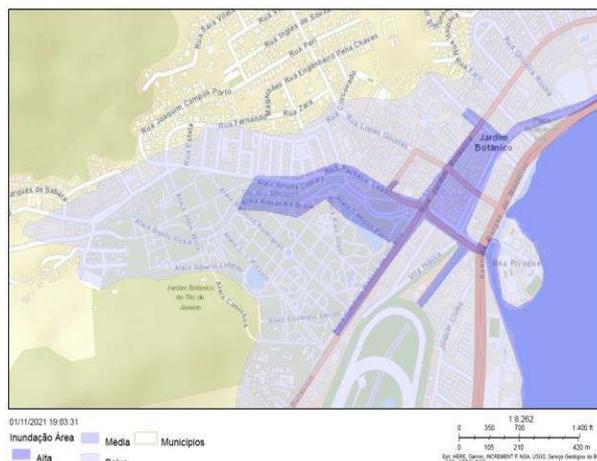


**Figura 6** – Infiltração em valores acumulados.

São vários os fatores que permitem justificar o alto valor de infiltração encontrado, como por exemplo, a possibilidade de um determinado horizonte não mapeado na pesquisa conter condutores de fluxos preferenciais, ou até mesmo a alta relação percentual dos teores de areia em comparação aos demais materiais (argila e silte), que favorecem a infiltração da água.

Ainda, é preciso mencionar que sem informações detalhadas a respeito da distribuição das raízes no perfil, não se pode afirmar que os resultados encontrados refletem a verdadeira condição de transpiração e, por consequência, as demais parcelas estimadas. Portanto, ressalta-se que mais estudos deverão ser desenvolvidos na região para confirmar se este comportamento é de fato uma tendência.

Atualmente, o entorno do JBRJ é caracterizado por densas ocupações urbanas (Figura 7) que estão localizadas em áreas naturalmente inundáveis.



**Figura 7** – Ruas sujeitas às inundações no bairro Jardim Botânico.

Observa-se que a região do presente estudo (Roseiral) está localizada dentro da área considerada de baixo risco às inundações. No entanto, algumas ruas do entorno estão dentro dos limites de alto risco, que poderiam ser agravados caso o JBRJ e sua vegetação não estivessem contribuindo para a captação de parte do volume precipitado.

Em uma análise mais ampla que envolve a Bacia do Rio dos Macacos, se não houvesse o JBRJ e sua vegetação predominante, o volume de água precipitado provavelmente estaria gerando escoamento superficial mais expressivo, situação que facilitaria a ocorrência de picos de alagamento ainda mais intensos.

## CONCLUSÕES

O estudo de caracterização do regime hídrico da amostra de solo selecionada, se mostrou de grande relevância para a compreensão da influência que o JBRJ tem no bairro em questão. Como pesquisa quantitativa realizada de modo experimental, ficou evidente sua contribuição a partir da simulação desenvolvida no HYDRUS-1D.

Com base nos resultados obtidos, foi possível avaliar a variação da umidade no solo conforme os pontos estabelecidos. A análise gráfica de umidade do solo permitiu deduzir um perfil de umidade que possui relação direta com as demais parcelas do balanço hídrico.

Além disso, foram estimados os valores acumulados de absorção de água pela raiz no período de 20 anos, associada à transpiração realizada pela vegetação na área de estudo. Esta avaliação se estendeu em hipóteses que poderão ser validadas futuramente por pesquisas de campo e novas simulações.

## RECOMENDAÇÕES

Com os eventos de alagamentos e inundações cada vez mais frequentes na região, é evidente a

necessidade de compreender a dinâmica hidrológica do Jardim Botânico, para que seja possível estimar de forma mais precisa as parcelas do balanço hídrico em termos da bacia hidrográfica do Rio dos Macacos.

Um dos ajustes futuros na modelagem terá relação com o lençol freático. Para isso, será necessário obter informações mais detalhadas da sua localização e variação com o tempo. Nesse caso, a modelagem será reajustada para uma condição de fronteira mais realística - *Deep drainage* ao invés de *Free drainage*.

A estimativa das parcelas do balanço hídrico tem como principal limitação a precisão dos seus componentes, em especial, a evapotranspiração, determinada no presente caso de maneira teórica admitindo-se um percentual voltado para transpiração e outro para evaporação.

Em estudos futuros, espera-se estimar mais precisamente os dados de entrada na simulação que, certamente irão conferir resultados mais satisfatórios, uma vez que pequenas imprecisões podem acarretar em grandes incertezas.

De posse dos resultados do balanço hídrico, poderão ser adequadas medidas preventivas já existentes e desenvolvidas novas metodologias, capazes de contribuir para minimizar os impactos negativos que afetam o cotidiano da população.

#### AGRADECIMENTOS

À Embrapa Solos, Fundação GEO-Rio e todos os pesquisadores envolvidos por disponibilizarem os dados necessários para a realização da pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- BOUMA, J. **Using soil survey data for quantitative land evaluation**. In: Stewart, B. A., ed. *Advances in Soil Science*, v. 9, p.171-213, 1989.
- BRASIL. **Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981**. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/16938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/16938.htm) Acesso em: 20 nov. 2021.
- \_\_\_\_\_. **Decreto no 99.274 de 6 de junho de 1990**. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/antigos/d99274.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/antigos/d99274.htm) Acesso em: 25 nov. 2021.
- \_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA nº 339 de 25 de setembro de 2003**. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2003/res\\_conama\\_339\\_2003\\_jardinsbotanicos.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2003/res_conama_339_2003_jardinsbotanicos.pdf) Acesso em: 25 nov. 2021.
- CALDERANO FILHO, B., WITTERN, K. P., CONCEIÇÃO, M., TAVARES, N. P., FAGUNDES, S. R. F. **Identificação de limitações pedológicas e ambientais causadoras da degradação de áreas do Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. Série Estudos e Contribuições n. 10, EMBRAPA SNLCS- IBAMA. Rio de Janeiro, 1992.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Necessidades hídricas das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1997. 204p.
- FUNARI, F. L., PEREIRA FILHO, A. J. **Avaliação da evapotranspiração potencial em área de mata atlântica, parque estadual das fontes do Ipiranga, São Paulo**. Revista do Instituto Geológico: São Paulo, 2020.
- GOMES, A. S. **Funções de Pedotransferência para Estimativa da Densidade de Solos da Bacia do Solimões, sob Floresta Tropical Amazônica**. Dissertação (Mestrado) do Curso de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. UFRRJ: Seropédica, 2014.
- IBGE. **Manual Técnico de Pedologia do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**.
- MIRANDA, E. E. **Jardins Botânicos do Brasil/ texto** Evaristo Eduardo Miranda; fotografia Fabio Colombini. São Paulo: Metalivros, 2009.
- MONTEIRO, J. E. B. A. CUADRA, S. V., OLIVEIRA, A. F., NAKAI, A. M., MACIEL, R. J. S. **Estimativa da evapotranspiração diária baseada apenas em temperatura**. Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2017.
- RIO DE JANEIRO. **Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro**. Disponível em: <https://www.rio.rj.gov.br/web/georio> Acesso em: 26 nov. 2021.
- ŠIMŮNEK et al., 2013. **Manual do Hydrus-1D**. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media Department of Environmental Sciences. University of California Riverside, 2013.
- TOMASELLA, J. & HODNETT, M. G. **Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia**. *Soil Science*, Madison, v. 163, n. 3, p. 190 – 202, 1998.
- VAN GENUCHTEN, M. T. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity on unsaturated soils**. *Soil Science Society of America Journal*, 44, n. 5, p. 892-898, 1980.
- WÖSTEN, J.H.M., LILLY, A., NEMES, A., LE BAS, C. **Development and use of a database of hydraulic properties of European soils**. *Geoderma* 90, p. 169–185, 1999

## Balanço Hídrico em Áreas de Pastagens do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, Valença-RJ.

Water Balance in Pasture Areas in the Middle Valley of the Paraíba do Sul River, Valença-RJ.

**Matheus Leal Soares das Neves** <sup>(1)</sup>; **Wenceslau Geraldês Teixeira** <sup>(2)</sup>; **Alexandre Ortega Gonçalves** <sup>(2)</sup>; **Fabiano Balieiro** <sup>(2)</sup>

(1) Bolsista ZARC - Embrapa Solos, Rio de Janeiro, [matheus.neves@colaborador.embrapa.br](mailto:matheus.neves@colaborador.embrapa.br), RJ; (2) Pesquisador Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ; [wenceslau.teixeira@embrapa.br](mailto:wenceslau.teixeira@embrapa.br), [alexandre.ortega@embrapa.br](mailto:alexandre.ortega@embrapa.br), [fabiano.balieiro@embrapa.br](mailto:fabiano.balieiro@embrapa.br)

**RESUMO:** Conhecer a variação de armazenamento e estimar a disponibilidade de água no solo torna-se fundamental para gerenciamento e tomada de decisão na agricultura e entendimento dos processos de crescimento e produção de pastagens. O presente estudo objetivou calcular o balanço hídrico climatológico de uma pastagem no Campo Experimental Santa Mônica (CESM) em Valença-RJ. Os fluxos de água foram estimados através de simulações realizadas no software HYDRUS-1D, utilizando séries de 14 anos, do início de 2007 ao final de 2020, de precipitação e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) como condições de fronteira para solução da equação de Richards. Os parâmetros hidráulicos da equação de van Genuchten-Mualem, que descrevem a curva de retenção de água, foram obtidos pelo ajuste de pares de umidade e tensão matricial de amostras indeformadas de solo. A área experimental possui precipitação pluvial média anual de 1.446 mm e o valor acumulado de precipitação, no período estudado, foi de 17.736 mm. No ano mais seco (2017), a estimativa de recarga dos mananciais foi de 778 mm e no mais chuvoso (2016), estimou-se 1.782 mm. Este estudo permitirá o avanço de simulações de balanço hídrico para os demais usos e coberturas do solo na área de estudo.

**Palavras-chave:** água disponível no solo; evapotranspiração; simulação.

**ABSTRACT:** The variation of storage and the availability of water in the soil becomes fundamental for management and decision making in agriculture, as well as understanding the processes of growth and production of pastures. The present study aimed to calculate the climatological water balance of a pasture in Campo Experimental Santa Mônica (CESM) in Valença-RJ. Water fluxes were estimated through simulations carried out in the HYDRUS-1D software, using 14-year series, from early 2007 to late 2020, of precipitation and reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) as boundary conditions for solving the Richards equation. Van Genuchten-

Mualem hydraulic parameters describing water retention were obtained by pairwise fitting of moisture and potential data of soil samples. The experimental area has an average annual rainfall of 1.446 mm and the accumulated rainfall during the studied period was 17.736 mm. In the driest year (2017), the estimated recharge of the mangroves was 778 mm and in the wettest (2016), estimated 1.782 mm. This study will allow the advancement of water balance simulations for other land uses and land cover in the study area.

**Keywords:** available soil water; evapotranspiration; simulation.

### INTRODUÇÃO

Com o advento das mudanças climáticas, a humanidade passou a enfrentar diversos desafios globais e, conseqüentemente, a agricultura está entre esses desafios, visto que será necessário aumentar a produção agrícola de maneira sustentável e economicamente viável, visando abastecer a crescente população mundial, estimada em 9,73 bilhões até 2050 (FAO, 2017), e diminuir a instabilidade alimentar. Nesse sentido, a obtenção de dados edafoclimáticos torna-se uma estratégia que permite a extração de parâmetros fundamentais para o gerenciamento dos recursos hídricos, facilitando o planejamento, o manejo e a tomada de decisões no cenário agrícola.

O balanço hídrico provém da “Teoria de Thorntwaite” (Thorntwaite e Mather, 1955) e baseia-se nas relações entre a precipitação, a evapotranspiração, o escoamento superficial e a infiltração da água no solo. O cálculo do balanço hídrico permite estimar a evapotranspiração real de uma cultura, bem como a deficiência ou excedente hídrico, e o total de água armazenada no solo em cada período de interesse (Pereira, 2005).

Em razão da necessidade de entender a dinâmica e a variação do regime hídrico do Campo Experimental Santa Mônica, realizou-se o cálculo do

balanço hídrico de uma área de pastagem, com predomínio de *Brachiaria spp.*

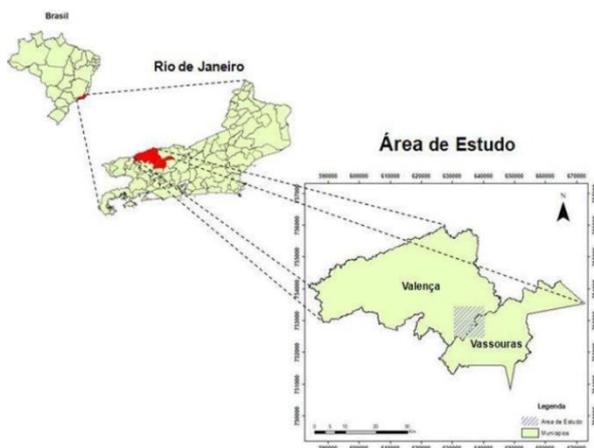
Utilizou-se o software HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK, J. et al., 2013) para a simulação dos fluxos de água, resolvendo numericamente a equação de Richards e o período considerado para esta avaliação foi a partir de 14 anos. O objetivo do trabalho foi quantificar os volumes de evapotranspiração potencial de referência (ET<sub>o</sub>), precipitação pluvial, os parâmetros hidráulicos do solo, assim como os volumes de água transpirados, evaporados e de recarga dos mananciais.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Características da área de estudo

O campo experimental da Fazenda Santa Monica, pertence à Embrapa Gado de Leite (43°42'49,47"O e 22°20'38,50"S) localizado no município de Valença-RJ. O município está localizado ao sul do Estado do Rio de Janeiro na elevação de 560 m em relação ao nível do mar, possui área territorial de 1.300,767 km<sup>2</sup>, segundo o IBGE, que no ano de 2020 estimou a população em 76.869 habitantes (Santaren, 2021).

O clima do município é típico da região Sudeste do Estado do Rio de Janeiro, onde o inverno apresenta-se seco e o verão chuvoso, classificado como Cwa, de acordo com a metodologia de Köppen (1938), apresentando temperatura média das máximas de 30 °C. A pluviosidade do local é mais elevada no verão do que no inverno, tendo média de 1.225 mm ano<sup>-1</sup> (Neves, 2020). A região possui histórico de vegetação nativa transformada em cafeicultura e, subsequentemente, em pastagem ao final do século XIX (Valle, 2018). Os solos predominantes foram descritos da classe dos Cambissolo Háptico Tb Distrófico (Valle, 2018), baseado no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018) com classe textural argilosa.



**Figura 1.** Mapa de localização da área de estudo no município de Valença - RJ.  
Fonte: Neves (2020).

### Dados de precipitação pluvial

Foram organizados e analisados de uma série histórica de 14 anos (período de 01/01/2007 a 31/12/2020). Os dados foram obtidos da estação pluviométrica instalada no Campo Experimental Santa Mônica, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021) e as falhas completadas com estimativas obtidas no *Prediction of Worldwide Energy Resources – NASAPOWER* (Stackhouse, 2021) com as coordenadas geográficas da área de estudo.

### Dados de evapotranspiração de referência

A série histórica de 2007 a 2020 anos, com dados de evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), resultou do cálculo utilizado pelo método da FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998), onde os dados de entrada são a velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar do projeto NASAPOWER (Stackhouse, 2021) com coordenadas geográficas da estação da Fazenda Santa Mônica.

### Simulação no Hydrus

Os dados para parametrização no software Hydrus consistiram em precipitação pluvial (P), evaporação (E) e transpiração (T) em centímetros, todos em escalas diárias.

A ET<sub>o</sub> foi convertida na ET das pastagens utilizando-se o coeficiente de cultura (*k<sub>c</sub>*) igual a 0,70, obtendo-se a evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>). A ET<sub>c</sub> foi particionada nos processos de evaporação e transpiração utilizando-se os coeficientes 0,25 e 0,75 da ET<sub>c</sub>, respectivamente.

Os parâmetros hidráulicos foram obtidos através do ajuste dos dados medidos de retenção de água obtidos a partir de seis amostras de solo. As amostras foram saturadas e estimadas a umidade após equilíbrio nos potenciais (0 – saturado, 60, 100, 330 e 15000 cm) seguindo as metodologias apresentadas em Teixeira e Behring (2017). Posteriormente às medições, realizou-se o ajuste da curva com o modelo de van Genuchten-Mualem (1980):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{1-1/n}}$$

em que  $\theta$  é a umidade volumétrica do solo (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) como função da tensão matricial de água no solo ( $h$ ), considerando  $h > 0$  para solo não saturado (cm).  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são, respectivamente, as umidades residual e de saturação (cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>) e  $\alpha$  (cm<sup>-1</sup>) e  $n$  são parâmetros empíricos do formato da curva. Os dados foram ajustados com o programa RETC (van Genuchten, M.T.; Leij, F.J.; Yates, S.R., 1991).

Para a simulação no Hydrus, foram consideradas as propriedades hidráulicas homogêneas e um perfil

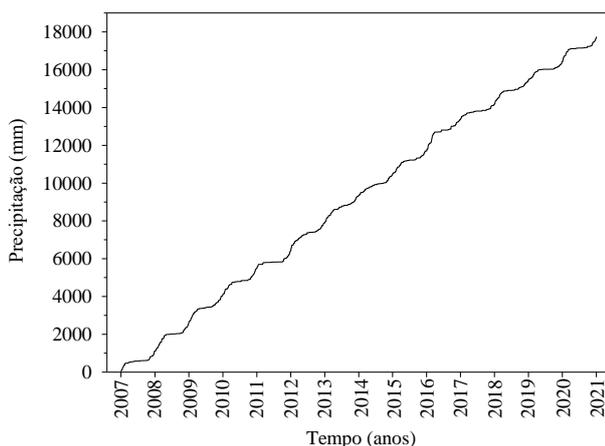
de 200 cm de profundidade com fluxo predominantemente vertical (1D). Como condições de fronteira superior foram consideradas as condições atmosféricas (precipitação pluvial, evaporação e transpiração). Considerou-se drenagem livre como condição de fronteira inferior, e com empçamento máximo de 10 cm, sem perdas por escoamento superficial. Como condição inicial definiu-se que o solo apresentava potencial matricial na capacidade de campo, considerado (10 kPa).

Os parâmetros de Feddes foram inseridos para simular a absorção de água pelas raízes da pastagem, conforme a base interna do Hydrus para pastagens “pastures” obtidos de Wesseling, 1991 (apud ŠIMŮNEK, J. et al., 2013).

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

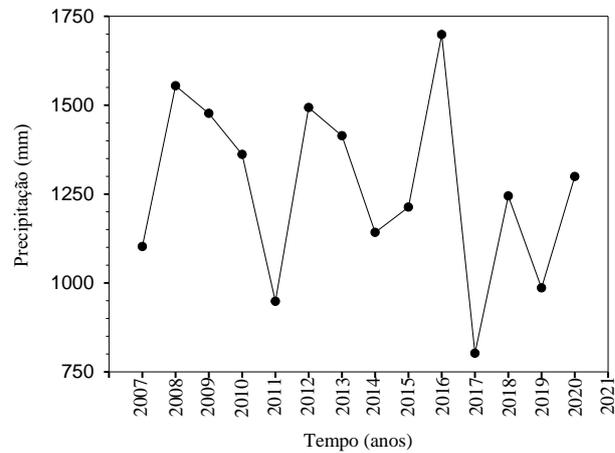
Os parâmetros hidráulicos do solo ajustados a equação de van Genuchten-Mualem foram  $\theta_s = 0,497$ ;  $\theta_r = 0,000$ ;  $\alpha = 0,098$ ;  $n = 1,137$ ,  $K_s = 40$  cm/dia. RMSE (para o ajuste de  $0.009$  cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) foram ajustados considerando um solo homogêneo quanto às propriedades hidráulicas para fins de simulação.

A precipitação pluvial média anual no Campo Experimental Santa Mônica, considerando a série histórica de 14 anos, foi de 1.267 mm de chuva e o valor acumulado durante o referido período foi de 17.736 mm (Figura 2).



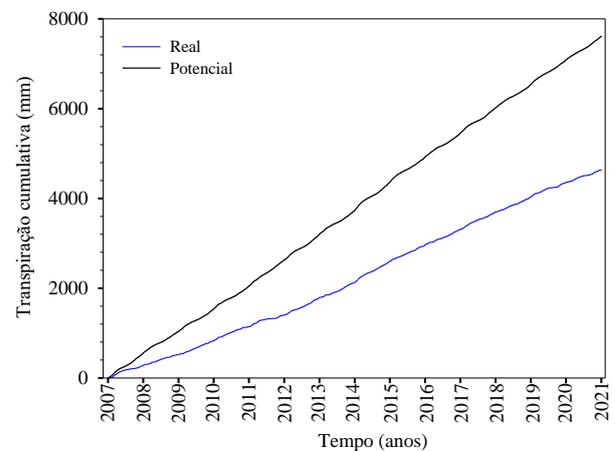
**Figura 2.** Precipitação total acumulada.

O volume total de precipitação no ano mais seco (2017) foi de 802 mm e no mais chuvoso (2016) de 1698 mm (Figura 3).



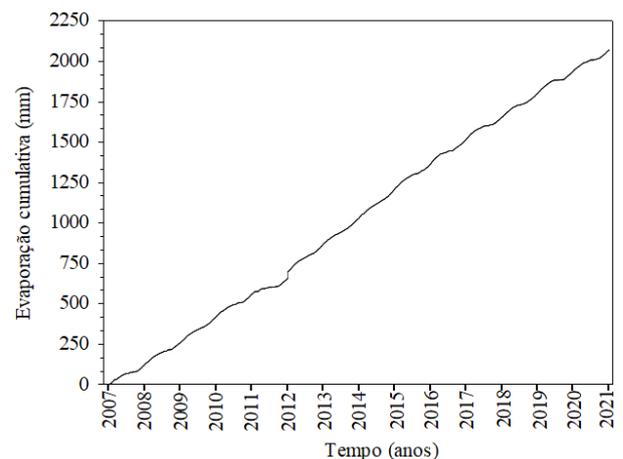
**Figura 3.** Precipitação total – índices anuais (01/01/2007 a 31/12/2020).

O valor estimado para o total de transpiração potencial para o período de 14 anos foi de 7.618 mm, com média anual de 544 mm. A transpiração real, ou efetiva, foi estimada para o período 4.635 mm, com média anual de 331 mm (Figura 4).



**Figura 4.** Simulação da transpiração potencial e real acumulada.

O volume total de água evaporada da superfície do solo e das folhas da pastagem apresentou valor médio anual de 148 mm (Figura 5).



**Figura 5.** Simulação da evaporação cumulativa.

Estimou-se que a quantidade acumulada de água que infiltrou e percolou no solo durante os 14 anos analisados, foi de 11.083 mm, com média anual de 792 mm (Figura 6).

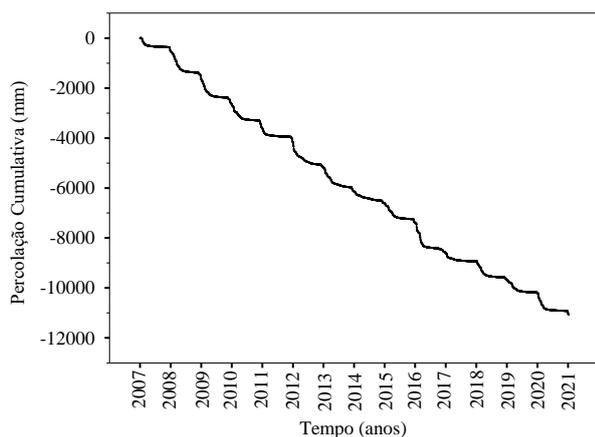


Figura 6. Simulação da percolação cumulativa de água no solo.

## CONCLUSÕES

Do total da precipitação foi estimado que, do volume de água, 26% retornaram para a atmosfera através da transpiração da pastagem, 11% resultaram da evaporação direta da água, através das folhas e da superfície do solo, e 62% infiltraram e foram os responsáveis pela recarga dos mananciais.

Este estudo preliminar auxiliará no uso de simulações de balanço hídrico para os demais usos da terra nesta região, podendo auxiliar no planejamento agrícola. Planeja-se fazer simulações de balanço hídrico de sistemas integrados de pastagem com plantio de eucaliptos em modelos de simulação 2D (Hydrus-2D).

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements** Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.

INMET. **Dados meteorológicos da estação automática de Valença (A611)**. Disponível em <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A611>. Acesso em 01 de nov de 2021.

FEDDES, R. A.; KOWALIK, P. J., ZARADNY, H. **Simulation of field water use and crop yield**, John Wiley & Sons, New York, NY, p. 194-209, 1978.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO/ONU). **The Future of Food and Agriculture**. Roma, 2017.

NEVES, M. L. S. **Diagnóstico dos níveis de degradação e estimativa da biomassa com o uso de sensoriamento remoto em pastagem**. 2020. 54 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2020.

PEREIRA, A. R. **Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather<sup>(1)</sup>**. 2005. Bragantia, Campinas, v.64, n.2, p. 311-313, 2005.

SANTAREN, K. C. F. **Fluxo de gases de efeito estufa associado à dinâmica composicional e funcional da comunidade bacteriana em resposta à chuva em solos de pastagens**. 2021. 82 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Microbiologia Paulo de Góes, Programa de Pós-Graduação em Ciências (Microbiologia), 2021.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** – 5. ed., rev. e ampl. 356 p. – Brasília, DF: Embrapa, 2018.

STACKHOUSE, P. W. **The Power Project**. NASA Prediction of Worldwide Energy Resources, 2021. Disponível em: <<https://power.larc.nasa.gov/>>. Acesso em: 27 de ago. de 2021

ŠIMŮNEK, J. et al. **Hydrus-1D Manual. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media**. Department of Environmental Science. University of California, Riverside, 2013.

TEIXEIRA, W. G., BEHRING, S. B. **Retenção da água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards**. In: Manual de métodos de análise de solo / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2017.

VALLE, T. R. S. **Níveis de degradação de pastagens e qualidade do solo na Região do Médio Vale do Paraíba do Sul**. 2018. 108 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2018.

VAN GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. US Salinity Lab., USDA, Riverside, CA, 1991.

VAN GENUCHTEN, M. TH. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**. Soil Science Society of America Journal. 44: 892-898, 1980.

**WESSELING, J.G. Meerjarige simulaties van grondwateronttrekking voor verschillende bodemprofielen, grondwatertrappen en gewassen met het model SWATRE, Report 152, Winand Staring Centre, Wageningen, 1991.**

## Modelagem no HYDRUS, balanço Hídrico: Bacia do Bonfim, Petrópolis-RJ

Modeling in HYDRUS, water balance: Bonfim Basin, Petrópolis-RJ

**Ana Claudia de Mello Nascimento<sup>(1)</sup>; Wenceslau Geraldtes Teixeira<sup>(2)</sup>; Alexandre Ortega Gonçalves<sup>(2)</sup>**

(1) Mestranda em Engenharia Ambiental, UERJ, RJ, [anaclaudia.mello@hotmail.com](mailto:anaclaudia.mello@hotmail.com) (apresentadora do trabalho); (2) Pesquisador Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ; [wenceslau.teixeira@embrapa.br](mailto:wenceslau.teixeira@embrapa.br), [alexandre.ortega@embrapa.br](mailto:alexandre.ortega@embrapa.br)

**RESUMO:** O conhecimento da quantidade de água da chuva que percola e recarrega os aquíferos das bacias hidrográficas é essencial para gerenciar os recursos hídricos. O objetivo do estudo foi calcular o balanço hídrico da bacia hidrográfica do Bonfim, situado no município de Petrópolis-RJ, ambiente geológico que necessita ser investigado. Simulou-se o fluxo de água e raízes em áreas de pastagens utilizando o HYDRUS 1D. Os dados de entrada foram as séries históricas de 20 anos de precipitação pluvial, evaporação e transpiração. Parâmetros do solo Cambissolo háplico foram obtidos por Rossetta. Considerou-se drenagem livre e modelo de absorção de água Feeds, não considerou runoff. Bonfim tem média anual de precipitação pluvial de 1500 mm e o cumulativo durante 20 anos foi 29.230 mm e como resultado do balanço hídrico, 36 % transpiraram, 12 % evaporaram e 52 % das águas percolaram. A variação do ano mais seco (2017) 1068 mm e do mais chuvoso (2009) 1749 mm. No ano mais seco a recarga do aquífero para pastagens foi de 340 mm e mais chuvoso 1031 mm. O estudo é preliminar, serão posteriormente simulados o balanço hídrico para diversificados sistemas de uso da terra e outras classes de solo.

**Palavras-chave:** Águas subterrâneas; percolação; pastagens.

**ABSTRACT:** Knowing the amount of rainwater that percolates and recharges aquifers in watersheds is essential to manage water resources. The objective of the study was to calculate the water balance of the Bonfim watershed, located in the municipality of Petrópolis-RJ, a geological environment that needs to be investigated. The flow of water and roots in pasture areas was simulated using the HYDRUS 1D. The input data were the 20-year historical series of rainfall, evaporation, and transpiration. Soil parameters Haplic Cambisol were obtained by Rosetta. Free drainage and Feeds water absorption model were considered, runoff was not considered. Bonfim has an average annual rainfall of 1500 mm and the cumulative over 20 years was 29,230 mm and because of the water balance, 36% transpired, 12%

evaporated and 52% of the water percolated. The variation of the driest year (2017) 1068 mm and the wettest (2009) 1749 mm. In the driest year, the aquifer recharge for pastures was 340 mm and the wettest year was 1031 mm. The study is preliminary, the water balance will be simulated later for different land use systems and other soil classes.

**Keywords:** Groundwater; percolation; pastures.

### INTRODUÇÃO

A estimativa de recarga de águas subterrâneas é de grande importância para o gerenciamento dos recursos hídricos em uma bacia. Existem diversos métodos para estimar a recarga do aquífero, um deles é o balanço hídrico e a escolha do método depende unicamente do objetivo do trabalho (Gonçalves; Manzione, 2019).

O balanço hídrico corresponde a contabilização das parcelas de entrada e saída da água num volume de solo em determinado ecossistema e intervalo de tempo (Souza et al., 2015). A diferença entre as entradas e saídas de água equivale à variação do armazenamento no sistema (Engelbrecht et al., 2019).

Segundo Han et al. (2017) é um grande desafio de pesquisa determinar os efeitos da urbanização sobre a recarga das águas subterrâneas pois dados empíricos e estudos de casos ainda são limitados.

Há necessidade em se calcular o balanço hídrico do rio Bonfim, localizado no município de Petrópolis, pertencente ao estado do Rio de Janeiro. Essa necessidade se deve não somente pela sua contribuição da zona não saturada, mas também pelo ambiente geológico que carece ser investigado (Lawall, 2018).

O objetivo deste trabalho foi contabilizar os fluxos de transpiração, evaporação e percolação em áreas de pastagens na bacia do Bonfim, considerando solo Cambissolo háplico com dados de precipitação e evapotranspiração num intervalo de tempo de 2000 a 2019 anos utilizando o HYDRUS 1D.

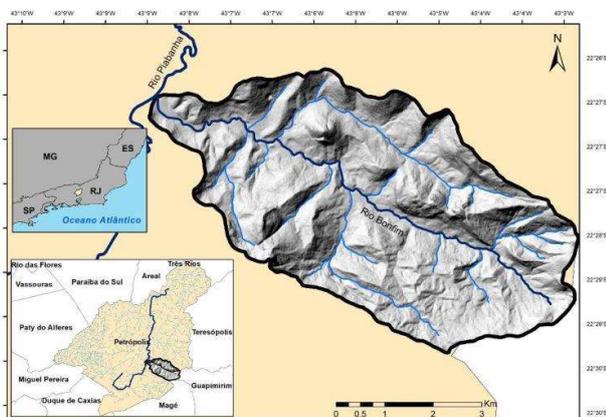
## MATERIAL E MÉTODOS

### Características da área de estudo

O município de Petrópolis tem área de aproximadamente 797 km<sup>2</sup> e altitude média de 845 metros. O município tem sua área dividida em cinco distritos, sendo o primeiro Petrópolis, segundo Cascatinha, terceiro Itaipava, quarto Pedro do Rio e Posse (PETRÓPOLIS, 2013).

Conforme a Secretária de Planejamento e Urbanismo da Prefeitura Municipal de Petrópolis, o município dispõe de um abairramento informal. Bonfim insere-se nos limites de Correias, que é considerado um bairro de Petrópolis e está localizado no segundo distrito (PETRÓPOLIS, 2013).

A Figura 1 mostra a localização da bacia do Bonfim no município de Petrópolis, estado do Rio de Janeiro.



**Figura 1.** Localização da bacia do Bonfim, Petrópolis, RJ. Fonte: Lawall (2018).

### Dados de precipitação pluvial

A obtenção de uma série histórica de precipitação pluvial diária de 20 anos (2000 a 2019 anos) foi possível por meio da organização dos dados diários de chuva em planilhas eletrônicas, utilizando os dados compilados e preenchendo as respectivas falhas.

Os dados foram fornecidos pelas estações pluviométricas das estações, Bonfim do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), Itamarati-se da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Pico do Couto do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e dados da NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (NASAPOWER) com coordenadas geográficas da Estação do Bonfim do INEA.

### Dados de evapotranspiração de referência

A série histórica de 2000 a 2019 anos com dados de evapotranspiração de referência foi resultado do cálculo pelo método FAO Penman Monteith, onde se utilizou dados de vento, temperatura, umidade

relativa e outras do NASAPOWER com coordenadas geográficas da estação do Bonfim INEA.

### Dados de entrada no Hydrus

Os dados de entrada manipulados no Hydrus consistiram em precipitação pluvial em centímetros e dados de evaporação e transpiração em centímetro.

O produto dos dados de evapotranspiração de referência por coeficiente da cultura (kc) das pastagens igual a 0,70, resultou na evapotranspiração de pastagens. A evaporação foi o produto da evapotranspiração de pastagens por 0,25 e a transpiração por 0,75.

A composição granulométrica utilizada como entrada no Hydrus foi do solo Cambissolo Háplico obtido a partir dos dados do perfil de solo da Bacia do Bonfim, Petrópolis, RJ, fornecidos por Pereira et al. (2021).

### Parametrização no Hydrus

Simulou-se o fluxo de águas e raízes numa profundidade de solo igual a 200 cm. Selecionou-se seis dias de eventos extremos em Petrópolis.

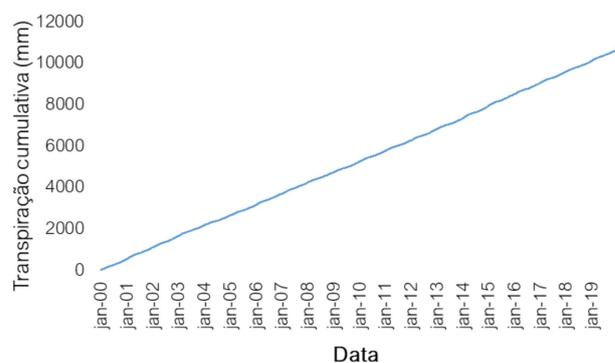
O modelo hidráulico utilizado foi o de van Genuchten-Mualem (1980) em que os parâmetros foram obtidos por Rosetta através dos dados de granulometria e densidade do solo do perfil de solo Cambissolo Háplico. As condições de fronteiras consideradas foram, superior as condições atmosféricas (precipitação pluvial, evaporação e transpiração) com altura máxima de empoçamento (10 cm) e inferior a drenagem livre. Condição inicial de potencial matricial.

O modelo de absorção de água foi Feddes, base de dados: Pastagens (Wesseling, 1991).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

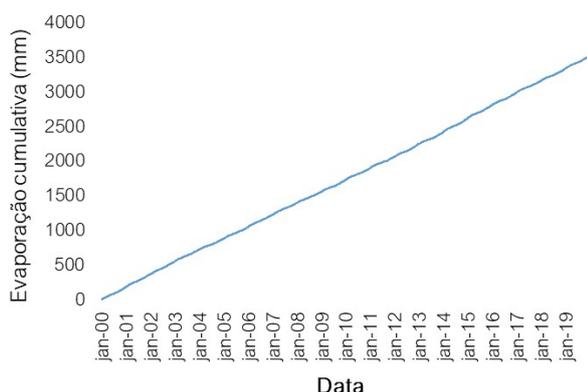
A precipitação média anual na bacia do Bonfim, considerando a série histórica de 20 anos é cerca de 1.500 mm de chuva anual. O cumulativo de precipitação pluvial é de 29.230 mm.

O quantitativo total de transpiração em 20 anos é de 10.640 mm, a Figura 2 mostra o gráfico de transpiração cumulativa dos anos de 2000 a 2019.



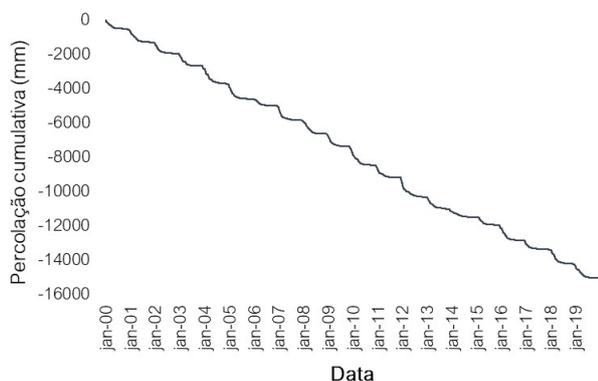
**Figura 2.** Transpiração cumulativa em 20 anos na bacia do Bonfim, Petrópolis, RJ.

O cumulativo de evaporação em 20 anos é de 3.500 mm, mostrado na Figura 3.



**Figura 3.** Evaporação cumulativa em 20 anos na bacia do Bonfim, Petrópolis, RJ.

A quantidade de água cumulativa em 20 anos, infiltrada no solo da bacia do Bonfim é de 15.100 mm a Figura 4 apresenta o gráfico.



**Figura 4.** Percolação cumulativa em 20 anos na bacia do Bonfim, Petrópolis, RJ.

O balanço hídrico da bacia do Bonfim resultou em que do total dos 29.230 mm de chuvas cumulativa dos anos de 2000 a 2019, 36 % transpiraram, 12 % evaporaram e 52 % das águas percolaram.

Alterações dos componentes do balanço hídrico seguem a variação sazonal das precipitações, ou seja, quanto maior os períodos de pluviosidade na região, maiores são o armazenamento de água no solo, a evapotranspiração e maior drenagem (Brito et al., 2020).

Segundo o estudo realizado por Brito et al. (2020), constatou que o uso de solo nas pastagens promoveu mudanças nos componentes do balanço hídrico como redução na evapotranspiração e aumento das perdas de água por drenagem.

Na simulação para o Bonfim foi utilizando a pastagem como tipo de solo e obteve-se um balanço hídrico equilibrado. A simulação com outros sistemas de uso da terra e considerando runoff se faz necessário para averiguar possível capacidade de percolação de água maior ou menor.

## CONCLUSÕES

A precipitação média anual do Bonfim é 1500 mm com variação do ano mais seco (2017) 1068 mm e do mais chuvoso (2009) 1749 mm. No ano mais seco a recarga do aquífero para pastagens em Cambisolo Háplico foi de 340 mm e no mais chuvoso 1031 mm.

O estudo é preliminar, serão posteriormente simulados o balanço hídrico para diversificados sistemas de uso da terra, como, florestas, pastagens, cultivo e outras classes de solo.

## RECOMENDAÇÕES

Simular os fluxos de água no solo considerando runoff e utilizando dados horários de chuvas com períodos mais curtos na série histórica.

## REFERÊNCIAS

BRITO, T. R. do C.; LIMA, J. R. de S.; OLIVEIRA, C. L. de; SOUZA, R. M. S.; ANTONINO, A. C. D.; MEDEIROS, E. V. de; SOUZA, E. S. de; ALVES, E. M. Mudanças no Uso da Terra e Efeito nos Componentes do Balanço Hídrico no Agreste Pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 02, p. 870-886, 24 mar. 2020.

ENGELBRECHT, B. Z.; GONÇALVES, R. D.; TERAMOTO, E. H.; CHANG, H. K. DISPONIBILIDADE HÍDRICA E BALANÇO HÍDRICO DA BACIA DO RIO CACHOEIRA NA REGIÃO DE ITABUNA / BA. **Geociências**, São Paulo, v. 38, n. 3, p. 731 - 740, 2019.

GONÇALVES, V. F. M.; MANZIONE, R. L. ESTIMATIVA DA RECARGA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO SISTEMA AQUÍFERO BAURU (SAB). **Geo UERJ**, ano 2019, n. 35, p. 1-19, 17 set. 2019. DOI <https://doi.org/10.12957/geouerj.2019.37063>. Disponível em: <https://www.epublicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/view/37063>. Acesso em: 10 jan. 2022.

HAN, D.; CURRELL, M. J.; CAO, G.; HALL, B. Alterations to groundwater recharge due to anthropogenic landscape change. **Journal of Hydrology**, ano 2017, v. 554, p. 545-557, 21 set. 2017.

LAWALL, S. **Os Efeitos dos Diferentes Tipos de Uso e Cobertura da Terra, Características dos Solos e Chuvas na Hidrologia dos Solos da Região Serrana do Rio de Janeiro**. 2018. 180 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

RENDEIRO, P. N.; CARVALHO JÚNIOR, W. de; FERNANDES FILHO, E. I.; CALDERANO FILHO, B.; BARGE, B. S.; SILVA C. C. da; OLIVEIRA, D. R. de; DIAMANTE, A. M. L.; LAWALL, S.; SARAIVA, K. P. H.; ROCHA, P. V. **Levantamento Semidetalhado dos Solos da Microbacia do Córrego do Bonfim, Município de Petrópolis, Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro**. 1. ed. atual. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021.

SOUZA, R. M. S.; SOUZA, E. S. de; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. de S. Balanço hídrico em área de pastagem no semiárido pernambucano. **Revista**

**Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 5, p. 449–455, 1 abr. 2015

## Ajuste de equações de retenção de água em Latossolos Amarelos muito argilosos da Amazônia Central

Fitting soil water retention equation to clayey yellow Ferralsols in Central Amazon

**Letícia Guimarães Pimentel<sup>(1)</sup>; Aline Mari Huf dos Reis<sup>(1)</sup>; Gilvan Coimbra Martins<sup>(2)</sup>; Fabricio Resende Fregonezi<sup>(3)</sup> Alexandre Ortega Gonçalves<sup>(4)</sup>; Wenceslau Geraledes Teixeira<sup>(4)</sup>**

(1) Bolsista ZARC - Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, [leticia.pimentel@colaborador.embrapa.br](mailto:leticia.pimentel@colaborador.embrapa.br); [huf.aline@gmail.com](mailto:huf.aline@gmail.com); Pesquisador - Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM; [gilvan.martins@embrapa.br](mailto:gilvan.martins@embrapa.br) (3) Gerência Agrícola - Jayoro, Presidente Figueiredo, AM; [fabricio@jayoro.com.br](mailto:fabricio@jayoro.com.br) (4) Pesquisador - Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, [alexandre.ortega@embrapa.br](mailto:alexandre.ortega@embrapa.br); [wenceslau.teixeira@embrapa.br](mailto:wenceslau.teixeira@embrapa.br);

**RESUMO:** Para determinar a curva de retenção de água no solo (CRA) em solos com distribuição bimodal de poros, o modelo proposto por van Genuchten não os ajusta adequadamente. Entre outros modelos para descrever a CRA, a equação de Durner é frequentemente utilizada para a descrição de solos bimodais. O objetivo principal deste trabalho foi comparar os modelos unimodal (van Genuchten-Mualem) e bimodal (Durner) para descrição da CRA de um Latossolo Amarelo presente no município de Presidente Figueiredo (Estado do Amazonas - Brasil). Amostras indeformadas de solo foram coletadas em diferentes profundidades na Fazenda Jayoro, sob cultivo de cana-de-açúcar, e estas foram submetidas a tensões matriciais (cm) de 0; 10; 30; 60; 100; 330; 1100; 5000 e 15000 até o equilíbrio quando a água volumétrica do solo foi medida. O software Hyprop foi utilizado para obter os parâmetros das equações da CRA uni e bimodal, e foram considerados os menores valores da raiz do erro quadrático médio (RMSE) como parâmetros de ajuste para comparar as equações. O teor de água disponível para a planta (AD) também foi calculado. O modelo de Durner apresentou menores valores de RMSE para todas as profundidades avaliadas. Além disso, os maiores valores de AD foram verificados para quatro dos seis pontos avaliados.

**ABSTRACT:** To determine the soil water retention curve (SWRC) in soils with bimodal distribution of pores, the model proposed by van Genuchten does not fit them properly. Among other models to describe SWRC, Durner's equation is frequently used for the description of bimodal soils. The main objective of this paper was to compare the unimodal (van Genuchten-Mualem) and the bimodal (Durner) models to predict the SWRC in a very clayey Ferralsol present in the county of Presidente Figueiredo (Amazonas State - Brazil). Undisturbed

soil samples were collected at different depths in Jayoro's Farm, under sugarcane cultivation, and these were submitted to matric tensions (cm H<sub>2</sub>O) of 0; 10; 30; 60; 100; 330; 1100; 5000 and 15000 until equilibrium when volumetric soil water was measured. The software Hyprop was used to obtain the parameters of the SWRC equations uni and bimodal, and were considered the smallest values of Root Mean Square Error (RMSE) as goodness of fit to compare the equations. The plant available water (AW) content was also calculated. Durner's model showed smaller values of RMSE for all the depths evaluated. Furthermore, higher values of AW were verified for four of the six points evaluated.

**Palavras-chave:** Distribuição bimodal; equação de Durner; Água disponível.

**Keywords:** Bimodal distribution; Durner's equation; Available water.

## INTRODUÇÃO

Há muitos anos modelos matemáticos e técnicas de simulação são encontradas para descrever de forma dinâmica a natureza da água no sistema solo-planta. A capacidade de um solo em reter água e disponibilizá-la para as plantas é representada pela curva de retenção de água (CRA), a qual relaciona a fração volumétrica de água ( $\theta$ ) a uma dada tensão matricial ( $h$ ) (Jorge, et al., 2010). Portanto, um aumento da tensão matricial significa uma redução da água presente no solo (Hillel, 1998).

Muitos modelos matemáticos foram elaborados para descrever a CRA. Contudo, o modelo proposto por van Genuchten-Mualem (1980) continua sendo o mais utilizado, uma vez que ele consegue representar essa função para a maioria dos solos estudados. O modelo proposto por van Genuchten-Mualem é, matematicamente, melhor ajustável aos dados se

houver um maior número de tensões avaliadas. Porém, a rotina de laboratório é onerosa e demorada, além de causar alterações na estrutura do solo das amostras (Jorge, et al. 2010).

O modelo de van Genuchten-Mualem não é capaz de se ajustar adequadamente a solos com distribuição bimodal de poros, que são solos que apresentam duas classes de poros muito contrastantes. Portanto, outros modelos são propostos, como por exemplo o de Durner (1994), que é a sobreposição de duas ou mais equações propostas por van Genuchten (Carducci, et al. 2011).

Assim, o objetivo deste trabalho foi comparar os modelos unimodal (van Genuchten) e bimodal (Durner) da curva de retenção de água (CRA) de um Latossolo Amarelo presente na Fazenda Jayoro, no município de Presidente Figueiredo, AM, sob cultivo de cana-de-açúcar.

## MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de solos foram coletadas na Fazenda Jayoro, no município de Presidente Figueiredo, AM. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Am, que se caracteriza por apresentar temperatura média do mês mais frio sempre superior a 18°C e precipitação pluviométrica anual variando de 2.000 mm a 2.500 mm (Rodrigues et al., 2001).

Em março de 2018 coletaram-se amostras indeformadas de solo, em triplicata, em anéis cilíndricos de 100 cm<sup>3</sup>, para obtenção de dados de retenção da água em diferentes potenciais. Essas amostras foram coletadas nos talhões, “Usina” e “Pororoca”, próximo a superfície (Horizonte A) 0 cm, e entre 25 e 30 cm (Horizonte Bw1). Em uma área com floresta primária adjacente também foram coletadas amostras nos mesmos horizontes. O solo do local foi classificado como Latossolo Amarelo distrófico e de textura muito argilosa (Rodrigues et al., 2001) segundo as regras de classificação descritas em Santos et al (2018). As amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Física do Solo da Embrapa Amazônia Ocidental, em Manaus. As umidades volumétricas das amostras de solo foram determinadas por gravimetria após atingir o equilíbrio nas tensões matriciais de 0; 10; 30; 60; 100 kPa em mesa de tensão. Posteriormente as amostras foram submetidas às tensões de 330; 1100 e 5000 kPa Os valores médios para a tensão 15000 kPa foram estimados pela textura e baseados no trabalho de Teixeira (2001) para os Latossolos Amarelos muito argilosos da Amazônia Central. Considerou-se o valor de 10% do valor médio da umidade volumétrica como desvio padrão das amostras. Os pares de umidade e tensão avaliados foram ajustados ao modelo van Genuchten (1980) com a restrição de Mualem (1976), descrita abaixo:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha|h|)^n\right]^m}, m = 1 - 1/n$$

Em que  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são os teores de água residual e saturada do solo, respectivamente (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>),  $\theta$  é a umidade volumétrica (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $h$  é a tensão matricial da água no solo (cm de água – em módulo);  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  são parâmetros empíricos do modelo.

Foi utilizado também o modelo de Durner (1994) para ajustar os dados de umidade e potencial. Segue descrição da equação de Durner (1994):

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \sum_{i=1}^k w_i \left[1 + (\alpha|h|)^n\right]^{-m} + \theta_r, m = 1 - 1/n$$

Os parâmetros dessa equação são definidos previamente, sendo  $k$  o número de sub curvas (modas, neste caso  $k=2$ ) e  $w_i$  é um fator de peso dado para cada moda, satisfazendo  $0 < w_i < 1$ . Para o ajuste de ambas as equações foi utilizado o software HYPROP (2019). Os valores de tensão matricial foram convertidos para a escala log de cm de H<sub>2</sub>O (pF) e inseridos no HYPROP para a simulação. Com parâmetro de qualidade dos ajustes das equações foi considerado os menores valores de RMSE. Após os ajustes dos coeficientes das equações de cada área e profundidade estudada, os dados observados e as equações ajustadas foram plotados de modo a apresentar a CRA de cada local amostrado (Figura 1).

Calculou-se a água disponível (AD) do solo através da subtração da umidade na capacidade de campo menos a umidade do ponto de murcha permanente (AD = pF 2,0 - pF 4,2) para cada área estudada e em profundidade. A critério de classificação foi observada a tabela de classificação de água disponível (AD) em solos do Brasil (Teixeira et al., 2020)

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios e desvios padrão das umidades volumétricas retidas nos diferentes potenciais avaliados estão descritos na Tabela 1. A maior umidade média na saturação ocorreu na amostra do talhão da Pororoca e na profundidade de 5-10 cm, juntamente com um baixo desvio padrão (0,01). A menor umidade na saturação do conjunto amostral foi igual a 0,55 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, e ocorreu em duas amostras: talhão da Usina (5-10 cm) e no talhão da Pororoca (25-30 cm). Contudo, na amostra da Pororoca o desvio padrão foi zero sendo que na amostra coletada na área da Usina foi igual a 0,05.

A maior umidade média para a capacidade de campo (pF 2,0) foi registrada para a amostra da Pororoca, porém, na profundidade de 25-30 cm (0,42 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>). A menor umidade nessa condição foi para a profundidade de 5-10 cm também na amostra da Pororoca (0,29 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>). As umidades no ponto de

murcha permanente (pF 4,2) encontradas para todas as amostras apresentaram resultados muito próximos entre si, pois variaram apenas entre 0,20 ou 0,25 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

Verificou-se que nas amostras avaliadas o ajuste bimodal da curva de retenção de água se mostrou mais exato, indicado pelos menores valores da raiz do erro quadrático médio – RMSE (Tabela 2). Ou seja, quanto mais próximo a zero forem os valores de RMSE, maior será a exatidão alcançada pelo ajuste de uma simulação. É possível notar essa diferença graficamente principalmente para o talhão da usina na profundidade de 5-10 cm (Figura 1).

Pode-se perceber que para a profundidade de 5-10 cm, nas áreas da Usina e da Pororoca os valores de água disponíveis foram de: 0,06 e 0,04 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>; respectivamente. As outras amostras apresentaram valores de AD próximas umas das outras para Usina, Pororoca e Floresta na profundidade de 25-30 cm e na profundidade de 3-7 cm para Floresta, com classificação de valores de AD muito alto (Tabela 1).

## CONCLUSÕES

1. A maior umidade média na saturação ocorreu no Talhão Pororoca (5-10) e a menor umidade na saturação ocorreu em dois talhões: Usina (5-10) e Pororoca (25-30).

2. A maior e a menor umidade média na saturação para a capacidade de campo foram no Talhão da Pororoca nas profundidades 25-30 e 5-10, respectivamente.

3. As umidades médias no ponto de murcha variaram entre 0,20 e 0,25 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

4. A partir da comparação estatística e uma análise visual dos modelos unimodal (van Genuchten) e bimodal (Durner) das curvas de retenção do Latossolo Amarelo muito argiloso, observou-se que o ajuste bimodal se mostrou mais eficiente em representar a estrutura desse solo.

5. O solo da Fazenda Jayoro apresentou altos valores de água disponível do solo para quatro dos seis pontos avaliados.

## REFERÊNCIAS

CARDUCCI, C. E. OLIVEIRA, G. C. SEVERIANO, E. C. ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. R. Bras. Ci. Solo, 35:77-86, 2011.

DURNER W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. Water Res. Res., 30: 211-223, 1994.

SILVA, M. B. et al. Guia de Campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos:

RCC do Maranhão. In: TEIXEIRA, W. G. MARTINS, A. L. S. LUMBRERAS, J. F. Retenção de Água em Amostras de Solos da XIII RCC, estado do Maranhão. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2020. Capítulo 14.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. Brasília, 2006. 412p.

JORGE, R. F. CORÁ, J. E. BARBOSA, J. C. Número Mínimo de Tensões para Determinação da Curva Característica de Retenção de Água de um Latossolo Vermelho Eutrófico sob Sistema de Semeadura Direta. R. Bras. Ci. Solo. 34:1831-1840, 2010.

HILLEL, D. Environmental Soil Physics: fundamentals, applications, and environmental considerations. 1 Ed. [S.l.]: Preview, 31 agosto 1998.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Res. Res., 12:513-522, 1976.

RODRIGUES, T. E. et al. Caracterização e classificação dos solos do município de Presidente Figueiredo, Estado do Amazonas. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, Documento 123, 2001. 50p.

SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.

SCHINDLER, U. METER Group AG: HYPROP-FIT. Versão 4.2.2.0 [S.l.], 2019. Disponível em: <https://www.metergroup.com/>. Acessado em: 09 de setembro de 2022.

SOUZA, S. F. G. MARASCA, I. PALUDO, V. SILVA, P. R. A. LANÇAS, K. P. Avaliação da Produtividade da Cultura de Cana de Açúcar com e sem a Aplicação de Fósforo em Profundidade Utilizando um Equipamento de Preparo Profundo e Mecanizado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 42. Campo Grande, 2013. Anais. Campo Grande, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2014.

TEIXEIRA, W. G. MARQUES, J. D. MOREIRA, A. HUWE, B. Ajuste das Funções da Retenção de Umidade para o Latossolo Amarelo Textura Argilosa da Amazônia Central. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 14., Cuiabá, 2002. Anais. Cuiabá, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2001. P 1-5.

VAN GENUCHTEN, M. TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal. 44: 892-898, 1980.

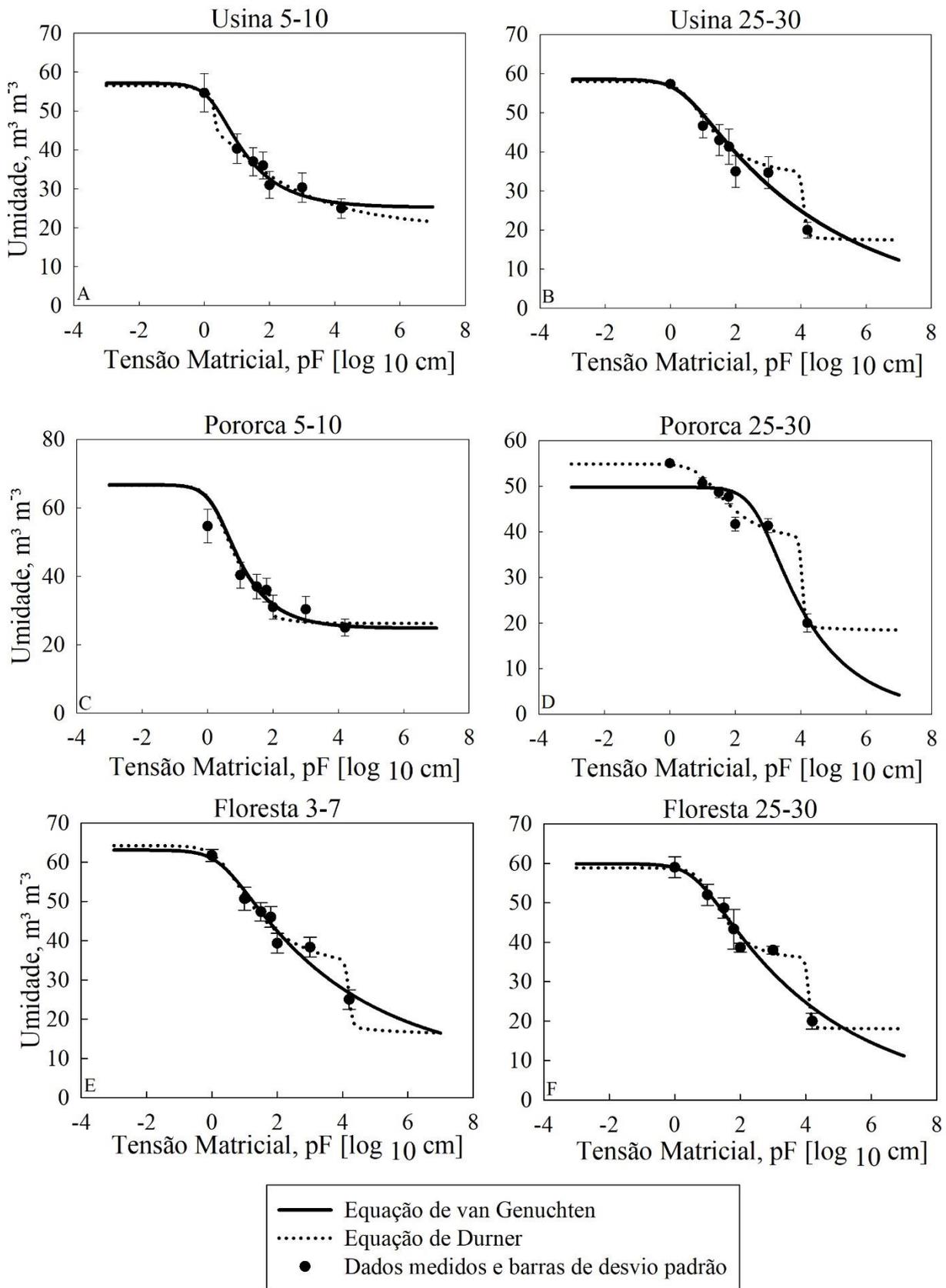
**Tabela 1.** Umidade volumétrica ( $m^3 m^{-3}$ ) de amostras do Latossolo Amarelo após serem submetidas e equilibradas em sete potenciais matriciais (pF).

Talhão	Profundidade		pF 0,0	pF 1,0	pF 1,5	pF 1,8	pF 2,0	pF 3,0	pF 4,2*	AD
	cm		$\theta [m^3 m^{-3}]$							
Usina	05-10	Média	0,55	0,40	0,37	0,36	0,31	0,30	0,25	0,06
		Desvio P	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	-	
	25-30	Média	0,57	0,47	0,43	0,41	0,35	0,35	0,20	0,15
		Desvio P	0,01	0,03	0,04	0,05	0,04	0,04	-	
Pororoca	05-10	Média	0,63	0,43	0,38	0,36	0,29	0,28	0,25	0,04
		Desvio P	0,01	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	-	
	25-30	Média	0,55	0,51	0,49	0,48	0,42	0,41	0,2	0,22
		Desvio P	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	-	
Floresta	03-07	Média	0,62	0,51	0,47	0,46	0,39	0,38	0,25	0,14
		Desvio P	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	-	
	25-30	Média	0,59	0,52	0,49	0,43	0,39	0,38	0,20	0,19
		Desvio P	0,03	0,03	0,03	0,05	0,01	0,01	-	

\*Dados de umidade retida a pF 4.2 (log cm) foram estimados pela textura e baseados em trabalho anterior de Teixeira (2001). Desvio P corresponde ao desvio padrão.

**Tabela 2.** Parâmetros das funções de retenção de água ajustados para amostras de Latossolo Amarelo, textura muito argilosa, coletados em áreas de canaviais (Usina e Pororoca) e de Floresta Primária Fazenda Jayoro - Presidente Figueiredo - AM.

Profundidade (cm)	Usina		Pororoca		Floresta	
	05-10	25-30	05-10	25-30	03-07	25-30
Parâmetros	Função Unimodal - van Genuchten					
$\theta_s (m^3 m^{-3})$	0,571	0,586	0,668	0,498	0,631	0,599
$\theta_r (m^3 m^{-3})$	0,252	0,000	0,248	0,000	0,075	0,000
$\alpha (cm^{-1})$	0,500	0,443	0,500	0,002	0,500	0,221
n	1,375	1,102	1,46	1,25	1,119	1,115
RMSE	0,015	0,028	0,016	0,033	0,023	0,029
Parâmetros	Função Bimodal - Durner					
$\theta_s (m^3 m^{-3})$	0,566	0,580	0,666	0,548	0,642	0,588
$\theta_r (m^3 m^{-3})$	0,199	0,175	0,262	0,184	0,163	0,181
$\alpha_1 (cm^{-1})$	0,499	0,282	0,500	0,000	0,000	0,101
n1	10,893	1,412	1,709	9,096	7,91	1,613
W1	0,246	0,59	0,841	0,538	0,355	0,564
$\alpha_2 (cm^{-1})$	0,500	0,000	0,011	0,091	0,452	0,000
n2	1,180	8,094	15,000	1,415	1,324	8,700
W2	0,754	0,410	0,159	0,462	0,645	0,436
RMSE	0,012	0,015	0,008	0,014	0,016	0,014



**Figura 1.** Funções de retenção da água ajustadas para amostras de Latossolo Amarelos sob canavial (Usina e Pororoca) e área de floresta nos horizontes A e Bw1 para os modelos unimodal (van Genuchten, 1980) e bimodal (Durner, 1994).

## Ajuste de equações de retenção de água em solos do Sudoeste da Amazônia

Fitting soil water retention equations to soil in the southwestern of Amazon

Wenceslau Geraldes Teixeira<sup>(1)</sup>; Fernando Igne Rocha<sup>(2)</sup>; Gabriela Dias<sup>(3)</sup>; Leticia Guimarães Pimentel<sup>(4)</sup>; Aline P. de Oliveira<sup>(1)</sup>; Ederson C. Jesus<sup>(5)</sup>

(1) Pesquisador - Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ [wenceslau.teixeira@embrapa.br](mailto:wenceslau.teixeira@embrapa.br); (2) Doutorando em Agronomia – Ciência do Solo / UFRRJ, Seropédica, RJ. (3) Graduanda Ciência Ambiental - UFF - Bolsista Pibic- Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, (4) Mestranda Programa PEAMB-UERJ - Bolsista Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ (4) Pesquisador - Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ

**RESUMO:** A avaliação da curva característica de retenção de água de um solo fornece informações para a avaliação de sua aptidão agrícola, de risco climático e orienta o manejo mais adequado, assim como possibilita estudos de modelagem hidrológica, da produtividade de cultivos e em estudos geotécnicos e ecológicos de distribuição da vegetação. O objetivo deste estudo foi estimar os valores de água disponível e ajustar a curva de retenção de água de horizontes selecionados de três áreas com predomínio de Luvissole Háplico, Plintossolo Argilúvico e Argissolo Amarelo localizadas no município de Bujari - Acre, para as equações de van Genuchten e Durner. Os Luvissoles Háplicos e Plintossolos Argilúvicos apresentam valores muito altos de água disponíveis nos horizontes superficiais. O Argissolo Amarelo tem valores reduzidos principalmente nos horizontes subsuperficiais. Os resultados mostraram que os solos apresentaram um bom ajuste para curvas unimodais para o Luvissole e Plintossolo e uma melhoria significativa no ajuste bimodal para o Argissolo. A curva de retenção de água (CRA) dos solos estudados pode ser descrita razoavelmente pelo modelo unimodal de van Genuchten, exceto os horizontes subsuperficiais do Argissolo Amarelo.

**Palavras-chave:** Curva de retenção da água no solo; água disponível; modelagem hidrológica.

**ABSTRACT:** The evaluation of the soil water retention curve provides information for the evaluation of its agricultural aptitude, and of climatic risk and guides, the most appropriate management, as well as allows studies of hydrological modeling, the productivity of crops, and geotechnical and ecological studies of vegetation distribution. The objective of this study was to estimate the values of available water and to adjust the water retention curve of selected horizons of three areas with a predominance of Luvissole Háplico, Plintossolo Argilúvico e Argissolo Amarelo located in the municipality of Bujari - Acre, for the van Genuchten and Durner equations. The Luvissole Háplico and

Plintossolo Argilúvico have very high values of available water in the surface horizons. The Argissolo Amarelo has reduced values mainly in the subsurface horizons. The results showed that the soils showed a good fit for unimodal curves for Luvissole and Plintossolo and a significant improvement in the bimodal fit for Argissolo. The water retention curve (WRC) of the studied soils can be reasonably described by the unimodal van Genuchten model, except for the subsurface horizons of the Argissolo Amarelo.

**Keywords:** Soil water retention curve; available water; hydrological modeling.

## INTRODUÇÃO

São extremamente escassas as informações sobre a retenção de água dos solos do sudoeste da Amazônia, em especial do estado do Acre. Dentre os raros estudos, destacam-se os trabalhos de Kotlar et al. (2020) e Portugal (2000). A avaliação da capacidade de retenção de água de um solo contribui com a avaliação de sua aptidão agrícola, de risco climático e orienta o manejo mais adequado; assim como possibilita estudos de modelagem hidrológica, da produtividade de cultivos e estudos geotécnicos e ecológicos de distribuição da biodiversidade da flora e fauna. Valores obtidos das umidades volumétricas de determinados solos na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e das estimativas da água disponível (AD) são parâmetros essenciais no manejo da irrigação e no zoneamento agrícola de risco climático (ZARC) (Assad et al., 2008). A disponibilidade de água no solo passível de ser absorvida pelas plantas assim como os potenciais para estimativas da CC e PMP para diferentes espécies e solos são motivos de debate e interpretações (Bonfante; Bouma, 2015). Há muitos anos modelos matemáticos e técnicas de simulação são utilizados para descrever de forma dinâmica a natureza da água no sistema solo-planta. A capacidade de um solo em reter água e disponibilizá-la para as plantas é

representada pela curva de retenção de água (CRA), a qual relaciona a fração volumétrica de água ( $\theta$ ) a uma dada tensão matricial ( $h$ ) (Jorge, et al. 2010). Portanto, um aumento da tensão matricial significa uma redução da água presente no solo (Hillel, 1998).

Muitos modelos matemáticos foram elaborados para descrever a CRA. Contudo, o modelo proposto por van Genuchten (1980) continua sendo o mais utilizado, uma vez que ele consegue representar essa função para a maioria dos solos estudados. Entretanto, o modelo de van Genuchten não é capaz de se ajustar adequadamente a solos com distribuição bimodal de poros, estes solos se ajustam melhor a modelos bimodais como o proposto por Durner (1994). Apesar do conhecimento de que vários solos do Brasil apresentam destruição de poros bimodal estes modelos ainda são pouco utilizados para ajustes de solos do Brasil (Carducci et al., 2011; Teixeira et al., 2001).

O objetivo deste trabalho foi ajustar e comparar os modelos uni modal (van Genuchten) e bimodal (Durner) que descrevem a retenção de água em função do potencial matricial (CRA) de três áreas com predomínio de Luvisolo Háptico, Plintossolo Argilúvico e Argissolo Amarelo descritos e amostrados no município de Bujari - Acre.

## MATERIAL E MÉTODOS

Perfis de solo representativos dos solos predominantes do sudoeste da Amazônia. Os solos amostrados para a avaliação da retenção de água em diferentes potenciais foram de três classes de solo: uma área de Luvisolo Háptico sob pastagem com predomínio da espécie *brachiaria* (*Urochloa brizantha*) com aproximadamente sete anos de plantio. Uma área com Plintossolo Argilúvico sob pastagens com cerca de 25 anos de plantio, e uma área de floresta primária com predomínio de Argissolo Amarelo. Foram coletadas amostras de solos indeformadas em triplicata, em três horizontes de cada classe de solo, todas as áreas amostradas na Fazenda Leblon, no município de Bujari – AC. Detalhes e caracterização dos perfis e áreas amostras estão disponíveis em Rocha (2022). As análises de retenção de água foram realizadas no Laboratório de Física do Solo da Embrapa Amazônia Ocidental, em Manaus. As umidades volumétricas do solo foram determinadas por gravimetria após atingir o equilíbrio nas tensões matriciais de 0; 1; 3; 6; 10 kPa em mesa de tensão. Posteriormente as amostras foram submetidas às tensões de 33; 110 e 500 kPa e 1500 kPa em câmaras de Richard, segundo os procedimentos descritos em Teixeira e Bhering (2017). Calculou-se a AD no solo subtraindo o valor da umidade na capacidade de campo (10 kPa) da umidade no ponto de murcha permanente (1500 kPa) para cada área com diferentes solos nos diferentes

horizontes. Os pares de umidade (volumétrica –  $m^3 m^{-3}$ ) e tensões de equilíbrio foram ajustados às equações de van Genuchten (1980) com a restrição de Mualem (1976), descrita abaixo:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha|h|)^n\right]^m}, m = 1 - 1/n$$

Em que  $\theta_s$  e  $\theta_r$  são, respectivamente, o volume de água na saturação e residual ( $m^3 m^{-3}$ );  $h$  é a tensão matricial da água no solo (cm de água – em módulo);  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  são parâmetros empíricos do modelo.

E a equação bimodal de Durner (1994):

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \sum_{i=1}^k w_i \left[1 + (\alpha|h|)^n\right]^{-m} + \theta_r, m = 1 - 1/n$$

Os parâmetros da Equação de Durner são como definidos previamente, sendo  $k$  o número de sub curvas (modas) e  $w_i$  é um fator de peso dado para cada moda, satisfazendo  $0 < w_i < 1$ . Para o ajuste de ambas as equações, denominadas de curva de retenção de água (CRA) foi utilizado o software HYPROP (2019). Os dados de tensão potencial matricial são apresentados e plotados em  $\log_{10}$  cmH<sub>2</sub>O, denominado de unidade pF. Foi utilizado como critério para qualidade e comparação dos ajustes das equações uni (vG) e bimodal (Durner) os menores valores da raiz do erro quadrático médio (RMSE).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios das umidades volumétricas do solo nos diferentes potenciais avaliados (Tabela 1) mostram elevada capacidade de retenção de água em baixos potenciais (até pF 2.5) para os horizontes do Luvisolo e Plintossolo estudados, que apresentam textura fina (Tabelas 1 e 2). O Argissolo estudado apresenta uma menor retenção de água em baixos potenciais (por ex. pF 2) o que reflete em baixos valores de AD neste solo.

Os valores médios da água retida nos potenciais (pF 2; 2,5; 3) apresentaram baixa redução da água ou mesmo mantiveram o valor apesar do aumento da tensão. Este fenômeno é raramente reportado, sendo a explicação física é que a água retida estava em poros que somente drenam em potenciais maiores (por exemplo pF 4.2). Alterações bruscas de temperaturas e procedimentos no laboratório que podem determinar esta ocorrência (Teixeira et al., 2021; Moraes et al., 1993a, b). Amostras com argilas ativas como dos solos encontrados no sudoeste da Amazônia, apresentam um longo tempo para o equilíbrio ser atingido e procedimentos laboratoriais inadequados (p. ex., perda de contato com as placas ou mesa de tensão, uso de diferentes equipamentos) (Ball; Hunter, 1988) podem causar erros nas

determinações do potencial de equilíbrio e da umidade das amostras.

Os valores de AD foram classificados (Teixeira et al., 2002) entre valores muito altos para o horizonte AB do Luvissole Háplico, e valores muito baixos nos horizontes AB e Bt do Argissolo Amarelo (Tabela 2).

Os coeficientes das equações de van Genuchten e Durner (Tabela 2) mostram que a retenção da água em diferentes potenciais, para maioria dos horizontes estudados pode ser descrita pelo modelo unimodal, exceto os horizontes AB do Luvissole Háplico, e os horizontes AB e Bt do Argissolo Amarelo, indicado pelos menores valores do RMSE. As CRA de todos os solos e seus horizontes são apresentados nas Figuras 1 e 2. A seleção de modelos que apresentam uma melhor descrição da relação entre a umidade e potencial próximo a saturação (potenciais menores que pF 2) é fundamental para estudos de simulação de fluxos em áreas de alta pluviosidade como na Amazônia, pois estas incertezas na descrição próxima da saturação do solo se refletem de forma exponencial na equação que descreve a condutividade hidráulica em função do potencial (Durner, 1994, van Genuchten, 1980).

## CONCLUSÕES

Os Luvissoles Háplicos e Plintossolos Argilúvicos do sudoeste da Amazônia apresentam valores muito alto de água disponível nos horizontes superficiais.

O Argissolo Amarelo apresentou valores baixos de AD principalmente nos horizontes subsuperficiais.

A curva de retenção de água (CRA) pode ser descrita razoavelmente pelo modelo unimodal de van Genuchten. Entretanto, para estudos que envolvam cálculos de fluxos de água derivados da CRA se recomenda o uso da equação bimodal para os horizontes subsuperficiais do Argissolo Amarelo.

## AGRADECIMENTOS

A USAID/NAS (PEER Project 4-299, USAID agreement AID-OAA-A-11-00012) pelo financiamento do projeto. Ao CNPq pela bolsa de produtividade de ECJ e WGT, e pela bolsa de estudo de doutorado na FIR. A CAPES/PDSE, pela concessão da bolsa de doutorado-sanduiche ao primeiro autor.

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/14Uk4naEIBxoZoibDtEgMV44U0KcsVwRKYcrf9TrB-30/edit?usp=sharing>

## REFERÊNCIAS

BALL, B. C.; HUNTER, R. The determination of water release characteristics of soil cores at low suctions. *Geoderma*, 43: 1952-212, 1988.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: *Advances in Soil Science*. Springer. New York, 1989. p. 177-213.

BONFANTE, A.; BOUMA, J. The role of soil series in quantitative Land Evaluation when expressing effects of climate change and crop breeding on future land use. *Geoderma*. 259-260, 2015. p. 187-195.

CARDUCCI, C. E. OLIVEIRA, G. C. SEVERIANO, E. C. ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:77-86, 2011.

CARDUCCI, C. E., et al. Retenção de água e distribuição bimodal de poros em solos sob sistema intensivo de manejo. *Engenharia Agrícola*. 2016. 33. 291 – 296.

DURNER W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*. 30: 211-223, 1994.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. Brasília, 2006. 412p.

KOTLAR, A. M.; VAN LIER, Q J.; SOUZA BRITO, E. de. Pedotransfer functions for water contents at specific pressure heads of silty soils from Amazon rainforest. *Geoderma*, v. 361, p. 114098, 2020.

MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. BACCHI, O. O. S. Heterogeneidade dos pontos experimentais de curvas de retenção da água no solo. *Scientia Agricola*, 50(3), 393-403. 1993a.

MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L. Variabilidade da água disponível de uma Terra Roxa Estruturada Latossólica. *Scientia Agricola*, 50(3), 404-412. 1993b.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Res. Res.*, 12;513-522, 1976.

PORTUGAL, A. F. Juruá dry land and wet land geoenvironments, northwest of Acre state. 2009. 148 f. (Tese Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009. 148 p.

Rocha, F. I., Ribeiro, T. G., Fontes, M. A., Schwab, S., Coelho, M. R. R., Lumberras, J. F., ... & Jesus, E. D. C. Land-Use System and Forest Floor Explain Prokaryotic Metacommunity Structuring and Spatial Turnover in Amazonian Forest-to-Pasture Conversion Areas. *Frontiers in Microbiology*, v. 12, p. 909, 2021.

TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, A. L. da S.; LUMBRERAS, J. F. Retenção de água em amostras de solos da XIII RCC, estado do Maranhão. In: SILVA, M. B. e; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, V. A. de (ed.). Guia de campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC do Maranhão. Brasília, DF: Embrapa, 2020. E-book. cap. 14.

TEIXEIRA, W. G.; BHERING, S. B. Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). Manual de métodos de análise de solo. 3ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2017, p. 34-46.

SCHINDLER, U. METER Group AG: HYPROFIT. Versão 4.2.2.0 [S.l.], 2019. Disponível em: <https://www.metergroup.com/>. Acessado em: 09 de setembro de 2022.

TEIXEIRA, W. G. Land use systems effects on soil physical and hydraulic properties of a clayey Ferralsol in the Central Amazon. Bayreuther Bodenkundliche Berichte. Bayreuth, v.72, 1-255 p

VAN GENUCHTEN, M. TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal. 44: 892-898, 1980.

**Tabela 1.** Umidades volumétricas do solo [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ] retidas em amostras de três perfis de solo localizados no sudoeste da Amazônia após equilíbrio a oito diferentes potenciais [ $\text{pF} - \log_{10} \text{cm}$ ]

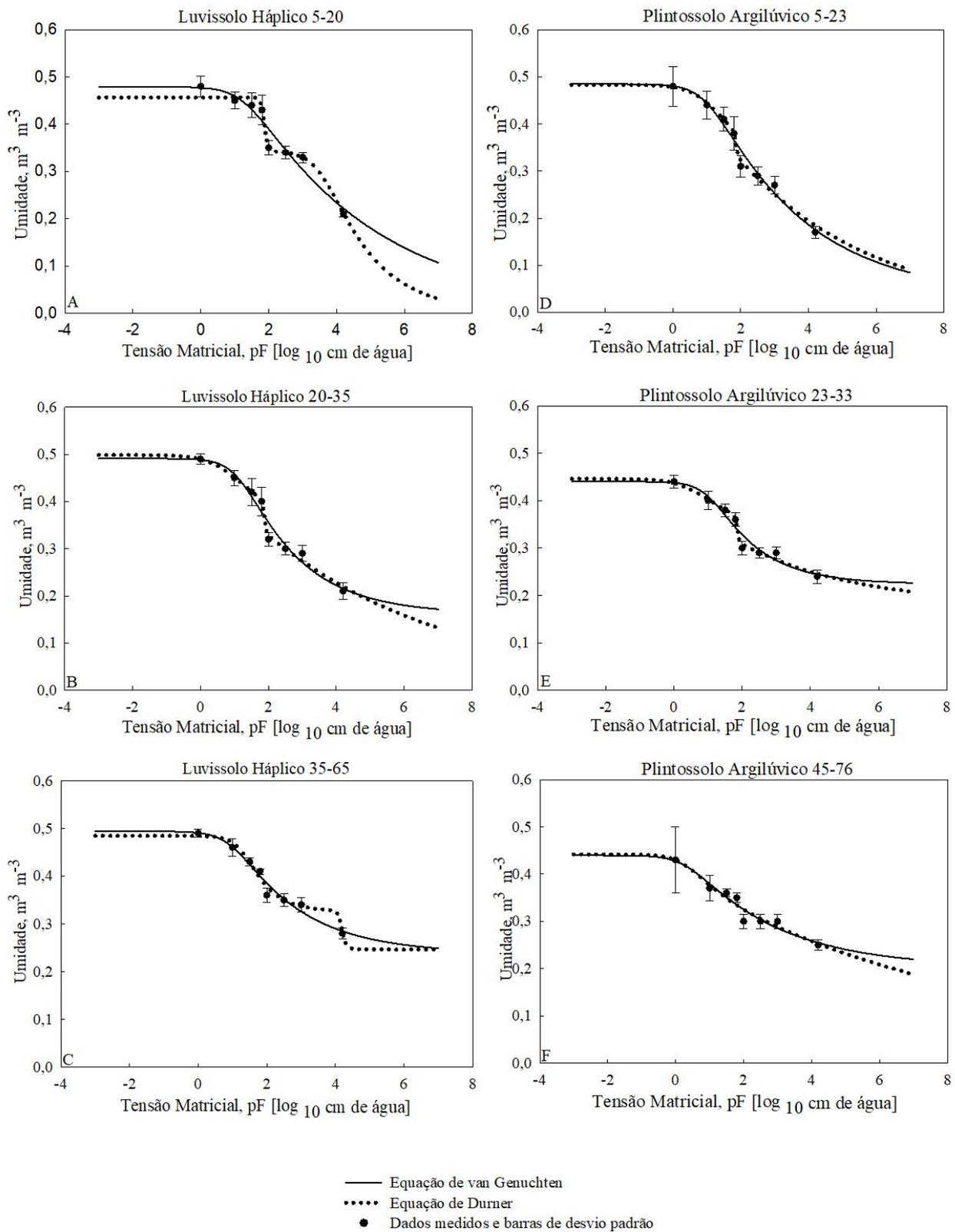
Classe de Solo	Horizonte	Espessura	ED	0	1	1,5	1,8	2	2,5	3	4,2	AD
		cm	$\theta$ [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]									
Luvissolo Háplico	AB	5-20	Média	0,48	0,45	0,44	0,43	0,35	0,34	0,33	0,21	0,14
			DP	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
	Bt1	20-35	Média	0,49	0,45	0,42	0,40	0,32	0,30	0,29	0,21	0,10
			DP	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01
	Bt2	35-65	Média	0,49	0,46	0,43	0,41	0,36	0,35	0,34	0,28	0,07
			DP	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Plintossolo Argilúvico	A	5-23	Média	0,48	0,44	0,41	0,38	0,31	0,29	0,27	0,17	0,14
			DP	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00
	AB2	23-33	Média	0,44	0,40	0,38	0,36	0,30	0,29	0,29	0,24	0,05
			DP	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	2Btgf2	45-76	Média	0,43	0,37	0,36	0,35	0,30	0,30	0,30	0,25	0,05
			DP	0,07	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Argissolo Amarelo	A	0-12	Média	0,46	0,42	0,38	0,34	0,22	0,21	0,21	0,13	0,09
			DP	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04
	AB	12-30	Média	0,46	0,43	0,38	0,34	0,19	0,18	0,18	0,16	0,03
			DP	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
	Bt	48-57	Média	0,48	0,41	0,32	0,27	0,15	0,15	0,15	0,13	0,02
			DP	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01

AD – Água Disponível; DP – Desvio Padrão; ED – Estatística Descritiva;

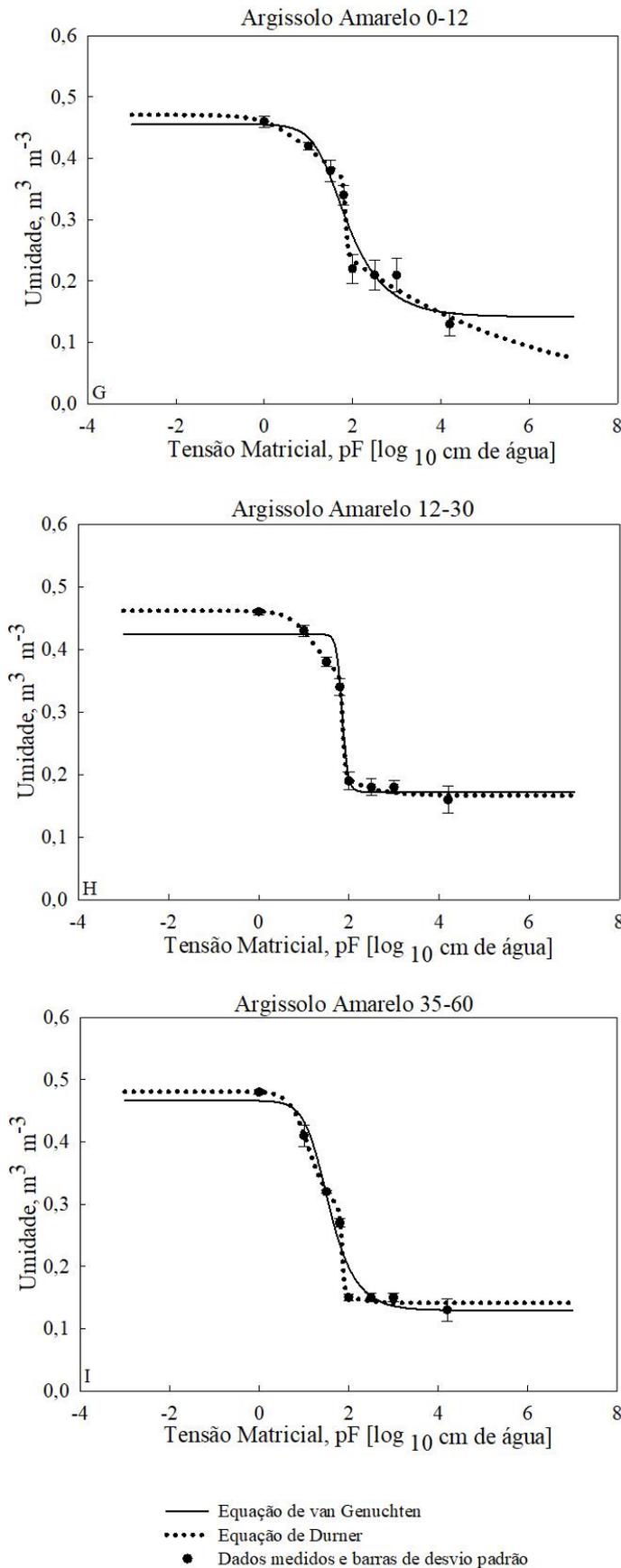
**Tabela 2.** Parâmetros das funções de retenção de água de van Genuchten e Durner de três perfis de solo localizados no sudoeste da Amazônia

Parâmetros	Luvissolo Háplico			Plintossolo Argilúvico			Argissolo Amarelo		
	FAS	A	AS	FA	FA	A	F	FAA	FA
Classe textural	5-20	20-25	35-65	5-23	23-33	45-76	0-12	12-30	48-57
Função unimodal - van Genuchten									
$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0,479	0,491	0,494	0,485	0,440	0,440	0,456	0,424	0,467
$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0,000	0,161	0,238	0,032	0,224	0,202	0,142	0,172	0,129
$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	0,054	0,075	0,109	0,102	0,092	0,500	0,038	0,015	0,048
n	1,114	1,255	1,228	1,155	1,323	1,167	1,612	7,182	1,986
RMSE	<b>0,020</b>	0,017	0,011	0,015	0,014	0,013	0,027	<b>0,021</b>	<b>0,024</b>
Função bimodal – Durner									
$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0,457	0,499	0,485	0,483	0,446	0,442	0,471	0,462	0,481
$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0,000	0,000	0,247	0,000	0,178	0,000	0,000	0,167	0,141
$\alpha_1$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	0,000	0,013	0,000	0,014	0,500	0,500	0,014	0,094	0,105
n1	1,305	15,000	7,535	15,000	1,129	1,517	15,000	1,741	2,233
W1	0,752	0,129	0,338	0,097	0,805	0,140	0,264	0,465	0,602
$\alpha_2$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	0,014	0,351	0,046	0,146	0,014	0,500	0,500	0,014	0,014
n2	8,823	1,079	1,719	1,111	15,000	1,046	1,100	15,000	15,000
W2	0,248	0,871	0,662	0,903	0,195	0,860	0,736	0,535	0,398
RMSE	<b>0,010</b>	0,007	0,009	0,010	0,007	0,013	0,011	<b>0,004</b>	<b>0,005</b>

Classes texturais - A= Argila; F = Franca; FA = franco-arenosa; FAA = franco-argilo-arenosa; FAS = franco-argilo-siltosa. FA = Franco-arenosa. RMSE = Raiz do erro quadrático médio).



**Figura 1.** Funções de retenção da água ajustadas para amostras de Luvisolo Háplico (Pasto Novo) nos horizontes BA, Btg1 e Btg2 e para amostras de Plintossolo Argilúvico (Pasto Velho) nos horizontes AB, Bt1gf e Bt3gf para os modelos unimodal (van Genuchten, 1980) e bimodal (Durner, 1994).



**Figura 2.** Funções de retenção da água ajustadas para amostras de Argissolo Amarelo em área de floresta nos horizontes A, AB e Bw2 para os modelos unimodal (van Genuchten, 1980) e bimodal (Durner, 1994).

## Predição da resistência à penetração do solo em um sistema agroflorestal com dendê na Amazônia por meio do Hydrus-1D

Prediction of soil penetration resistance in an agroforestry system with oil palm in the Amazon using Hydrus-1D

**Raimundo Leonardo Lima de Oliveira<sup>(1)</sup>; Wenceslau Geraldes Teixeira<sup>(2)</sup>; Steel Silva Vasconcelos<sup>(3)</sup>; Alexandre Ortega Gonçalves<sup>(2)</sup>; Débora Cristina Castellani<sup>(4)</sup>; Osvaldo Ryohei Kato<sup>(3)</sup>;**

<sup>(1)</sup>Doutorando do Curso de Pós-Graduação em Agronomia, UFRA, Belém, PA. E-mail: [raimundoleonardo22@gmail.com](mailto:raimundoleonardo22@gmail.com); <sup>(2)</sup>Pesquisador Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: [wenceslau.teixeira@embrapa.br](mailto:wenceslau.teixeira@embrapa.br); <sup>(3)</sup>Pesquisador Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: [alexandre.ortega@embrapa.br](mailto:alexandre.ortega@embrapa.br); <sup>(4)</sup>Pesquisador Embrapa Amazônia oriental, Belém, PA. E-mail: [steel.vasconcelos@embrapa.br](mailto:steel.vasconcelos@embrapa.br); <sup>(3)</sup>Pesquisador Embrapa Amazônia oriental, Belém, PA. E-mail: [osvaldo.kato@embrapa.br](mailto:osvaldo.kato@embrapa.br); <sup>(4)</sup>Pesquisadora do Centro de Inovação, Área de Pesquisa Avançada, NATURA, Cajamar, SP. E-mail: [deboracastellani@natura.net](mailto:deboracastellani@natura.net).

**RESUMO:** A resistência à penetração (RP) é importante propriedade nos estudos de compactação. Assim, este trabalho teve como objetivo prever a RP na zona de manejo, pilha de folhas, em um sistema agroflorestal com dendeeiro na Amazônia. Coletaram-se amostras de solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm, para determinação dos parâmetros hidráulicos do solo. A RP foi medida em campo com um penetrômetro de impacto. Com os dados de RP e umidade volumétrica medidos em campo, ajustou-se a uma equação que prevê a RP em função da umidade. Com os dados de precipitação, evapotranspiração e parâmetros hidráulicos do solo, pode-se simular no Hydrus-1D a dinâmica da umidade volumétrica na zona de pilha de folhas. Com a umidade volumétrica, predizemos a RP no período 2008-2020. A RP na camada 0-10 cm nos meses de menor e maior umidade ficou abaixo do limite crítico (2,0 MPa). A RP aumenta com a profundidade do solo, devido ao aumento da densidade aparente, diminuição do teor de matéria orgânica e mudanças texturais do solo. Concluímos, que estudos futuros sobre RP, nos sistemas agroflorestais com dendeeiro, devem avançar nas demais zonas de manejo com presença e ausência de plantas.

**Palavras-chave:** Amazônia oriental; compactação; modelagem.

**ABSTRACT:** Penetration resistance (PR) is an important property in compaction studies. Thus, this study aimed to predict PR in the management zone, leaf pile, in an agroforestry system with oil palm in Amazonia. We collected soil samples in the 0-10 and 10-20 cm layers to determine the soil hydraulic parameters. The PR was measured in the field with an impact penetrometer (Stolf et al., 2014). With the PR

and volumetric moisture data measured in the field, we can fit an equation which predicts PR as a function of moisture. With data on precipitation, evapotranspiration and hydraulic parameters, we simulated in Hydrus-1D, the dynamics of volumetric moisture in the leaf pile zone. With the volumetric moisture, we predict the PR in the period 2008-2020. The PR in the 0-10 cm layer, in the months of lower and higher moisture, was below the critical limit (2.0 MPa). PR increases with soil depth, probably due to increased bulk density, decreased organic matter content and textural changes in the soil. We conclude that future studies on PR, in agroforestry systems with oil palm, should advance in other management zones with presence and absence of plants.

**Keywords:** Amazon eastern; compression; modeling.

### INTRODUÇÃO

O dendeeiro ou palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é uma palmeira oleaginosa de origem Africana e tem sido cultivada tradicionalmente na Amazônia em sistemas de monocultivo (Sedap, 2021). No entanto, sistemas agroflorestais baseados no dendeeiro têm sido estudados e recomendados como alternativa de menor impacto ambiental (Carvalho et al., 2014; Ramos et al., 2018) e com potencial de melhorar a qualidade do solo, comparado ao monocultivo de dendê (Gomes et al., 2021).

A resistência à penetração (RP), tem sido estudada em diversos sistemas agropecuários, para avaliar o estado de compactação dos solos (Dearmon et al., 2020; Moraes et al., 2020). As práticas de manejo podem influenciar no teor de matéria orgânica, na densidade do solo e na umidade e, consequentemente, na RP (Gabriel et al., 2021). Em geral, 2,0 MPa, tem

sido utilizado como limite crítico de RP que pode afetar o crescimento de raízes (Tormena et al., 2007).

Na Amazônia, não se tem conhecimento de estudos sobre a dinâmica da RP em sistemas agroflorestais com dendezeiro. Nesses sistemas de cultivo, as práticas de manejo podem influenciar na RP. Assim, este trabalho teve como objetivo prever a RP na zona de manejo, pilha de folhas, de um sistema agroflorestal com dendezeiro na Amazônia.

## MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida numa propriedade, que está localizada no município de Tomé-Açu, Estado do Pará, Brasil. O solo da área é caracterizado como Latossolo Amarelo distrófico de textura franco arenosa (Embrapa, 2018). O estudo foi conduzido em um sistema agroflorestal que ocupa uma área de 2,0 ha e tem o dendezeiro como principal espécie de valor econômico.

O sistema consiste em linhas duplas de palma de óleo (espaçamento de 7,5 m entre linhas e 9,0 m entre plantas), alternada por faixas com espécies herbáceas, arbustivas e arbóreas. Além do dendezeiro as espécies predominantes eram: *Euterpe oleracea*, *Carapa guineenses*, *Oenocarpus mapora*, *Theobroma cacao*, *Bertholletia excelsa*, *Adenantha pavonina*, *Inga edulis*, *Tabebuia sp*, *Hymenaea courbaril*, *Mangifera indica*, *Swietenia macrophylla*, *Azadirachta indica* e *Viola surinamensis*.

Coletamos amostras de solo na zona de manejo, pilha de folhas, local de deposição das folhas podadas do dendezeiro e do cacauzeiro nas camadas 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm do solo. Para representar a camada 0-10 cm, utilizamos a média das camadas 0-5 e 5-10 cm. No laboratório determinamos a curva de retenção de água do solo (CRA), por meio das câmaras de Richards. Para o ajuste dos parâmetros da CRA, utilizamos o RETC (Van Genuchten et al., 1991).

A RP determinamos por meio de um penetrômetro de impacto (Stolf et al., 2014). Com os dados de RP e umidade gravimétrica coletados em campo, ajustamos a uma equação que prediz a RP em função da umidade volumétrica, proposta por Busscher et al. (1997). A densidade do solo e a umidade gravimétrica determinamos, conforme metodologia da Embrapa (2017).

Usamos os dados de precipitação no período 2008-2020, pertencentes a torre micrometeorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no município de Tomé-Açu. As falhas nos dados de clima, preenchemos por meio do projeto Nasa Power. A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) calculamos pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Com os dados de clima e os parâmetros hidráulicos do solo, simulamos no Hydrus-1D a dinâmica da umidade do solo na zona de manejo,

pilha de folhas, nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm do solo. Usamos a equação proposta por Busscher et al. (1997), para prevermos a RP, no período 2008-2020. Os gráficos foram feitos no software SigmaPlot 11.0.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em geral, a densidade do solo é menor na superfície (0-10 cm) e aumenta com a profundidade do solo (Figura 1). Nas camadas mais superficiais devido o aporte contínuo de matéria orgânica proveniente das folhas do dendezeiro e do cacauzeiro influenciam num maior teor de carbono e, conseqüentemente, menor densidade aparente (Frazão et al., 2013; Ramos et al., 2018).

No geral, os meses de maior ou menor umidade do solo (Figuras 3A e 4A), é reflexo do período chuvoso e de maiores ou menores perdas de água do solo para atmosfera pelos processos de evaporação ou evapotranspiração (Figuras 2A e 2B).

A RP na camada 0-10 cm ficou abaixo do limite crítico (2,0 MPa), nos meses mais seco e chuvoso dos anos 2008-2020 (Figura 3B). Na superfície do solo devido a densidade aparente ser menor e apresentar maior teor de matéria orgânica, isso influenciou numa menor RP em comparação as camadas mais profundas do solo. O manejo que favorece a cobertura permanente do solo contribui num maior teor de matéria orgânica, menor densidade aparente e garante também maior retenção de umidade e, conseqüentemente, impactará na RP (Gabriel et al., 2021; Sayedahmed, 2015; Vaz et al., 2011).

Na camada 10-20 cm (Figura 4B), a RP nos meses de menor umidade do solo, foi superior ao limite crítico (2,0 MPa), que afeta o crescimento de raízes (Tormena et al., 2007). O aumento da RP em profundidades pode ser provavelmente por fatores, como maior densidade aparente, menor teor de matéria orgânica e mudanças na textura do solo que impactam no comportamento da RP (Vaz et al., 2011). O estudo recente de Silva Chaves et al. (2020) na Amazônia oriental em sistemas agroflorestais baseados nas espécies *Passiflora edulis* e *Theobroma grandiflorum*, mostraram que a RP variou significativamente dentro da profundidade do solo, corroborando com nossos resultados. Portanto, o aumento da RP em profundidade nesse solo, é provavelmente um processo natural e não de natureza antrópica.

## CONCLUSÕES

A resistência à penetração na pilha de folhas é menor na camada superficial do solo, comparado as camadas subsuperficiais, mesmo nos períodos de maior ou menor umidade do solo.

Estudos futuros sobre resistência à penetração nos sistemas agroflorestais com dendezeiro devem

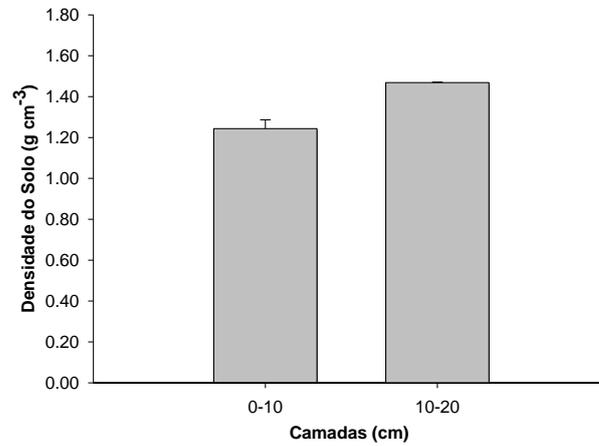
avançar nas demais zonas de manejo com presença e ausência de plantas.

## AGRADECIMENTOS

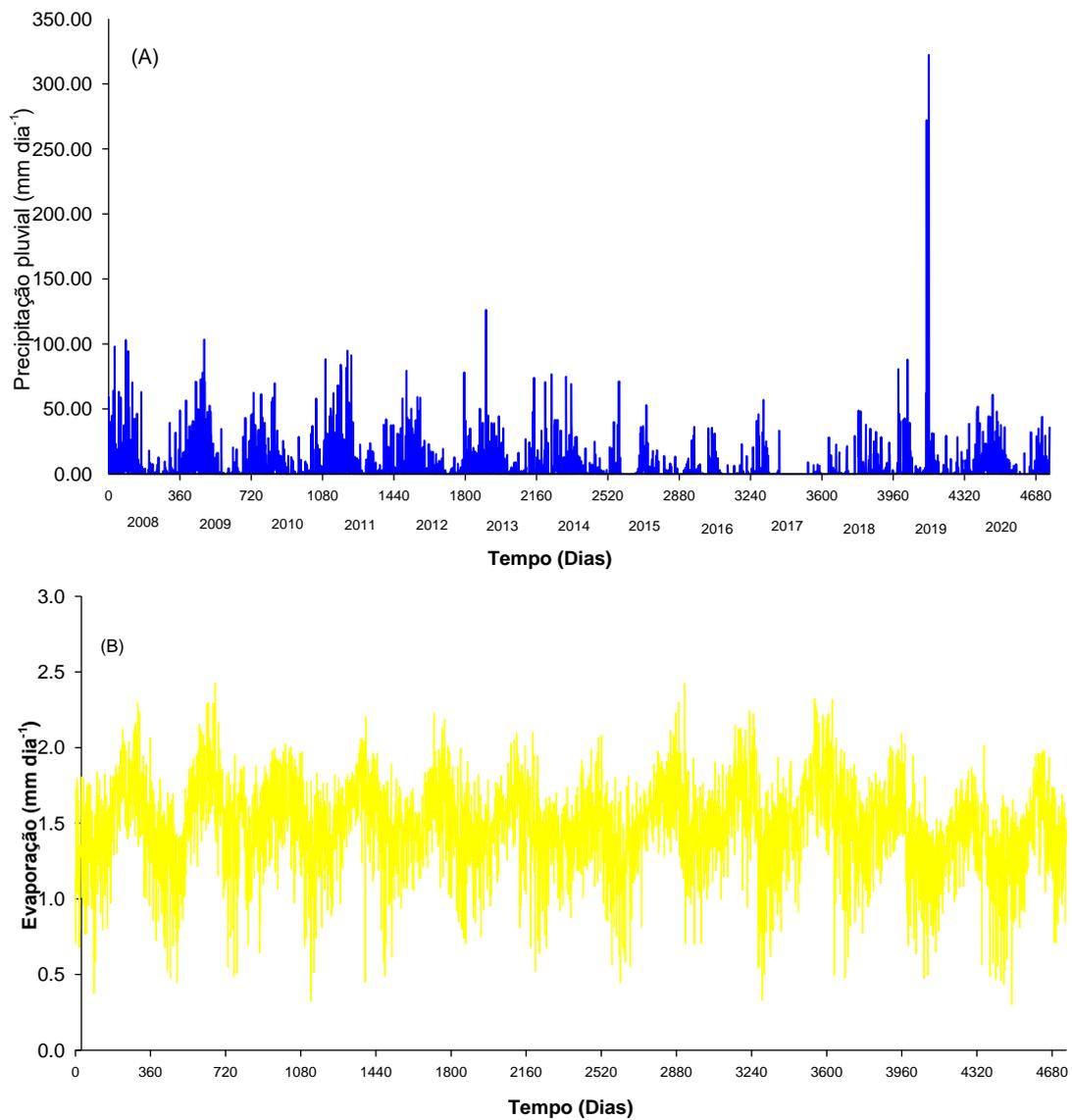
Agradecemos aos agricultores que contribuíram para realização desta pesquisa. Ao projeto SAF Dendê: “Conciliando conservação com meios de vida”, resultado da parceria entre Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu (CAMTA), Natura Inovação e Tecnologia de Produtos-Ltda, Embrapa Amazônia Oriental (CPATU), Embrapa Solos, Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal (ICRAF), e financiado pela Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional (USAID). À Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Estado do Pará (FAPESPA), pela concessão de bolsa de estudo a RLLO.

## REFERÊNCIAS

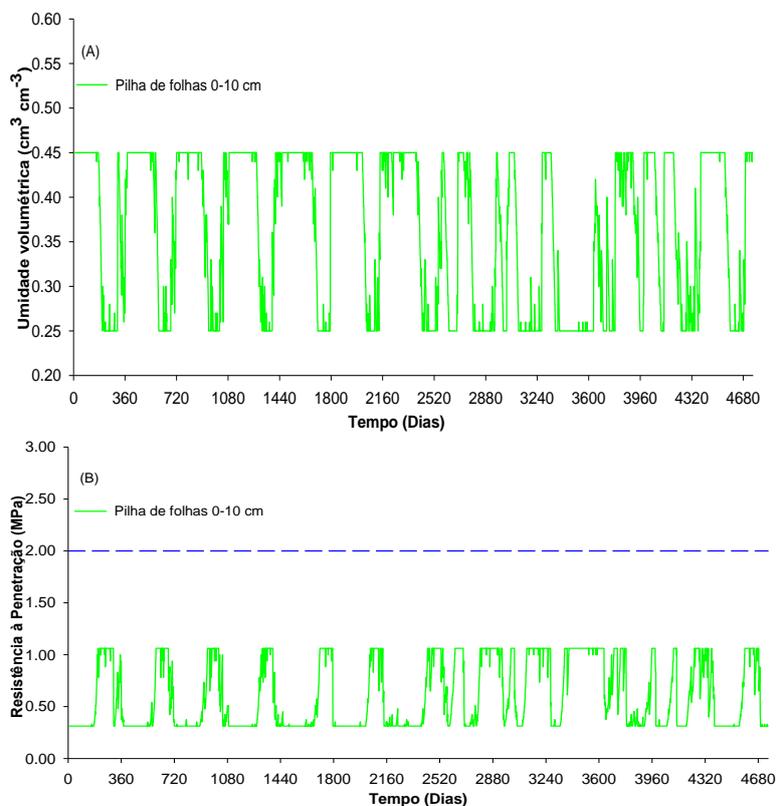
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, p. 1-333, 1998.
- BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, v. 43, p. 205-217, 1997.
- CARVALHO, W. R.; VASCONCELOS, S. S.; KATO, O. R.; CAPELA, C. J. B.; CASTELLANI, D. C. Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon. **Agroforestry systems**, v. 88, p. 357-368, 2014.
- DEARMOND, D.; FERRAZ, J. B.; EMMERT, F.; LIMA, A. J. N.; HIGUCHI, N. An Assessment of Soil Compaction after Logging Operations in Central Amazonia. **Forest Science**, v. 66, p. 230-241, 2020.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF, 2017. 573 p.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF, 2018. 356 p.
- FRAZÃO, L. A.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. E.; CERRI, C. C. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. **Gcb Bioenergy**, v. 5, p. 384-390, 2013.
- GABRIEL, J. L.; GARCÍA-GONZÁLEZ, I.; QUEMADA, M.; MARTIN-LAMMERDING, D.; ALONSO-AYUSO, M.; HONTORIA, C. Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content. **Geoderma**, v. 386, p. 1-8, 2021.
- GOMES, M. F.; VASCONCELOS, S. S.; VIANA-JUNIOR, A. B.; COSTA, A. N. M.; BARROS, P. C.; KATO, R. O.; CASTELLANI, D. C. Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. **Land Degradation & Development**, v. 32, p. 4313-4326, 2021.
- MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; MASTROBERTI, A. A.; LEVIEN, R.; LEITNER, D.; SCHNEPF, A. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 200, p. 1-14, 2020.
- RAMOS, H. M. N.; VASCONCELOS, S. S.; KATO, O. R.; CASTELLANI, D. C. Above-and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. **Agroforestry systems**, v. 92, p. 221-237, 2018.
- SILVA CHAVES, S. F.; GAMA, M. A. P.; ALVES, R. M.; OLIVEIRA, R. P.; NETO, J. L. P.; LIMA, V. M. N. Evaluation of physicochemical attributes of a yellow latosol under agroforestry system as compared to secondary forest in the Eastern Amazon. **Agroforestry systems**, v. 94, p. 1903-1912, 2020.
- SEDAP, 2021. **Secretária de Estado de Desenvolvimento Agropecuário e da Pesca**. Disponível:<<http://www.sedap.pa.gov.br/content/dend%C3%AA>>. Acesso em: 03 dez. 2021.
- STOLF, R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; SILVA, L. C. F. D.; MARGARIDO, L. A. C. Penetrômetro de impacto stolf-programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 774-782, 2014.
- TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. D. Variação temporal do interval hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 211-219, 2007.
- VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. US Salinity Lab., USDA, Riverside, CA, 1991.
- VAZ, C. M.; MANIERI, J. M.; DE MARIA, I. C.; TULLER, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v. 166, p. 92-101, 2011.



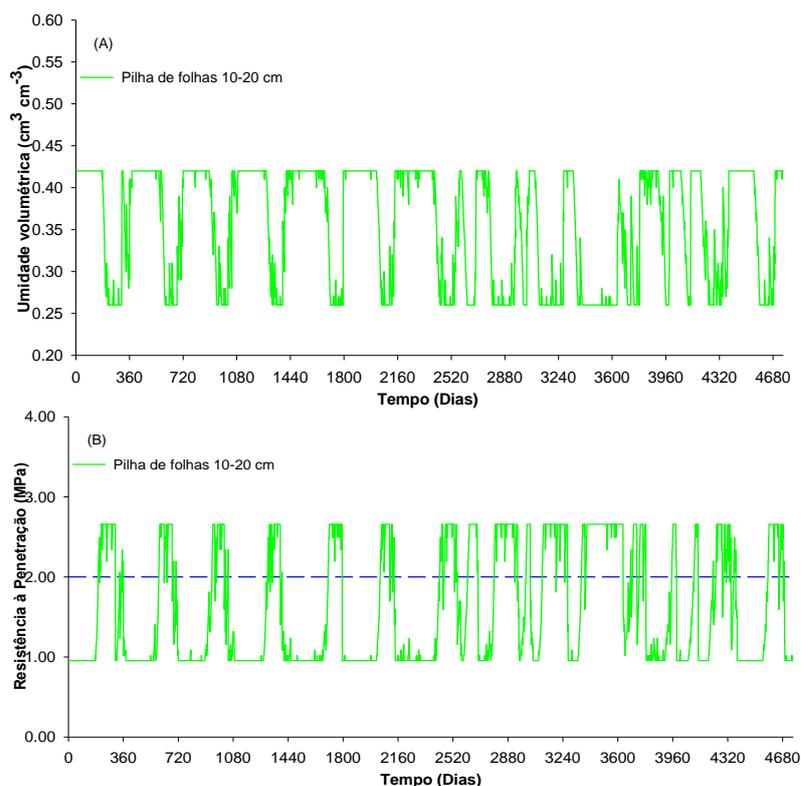
**Figura 1.** Densidade do solo na zona de manejo, pilha de folhas, de um sistema agroflorestal com dendezeiro em Tomé-Açu, Amazônia oriental, Brasil.



**Figura 2.** Precipitação (A) e evaporação (B) em um sistema agroflorestal com dendezeiro em Tomé-Açu, Amazônia oriental, Brasil.



**Figura 3.** Umidade volumétrica (A) e resistência à penetração (B) na zona de manejo, pilha de folhas, de um sistema agroflorestal com dendezeiro em Tomé-Açu, Amazônia oriental, Brasil. A linha azul tracejada indica o limite crítico que afeta o crescimento de raízes (Tormena et al., 2007).



**Figura 4.** Umidade volumétrica (A) e resistência à penetração (B) na zona de manejo, pilha de folhas, de um sistema agroflorestal com dendezeiro em Tomé-Açu, Amazônia oriental, Brasil. A linha azul tracejada indica o limite crítico que afeta o crescimento de raízes (Tormena et al., 2007).

## Simulação da dinâmica de nitrato e potássio pelo modelo HYDRUS-1D em solos da região canavieira de Piracicaba

HYDRUS-1D subsurface simulation of nitrate and potassium dynamics in sugarcane fields in Piracicaba

**Bruna Marques de Queiroz<sup>(1)</sup>; Isabela Klefenz Rabello de Oliveira<sup>(2)</sup>; Luciano Alves de Oliveira<sup>(3)</sup>; Jarbas Honorio de Miranda<sup>(4)</sup>**

(1) Mestranda do Curso de Pós-Graduação de Engenharia de Sistemas Agrícolas, ESALQ, Piracicaba, SP, [bruna.marques.queiroz@usp.br](mailto:bruna.marques.queiroz@usp.br); (2) Graduanda do Curso de Engenharia Agrônômica, ESALQ, Piracicaba, SP, [isabela.klefenz@usp.br](mailto:isabela.klefenz@usp.br); (3) Pós-doutorando na Universidade de Illinois, Champaign, IL, [luciano8@illinois.edu](mailto:luciano8@illinois.edu); (4) Professor associado no Departamento de Engenharia de Biosistemas, ESALQ, Piracicaba, SP, [jhmirand@usp.br](mailto:jhmirand@usp.br)

**RESUMO:** Com enfoque no cultivo e manejo nutricional da cana-de-açúcar, as pesquisas evidenciam a importância de estudos sobre a dinâmica do nitrogênio e de potássio no solo. Nesse sentido, o principal objetivo do presente estudo foi a utilização do modelo HYDRUS-1D para simular a dinâmica de nitrato e potássio em dois tipos diferentes de solo da região canavieira de Piracicaba (Latossolo Vermelho-Amarelo e Nitossolo Vermelho). Essas simulações foram realizadas sob diferentes condições climáticas da região e ao longo do ciclo da cana-de-açúcar. Para realizar as simulações foram obtidos parâmetros de transporte do nitrato e do potássio por meio do ajuste numérico de curvas de distribuição de efluentes (*Breakthrough Curves* (BTC)), assim como dados climáticos do posto meteorológico da ESALQ/USP e dados do crescimento da raiz durante o ciclo da cultura. Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo HYDRUS-1D possibilitou um melhor entendimento da dinâmica dos nutrientes (nitrogênio e potássio), nas condições descritas anteriormente, evidenciando uma maior adsorção do íon potássio no Nitossolo, bem como, um maior deslocamento do íon nitrato nesse tipo de solo.

**Palavras-chave:** cana-de-açúcar; dinâmica de solutos; curvas de efluentes.

**ABSTRACT:** With a focus on the cultivation and nutritional management of sugarcane, research shows the importance of studies on the dynamics of nitrogen and potassium in the soil. In this sense, the main objective of this research was to characterize movement patterns of nitrate and potassium for dry, standard, and wet years in the sugarcane region of Piracicaba (using red-yellow Rhodic Ferralsol and Rhodic Nitisol). These simulations were carried out under different climatic conditions in the region and throughout the sugarcane cycle. To perform these simulations, nitrate and potassium transport parameters were obtained through the numerical adjustment of effluent distribution curves

(*Breakthrough Curves* (BTC)), as well as climatic data from the ESALQ/USP meteorological station and measurements of root growth data during the crop cycle. In view of the results obtained, it can be concluded that the HYDRUS-1D model enabled a better understanding of the dynamics of nutrients (nitrogen and potassium), under the conditions described above, showing greater adsorption of potassium in the Rhodic Nitisol, as well as a greater displacement of nitrate for that same type of soil.

**Keywords:** sugar cane; solution dynamics; breakthrough curves.

### INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. O último levantamento realizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) em 2019 aponta que o país produziu 752 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, o que resultou na produção de aproximadamente 30 toneladas de açúcar e 34 bilhões de litros de etanol. Dessa forma, nota-se que a cana-de-açúcar possui significativa importância para o agronegócio e para a produção nacional de combustível.

Um bom manejo nutricional e a realização de boas práticas culturais no cultivo da cana-de-açúcar são fundamentais para elevação da sua produtividade, por esse motivo tais atividades são alvos de pesquisas que evidenciam a importância do nitrogênio (N), disponibilizado na forma de nitrato para a planta, e do potássio (K) no ciclo produtivo da cultura.

Por se tratar de dois íons que apresentam manejos distintos, o nitrato com aspectos ligados à “contaminação ambiental” e o potássio com um aspecto “econômico”, o entendimento quanto à dinâmica desses íons no solo torna-se foco de pesquisas que objetivam prevenir riscos de problemas ambientais e otimizar a utilização de recursos na produção agrícola (VOURLITIS et al., 2017). Para auxiliar no entendimento dessa dinâmica, o modelo

HYDRUS-1D, software amplamente utilizado na simulação do movimento unidimensional de água, calor e solutos em um meio não saturado, se apresenta como uma importante ferramenta (ŠIMŮNEK et al., 2013).

A hipótese da pesquisa é que há uma influência do solo, do clima e do crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar no transporte dos íons nitrato e potássio. Portanto, o principal objetivo foi simular a dinâmica dos íons em dois solos distintos pelo modelo HYDRUS-1D, sob diferentes condições climáticas da região e avaliar de que maneira a classe textural do solo, o crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar e as condições meteorológicas influenciaram na dinâmica do nitrato e potássio no solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida junto ao Laboratório de Física do Solo, no Departamento de Engenharia de Biosistemas, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), no qual colunas de solo foram preenchidas com Latossolo Vermelho Amarelo e Nitossolo Vermelho, solos coletados em uma área do departamento, para elaboração das *Breakthrough Curves (BTC'S)*. Para isso, as colunas foram saturadas por capilaridade, lavadas com água destilada para que todos os íons presentes fossem lixiviados e comprovada a condição de regime permanente, deu-se início a passagem das soluções de interesse contendo os íons nitrato e potássio. Em seguida foram coletados volumes sequenciais de efluentes de 15 mL e realizada a mensuração das concentrações dos íons.

Os parâmetros de transporte dos íons nitrato e potássio foram obtidos a partir do ajuste numérico das curvas de distribuição de efluentes pelo modelo STANMOD (**S**Tudio of **A**Nalytical **M**ODEls), os quais foram: número de Peclet, coeficiente de dispersão, número de Peclet em função da dispersividade, número de Peclet em função da velocidade da água nos poros e fator de retardamento. Estes foram utilizados para a realização das simulações no modelo HYDRUS-1D.

Para o estudo da influência climática na dinâmica dos solutos, os dados climáticos foram obtidos diretamente da base de dados do posto meteorológico da ESALQ/USP para os anos de 1978 (ano classificado como “seco”), 2018 (“intermediário”) e 1983 (“chuvoso”). De posse desses dados também foi calculada a evapotranspiração diária (ETP).

Com a finalidade de estudar de que maneira o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar influencia na dinâmica dos íons no solo, foram utilizados dados do crescimento radicular durante cada fase do ciclo de cultivo, os quais foram avaliados a partir da densidade de raízes (%) por profundidade.

O modelo das propriedades hidráulicas adotado na simulação foi o de van Genuchten (1980), sem considerar o fenômeno da histerese. Para as condições de contorno, foram adotadas a condição atmosférica com escoamento superficial como condição superior e livre drenagem como a inferior. Com relação ao transporte de solutos, o modelo de equilíbrio foi empregado. As condições de contorno nesse caso foram: superior, concentração do fluxo de entrada; inferior, gradiente de concentração zero; e condições iniciais baseadas nas concentrações tomadas na fase líquida.

Para a simulação da absorção de água pela raiz, foi utilizado o modelo de Feddes, em que o HYDRUS-1D fornece os parâmetros de acordo com a cultura que está sendo simulada.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como o nitrato é um ânion, a tendência deste íon, ao contrário do potássio, é ficar mais retido no solo de textura arenosa. Logo, pode ser visto nas Figuras 1, 2 e 3 que a adsorção deste íon foi maior no Latossolo, esse processo é causado pela atração eletrostática entre o nitrato e os sítios positivamente carregados do Latossolo. A retenção do nitrato está relacionada às propriedades físicas e químicas dos solos (BLACK & WARING, 1979). Porém, pode-se observar que a alta quantidade de chuvas no ano “chuvoso” provocou lixiviação desse nutriente, sendo que ele ficou disponível no solo apenas 75 dias após o início da simulação no Latossolo e 150 dias no Nitossolo.

Portanto, em um ano chuvoso no solo argiloso, o nitrato pode ter um deslocamento muito rápido para as camadas inferiores do solo, o que pode ser perigoso devido ao potencial de contaminação do lençol freático.

Diante da característica química do potássio, tratando-se de um cátion, a sua distribuição é afetada fundamentalmente pelas propriedades hidráulicas e físico-químicas do solo, além da taxa de aplicação de água no solo que, diante das condições simuladas, pode-se notar que houve uma maior adsorção de potássio no Nitossolo em relação ao Latossolo. Isso se deve principalmente à predominância de cargas negativas no Nitossolo devido ao excesso do teor de argila em sua composição, enquanto o Latossolo apresenta baixa CTC e por isso o nutriente é deslocado muito mais facilmente nesse meio. Com isso, pode ser visto que o potássio fica mais retido e disponível na solução do solo para a cultura ao longo do período de cultivo no Nitossolo em comparação ao Latossolo.

Pode ser visto que, devido à alta quantidade de chuvas, a concentração de nitrato e potássio reduziu-se rapidamente na zona radicular e os nutrientes se tornaram indisponíveis para a planta.

Nas simulações realizadas pelo modelo HYDRUS-1D para o ano intermediário, pode ser observado pela Figura 2 que o nitrato seguiu a tendência de ficar mais retido no Latossolo, e o potássio seguiu a tendência de ficar mais retido no Nitossolo (no LVA a concentração de  $K^+$  na zona superficial é reduzida logo no início do ciclo), porém, diferentemente do apresentado no ano “chuvoso”, nesse caso os íons ficaram mais disponíveis nestes tipos de solo ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, sendo deslocados para as camadas mais profundas e não lixiviados, devido à menor quantidade de chuva.

Nos diferentes pontos em profundidade, as linhas que representam a concentração do íon  $K^+$  no solo, estão mais próximas no Nitossolo para o ano intermediário do que no ano seco (Figura 3), uma vez que no Nitossolo o perfil ficou úmido homogeneamente em todos os pontos e por isso o potássio teve uma distribuição melhor e homogênea ao longo do perfil. Já no ano seco, esse espaçamento é um pouco maior devido à menor quantidade de chuvas o que causa maior dificuldade na movimentação do potássio no solo.

A estação seca apresentou os maiores teores de nitrato e potássio (menor lixiviação) durante todo o período simulado. As concentrações mais baixas no ano chuvoso se devem à lavagem destes íons no solo devido à precipitação pluviométrica e alta mobilidade dos mesmos (CORREA et al., 2006).

A presença da cultura e seu desenvolvimento radicular ao longo do ciclo influenciou na absorção desses nutrientes, sendo que a redução considerável dos íons durante o período de cultivo na zona radicular, pode ser devido ao consumo dos nutrientes pela cultura da cana-de-açúcar, já que estes são requeridos em alta quantidade.

É importante ressaltar o quanto a perda por lixiviação desses nutrientes é alta e pode causar sintomas de deficiência na cana-de-açúcar. Considerando os valores simulados de  $1 \text{ mmol}_c \text{ cm}^{-3}$  para o potássio no Latossolo e para o nitrato em ambos os solos e de  $4 \text{ mmol}_c \text{ cm}^{-3}$  de potássio no Nitossolo, esses valores representam  $78,18 \text{ kg ha}^{-1}$  de K no solo arenoso e  $312,72 \text{ kg ha}^{-1}$  no solo argiloso e  $124 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrato nos dois tipos de solos.

## CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo HYDRUS-1D apresentou um desempenho satisfatório na simulação da dinâmica de nitrato e potássio para as condições do experimento.

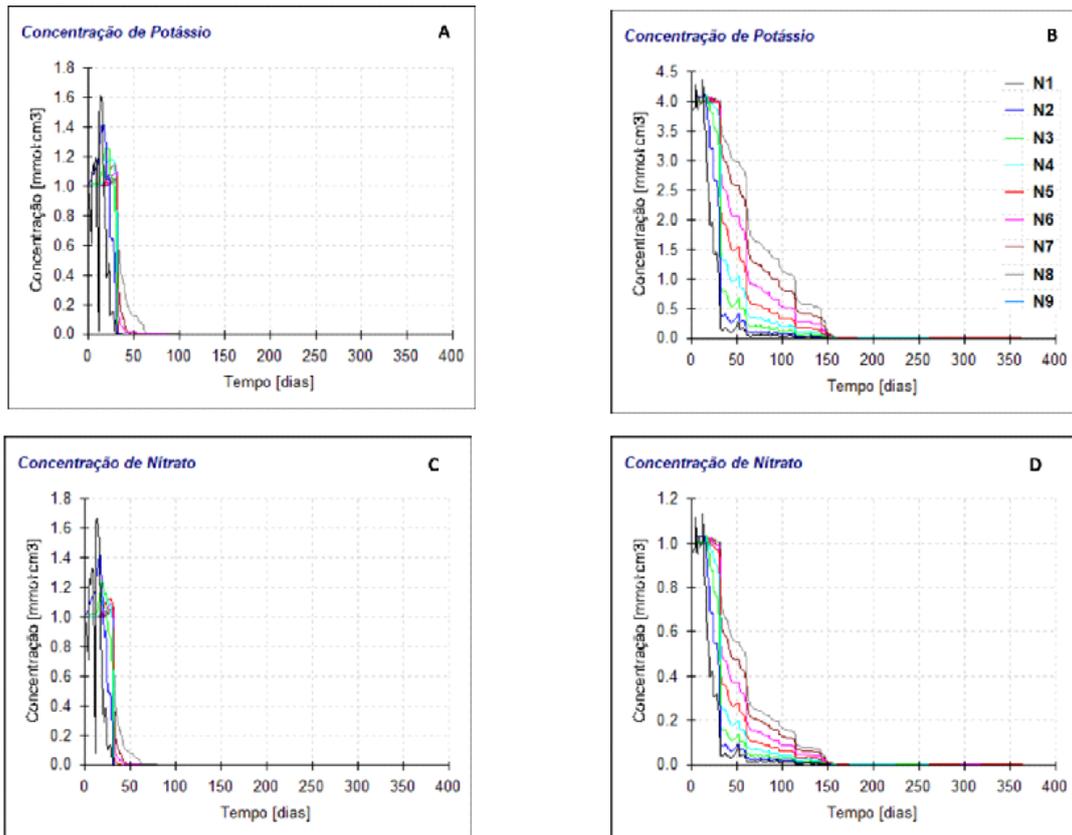
Com relação a simulação do transporte de solutos, pode-se observar que o potássio obteve uma maior adsorção no Nitossolo em relação ao Latossolo, enquanto ocorreu o contrário para o nitrato. Os íons

estudados ficaram mais disponíveis ao longo do ciclo no ano com precipitação intermediária.

Portanto, notou-se que a classe textural do solo, as condições meteorológicas e o crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar influenciaram na dinâmica de nitrato e potássio no perfil de solo.

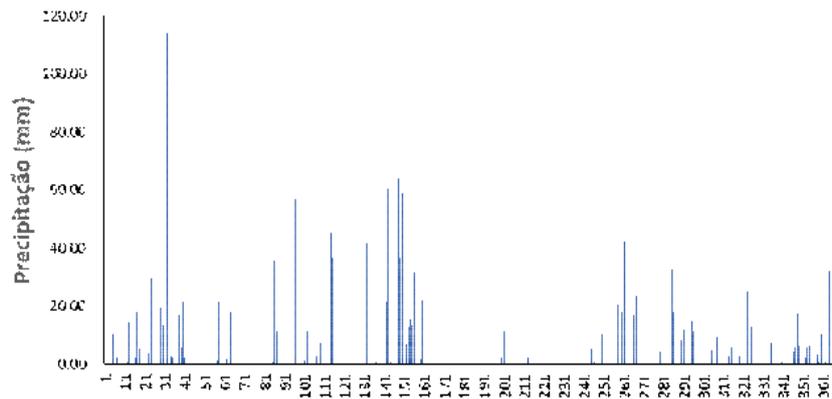
## REFERÊNCIAS

- BLACK, A.S.; WARING, S.A. Adsorption of nitrate, chloride and sulphate by some Highly Weathered soils from South-East Queensland. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.17, n.2, p.271-282, 1979.
- CORREA, R. S.; WHITE, R. E.; WEATHERLEY, A. J. Risk of nitrate leaching from two soils amended with biosolids. **Water Resources**, v.33, n.4, p.453-462, 2006.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO/ONU). **The Future of Food and Agriculture**. Roma, 2019.
- ŠIMŮNEK, J. et al. **Hydrus 1D**. Riverside, California: Department of environmental sciences, University of California Riverside, 2013.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-897, 1980.
- VOURLITIS, G. L.; HENTZ, C. L.; JUNIOR, O. B. P.; CARNEIRO, E.; NOGUEIRA, J. S. Soil N, P, and C dynamics of upland and seasonally flooded forests of the Brazilian Pantanal. **Global Ecology and Conservation**, v. 12, p. 227–240, 1 out. 2017.

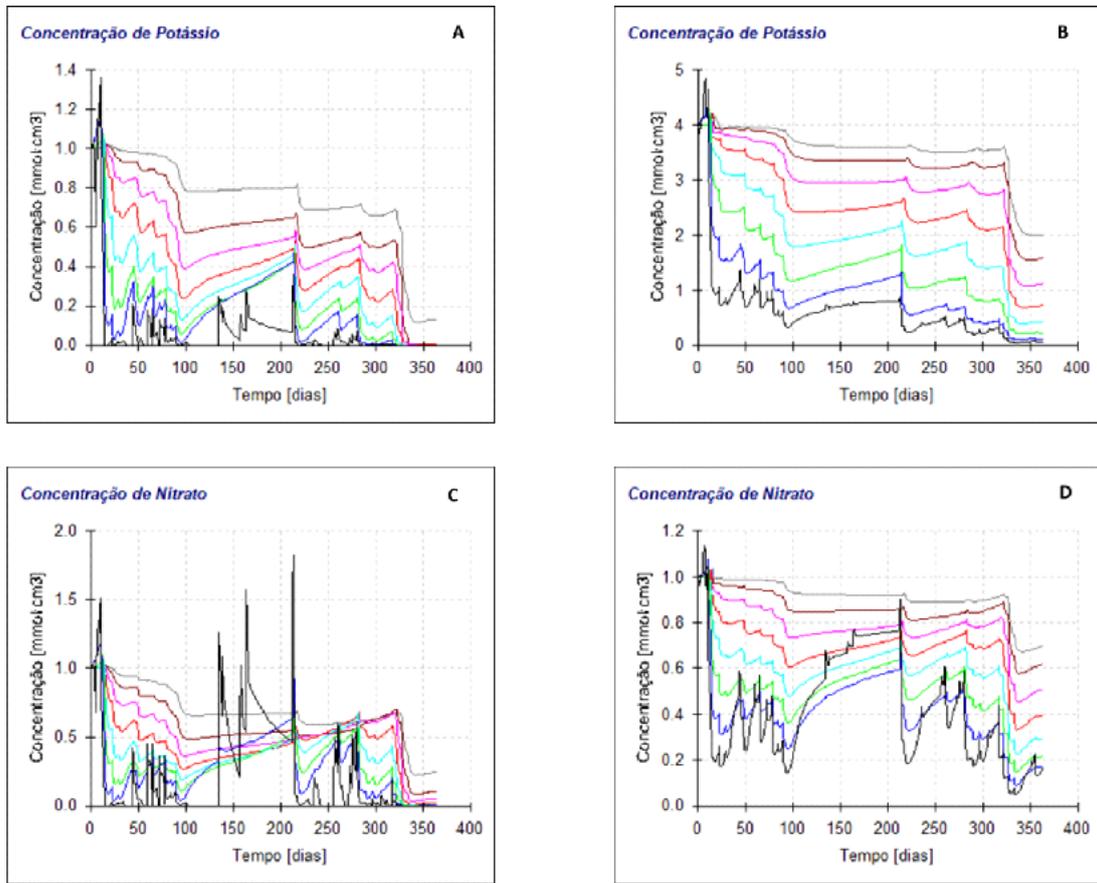


ANO CHUVOSO -1983

E

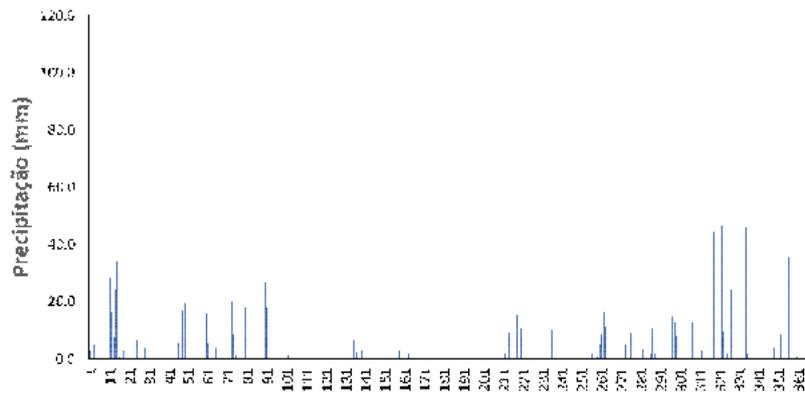


**Figura 1.** Simulação da concentração de potássio realizada para um Latossolo Vermelho Amarelo (A) e Nitossolo Vermelho (B) e da concentração de nitrato em um Latossolo Vermelho Amarelo (C) e Nitossolo Vermelho (D) durante o ciclo da cana-de-açúcar para o ano de 1983 (chuvoso) em Piracicaba (E). N1 = 7,78 cm, N2 = 15,56 cm, N3 = 23,33 cm, N4 = 31,11 cm, N5 = 38,89 cm, N6 = 46,67 cm, N7 = 54,44 cm, N8 = 62,22 e N9 = 70 cm.

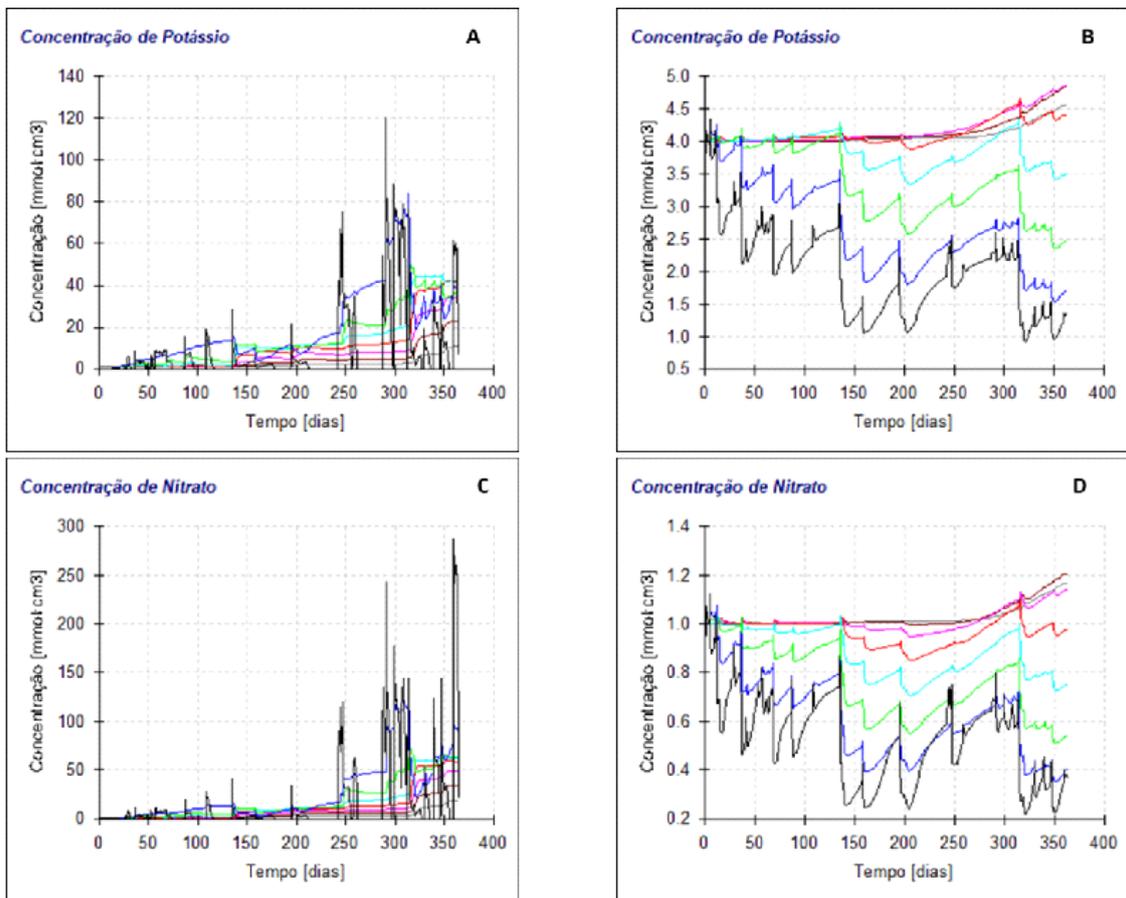


ANO INTERMEDIÁRIO - 2018

E

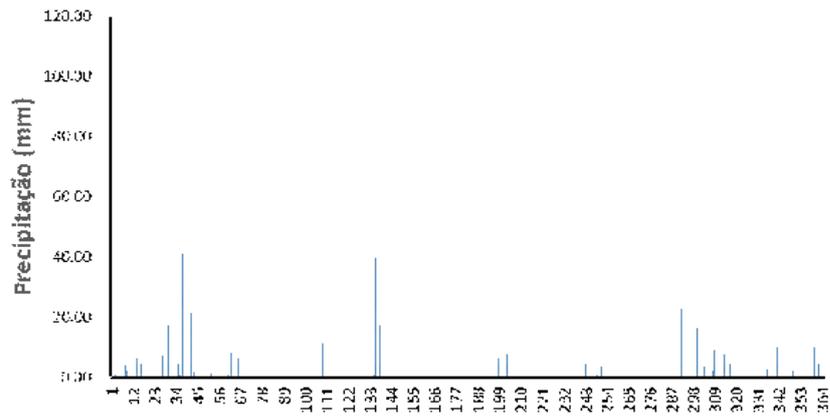


**Figura 2.** Simulação da concentração de potássio realizada para um Latossolo Vermelho Amarelo (A) e Nitossolo Vermelho (B) e da concentração de nitrato em um Latossolo Vermelho Amarelo (C) e Nitossolo Vermelho (D) durante o ciclo da cana-de-açúcar para o ano de 2018 (intermediário) em Piracicaba (E). N1 = 7,78 cm, N2 = 15,56 cm, N3 = 23,33 cm, N4 = 31,11 cm, N5 = 38,89 cm, N6 = 46,67 cm, N7 = 54,44 cm, N8 = 62,22 e N9 = 70 cm.



ANO SECO - 1978

E

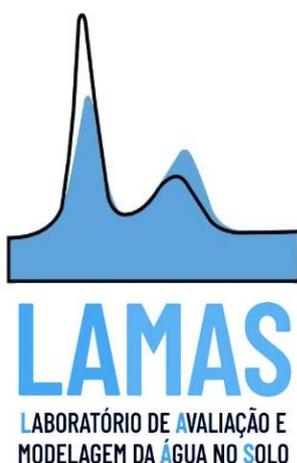


**Figura 3.** Simulação da concentração de potássio realizada para um Latossolo Vermelho Amarelo (A) e Nitossolo Vermelho (B) e da concentração de nitrato em um Latossolo Vermelho Amarelo (C) e Nitossolo Vermelho (D) durante o ciclo da cana-de-açúcar para o ano de 1978 (seco) em Piracicaba (E). N1 = 7,78 cm, N2 = 15,56 cm, N3 = 23,33 cm, N4 = 31,11 cm, N5 = 38,89 cm, N6 = 46,67 cm, N7 = 54,44 cm, N8 = 62,22 e N9 = 70 cm.

## Simulação de fluxos de água e solutos no solo.

Wenceslau Geraldes Teixeira, Aline Mari Huf dos Reis, Alba Leonor da Silva Martins

A economia verde, a agricultura regenerativa e o reconhecimento da importância de preservar o solo e água tem sido debatida e gerado políticas públicas que demandam um contínuo avanço do conhecimento do comportamento da água no solo e a da quantificação dos componentes do balanço hídrico, em diferentes sistemas de uso da terra. Os estudos que compõe esse volume são resultados do curso de Modelagem de Fluxos de Água e Solutos no Solo, oferecido como disciplina dos Programas de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PEAMB e DEAMB) da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) com a participação de discentes, professores e pesquisadores no tema de modelagem de fluxos hídricos (Universidade de Utrecht – Holanda, Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA, Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, Universidade Federal de Lavras – UFLA, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ). Esperamos com este volume incentivar e inspirar que outros estudos na quantificação dos componentes do balanço hídrico e dos processos de fluxos de água e íons na zona vadosa dos solos se ampliem no Brasil.



ISBN: 978-65-00-57503-3

