



INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS NA MODELAGEM FÍSICA DA ESTABILIDADE DE ENCOSTAS

Danúbia Teixeira Silva¹
Gean Paulo Michel²
Nelson Ferreira Fernandes³
Otto Corrêa Rotunno Filho⁴
Franciele Zanadrea⁵
Artur Nonato Vieira Cereto⁶
Clara Moreira Cardoso⁷

RESUMO

Desastres naturais ocorrem quando eventos extremos atingem áreas vulneráveis, superando a capacidade de resposta das populações. Dentre esses eventos, os movimentos gravitacionais de massa, como escorregamentos rasos, destacam-se pela frequência e pelos impactos socioeconômicos crescentes, agravados pelas mudanças climáticas e pela ocupação desordenada do território. A identificação de áreas suscetíveis tem avançado com o uso de modelos fisicamente embasados, que integram variáveis geomorfológicas, geotécnicas e hidrológicas. Nesse contexto, o modelo TRIGRS se destaca por simular a infiltração transiente da água no solo durante eventos de precipitação, estimando a estabilidade de encostas em diferentes profundidades. A resposta do solo à infiltração depende diretamente das propriedades hidráulicas do perfil, cuja obtenção ainda representa um desafio. Embora funções de pedotransferência (PTFs) sejam amplamente utilizadas, elas podem levar a erros quando aplicadas fora das condições para as quais foram desenvolvidas. Este trabalho investiga a influência de diferentes métodos de parametrização hidráulica no TRIGRS sobre a variação da umidade volumétrica. Os resultados indicam que o uso isolado de PTFs não é suficiente para representar as variações de umidade volumétrica ao longo do perfil do solo. Embora as simulações inversas ajustadas a dados de campo tenham melhorado a estimativa da distribuição de umidade, os achados reforçam a necessidade de recalibrar os parâmetros hidráulicos no TRIGRS com base em dados observacionais, de modo a assegurar maior compatibilidade com as condições hidrodinâmicas reais do solo e ampliar a confiabilidade das simulações de estabilidade de encostas.

Palavras-chave: Escorregamentos, Propriedades hidráulicas do solo, Funções de pedotransferência, Umidade do solo, TRIGRS

¹ Doutoranda no Programa de Engenharia Civil (PEC) da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, danubia.teixeira@coc.ufrj.br;

² Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas –IPH, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, gean.michel@ufrgs.br;

³ Professor do Instituto de Geociências – IGEO, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, nelsonnff@acd.ufrj.br;

⁴ Professor do Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, otto@coc.ufrj.br;

⁵ Professora da Universidade Federal Fluminense – UFF, francielez@id.uff.br;

⁶ Mestrando do Curso de Engenharia de Biossistemas da Universidade Federal Fluminense - UFF, arturcereto@id.uff.br;

⁷ Graduando do Curso de Engenharia de Recursos Hídricos e do Meio Ambiente da Universidade Federal Fluminense - UFF, claramoreiracardoso@id.uff.br.

INTRODUÇÃO

Escorregamentos translacionais de solo induzidos por precipitações intensas são eventos recorrentes em regiões montanhosas com declividades acentuadas. Em encostas onde camadas superficiais de solo de reduzida espessura recobrem diretamente um substrato rochoso, a ocorrência de chuvas de alta intensidade pode provocar um aumento significativo nas poro-pressões, favorecendo a formação de lençóis freáticos e, consequentemente, a instabilização do maciço.

Para avaliar essas condições, modelos fisicamente baseados como o TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model*) vêm sendo amplamente utilizados. O TRIGRS simula a infiltração de água no solo em regime transiente a partir de séries temporais de precipitação e da variação da umidade volumétrica do solo, com o objetivo de estimar o momento e a localização mais propensos à ocorrência de escorregamentos rasos (Baum, et al., 2008). O modelo simula o fluxo de água no solo de maneira unidimensional (vertical) em materiais homogêneos, isotrópicos, saturados e não saturados. A resposta do solo à infiltração é controlada pelas propriedades hidráulicas do perfil do terreno: a umidade volumétrica saturada (θ_s), a umidade volumétrica residual (θ_r), a condutividade hidráulica saturada (K_s) e a difusividade hidráulica saturada (D_0). O TRIGRS usa a solução analítica para infiltração transiente em solo não saturado, proposta por Srivastava e Yeh (1991), a curva de retenção de água no solo é descrita pelo modelo de Gardner (1958) devido à disponibilidade da solução analítica para a equação de Richards (Baum et al., 2010).

No entanto, a acurácia das simulações realizadas com o TRIGRS depende fortemente da parametrização das propriedades hidráulicas do solo. Em muitos casos, a ausência de dados medidos em campo leva à adoção de funções de pedotransferência (PTFs) como forma alternativa para estimar tais parâmetros. No Brasil, conforme destacado por Tomasella et al. (2000), predominam os solos tropicais, caracterizados por sua natureza microagregada, alto grau de intemperismo e propriedades hidráulicas distintas, sobretudo no que se refere à retenção de água, quando comparados aos solos de regiões temperadas. O uso direto de PTFs desenvolvidas para outros contextos pode introduzir incertezas relevantes, como apontam Ottoni et al. (2018). Ainda que esforços importantes tenham sido feitos, como a PTF proposta por Hodnett e Tomasella (2002) baseada em 771 horizontes de solos tropicais de 22 países (incluindo 90 horizontes de 29



perfis brasileiros), a aplicação dessas equações em ambientes tropicais específicos deve ser feita com cautela. Nesse contexto, uma limitação crítica é o uso exclusivo de PTFs sem a verificação ou calibração com dados reais de umidade volumétrica obtidos por monitoramento de campo. Essa lacuna pode comprometer a confiabilidade das simulações hidrológicas e de estabilidade de encostas, uma vez que a resposta do solo à infiltração é sensível a variações nos parâmetros hidráulicos. A calibração com dados observados de umidade no solo é, portanto, fundamental para ajustar as simulações e obter estimativas mais realistas do comportamento hidrodinâmico do perfil.

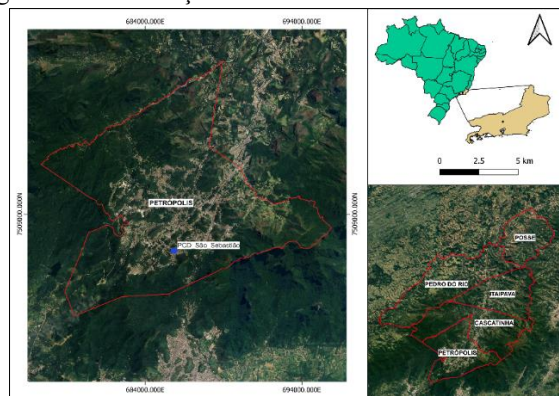
Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a sensibilidade do modelo TRIGRS a dois distintos métodos de parametrização das propriedades hidráulicas do solo, comparando os resultados obtidos a partir de parâmetros estimados por meio de funções de pedotransferência (PTFs) com aqueles calibrados por simulação inversa no modelo HYDRUS-1D, utilizando séries temporais de umidade volumétrica medidas em campo. A análise permitiu discutir as limitações da aplicação de PTFs sem calibração local e ressalta a importância de dados observacionais para a melhoria da representação dos processos de infiltração em modelos de estabilidade de encostas.

MATERIAIS E MÉTODOS

No município de Petrópolis, estado do Rio de Janeiro, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) instalou Plataformas de Coleta de Dados Geotécnicas (PCDs). Essas plataformas são instaladas, preferencialmente, em encostas íngremes e naturais, fornecem, em tempo real, dados de precipitação acumulada, por meio de pluviômetros, bem como informações sobre a variação da umidade volumétrica do solo ao longo do perfil. A medição da umidade é realizada por seis sensores distribuídos em intervalos regulares de 0,5 metros, ao longo de uma sonda com três metros de comprimento (definindo assim, 6 profundidades de obtenção de dados), inserida verticalmente no solo. Os sensores obedecem ao princípio da capacitância, utilizando a tecnologia de reflectômetros que operam no domínio da frequência (em inglês, *frequency domain reflectometry* - FDR), permitindo a obtenção contínua e automatizada de dados de umidade volumétrica do solo. A Figura 1 apresenta a localização da PCD São Sebastião, utilizada neste estudo.

Para a estimativa da variação da umidade volumétrica do solo no modelo TRIGRS, foram adotadas duas parametrizações das propriedades hidráulicas no perfil de solo.

Figura 1 – Localização da PCD Geotécnicas São Sebastião



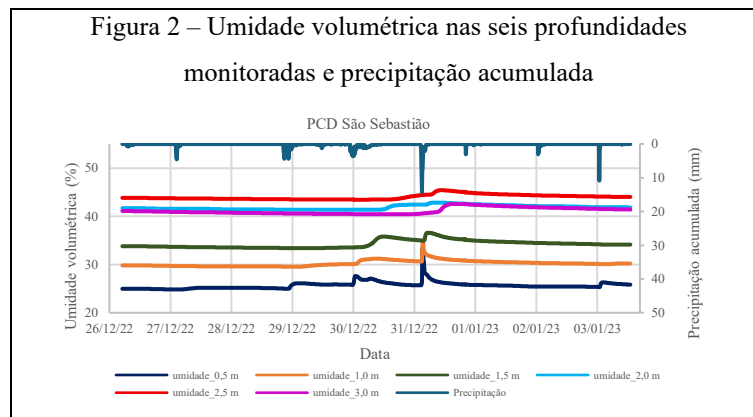
Na parametrização 1, os parâmetros hidráulicos foram estimados por meio de funções de pedotransferência (PTFs), com base em atributos físicos do solo. Já na parametrização 2, os parâmetros foram obtidos por simulação inversa no modelo HYDRUS-1D Šimůnek e van Genuchten, et al. (2012), a partir de dados experimentais de campo. Posteriormente, realizou-se a recalibração desses parâmetros diretamente no TRIGRS, com o objetivo de aprimorar o ajuste das simulações às condições hidrodinâmicas observadas, procedimento realizado exclusivamente na parametrização 2.

Os parâmetros hidráulicos da curva de retenção de água no solo, segundo o modelo de van Genuchten, para a parametrização 1 foram obtidos por meio da função de pedotransferência desenvolvida por Hodnett e Tomasella (2002), a qual requer informações detalhadas sobre a granulometria do perfil de solo. A Tabela 1 apresenta as informações de distribuição granulométrica do perfil de solo onde a sonda com os sensores de umidade da PCD foi instalada. Como o TRIGRS admite apenas um perfil de solo homogêneo, foi realizada uma média harmônica dos valores percentuais de granulometria para compor um perfil representativo e, dessa forma, realizar a estimativa, por meio da PTF, dos parâmetros hidráulicos da curva de retenção de água de van Genuchten: umidade volumétrica saturada (θ_s), umidade volumétrica residual (θ_r), parâmetro de escala de entrada de ar pelo modelo de van Genuchten (α_{vG}), a distribuição dos poros (n) e a condutividade hidráulica saturada (K_s).

Tabela 1 – Dados de ensaio de granulometria dos solos do perfil da PCD São Sebastião

Nome da PCD	Coordenadas		Intervalo (m)	Classificação Geotécnica	Granulometria (%)			
	Latitude	Longitude			Pedregulho	Areia	Silte	Argila
São Sebastião – Geo (330390604G)	-22.536809°	-43.192838°	0.2 - 0.8	Areia Siltosa	8	49	23	20
			0.8 - 1.4	Areia Pedregulhosa	32	45	13	10
			1.4 - 1.9	Areia Siltosa	8	63	17	12
			1.9 - 2.4	Areia Siltosa	8	66	16	10
			2.4 - 2.8	Areia Siltosa	5	64	17	14
			2.8 - 3.4	Areia Pedregulhosa	17	55	16	12

A parametrização 2 foi realizada através dos dados de monitoramento de campo da PCD São Sebastião, o evento de precipitação selecionado para a análise foi aquele que apresentou variações significativas de umidade ao longo das seis profundidades monitoradas no perfil do solo (Figura 2). As variáveis de entrada, compostas pela umidade volumétrica medida em diferentes profundidades do solo e pela intensidade de precipitação observada durante o evento selecionado, foram inseridas no software HYDRUS 1D. O modelo hidráulico de Van Genuchten-Mualem foi adotado para ajustar os parâmetros hidráulicos da curva de retenção de água ($\theta_s, \theta_r, \alpha_{vG}, n$ e K_s) aos dados observados em campo.



Os parâmetros hidráulicos estimados, tanto pela simulação com o HYDRUS-1D como pela PTF, diz respeito ao modelo hidráulico proposto por van Genuchten para a curva de retenção de água no solo. A partir desses parâmetros da equação de Van Genuchten, duas curvas hipotéticas foram construídas e utilizadas para ajuste da equação de Gardner (1958), que é utilizada pelo TRIGRS para descrever o comportamento da umidade e condutividade do solo devido à infiltração da água. A abordagem de Gardner utiliza uma equação exponencial, mais simples que a equação de van Genuchten, e está demonstrada pelas equações 1 e 2, respectivamente:

$$K(\psi) = K_s e^{\alpha_G \psi^*} \quad (2)$$

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) e^{\alpha_G \psi^*} \quad (3)$$

Baum *et al.*, (2008) descreve ψ^* como a diferença entre o potencial matricial do solo (ψ) e o potencial matricial no topo da franja capilar (ψ_0). α_G é um parâmetro que representa o inverso da altura da franja capilar sobre o lençol freático, e está relacionado



à taxa de redução da condutividade hidráulica e umidade devido à redução nos valores de potencial matricial. A condutividade hidráulica saturada é K_s , para qualquer ponto da franja capilar e abaixo do nível da água no solo.

No modelo TRIGRS, o processo de infiltração da água no solo é simulado considerando a sucção matricial (ψ) como uma função da profundidade (Z) e do tempo (t), sendo esta estimada por meio da forma linearizada da solução da equação de Richards, conforme a equação 4:

$$\psi(Z, t) = \frac{\cos \delta}{\alpha_1} \ln \left[\frac{K(Z, t)}{K_s} \right] + \psi_0 \quad (4)$$

Onde δ é a inclinação da encosta, $\alpha_1 = \alpha_G \cos^2 \delta$ para a transformação de coordenadas da superfície inclinada do solo e $K(Z, t)$ é a variação da condutividade hidráulica em função da profundidade e do tempo.

A variação da umidade volumétrica em função da profundidade e do tempo foi determinada substituindo-se o valor da sucção matricial, calculado pela Equação 4, na Equação 3. Com esse procedimento, foi possível analisar a variação da umidade volumétrica simulada pelo modelo TRIGRS, utilizando diferentes fontes de parametrização dos parâmetros hidráulicos do solo. Para avaliar a qualidade das simulações, foram realizadas análises paramétricas, por meio do coeficiente de determinação (R^2), e não paramétricas, utilizando a correlação de Spearman, comparando os resultados simulados com os dados observados em campo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que o TRIGRS representa o fluxo unidimensional (vertical) em materiais homogêneos, a Tabela 2 apresenta a caracterização granulométrica do perfil de solo representativo, construída a partir do perfil original com dados de granulometria obtidos nas seis diferentes profundidades (Tabela 1). Para a definição desse perfil representativo, foi calculada a média harmônica dos valores percentuais de granulometria obtidos nos ensaios realizados em cada uma dessas profundidades.

Tabela 2 – Dados de granulometria do perfil representativo.

Intervalo (m)	Classificação Geotécnica	Granulometria (%)			
		Soma Finos	Areia	Silte	Argila
0.2 - 0.8	Areia Siltosa	92	53.3	25.0	21.7
0.8 - 1.4	Areia Pedregulhosa	68	66.2	19.1	14.7
1.4 - 1.9	Areia Siltosa	92	68.5	18.5	13.0
1.9 - 2.4	Areia Siltosa	92	71.7	17.4	10.9
2.4 - 2.8	Areia Siltosa	95	67.4	17.9	14.7
2.8 - 3.4	Areia Pedregulhosa	83	66.3	19.3	14.5
Perfil representativo		86	65	19	14



Com base nesses percentuais e segundo os critérios utilizados por Hodnett e Tomasella (2002), o solo do perfil representativo se enquadra na classe Franco-arenoso (*Loamy sand*). Essa classe de solo é caracterizada por conter predominantemente areia, mas com quantidade suficiente de silte e argila para modificar ligeiramente a estrutura e a retenção de água em comparação com a areia pura. Os parâmetros hidráulicos do modelo de van Genuchten, estimados com base nas funções de pedotransferências propostas Hodnett e Tomasella (2002) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros hidráulicos de van Genuchten obtidos por PTF

Parâmetros	θ_r (m ³ / m ³)	θ_s (m ³ / m ³)	α_{vG} (1/m)	n
Hodnett e Tomasella (2002)	0,062	0,438	0,837	1,672

A Tabela 4 apresenta os parâmetros hidráulicos estimados por meio de simulação inversa no modelo HYDRUS-1D. Para a definição do perfil de solo representativo, foi utilizada a média harmônica dos valores dos parâmetros hidráulicos obtidos para cada uma das seis profundidades analisadas.

Tabela 4 – Parâmetros hidráulicos do modelo de van Genuchten estimados por simulação inversa no HYDRUS-1D para diferentes profundidades e perfil representativo.

	Parâmetros hidráulicos - PCD São Sebastião				
	θ_r (m ³ / m ³)	θ_s (m ³ / m ³)	α_{vG} (1/m)	n	K_s (m/s)
prof_0,5m	0,034	0,294	2,014	1,435	8,87E-06
prof_1,0m	0,022	0,307	1,200	1,260	8,07E-07
prof_1,5m	0,012	0,356	1,000	1,650	5,02E-07
prof_2,0m	0,044	0,422	1,003	1,180	8,79E-07
prof_2,5m	0,050	0,451	0,648	1,109	7,54E-06
prof_3,0m	0,012	0,428	0,428	1,142	2,23E-06
Perfil representativo	0,021	0,451	0,832	1,271	1,2 E-06

Através do ajuste da curva do modelo de Gardner à curva de retenção de água de van Genuchten-Mualem, foram obtidos os parâmetros hidráulicos (Tabela 5) para a realização das parametrizações 1 e 2 no modelo TRIGRS.

Tabela 5 – Parâmetros hidráulicos de Gardner ajustado à curva de van Genuchten-Mualem

Parametrização - TRIGRS	θ_r (m ³ / m ³)	θ_s (m ³ / m ³)	α (1/m)	K_s (m/s)	D_0 (m ² /s)
Parametrização 01: Hodnett e Tomasella (2002)	0,146	0,438	0,340	1E-06	1E-04
Parametrização 02: Dados de campo acoplados ao HYDRUS – 1D	0,021	0,451	0,27	1,2 E-06	1,2E-05

Os resultados das simulações de umidade volumétrica no modelo TRIGRS, utilizando as parametrizações 1 e 2, bem como a comparação entre as umidades simuladas pelo HYDRUS-1D e os dados observados em campo nas 6 profundidades, são apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

Figura 4 – Comparação entre umidades simuladas no TRIGRS (parametrização 01), estimadas pelo HYDRUS-1D e observadas em campo, em diferentes profundidades.

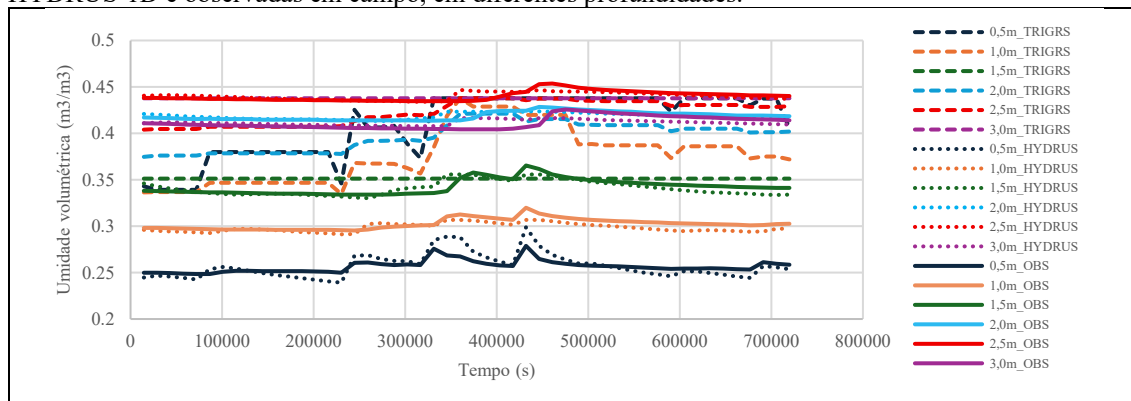
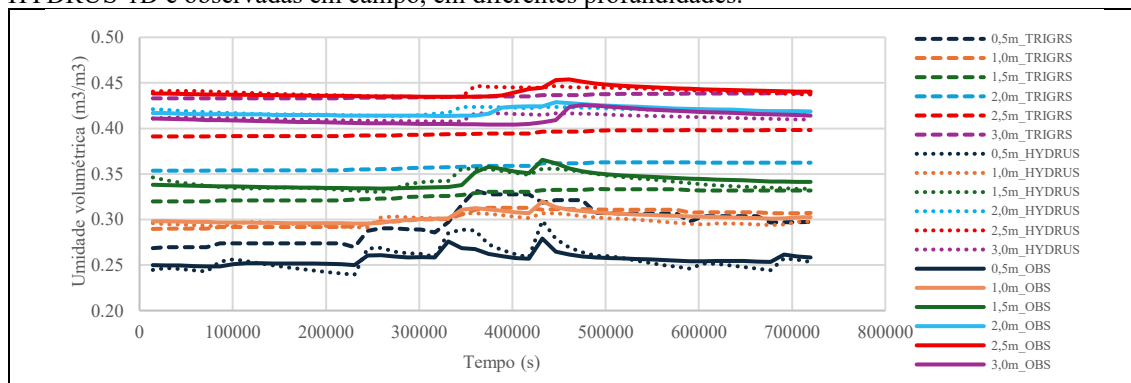


Figura 5 – Comparação entre umidades simuladas no TRIGRS (parametrização 02), estimadas pelo HYDRUS-1D e observadas em campo, em diferentes profundidades.



A Tabela 6 apresenta os valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos na comparação entre as simulações de umidade volumétrica no TRIGRS, utilizando as parametrizações 01 e 02, e os dados observados em campo, nas profundidades de 0,5 m a 3,0 m. A parametrização 01 apresentou valores de R^2 muito baixos em todas as profundidades, indicando baixo desempenho na representação das variações de umidade no perfil de solo. Já a parametrização 02 resultou, em geral, em valores de R^2 superiores a 0,5, com exceção da profundidade de 0,5 m, que apresentou um valor de 0,43. Apesar do desempenho relativamente superior, os valores obtidos ainda são considerados baixos para representar adequadamente as dinâmicas de umidade no perfil. Dado que o R^2 é uma métrica sensível apenas à linearidade e à variância explicada, sua interpretação deve ser feita com cautela.

Tabela 6 – Análise paramétrica com coeficiente de determinação (R^2)

Análise paramétrica – R^2						
Profundidades	0,5m	1,0m	1,5m	2,0m	2,5m	3,0m
Parametrização 01	0,39	0,81	0	0,51	0,40	0
Parametrização 02	0,43	0,70	0,56	0,59	0,52	0,55

Como alternativa à métrica R^2 , aplicou-se a análise complementar por meio do coeficiente de correlação de Spearman (Tabela 7), mais robusto na avaliação de associações monotônicas em séries temporais de umidade do solo. Os resultados



demonstraram que, para a parametrização 2, houve correlação monotônica positiva e estatisticamente significativa ($p\text{-valor} < 0,005$) entre os dados simulados e observados, evidenciando maior capacidade do modelo em reproduzir a dinâmica temporal da umidade. Em contrapartida, na parametrização 1, os coeficientes de Spearman foram baixos, indicando limitações no uso exclusivo de funções de pedotransferência na representação dos processos hidrológicos.

Tabela 7 – Análise não paramétrica com a correlação de Spearman

Análise não paramétrica – Spearman							
Profundidades		0,5m	1,0m	1,5m	2,0m	2,5m	3,0m
Parametrização 01	ρ	0,4050	0,8892	- 0,9236	0,6735	0,4834	- 0,9269
	p-valor	0,0035	0,0000	2,0000	0,0000	0,0004	2,0000
Parametrização 02	ρ	0,6981	0,8588	0,4416	0,6749	0,5939	0,5198
	p-valor	0,0000	0,0000	0,0013	0,0000	0,0000	0,0001

Esses achados reforçam que o R^2 , isoladamente, não é suficiente para avaliar a qualidade das simulações hidrológicas, uma vez que é sensível a desvios de escala e de sincronismo. Já a correlação de Spearman, por considerar a ordenação dos valores, mostrou-se mais adequada para captar relações não lineares, comuns em séries de umidade do solo. Nesse contexto, a parametrização 2 apresentou desempenho superior à parametrização 1.

Embora ambas as parametrizações tenham utilizado o modelo de Gardner para ajuste dos parâmetros hidráulicos, na parametrização 1 os valores foram estimados por PTFs, sem calibração direta com dados experimentais. Já na parametrização 2, os parâmetros foram inicialmente estimados via simulação inversa no HYDRUS-1D, e posteriormente recalibrados no TRIGRS com base nos dados medidos em campo para θ_r , K_s e D_0 . Esse processo foi decisivo para aprimorar a representação hidrodinâmica do solo ao longo do perfil.

Adicionalmente, observou-se significativa sensibilidade do modelo TRIGRS aos parâmetros K_s , D_0 , θ_r e α_G . Verificou-se que α_G e θ_r controlam principalmente a distribuição inicial da umidade no perfil, enquanto K_s e D_0 regulam a variação da umidade em profundidade. Pequenas alterações nesses parâmetros resultaram em mudanças substanciais na simulação da umidade volumétrica, evidenciando a importância da calibração criteriosa desses valores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de funções de pedotransferência na parametrização do TRIGRS revelou-se limitada, resultando em simulações não representativas da umidade



volumétrica do perfil de solo. Parâmetros hidráulicos estimados via simulação inversa no HYDRUS-1D, a partir de dados de campo, demonstraram maior potencial para representar o comportamento hidrodinâmico do solo. No entanto, a calibração de variáveis sensíveis, como condutividade hidráulica saturada (K_s), difusividade hidráulica saturada (D_0) e umidade residual (θ_r), é indicada como estratégia para aprimorar a representatividade do comportamento da umidade do solo nas simulações. Os resultados evidenciam a necessidade de ampliar o escopo das calibrações, incluindo diferentes eventos pluviométricos e séries de umidade volumétrica. Recomenda-se também a realização de novas simulações utilizando dados provenientes de diferentes PCDs, a fim de aumentar a robustez e a capacidade de generalização dos parâmetros empregados nas simulações de instabilidade com o TRIGRS.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, os autores agradecem a bolsa de estudos concedida a primeira autora fornecida pela CAPES. Agradecimentos são estendidos ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (Desenvolvimento do Sistema de ALerta Antecipado para Deslizamentos – SALAD Projeto, processo CNPq 446162/2023–0) e ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais- CEMADEN.

REFERÊNCIAS

- BAUM, R. L., GODT, J. W., SAVAGE, W. Z. "Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration", **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 115, n. F3, p. F03013, 2010. DOI: 10.1029/2009JF001321. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2009JF001321>.
- BAUM, R. L., SAVAGE, W. Z., GODT, J. W. "TRIGRS — A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0", **U.S. Geological Survey Open-File Report**, n. 2008–1159, p. 75, 2008.
- CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. *Dados de granulometria do solo fornecidos sob solicitação direta*. São José dos Campos, 2024. Comunicação pessoal.
- HODNETT, M. G., TOMASELLA, J. "Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils", **Geoderma**, v. 108, n. 3–4, p. 155–180, 2002. DOI: 10.1016/S0016-7061(02)00105-2.
- ŠIMŮNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. T., ŠEJNA, M. "Hydrus: Model use, calibration, and validation", **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1261–1274, 2012.
- SRIVASTAVA, R., YEH, T. "Toward the Water Table in Homogeneous and Layered Soils", **Water Resources Research**, v. 27, n. 5, p. 753–762, 1991.