

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DE PERMEABILIDADE DO SOLO EM ENCOSTA UTILIZANDO O HYDRUS-1D

Fernanda da Silva¹; Franciele Maria Vanelli² Leonardo Romero Monteiro³,

Danúbia Teixeira Silva⁴ & Gean Paulo Michel⁵

Abstract: Landslides are recurrent events in the Blumenau/SC region, especially when susceptible areas are subjected to intense rainfall. This study evaluated the applicability of the Hydrus-1D numerical model in simulating infiltration processes related to landslides, by comparing simulated soil volumetric moisture results with data observed in real events. To determine the soil's hydraulic parameters, the Rosetta Lite Version 1.1 tool and the Hydrus-1D inverse solution method were used, based on the water retention equations proposed by van Genuchten, adjusted to the characteristics of the local soil. The soil was characterized using granulometry data, and the initial conditions were defined based on and initial conditions were defined from local rainfall and volumetric soil moisture records as of 2019. Three events were selected for calibration and two for model validation, considering accumulated rainfall at four-day intervals per event, in order to analyze the influence of infiltration on soil moisture dynamics. The results of the statistical criteria applied to calibration and validation indicate certain limitations of the model. It should be noted that Hydrus-1D operates under the assumption of flat soil, which compromises the accuracy of the simulations in sloping areas, such as hillsides, where slope plays a relevant role in the behavior of subsurface flow.

Resumo: Deslizamentos de encostas são eventos recorrentes na região de Blumenau/SC, especialmente quando áreas suscetíveis são submetidas a precipitações intensas. Neste estudo, avaliou-se a aplicabilidade do modelo numérico Hydrus-1D na simulação dos processos de infiltração relacionados à ocorrência de deslizamentos, por meio da comparação entre os resultados simulados de umidade volumétrica do solo e os dados observados em eventos reais. Para a determinação dos parâmetros hidráulicos do solo, empregaram-se a ferramenta Rosetta Lite Version 1.1 e o método de solução inversa do Hydrus-1D, com base nas equações de retenção de água propostas por van Genuchten, ajustadas às características do solo local. A caracterização do solo foi realizada com base em dados de granulometria, e as condições iniciais foram definidas a partir de registros pluviométricos e de umidade volumétrica do solo locais a partir de 2019. Foram selecionados três eventos para calibração e dois para validação do modelo, considerando a intensidade de precipitação em intervalos de quatro dias por evento, a fim de analisar a influência da infiltração na dinâmica da umidade do solo. Os resultados dos critérios estatísticos aplicados à calibração e validação indicam certas limitações do modelo. Destaca-se que o Hydrus-1D opera sob a suposição de solo plano, o que compromete a precisão das simulações em áreas inclinadas, como encostas, onde a declividade exerce papel relevante no comportamento do fluxo subsuperficial.

Palavras-Chave – Deslizamento; Parâmetros hidráulicos do solo; Solução inversa.

1) Graduanda do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas (CCT) – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

2) Pós-Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – CCT/UDESC

3) Professor do Departamento de Engenharia Civil do CCT/UDESC

4) Doutoranda do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

5) Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e filiado à Universidade Federal Fluminense (UFF)

INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Itajaí, com aproximadamente 15.000 km² de extensão, constitui o sistema hidrográfico mais abrangente da vertente atlântica em Santa Catarina (ÁGUAS SC – Comitê do Itajaí, 2025). A região, em especial o município de Blumenau – principal polo econômico local, apresenta histórico recorrente de deslizamentos de terra, sendo caracterizada como área com suscetibilidade a movimentos de massa. De acordo com o IBGE (2010), cerca de 22% da população de Blumenau encontra-se exposta a riscos associados a desastres associados a fenômenos naturais, com destaque para os eventos deflagrados por chuvas intensas.

Os deslizamentos de encostas, geralmente associados a precipitações de alta intensidade e curta duração, não são fenômenos isolados, mas resultado de uma combinação de fatores hidrogeológicos, geomorfológicos e antrópicos (Fernandes *et al.*, 2001). A compreensão dos mecanismos que desencadeiam esses eventos é fundamental para subsidiar ações de gestão territorial e mitigação de riscos em áreas suscetíveis.

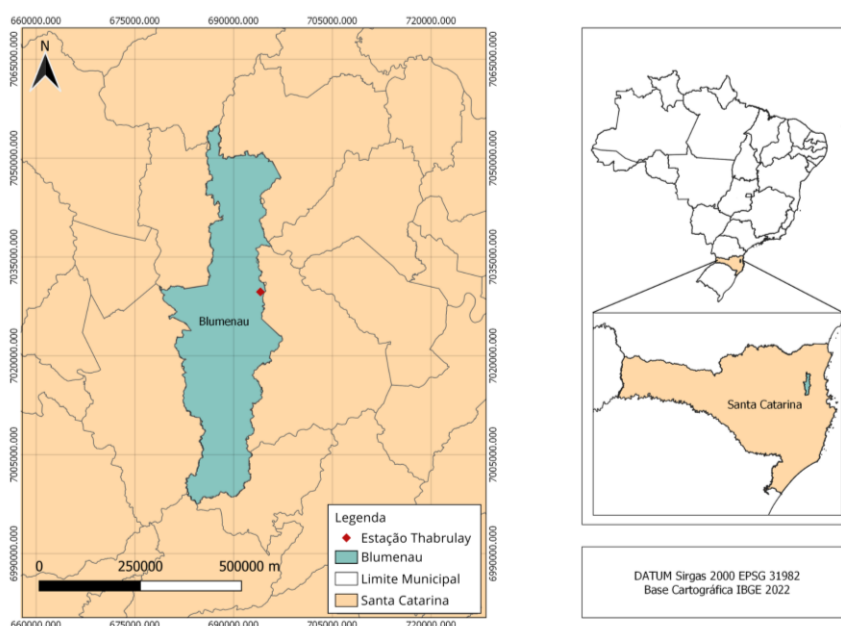
Nesse contexto, torna-se essencial investigar os processos hidrológicos que controlam a infiltração da água no solo e sua relação com a instabilidade de encostas. A modelagem numérica constitui uma ferramenta eficaz para essa finalidade, permitindo a simulação de cenários e a avaliação do comportamento hidráulico do solo. O presente estudo tem como objetivo aplicar o modelo Hydrus-1D, que simula o fluxo unidimensional de água em meios porosos não saturados (Šimůnek *et al.*, 2009), aliado às equações de van Genuchten e ao método de solução inversa, com o intuito de estimar os parâmetros hidráulicos do solo e analisar sua resposta frente a eventos de precipitação intensos registrados na região de Blumenau.

METODOLOGIA

Área de estudo

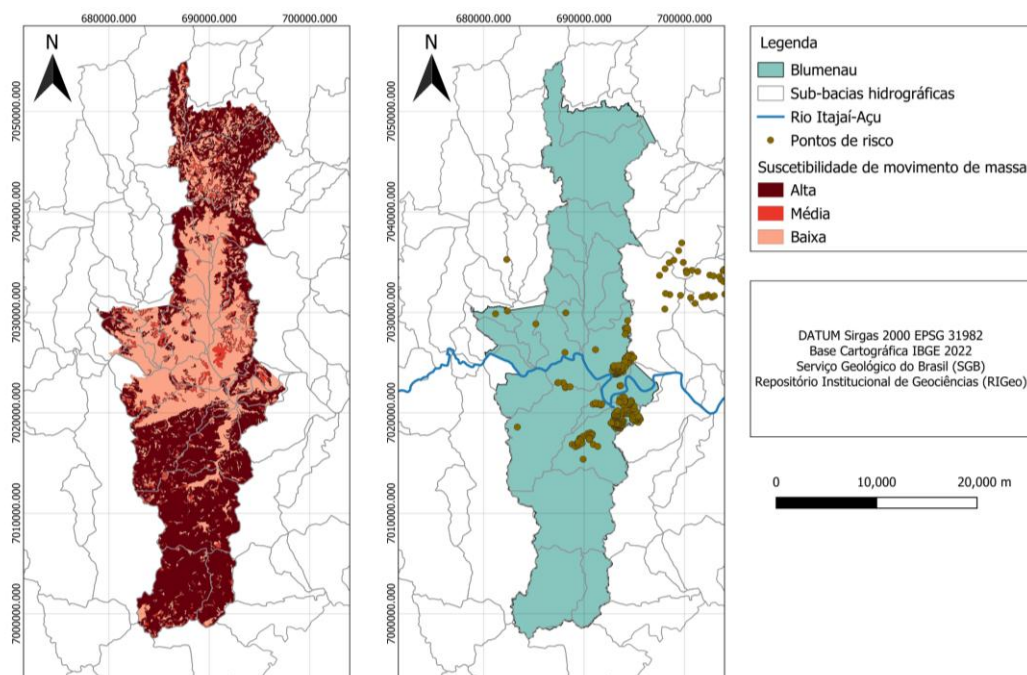
O município de Blumenau (Figura 1), localizado na região do Vale do Itajaí, possui histórico de deslizamentos de terra, sendo o único município de Santa Catarina monitorado com estações geotécnicas pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden), as quais fornecem a umidade volumétrica do solo.

Figura 1 - Área de estudo – Blumenau / SC



Os pontos de risco foram registrados pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB), considerando locais em que já houve a ocorrência de deslizamentos entre os anos de 2008 até 2010. Ao considerar a suscetibilidade de movimento de massa, a Figura 2 (a) apresenta a sua distribuição nas áreas do município, também desenvolvida por levantamentos do SGB. Grande parte dessas ocorrências acontecem em regiões próximas ao rio Itajaí-Açu, principal curso d'água da bacia e que atravessa a área urbana do município, como mostra a Figura 2 (b).

Figura 2 – (a) Suscetibilidade de movimento de massa; (b) Pontos de risco

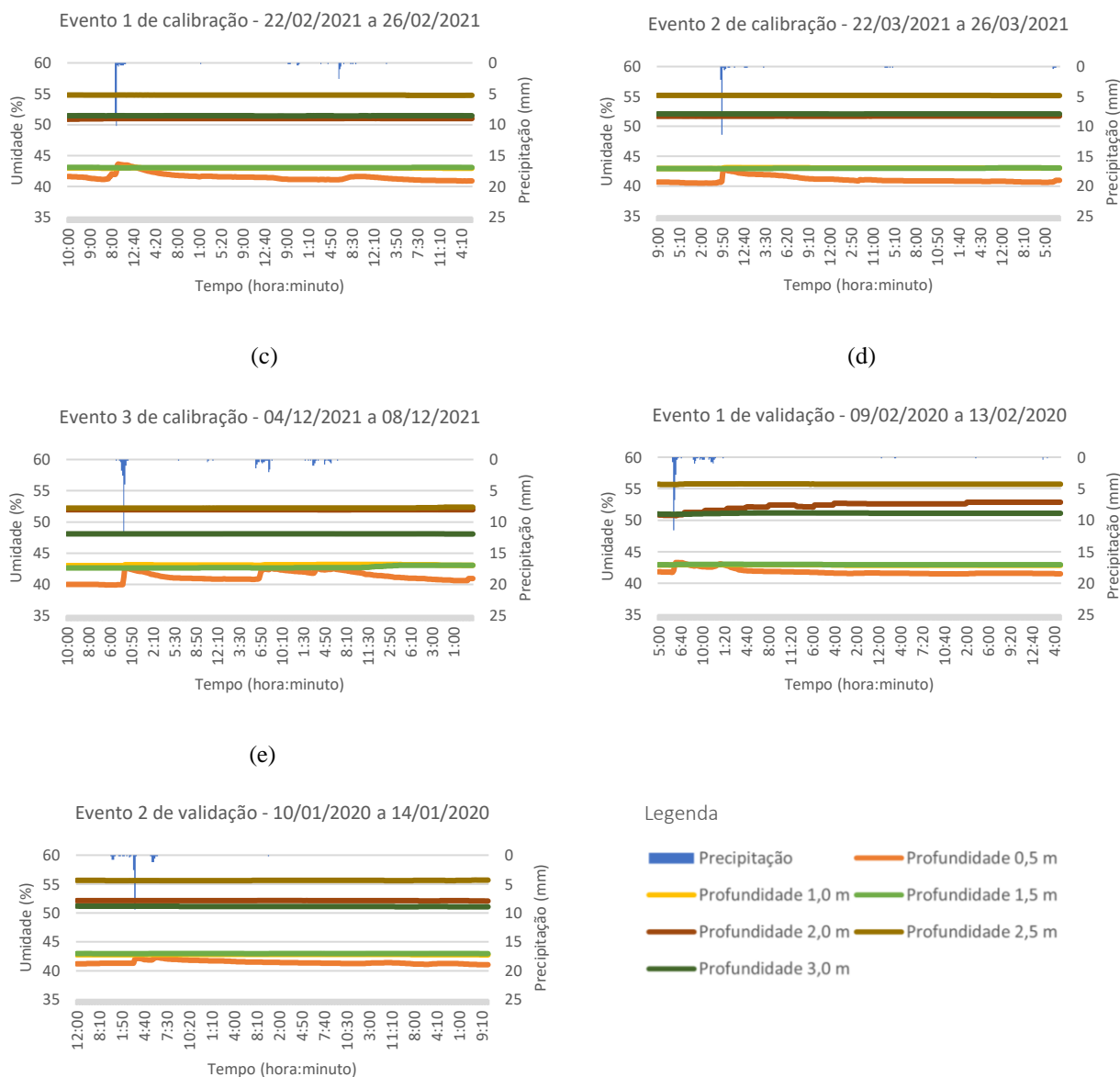


Dados

As estações geotécnicas do Cemaden possuem 6 sensores de umidade, cada sensor posicionado 0,5 m abaixo do sensor anterior, totalizando 3 m de profundidade. Para este estudo foram utilizados dados da estação geotécnica denominada Thabrulay, código 420240401G, localizada na região leste de Blumenau e monitorada pelo Cemaden. Conforme boletim de sondagem realizado na instalação da estação, o local apresenta um solo argilo-siltoso, com altos valores de coesão e ângulo de atrito, o que diminui a permeabilidade, tendo uma infiltração mais lenta (Pinto, 2006).

A série histórica desta estação inicia logo após sua instalação, em setembro de 2019, e possui registros sem falhas até novembro de 2022. Os eventos para calibração e validação do modelo foram extraídos desse período, e foram escolhidos 3 eventos para calibração e outros 2 eventos para validação. Considerou-se como evento a ocorrência de precipitação que gerou variação na umidade volumétrica do solo, principalmente nas camadas superiores. Cada evento selecionado possui a duração de 4 dias, todos com a mesma característica de precipitação de pico e com precipitação próxima a 10 mm (acumulada em 10 minutos), ocorrendo logo em seguida foi observado um aumento na umidade volumétrica do solo. A Figura 3 apresenta os eventos utilizados para calibração e validação.

Figura 3 – Eventos utilizados na calibração e validação do modelo. (a) Evento 1 – calibração; (b) Evento 2 – calibração; (c) Evento 3 – calibração; (d) Evento 1 - validação; (e) Evento 2 – validação



Modelo Hydrus-1D

O modelo Hydrus-1D, versão 4.0, desenvolvido por Šimůnek, Šejna e van Genuchten, do Departamento de Ciências Ambientais da Universidade da Califórnia, Riverside, consiste em um conjunto de *softwares* para simular o movimento unidimensional de água, calor e solutos em um meio poroso rígido parcialmente saturado (Šimůnek *et al.*, 2009). O modelo é baseado em uma forma modificada da equação de Richards, na qual não se considera os efeitos da fase gasosa para o movimento unidimensional da água no meio poroso, expressa por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \beta \right) \right] - S \quad (1)$$

onde,

h = potencial matricial da água no solo, L;

θ = teor volumétrico de água, L³ L⁻³;

t = tempo, T;

x = coordenada espacial, L;

S = termo de sumidouro, $L^3 L^{-3} T^{-1}$;

β = ângulo entre a direção do fluxo e o eixo vertical (ou seja, $\alpha = 0^\circ$ para o fluxo vertical, 90° para o fluxo horizontal e $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ para fluxo inclinado);

K = condutividade hidráulica do solo não saturado, $L T^{-1}$.

A equação de Richards apresenta uma característica de alta não linearidade, o que dificulta resolvê-la analiticamente para situações que são recorrentes em aplicações práticas (Baiaimonte, 2020). Assim, o Hydrus-1D permite a utilização de 5 modelos empíricos para as propriedades hidráulicas do solo: Brooks e Corey (1964), van Genuchten (1980), Vogel e Císlerová (1988), Kosugi (1996) e Durner (1994). Para o presente estudo, foi utilizado o modelo desenvolvido por van Genuchten (1980), que descreveu equações empíricas para representar a curva de retenção de água no solo (Equação 2) e a permeabilidade (Equação 3):

$$\theta(\Psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\Psi|)^n]^m} \quad (2)$$

$$K(\Psi) = K_s \frac{\{1 - (\alpha|\Psi|)^{n-1} [1 + (\alpha|\Psi|)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha|\Psi|)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (3)$$

onde,

θ_r = umidade residual (mm^3/mm^3);

θ_s = umidade saturada (mm^3/mm^3);

Ψ = potencial matricial (mm);

α , m e n = parâmetros de ajuste, sendo $m = 1 - (1/n)$;

K_s = condutividade hidráulica saturada (mm/min).

Para determinar os parâmetros hidráulicos do solo, o Hydrus-1D utiliza um modelo computacional baseado em redes neurais, o Rosetta Lite Version 1.1, que implementa funções de pedotransferência (Schaap, 2001). Neste caso, junto ao Rosetta, foram utilizados dados de granulometria do solo da área de estudo, de acordo com a distribuição de textura, separada em teores de areia, silte e argila de cada camada do solo. A discretização do perfil do solo em 6 camadas, de 0,5 m cada, foi adicionada ao modelo para comparação com os dados observados na estação geotécnica instalada no local. A fim de adequar as equações do modelo de van Genuchten para as características do solo da região de interesse, foi utilizada a solução inversa do Hydrus-1D, que realiza o ajuste dos parâmetros hidráulicos do solo, inicialmente estimados pelo Rosetta.

Para a solução inversa, utilizada nos 3 eventos de calibração, foi necessário fornecer os seguintes dados: tempo de simulação (4 dias, o equivalente a 5760 minutos), informação geométrica (perfil do solo com 3 m de profundidade, dividido em 6 camadas de 0,5 m), condições iniciais (em conteúdo de água), condições de contorno (contorno atmosférico com camada superficial e teores de água constantes, além da intensidade da precipitação expressa em mm/min), estimativas iniciais dos parâmetros (utilizando o Rosetta para o evento 1 de calibração), posição dos pontos de observação e tempo com os dados correspondentes (sendo inseridos os dados de umidade volumétrica observados). As unidades utilizadas foram milímetros, para comprimento, e minutos, para tempo.

Quanto às estimativas iniciais dos parâmetros hidráulicos do solo, utilizou-se o Rosetta para o evento 1 de calibração, ajustando os parâmetros K_s – condutividade hidráulica saturada, θ_s – umidade saturada, θ_r – umidade residual e α – parâmetro de ajuste das equações de van Genuchten, camada a camada e um parâmetro por vez. Após a finalização da calibração 1, os parâmetros hidráulicos ajustados foram utilizados como estimativas iniciais para a calibração com o evento 2, e posteriormente, os parâmetros hidráulicos ajustados da calibração 2 foram utilizados como

estimativas iniciais para a calibração com o evento 3. Para a validação do modelo, os parâmetros hidráulicos finais foram a média aritmética dos parâmetros das três calibrações, tendo como *input* apenas a precipitação do respectivo evento de validação, simulando de forma direta, sem o uso da ferramenta Solução Inversa.

Métricas de Desempenho

Para avaliar a relação entre os valores observados e os resultados do modelo, foram aplicados critérios estatísticos. Optou-se pela utilização de dois critérios: índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e percentual de viés (PBIAS), respectivamente:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\theta C_i - \theta O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\theta O_i - \theta O_{méd})^2} \quad (4)$$

$$PBIAS = \frac{\sum (\theta O_i - \theta C_i)}{\sum \theta O_i} \cdot 100 \quad (5)$$

onde,

θC = umidade volumétrica calculada, $L^3 L^{-3}$;

θO = umidade volumétrica observada, $L^3 L^{-3}$;

$\theta O_{méd}$ = umidade volumétrica observada média, $L^3 L^{-3}$.

O primeiro critério, NSE, é uma estatística adimensional que quantifica a razão entre a variância dos resíduos (erro) e a variância dos dados observados. Esse coeficiente avalia o desempenho de modelos preditivos, sendo que valores próximos a 1 indicam ajuste ótimo entre valores simulados e observados (Nash e Sutcliffe, 1970). Enquanto o segundo critério, PBIAS, é expresso em termos percentuais e quantifica a tendência média de os valores simulados se desviarem sistematicamente dos valores observados. O valor ideal é 0, indicando ausência de viés. Valores positivos revelam uma tendência do modelo à subestimação, enquanto valores negativos indicam superestimação sistemática (Gupta *et al.*, 1999).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

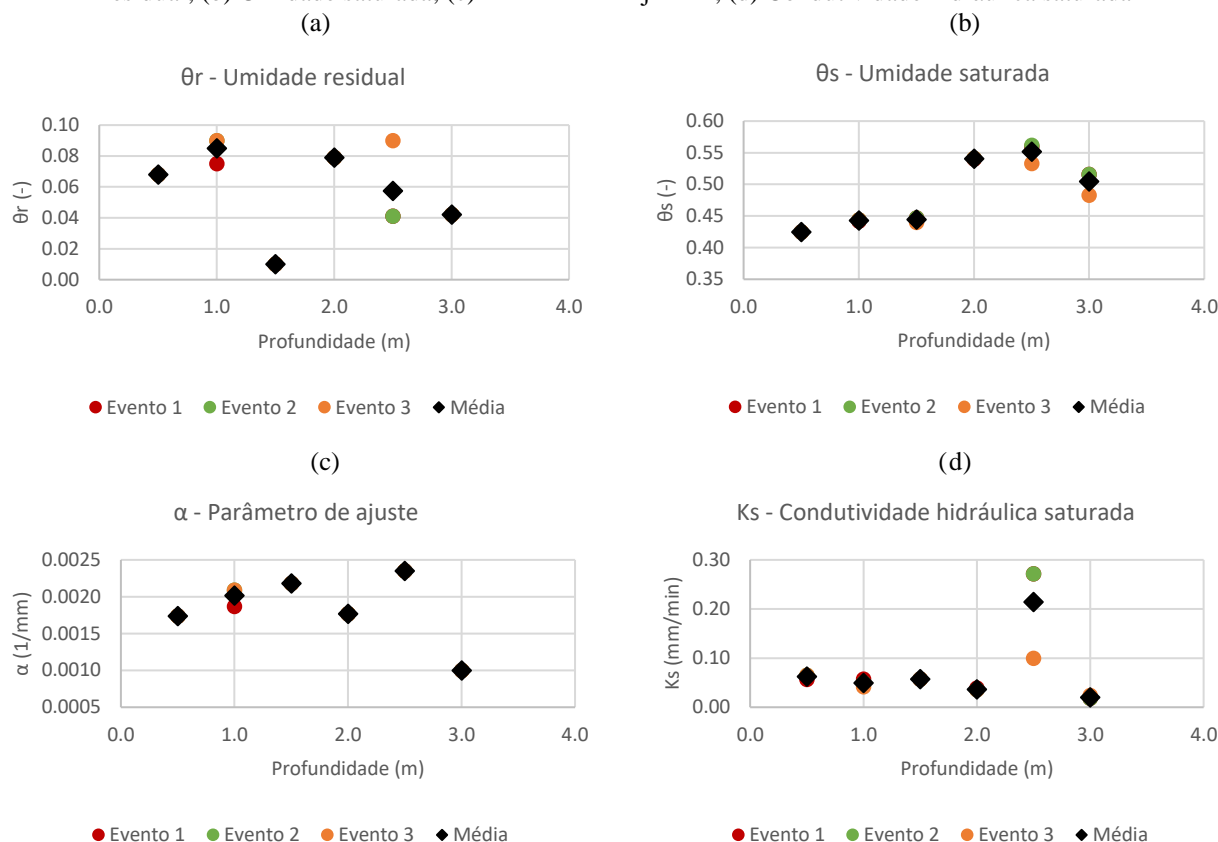
A partir da calibração com os três eventos, obteve-se a média aritmética dos parâmetros hidráulicos do solo (Tabela 1) que então foram utilizados para a validação do modelo. A Figura 3 mostra a variação dos parâmetros ajustados (θ_r , θ_s , K_s e α) para cada evento de calibração em comparação com as médias por profundidade utilizadas na validação. Nota-se que as camadas de 1,0 m e 2,5 m de profundidade são as que apresentam maior variação dos parâmetros durante o processo de calibração. A instabilidade observada nos parâmetros hidráulicos para as profundidades 1,0 m e 2,5 m resulta em uma representação diferente da que se espera obter para a variação da umidade volumétrica ao longo do tempo.

Tabela 1 – Parâmetros hidráulicos do solo obtidos após a calibração

Profundidade	θ_r (-)	θ_s (-)	α (1/mm)	n (-)	K_s (mm/min)	l (-) ¹
0,5 m	0,068	0,425	0,00174	1,35	0,0624	0,50
1,0 m	0,085	0,443	0,00202	1,28	0,0497	0,50
1,5 m	0,010	0,445	0,00218	1,33	0,0573	0,50
2,0 m	0,079	0,541	0,00177	1,33	0,0368	0,50
2,5 m	0,057	0,552	0,00235	1,33	0,2147	0,50
3,0 m	0,042	0,505	0,00100	1,43	0,0203	0,50

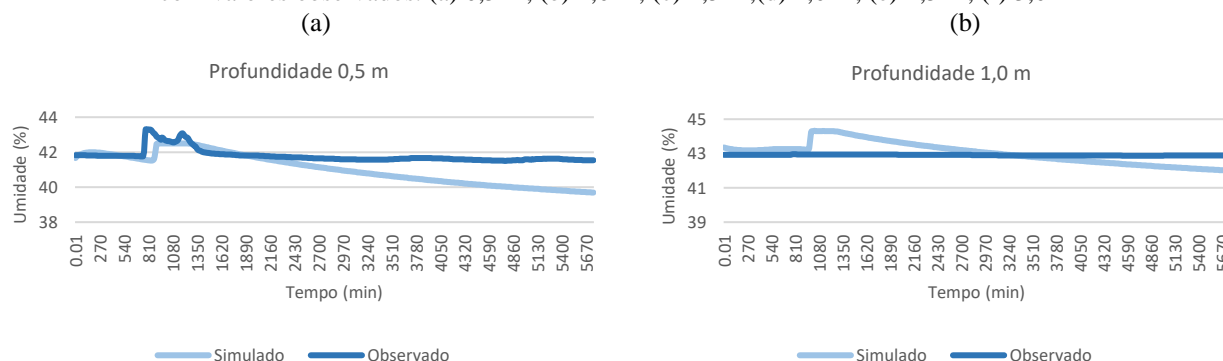
¹ l = parâmetro de tortuosidade na função de condutividade.

Figura 3 – Variação dos parâmetros hidráulicos do solo obtidos pelas simulações com o Hydrus-1D. (a) Umidade residual; (b) Umidade saturada; (c) Parâmetro de ajuste α ; (d) Condutividade hidráulica saturada



A Figura 4 ilustra a comparação entre os valores observados de umidade volumétrica e os valores simulados com o evento 1 de validação. Um comportamento semelhante se aplica aos resultados obtidos na validação com o evento 2. O desempenho do modelo é apresentado nas Tabelas 2 e 3, conforme os critérios estatísticos aplicados, NSE e PBIAS. As calibrações 2 e 3 apresentam um desempenho insatisfatório, conforme Moriasi *et al.* (2007)³, pois, para o NSE ser considerado satisfatório, os valores deveriam ser maiores do que 0,40. Isso mostra a alta variação entre os valores das simulações e os valores observados, evidenciando a limitação que o método tem para representar o comportamento hidráulico observado, que se trata de um fenômeno ocorrendo em solo de encosta.

Figura 4 – Variação da umidade volumétrica em decorrência do tempo obtida pela simulação na validação 1 comparada com valores observados. (a) 0,5 m; (b) 1,0 m; (c) 1,5 m; (d) 2,0 m; (e) 2,5 m; (f) 3,0 m



³ Utilizou-se Moriasi (2007) para identificar a qualidade do desempenho das simulações por falta de bibliografia mais adequada.



Tabela 2 – Desempenho das simulações com o critério de NSE

Simulação	0,5 m	1 m	1,5 m	2 m	2,5 m	3 m
Calibração 1	0,882	0,952	0,872	0,911	0,952	0,994
Calibração 2	-1,682	-84,927	-127,374	-16.716,373	-2.094,735	-12.023,591
Calibração 3	-0,996	-40,447	-7,959	-1.145,595	-22,400	-257,470
Validação 1	0,673	0,876	0,823	0,561	0,758	0,914
Validação 2	0,790	0,885	0,866	0,620	0,710	0,911

Tabela 3 – Desempenho das simulações com o critério de PBIAS

Simulação	0,5 m	1 m	1,5 m	2 m	2,5 m	3 m
Calibração 1	0,493	-0,227	-1,258	0,963	-0,842	-0,319
Calibração 2	-0,571	-0,048	-1,198	2,631	-0,173	0,950
Calibração 3	-1,964	-0,650	-1,062	-0,148	-0,234	-0,303
Validação 1	1,787	-0,288	-1,247	1,994	1,956	1,218
Validação 2	0,915	-0,409	-1,047	2,437	2,170	1,241

Os critérios estatísticos de desempenho adotados na calibração e validação apresentaram valores significativamente distantes dos limiares considerados adequados para a validação do modelo para as calibrações 2 e 3 (em todas as profundidades) no critério de NSE, indicando limitações na aplicação do Hydrus-1D ao contexto analisado. Um dos principais fatores que pode ter contribuído para esses resultados está relacionado à simplificação geométrica imposta pelo modelo, que considera exclusivamente fluxo unidimensional vertical em terrenos planos. Essa limitação desconsidera a

influência da declividade do terreno, fator determinante para o comportamento do fluxo de água em encostas, especialmente em regiões sujeitas a movimentos de massa (Iverson, 2000). Em ambientes inclinados, a redistribuição lateral da água no solo pode alterar significativamente os gradientes de poro-pressão, afetando diretamente os mecanismos de instabilidade. Além disso, a calibração baseada em apenas três eventos de precipitação pode ter restringido a representatividade dos parâmetros hidráulicos obtidos, reduzindo a capacidade do modelo de simular adequadamente a variabilidade das condições hidrológicas reais. Assim, torna-se evidente a necessidade de considerar modelos que incorporem a topografia no cálculo do fluxo ou que integrem componentes hidrológicos e geotécnicos de forma mais abrangente.

Adicionalmente, a caracterização do solo utilizada neste estudo baseou-se unicamente na análise granulométrica. De acordo com Melo (2021), embora a granulometria seja um parâmetro importante por estar associada à erodibilidade do solo, ela não deve ser considerada isoladamente para a descrição de suas propriedades físicas e hidromecânicas. As frações texturais de areia, silte e argila, geralmente não se apresentam de forma dissociada, mas sim agregadas, com diferentes níveis de estabilidade estrutural, os quais dependem de fatores como a coesão entre partículas, teor de matéria orgânica e histórico de uso do solo. Dessa forma, a ausência de dados complementares, como densidade do solo, porosidade, condutividade hidráulica saturada e estrutura, compromete a representatividade dos parâmetros inseridos no modelo e pode ter influenciado negativamente a precisão das simulações.

CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a capacidade do modelo Hydrus-1D em representar o processo de permeabilidade do solo em áreas de encosta, com foco nas recorrentes ocorrências de deslizamentos de terra na região de Blumenau/SC. Os resultados demonstraram uma divergência entre os dados simulados e os valores observados para as calibrações 2 e 3, levantando questionamentos quanto às limitações do modelo frente à complexidade do ambiente analisado. Uma das principais restrições identificadas refere-se à suposição de fluxo unidimensional vertical, que desconsidera os efeitos da declividade no comportamento hidráulico do solo – um fator crucial em terrenos inclinados, onde o fluxo lateral de água pode contribuir significativamente para a instabilização de encostas (Iverson, 2000). Além disso, a utilização exclusiva de dados granulométricos e da disposição das camadas para a parametrização do solo mostrou-se insuficiente para representar de forma adequada suas propriedades hidráulicas e mecânicas. A ausência de informações sobre mineralogia, estrutura, coesão entre partículas e outros atributos físicos limita a confiabilidade dos resultados, conforme destacado por Melo (2021). Apesar de o modelo não ter se mostrado plenamente eficaz na simulação da variação da umidade volumétrica do solo em resposta à precipitação, este trabalho reforça a complexidade envolvida na análise de processos que antecedem os deslizamentos de terra.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pelo apoio financeiro a partir da Chamada Pública CNPq/MCTI Nº 15/2023 para a participação do XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Os autores também agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), com evidência ao Edital 60/2024, pelo apoio financeiro concedido.

REFERÊNCIAS

ÁGUAS SC – COMITÊ DO ITAJAÍ. (2025). Disponível em: <https://www.aguas.sc.gov.br/a-bacia-rio-itajai/bacia-hidrografica-rio-itajai>. Acesso em: 16 jun. 2025.

- BAIAMONTE, G. (2020). “*Analytical SOLUTION OF THE Richards Equation under gravity-driven infiltration and constant rainfall intensity*”. Journal of Hydrologic Eng. v. 25, n. 7, pp. 210 – 217.
- BROOKS, R.H. & COREY, C.T. (1964). “*Hydraulic properties of porous media*”. Fort Collins, Colorado State University. Hydrology Papers, 3.
- DURNER, W. (1994). “*Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure*”. Water Resources Research. v. 30, pp. 211 – 223.
- FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. (2001). “*Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis*”. Revista Brasileira de Geomorfologia. v. 2, n. 1, pp. 51 – 71.
- GUPTA, H. V.; SORROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. (1999). “*Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration*”. Journal Hydrologic Eng. v. 4, n. 2, pp. 135 – 143.
- IBGE. (2010). Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/blumenau/panorama>. Acesso em: 16 jun. 2025.
- IVERSON, R. M. (2000). “*Landslide triggering by rain infiltration*”. Water Resources Research. v. 36, n. 7, pp. 1897 – 1910.
- KOSUGI, K. (1996). “*Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties*”. Water Resources Research. v. 32, pp. 2697 – 2703.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970). “*River flow forecasting through conceptual models part I – a discussion of principles*”. Journal of Hydrology. n. 10, pp. 282 – 290.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. (2007). “*Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*”. American Society of Agricultural and Biological Engineers. v. 5, n. 3, pp. 885 – 900.
- PINTO, C. S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos, 3ª Edição*. Oficina de Textos. 364 p.
- SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; VAN GENUCHTEN, M. T. (2001). “*Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions*”. Journal of Hydrology. v. 251, n. 3, pp. 163 – 176.
- ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M. T. (2009). “*The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media*”. Riverside: Department of Environmental Sciences – University of California Riverside. 332 p.
- VAN GENUCHTEN, M. T. (1980). “*A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*”. Soil Science Society of America Journal. v. 44, pp. 892 – 898.
- VOGEL, T. & CÍSLEROVÁ M. (1988). “*On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve, transport in porous media*”, Transport in Porous Media 3. Kluwer Academic Publishers. pp. 1 – 15.