



Avenida Pasteur, 404, Segundo andar - Bairro Urca, Rio de Janeiro/RJ, CEP 22290-255
 Telefone: e Fax: @fax_unidade@ - https://www.sgb.gov.br

PLANO DE TRABALHO - CONVÊNIOS/AJUSTES

Processo nº 48032.002312/2024-92

Projeto:	PEDOFUNÇÕES: PROPRIEDADES HIDRÁULICAS EM SOLOS BRASILEIROS
Natureza do projeto:	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação - P&D,I
Dados do Coordenador (a):	Marta Vasconcelos Ottoni
Dados do Coordenador (a) substituto (a):	Emanuel Duarte Silva
Órgão Administrador:	Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Computação Científica - FACC
Instituição Executora:	Divisão de Hidrologia Aplicada/Departamento de Hidrologia/Serviço Geológico do Brasil

1. Objetivo Geral

Os estudos hidrológicos e a simulação de fluxo de água na matriz porosa dos solos requerem informações de propriedades hidráulicas do solo que nem sempre se encontram disponíveis.

As Funções de Pedotransferência (FPTs) ou Pedofunções vêm cobrir essa deficiência de dados de tais propriedades do solo. As FPTs são modelos que permitem estimar essas informações de mais complexa determinação a partir de atributos do solo de mais frequente medição no campo e em laboratório, sendo estes as variáveis de entrada dos modelos.

No Brasil, há diversas FPTs de propriedades hidráulicas, mas se carece ainda de modelos mais atuais desenvolvidos na escala do território nacional e que levem em consideração uma estrutura hierarquizada das suas variáveis de entrada, já que muitas dessas variáveis podem não estar disponíveis aos usuários. Também são raros no país os estudos de validação dos modelos ajustados, e mais raros ainda os estudos de validação funcional dessas pedofunções em perfis de solos. Todas essas pesquisas validadoras são relevantes, pois elas avaliam o desempenho final de tais modelos preditores de propriedades hidráulicas na simulação dos processos hidrodinâmicos que ocorrem no solo.

Diante deste cenário, o Departamento de Hidrologia do Serviço Geológico do Brasil propôs o Projeto "Estudo de Pedofunções de Propriedades Hidráulicas em Solos Brasileiros" com prazo de duração de 7 (sete) anos a partir de 2024.

O objetivo geral é gerar e validar modelos de predição de propriedades hidráulicas do solo em escala nacional a partir de propriedades de solo comumente disponíveis em bases de dados e de frequente determinação no campo ou em laboratório.

Nesse projeto serão considerados como variáveis de entrada das pedofunções (variáveis essas disponibilizadas pelo projeto, segundo seus objetivos, num amplo e organizado banco de dados de solos) as seguintes propriedades: dados granulométricos, densidade do solo, teor de matéria orgânica, microporosidade, e outros atributos que poderão ser inseridos, se demonstrada a conveniência. Variáveis de solo de bases de dados internacionais poderão incluídas no estudo, se confirmada a aderência dessas variáveis à estrutura de dados dos solos brasileiros, o que seria útil para aumentar a abrangência da aplicabilidade desse projeto. Uma parte selecionada da base de dados seria utilizada nos estudos de desenvolvimento das FPTs, com a parte restante sendo exclusivamente para a validação dos modelos.

As variáveis hidráulicas de saída das pedofunções nacionais a serem desenvolvidas são as variáveis mais utilizadas de retenção de água, referentes a diferentes potenciais matriciais, como: umidade na saturação, capacidade de campo e ponto de murcha. Também serão preditos a condutividade hidráulica saturada, bem como os parâmetros da equação de van Genuchten (van Genuchten, 1980) da curva de retenção de umidade, o que vai permitir o cálculo completo dessa curva e uma avaliação preliminar da curva de condutividade hidráulica não saturada.

Para cada propriedade hidráulica a ser estimada, serão selecionados os modelos de pedofunções que tenham calculado essa propriedade na base de dados utilizada para validação com menores erros e maior confiabilidade, segundo o uso de estatísticas específicas de avaliação de erros.

Os modelos desenvolvidos de FPT's terão uma estrutura hierarquizada dos seus dados de entrada e o domínio desses dados nos modelos serão explicitados para evitar o uso indevido das pedofunções.

Na geração desses modelos pretende-se utilizar as técnicas de otimização da Inteligência Artificial (Árvore de Decisão, Rede Neural, Ajuste Multilinear, etc), com o objetivo de maximizar o desempenho do modelo preditivo final. Modelos combinados de otimização, utilizando conjuntamente todas as técnicas acima, também serão gerados e avaliados.

Estudos de validação funcional dos modelos ajustados também estão incluídos nos objetivos deste trabalho, objetivando avaliar o desempenho dos mesmos na avaliação de processos hidrodinâmicos nos perfis de solo. Paralelamente, prevê-se a determinação do domínio dos modelos com o objetivo de informar a aplicabilidade dos mesmos a outras bases de dados de solos não utilizadas no processo de calibração.

Pretende-se estender o escopo deste estudo para incluir a condutividade hidráulica não saturada como variável de saída, quando um volume mais expressivo desses dados se encontrarem disponíveis. Há também o objetivo de incluir o desenvolvimento de outros modelos de predição que levem também em consideração como variáveis de entrada as classes pedológicas e os dados morfológicos de perfis de solos, bem como covariáveis ambientais extraídas dos modelos digitais de terreno (MDT), estes últimos com a vantagem de potencializar a estimativa as propriedades de solo em larga escala territorial.

Prevê-se assim que com a seleção das FPTs de melhor desempenho esse projeto possa contribuir e se aplicar a nível nacional em diferentes estudos de modelagem e investigação hidrodinâmica do solo, iniciativas de mapeamento de solos e projetos de engenharia

Espera-se produzir um aplicativo nos moldes do Qmin, desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil [Qmin (cprm.gov.br)], onde o usuário insere sua base de dados de solos e indica o(s) modelo(s) preditor(es) que quer utilizar. Como resultado do aplicativo, será produzida uma outra base de dados com os valores das variáveis hidráulicas requeridas, incluindo os intervalos de confiança das estimativas e se as mesmas encontram-se na área de domínio do(s) modelo(s) escolhido(s).

O projeto será realizado por profissionais da CPRM que trabalham em técnicas de inteligência artificial e/ou que desempenham funções em áreas correlatas a este estudo. O trabalho também poderá contar com apoio de profissionais externos, COPPE, Embrapa, CENA/USP, UFLA, dentre outras para eventuais consultorias, no contexto de Acordos de Cooperação/ Parceria específicos entre a CPRM e a partícipe (vide Nota Técnica complementar 2350302). Espera-se contar com o apoio de bolsista de doutorado e/ou pos-doc para execução das atividades previstas neste plano, com suporte da supervisora deste estudo Marta Vasconcelos Ottoni/DEHID/CPRM.

2. Justificativa

No Brasil, os dados das propriedades hidráulicas dos solos encontravam-se dispersos em teses, dissertações e publicações. O HYBRAS - Hydrophysical Database for Brazilian Soils (Otoni et al., 2018) foi uma iniciativa do Serviço Geológico do Brasil de compilar essas informações e disponibilizá-las para amplo uso. No entanto, a distribuição dos dados disponíveis no HYBRAS ainda não cobre a ampla variedade de solos e biomas existentes no Brasil, carecendo de esforços conjuntos de diferentes instituições do país produtoras de dados de solos para a inclusão de mais informações nessa base de dados.

Nesse sentido, estimativas das propriedades hidráulicas a partir de informações mais facilmente medidas e amplamente disponíveis em bases de dados de solos no Brasil se fazem ainda necessárias. Funções de Pedotransferência (FPTs) ou Pedofunções, termos introduzidos por Bouma (1989), traduzem a relação existente entre aquilo que é mais difícil medir (as propriedades hidráulicas dos solos) e as variáveis de solo de mais fácil e frequente determinação, que são as variáveis de entrada dos modelos. Essas pedofunções têm sido úteis em modelos climatológicos, hidrológicos, de erosão, em estudos de irrigação e drenagem e para trabalhos de mapeamento digital de solos (Lin, 2010; Zhao et al., 2018, Ribeiro et al., 2018).

Desde 2018 quando o HYBRAS foi lançado no site da CPRM, deu-se continuidade ao levantamento de dados de propriedades hidráulicas e de outras propriedades de solo correlatas existentes no país. Desse período até os tempos atuais foi possível reunir essas informações em cerca de 8000 amostras de solos adicionais, essas ainda não oficialmente incluídas no HYBRAS. Esses novos dados serão publicados no ano de 2024 na segunda versão do HYBRAS, chamada HYBRAS V2, os quais serão aplicados neste estudo.

Segundo recente estudo de revisão de trabalhos no Brasil envolvendo FPTs de propriedades de propriedades hidráulicas dos solos, feito pela Coordenação deste Projeto, foram catalogados 57 modelos dessas pedofunções, no período de 1987 até 2019, a maioria concentrada no estado do Rio Grande do Sul e quase todos destinados a estimar alguns pontos da curva de retenção de umidade, como a capacidade de campo e o ponto de murcha. Em escala nacional encontram-se disponíveis apenas as FPTs dos trabalhos de Tomasella et al. (2000) e Tomasella et al. (2003), os dois para predição dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) da curva de retenção de umidade, incluindo o último estudo outros modelos para predição de alguns pontos dessa curva. Quanto à condutividade hidráulica saturada (Ksat), apenas a FPT de Otoni et al. (2019) foi calibrada para o território nacional. São inexistentes pedofunções de condutividade hidráulica não saturada no país.

Além disso, vários modelos brasileiros levam em consideração variáveis preditoras (as variáveis de entrada dos modelos) que estão frequentemente indisponíveis para o usuário, havendo a demanda, dessa forma, por um sistema de pedofunções com uma estrutura hierarquizada de variáveis de entrada, como realizado no Rosetta (Schaap et al., 2001).

Constatou-se também nesse estudo de revisão no Brasil a necessidade de se explorar diferentes técnicas de inteligência artificial para a geração das FPTs. Destacou-se que em torno de 82% das pedofunções brasileiras foram geradas a partir apenas de modelos de regressão multilinear. Ressalta-se que são promissoras e muito utilizadas no ajuste de FPTs (Bortoline e Albuquerque, 2018) outras técnicas de otimização, como as de Árvore de Decisão e Redes Neurais. Além disso, registraram-se, infelizmente, poucos trabalhos com estudos de validação dos modelos desenvolvidos e um número ainda menor com validação funcional, que indicariam o desempenho e a confiabilidade das FPT geradas na simulação de processos hidrodinâmicos no solo.

Outra carência observada nesse trabalho de revisão de FPTs no país diz respeito à aplicabilidade de uma determinada pedofunção para uma outra base de dados não contida na calibração da FPT. Ou seja, não é usual nos trabalhos publicados a indicação do domínio dos modelos, ou seja, o conjunto de dados de entrada utilizados no ajuste das FPTs, limitando, portanto, a aplicação confiável dessas FPTs em outras bases de dados. Por fim, essa revisão também permitiu concluir que ainda não há registros de pedofunções de propriedades hidráulicas no país que levem em consideração como variáveis de entrada características pedológicas e morfológicas do perfil de solo, como classe de solo, cor, estrutura, consistência, profundidade, etc. Essas pedofunções integradoras seriam particularmente úteis na utilização do legado de dados de solos existentes no país [que hoje, segundo BDSOLOS (Sistema de Informação de Solos Brasileiros (embrapa.br)), concentra em torno de 35,000 observações de solos de aproximadamente 5300 pontos amostrais com descrição pedológica] como ferramenta para geração adicional de informações de armazenamento e fluxo de água no solo, que raramente são descritas nessas bases de dados.

Justifica-se no Brasil, portanto, avanços nos estudos de FTPs de propriedades hidráulicas. Em especial, na geração de modelos preditores nacionais que levem em consideração a diversidade de solos e biomas existentes no país, que sejam facilmente disponíveis e aplicáveis a diferentes bases de dados e que produzam estimativas de qualidade e em formatos de saída que atendam às diferentes demandas dos usuários por essas informações hidráulicas.

Diante desse cenário, o Departamento de Hidrologia da CPRM instituiu o presente projeto: Estudos de Pedofunções de Propriedades Hidráulicas em Solos Brasileiros, inserido no contexto do programa Estudos de Caracterização Hidrológica de Solos, este último com o objetivo de ampliar o conhecimento dos processos hidrológicos no solo incluindo sua relação com os fluxos de água superficiais e subterrâneos nas diferentes escalas de espaço-tempo.

3. Atividades

As principais atividades realizadas neste projeto serão:

1. Desenvolvimento da base de dados do estudo:
 1. Compilação de dados de solo
 2. Seleção de dados de solos internacionais
 3. Organização, harmonização e consistência dos dados
 4. Análise dos dados

5. Composição das bases de dados do estudo, segundo as variáveis de saída e entrada a serem ajustados
 6. compilação de co-variáveis ambientais do MDT;
 7. Avaliação da ampliação da base de dados incluindo solos internacionais;
2. Ajuste e validação dos modelos para os dados hidráulicos: retenção de água, condutividade hidráulica saturada e parâmetros da eq. de van genuchten:
 1. Ajuste dos modelos (linear, random forest, catboost, redes neurais, etc) para os dados de retenção de água. Uso da validação cruzada
 2. Análise do desempenho da validação de todos os modelos
 3. Elaboração dos modelos combinados de otimização e comparação de desempenho com os dos modelos individuais para a base de dados teste
 4. Definição do domínio dos modelos
 5. Seleção dos modelos finais e comparação de desempenho dos modelos selecionados como o de outros modelos ajustados na literatura utilizando uma base de dados de solo teste não aplicado no desenvolvimento dos modelos ajustados no projeto.
 6. Desenvolvimento do aplicativo web para predições de propriedades hidráulicas a partir de bases de dados de solos fornecidas pelos usuários
 7. Ajuste e validação dos modelos, considerando os preditores extraídos de MDT e de outros atributos do solo que já estejam especializados (produto Embrapa);
 3. Validação funcional dos modelos:
 1. Escolha de cenários geoambientais que envolvam o armazenamento e fluxos de água no solo
 2. Escolha do modelo para simulação dos processos hidrológicos no solo
 3. Simulação dos cenários escolhidos, levando em consideração o uso das FPTs ajustadas no trabalho e aquelas usualmente utilizadas na literatura. Realizar comparação dos resultados obtidos pelos dois modelos de FPTs (ajustado neste trabalho e os da literatura)
 4. Elaboração de relatórios e trabalhos científicos:
 1. Elaboração dos relatórios
 2. Elaboração de trabalhos científicos para jornais nacionais e/ou internacionais e congressos científicos
 5. Participação em eventos científicos:
 1. Divulgação dos trabalhos parciais e finais em congressos, simpósios e workshops relacionados a temática do estudo

4. Resultados Esperados

- Bases expandidas de dados para o desenvolvimento e validação de pedofunções nacionais de propriedades hidráulicas;
- Modelos nacionais selecionados e com domínios bem definidos para predição da condutividade hidráulica saturada-Ksat;
- Modelos nacionais selecionados e com domínios bem definidos para predição de dados de retenção de água e de curvas de retenção de água;
- Resultado da comparação do desempenho dos modelos selecionados (retenção de água e Ksat) com o de outros ajustados na literatura a partir de uma base de dados de solo teste, não utilizada na calibração dos modelos selecionados no projeto;
- Resultados de validação funcional dos modelos selecionados para diferentes estudos de casos geoambientais que envolvam simulações e avaliações de armazenamento e movimento de água no solo;
- Aplicativo nos moldes do Qmin [Qmin (cprm.gov.br)], onde o usuário insere sua base de dados de solos e indica qual o modelo preditor quer utilizar; como resultado final, será produzida uma outra base de dados com os resultados, incluindo os intervalos de confiança e se as estimativas dos parâmetros hidráulicos encontram-se na área de domínio do modelo;
- Relatórios internos periódicos e artigos científicos apresentados em eventos e jornais científicos.
- Contratação de bolsista de pós-doutorado, doutorado e estagiários de ensino superior.

5. Período de execução

O projeto em questão terá duração de 4 (quatro) anos, com início previsto em 01/01/2025. O presente Plano de Trabalho pode ser terminado a qualquer tempo, mediante comunicação por escrito do dirigente do órgão executor ou da diretoria da FACC, preservada a conclusão dos compromissos irrevogáveis já assumidos pelas partes.

6. Cronograma

Item	Atividades	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4
3.1	Desenvolvimento da base de dados do estudo	x			
3.2	Ajuste e validação dos modelos para os dados hidráulicos: retenção de água, condutividade hidráulica saturada e parâmetros da eq. de van Genuchten	x	x	x	
3.3	Validação funcional dos modelos		x	x	
3.4	Elaboração de relatórios e trabalhos científicos		x	x	x

3.5	Participação em eventos científicos	x	x	x	
-----	-------------------------------------	---	---	---	--

7. Equipe Executora

Nome	E-mail	Vínculo	Atribuições
Marta Vasconcelos Ottoni	SGB/CPRM marta.ottoni@sgb.gov.br	Órgão executor	Coordenação, proposição da metodologia e acompanhamento da execução das atividades do projeto, geração dos modelos, elaboração dos relatórios e trabalhos científicos (atividades 3.1 a 3.4)
Emanuel Duarte Silva	SGB/CPRM emanuel.duarte@sgb.gov.br	Órgão executor	Apoio na coordenação do projeto
Lara Mota Corinto*	laramcorinto@hotmail.com	Órgão executor	Bolsista de doutorado nas atividades de desenvolvimento da base de dados (atividade 3.1), geração e validação dos modelos (atividade 3.2), validação funcional dos modelos (atividade 3.3), elaboração de relatórios e trabalhos científicos (atividade 3.4), participação em eventos científicos (atividade 3.5)
Bolsista pos-doc	-	Órgão executor	Bolsista de pos-doc nas atividades de desenvolvimento da base de dados (atividade 3.1), geração e validação dos modelos (atividade 3.2), validação funcional dos modelos (atividade 3.3), elaboração de relatórios e trabalhos científicos (atividade 3.4), participação em eventos científicos (atividade 3.5)

*Lara Corinto ainda está em processo de concurso para admissão no doutorado.

8. Despesas previstas

Os recursos do projeto serão utilizados essencialmente para os itens previstos abaixo.

Descrição do item	Valor unitário	Qtde	Total
	(R\$)		(R\$)
a - Bolsa doutorado pelo prazo de 4 anos	3.500,00	1	168.000,00
b - Participação em 2 congressos nacionais			14.100,00
• Passagem aérea (ida e volta)	3.000,00	2	6.000,00
• Diárias (hospedagem, alimentação e transporte, utilizando como valores de referência aqueles estabelecidos no decreto no 11.872 de 29/12/2023)	425	12	5.100,00
• Inscrição	1.500	2	3.000,00
c - Publicação artigo internacional	25.000	2	50.000,00
Total sem taxa administrativa FACC (a+b+c)			232.100,00
Total com taxa administrativa FACC – 10%			255.310,00

Bolsistas

Prevê-se a contratação de um bolsista de doutorado para exercer as atividades de pesquisa e desenvolvimento, conforme descritas nos itens 1 a 5 da seção 3 - Atividades. O bolsista deve ter formação em engenharia, em especial, civil, agrônômica, ambiental ou agrícola. O SGB/CPRM já possui uma indicação de bolsista de doutorado que atende os pré-requisitos necessários para desenvolvimento das atividades prevista para esse cargo. Caso haja desistência dessa indicação ou se o(a) bolsista obtiver financiamento de outro órgão de fomento (ex: CNPq), opta-se por contratação de um bolsista pos-doc com formação similar à do bolsista de doutorado e com experiência em ciência do solo e/ou ambiental. Essa contratação poderá ser efetuada mediante indicação direta do SGB/CPRM, por indicação de instituição parceira ou por seleção interna por meio de edital, caso não consiga realizar seleção por indicação interna e externa. O valor previsto de bolsa de doutorado é de R\$3.500,00 no prazo de quatro anos e de pos-doc de R\$ 5.500, no período remanescente do projeto, caso haja desistência da bolsista de doutorado. O bolsista de doutorado ou o eventual bolsista pos-doc poderá realizar suas atividades externamente ao SGB/CPRM – Rio de Janeiro.

9. Fonte de recursos

Os recursos advirão da realização das atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovações. O valor que será aportado é de R\$ 255.310,00 e será desembolsada em 3 parcelas, conforme cronograma financeiro abaixo:

Cronograma Financeiro	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4
Parcela 1: R\$ 95.000	x			
Parcela 2: R\$ 95.000		x		
Parcela 3: R\$ 65.310			x	

10. Referências

- BORTOLINI, D., ALBUQUERQUE, J.A. Estimation of the retention and availability of water in soils of the State of Santa Catarina. *Rev. Bras. Cienc. Solo.* . 2018;42:e0170250
- BOUMA, J., 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation, *Adv. Soil Sci.*, 9:177-213.
- EUROPEAN COMMISSION, 2009. LUCAS 2009 (Land Use / Cover Area Frame Survey), Technical reference, document C-3:Land use and Land Cover:Nomenclature (version of 20/03/2009), Eurostat.
- EVSUKOFF, A., 2020. Inteligência computacional: Fundamentos e aplicações [recurso eletrônico], 1. ed., Rio de Janeiro: E-papers.
- GERKE, H.H., VAN GENUCHTEN, M.TH., 1993. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resour. Res.* 29, 305–319. <https://doi.org/10.1029/92WR02339>.
- GWO, J.P., JARDINE, P.M., WILSON, G.V., YEH, G.T., 1995. A multiple-pore-region concept to modeling mass transfer in subsurface media. *J. Hydrol.* 164, 217–237.
- HARTIGAN, J.A., 1975. Clustering algorithms. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc.
- HO, TIN KAM, 1995. Random Decision Forests. *Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition*, Montreal, QC, 14–16 August, pp. 278–282.
- JARVIS, N.J., 1998. Modeling the impact of preferential flow on nonpoint source pollution. In: Selim, H.M., Ma, L. (Eds.), *Physical Nonequilibrium in Soils: Modeling and Application*, Ann Arbor Press, Chelsea, MI, pp. 195–221.
- LIN, H., 2010. Earth's Critical Zone and hydrogeology: concepts, characteristics, and advances, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 25–45, <https://doi.org/10.5194/hess-14-25-2010>.
- MAREN, A. J., 1990. Neural Network Structures: Form Follows Function. In: HARSTON, C. T., PAP, R. M. (eds.), *Handbook of Neural Computing Applications*. San Diego (California): Academic Press, Inc., Cap. 4, p. 45-57.
- OTTONI, M.V., 2017. Sistema de Classificação dos Solos baseado na Estrutura do Espaço Poroso, Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE (Tese de Doutorado). <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/19000/1/Tese%20de%20Marta%20V.%20Ottoni.pdf>.
- OTTONI, M.V., 2018. HYBRAS hydrophysical database for Brazilian soils : banco de dados hidrofísicos em solos no Brasil para o desenvolvimento de funções de pedotransferências de propriedades hidráulicas : versão 1.0 : relatório, Rio de Janeiro, CPRM, 27 p. <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/19021>.
- OTTONI, M.V., 2019. Pedotransfer functions of hydraulic properties for Brazilian soils: a review: preliminary results. 5th Brazilian Soil Physics Meeting, UFPA. <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22568>.
- OTTONI, M.V., OTTONI FILHO, T.B., SCHAAP, M.G., LOPES-ASSAD, M.L.R.C., E ROTUNNO FILHO, O.C., 2018. Hydrophysical database for Brazilian soils (HYBRAS) and pedotransfer functions for water retention. *Vadose Zone J.* 17:170095. doi:10.2136/vzj2017.05.0095.
- OTTONI, M.V., OTTONI FILHO, T.B., SCHAAP, M.G., LOPES-ASSAD, M.L.R.C., E ROTUNNO FILHO, O.C., 2019. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. *Journal of Hydrology.* 575:1345-1358. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.050>.
- PROKHORENKOVA, L., GUSEV, G., VOROBEV, A., DOROGUSH, A.V., GULIN, A., 2018. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. 32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2018), Montréal, Canada. <https://arxiv.org/abs/1706.09516>.
- PRUESS, K., WANG, J.S.Y., 1987. Numerical modeling of isothermal and non-isothermal flow in unsaturated fractured rock—a review. In: Evans, D.D., Nicholson, T.J. (Eds.), *Flow and Transport through Unsaturated Fractured Rock*, Geophysics Monograph, vol. 42. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 11–22. <https://doi.org/10.1029/GM042p0019>.
- RAWLS, W.J., E BRAKENSIEK, D.L., 1982. Estimating soil water retention from soil properties. *J. Irrig. Drainage Div. ASCE* 108:166–171.
- RIBEIRO, B.T., DA COSTA, A.M., SILVA, B.M., FRANCO, F.O., BORGES, C.S., 2018. Assessing pedotransfer functions to estimate the soil water retention. *Biosci. J., Uberlândia*, v. 34, supplement 1, p. 177-188.
- SCHAAP, M.G., LEIJ, F.J., VAN GENUCHTEN, MTH., 2001. ROSSETA: computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions, *Journal of Hydrology*, 251: 163-176, doi: 10.1016/S0022-1694(01)00466-8.
- STONE, M., 1974. "Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions". *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*. 36 (2): 111–147. doi:10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x.
- SZABÓ, B., WEYNANTS, M, E WEBER, T.K.D., 2021. Updated European hydraulic pedotransfer functions with communicated uncertainties in the predicted variables (eupfv2). *Geosci. Model Dev.*, 14, 151–175, 2021. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-151-2021>.
- TOMASELLA, J., HODNETT, M.G., ROSSATO, L., 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 327-338, doi: 10.2136/sssaj2000.641327x.
- TOMASELLA, J., PACHEPSKY, YA., CRESTANA, S., RAWLS, W.J., 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention, *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 67: 1085-1092, doi: 10.2136/sssaj2003.1085.

VAN GENUCHTEN, MTh., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 892-899, doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.

ZHAO, H., ZENG, Y., LV, S., AND SU, Z., 2018. Analysis of soil hydraulic and thermal properties for land surface modeling over the Tibetan Plateau, Earth Syst. Sci. Data, 10, 1031–1061, <https://doi.org/10.5194/essd-10-1031-2018>.



Documento assinado eletronicamente por **Flávio Barbosa Toledo, Usuário Externo**, em 19/12/2024, às 11:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



Documento assinado eletronicamente por **Jenifer da Silva Guitz, Usuário Externo**, em 19/12/2024, às 14:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Roberto Leonardo, Representante Legal**, em 20/12/2024, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



Documento assinado eletronicamente por **EMANUEL DUARTE SILVA, Chefe da Divisão de Hidrologia Aplicada**, em 20/12/2024, às 16:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



Documento assinado eletronicamente por **Inácio Cavalcante Melo Neto, Diretor(a)-Presidente**, em 23/12/2024, às 17:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



Documento assinado eletronicamente por **FRANCISCO VALDIR SILVEIRA, Diretor(a) de Hidrologia e Gestão Territorial, Substituto(a)**, em 23/12/2024, às 20:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site sei.sgb.gov.br/autenticidade, informando o código verificador **2388132** e o código CRC **BD6DB597**.