

## DESENVOLVIMENTO DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO: UMA REVISÃO DO CENÁRIO GLOBAL

GABRIEL BORGES DOS SANTOS<sup>1</sup>; OTTONI MARQUES MOURA DE LEON<sup>2</sup>;  
HENRIQUE SANCHEZ FRANZ<sup>3</sup>; DANIELLE BRESSIANI<sup>4</sup>; LUÍS CARLOS TIMM<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – [gabrielqwsantos@gmail.com](mailto:gabrielqwsantos@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – [ottonibaixo@gmail.com](mailto:ottonibaixo@gmail.com)

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas – [franzhenrique@yahoo.com.br](mailto:franzhenrique@yahoo.com.br)

<sup>4</sup>Universidade Federal de Pelotas – [daniebressiani@gmail.com](mailto:daniebressiani@gmail.com)

<sup>5</sup>Universidade Federal de Pelotas – [lcartimm@yahoo.com.br](mailto:lcartimm@yahoo.com.br)

### 1. INTRODUÇÃO

A descrição e previsão precisas dos processos e propriedades do solo são essenciais para compreender o sistema terrestre, bem como os impactos das mudanças climáticas no uso e na conservação do solo e da água. A condutividade hidráulica do solo saturado (Ks) é um dos parâmetros mais cruciais, pois influencia na movimentação da água no solo, na qualidade do solo, no transporte de poluentes, produtos químicos e nutrientes do solo, na absorção de água pelas plantas e no crescimento das culturas, entre outros fatores (INDORIA et al., 2020).

A forma mais precisa de se obter a Ks é por meio de medições diretas em campo ou em laboratório. Embora tenha havido avanços significativos nas técnicas de medição e nos equipamentos de laboratório, as medições diretas ainda são demoradas e desafiadoras (NAGANNA et al., 2017; VERECKEN et al., 2010). Nesse contexto, as funções de pedotransferência (FPTs) surgem como equações empíricas que estimam a Ks e outras propriedades usando medições mais facilmente disponíveis em bancos de dados de solo (BOUMA, 1989).

Revisões sobre a estimativa de propriedades hidráulicas do solo por meio de FPTs vêm sendo abordadas em vários estudos ao longo dos anos (WÖSTEN et al., 2001; PATIL e SINGH, 2016; VAN LOOY et al., 2017; ZHANG e SCHAAP, 2019; SILVA et al., 2023). No entanto, ainda há a necessidade de desenvolver uma revisão abrangente sobre o desenvolvimento global de FPTs para estimar a Ks. Portanto, o objetivo deste estudo foi compilar e analisar um banco de dados de artigos filtrados por meio de buscas no Scopus e na Web of Science (WoS) e com isso fornecer uma visão geral dos estudos mundiais relatados na literatura que desenvolveram FPTs para estimativa de Ks e quais métodos foram empregados para o desenvolvimento delas.

### 2. METODOLOGIA

Os artigos usados para a fundamentação teórica desta revisão foram localizados inserindo os termos: 'soil saturated hydraulic conductivity' ou 'saturated hydraulic conductivity' ou 'ks' ou 'k-sat' ou 'ksat' e 'pedotransfer functions' ou 'pedotransfer function' ou 'PTF' ou 'FPTs' em dois dos principais bancos de dados de artigos científicos, Scopus e Web of Science, abrangendo título, resumo e palavras-chave. O período de busca adotado correspondeu ao limite permitido em cada banco de dados, de 1960 a 2022 na Scopus e de 1945 a 2022 na WoS.

Inicialmente, 597 artigos foram filtrados. Posteriormente, buscas preliminares foram realizadas para identificar e eliminar artigos duplicados entre os bancos de dados, bem como para excluir artigos que não se encaixavam no escopo deste

estudo, resultando em um total de 335 artigos. Após a filtragem, os artigos selecionados foram explorados utilizando a ferramenta 'Bibliometrics' no RStudio® versão 4.2.1 (ARIA e CUCCURULLO, 2017), para analisar sistematicamente o estado da arte sobre o desenvolvimento de FPTs para a estimativa de Ks em escala global. Cada um dos 335 artigos foram examinados para verificar se nestes havia sido desenvolvida uma ou mais novas FPTs. Foi constatado que 100 artigos desenvolveram pelo menos uma nova FPT. Posteriormente, uma planilha foi organizada, detalhando os seguintes dados sobre os artigos e desenvolvimento: (a) País: O país de onde foram coletados os dados para desenvolver a(s) FPT(s). Vale destacar que, quando um banco de dados de mais de um país foi utilizado, o artigo foi considerado internacional; (b) Método: Especifica os métodos usados para desenvolver as FPTs.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o auxílio da ferramenta “Bibliometrix” foi possível observar a produção científica anual relativa aos 335 artigos selecionados. Como se observa na Figura 1, por meio da linha de tendência exponencial, existe um aumento na publicação de artigos que trabalham com a Ks nos últimos anos. Esse significativo crescimento nos últimos anos pode estar relacionado com a globalização, dinamismo e os avanços tecnológicos que permeiam todo o mundo (Araújo et al., 2023). Da mesma forma, as iniciativas de dados governamentais abertos também merecem destaque. Conforme observado por Saxena (2017), houve um aumento recente nos esforços de divulgação de dados em outras partes do mundo, contribuindo para um crescente corpo de investigação.

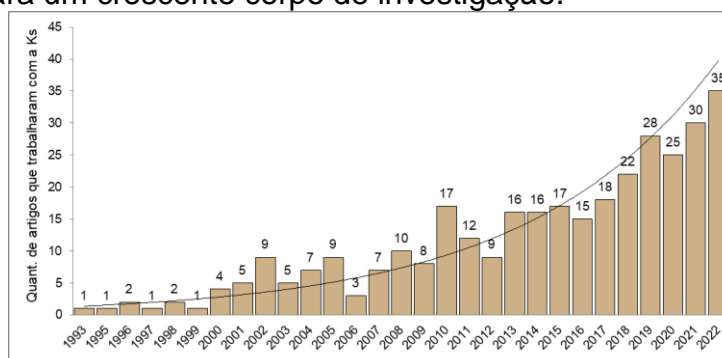


Figura 1: Produção científica anual de artigos que trabalharam com a Ks.

Fonte: Autores.

A Figura 2 apresenta a distribuição mundial de artigos que desenvolveram FPTs (Figura 2a), o número de artigos por continente (Figura 2b) e o ranking dos 10 principais países (Figura 2c) que mais contribuíram para o desenvolvimento de FPTs.

Na Figura 2a e 2b pode-se observar também um baixo desenvolvimento de FPTs nos continentes da África, América do Sul, Oceania e América Central, que são compostos majoritariamente por países em desenvolvimento e subdesenvolvidos. Isto pode estar atrelado ao fato de que os países desenvolvidos possuem alto nível de investimento em pesquisas científicas (Keesstra et al., 2016). Já conforme Figura 2b, há uma grande produção de artigos que desenvolveram novas FPTs no continente asiático. Na China existem muitos estudos desenvolvendo FPTs para estimar a Ks em uma área conhecida como o Planalto de Loess (Loess Plateau), uma região considerada ecologicamente vulnerável devido aos impactos cada vez maiores das mudanças climáticas e atividades humanas (Bai et al., 2022). A Índia (que também possui

diversas publicações) por sua vez possui grande influência das precipitações de monções (Chakraborty et al., 2020). Já o possível motivo do Irã possuir diversos trabalhos que desenvolveram uma nova FPT para estimar a Ks pode estar atrelado ao fato de que o país está localizado no cinturão seco do mundo, onde a água é um parâmetro crítico para a sobrevivência (Honarbakhsh et al., 2022).

Na Figura 3 podemos observar que dos dez métodos mais utilizados para desenvolver as FPTs, sete são métodos de aprendizado de máquina (ANN, SVM, RF, ANFIS, KNN, ELM e SVR), indicando um grande aumento do uso desse tipo de técnica para desenvolver novas FPTs que estimem a Ks. Conforme PADARIAN et al. (2020) métodos avançados de aprendizado de máquina geralmente têm melhor desempenho do que abordagens mais simples, como técnicas de regressões, por exemplo, graças à sua capacidade de capturar relações não lineares.

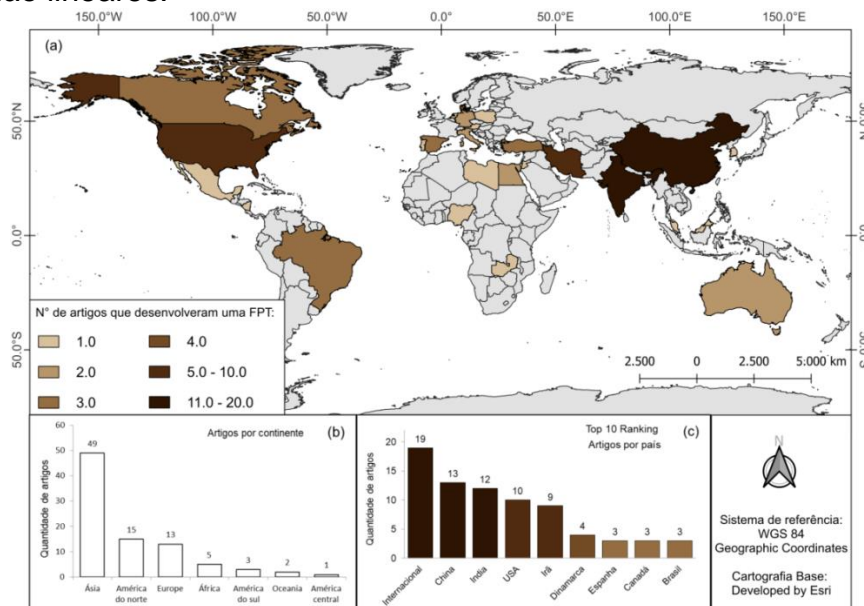


Figura 2: Desenvolvimento de FPTs.  
Fonte: Autores.



Figura 3: Top 10 dos métodos mais usados no desenvolvimento de FPT.  
Fonte: Autores.

#### 4. CONCLUSÕES

Nesta revisão, fornecemos uma visão geral do desenvolvimento das FPTs para estimar a Ks. Os resultados da pesquisa revelaram que a produção científica anual mostrou um aumento exponencial na publicação de artigos que tratam da Ks nos últimos anos. Foi possível observar os países que mais publicam na temática, com predomínio de países com vulnerabilidades ambientais e países desenvolvidos. Além disso, destacamos a utilização de aprendizado de máquina na construção dos modelos (FPTs) para estimas a Ks.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAUJO, R. C. C.; FARINA, R. M.; FLORIAN, F. The role of information technology in business management. **RECIMA21**, v.4, n.6, 2023.
- ARIA, M, CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v.11, n.4, p.959-975, 2017.
- BAI, X.; SHAO, M.; JIA, X.; ZHAO, C. Prediction of the van Genuchten model soil hydraulic parameters for the 5-m soil profile in China's Loess Plateau. **Catena**, v.210, p.1-11, 2022.
- BOUMA, J. **Using Soil Survey Data for Quantitative Land Evaluation**. New York: Springer, 1989.
- CHAKRABORTTY, R.; PAL, S. C.; SAHANA, M.; MONDAL, A.; DOU, J.; PHAM, B. T.; YUNUS, A. P. Soil erosion potential hotspot zone identification using machine learning and statistical approaches in eastern India. **Nat Hazards**, v.104, p.1259–1294, 2020.
- HONARBAKHSH, A.; TAHMOURES, M.; AFZALI, S. F.; KHAJEHZADEH, M.; ALI, M. S. Remote sensing and relief data to predict soil saturated hydraulic conductivity in a calcareous watershed, Iran. **Catena**, v.212, p.1-9, 2022.
- INDORIA, A. K.; SHARMA, K. L. REDDY, K. S. Hydraulic properties of soil under warming climate. **Climate change and soil interactions**, p.473–508, 2020.
- KEESSTRA, S. D.; BOUMA, J.; WALLINGA, J.; TITTONELL, P.; SMITH, P.; CERDÀ, A.; MONTANARELLA, L.; QUINTON, J. N.; PACHEPSKY, Y.; VAN DER PUTTEN, W. H.; BARDGETT, R. D.; MOOLENAAR, S.; MOL, G.; JANSEN, B.; FRESCO, L. O. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. **SOIL**, v.2, n.2, p.111–128. 2016.
- NAGANNA, S. R.; DEKA, P. C.; CH, S.; HANSEN, W. F. Factors influencing streambed hydraulic conductivity and their implications on stream–aquifer interaction: A conceptual review. **Environmental Science and Pollution Research**, v.24, n.32, p.24765–24789, 2017.
- PADARIAN, J.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Machine learning and soil sciences: a review aided by machine learning tools. **SOIL**, v.6, p.35–52, 2020.
- PATIL, N. G.; SINGH, S. K. Pedotransfer Functions for Estimating Soil Hydraulic Properties: A Review. **Pedosphere**, v.26, n.4, p.417–430, 2016.
- SAXENA, S. Open data in Israel, Georgia and Uzbekistan: Nature and scope. **Information and Learning Science**, v.118, n.7–8, p.406-419, 2017.
- SILVA, L. C. M.; AMORIM, R. S. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; BOCUTI, E. D.; SILVA, D. D. Pedotransfer functions and machine learning: Advancements and challenges in tropical soils. **Geoderma Regional**, v.35, p.1-20, 2023.
- VAN LOOY, K.; et. al. Pedotransfer Functions in Earth System Science: Challenges and Perspectives. **Reviews of Geophysics**, v.55, n.4, p.1199–1256, 2017.
- VERECKEN, H.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y.; SCHAAP, M. G.; VAN GENUCHTEN, M. T. Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten–Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. **Vadose Zone Journal**, v.9, n.4, 2010.
- WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, YA. A.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v.251, n.3-4, p.123-150, 2021.
- ZHANG, Y.; SCHAAP, M.G., 2019. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review. **Journal of Hydrology**, v.575, p.1011–1030.