

# WAVELETS E MODELOS DE ESPAÇO DE ESTADOS NA IDENTIFICAÇÃO DE CO-VARIÁVEIS PARA ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO EM ESCALA DE BACIA HIDROGRÁFICA

LUANA NUNES CENTENO<sup>1</sup>; RODRIGO VALANDRO MAZZARO<sup>2</sup>; NATHAN BELLUZZO DA SILVEIRA<sup>3</sup>; ARLAN DA SILVA FERREIRA<sup>4</sup>; WILLIAN SILVA BARROS<sup>5</sup>; LUÍS CARLOS TIMM<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup>Universidade Federal de Pelotas – [luananunescenteno@gmail.com](mailto:luananunescenteno@gmail.com)<sup>1</sup>; [rvmazzaro@gmail.com](mailto:rvmazzaro@gmail.com)<sup>2</sup>; [nathanbelluzzo@hotmail.com](mailto:nathanbelluzzo@hotmail.com)<sup>3</sup>; [arlansil@yahoo.com.br](mailto:arlansil@yahoo.com.br)<sup>4</sup>; [wsbarros@hotmail.com](mailto:wsbarros@hotmail.com)<sup>5</sup>; [lctimm@ufpel.edu.br](mailto:lctimm@ufpel.edu.br)<sup>6</sup>

## 1. INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) é um dos principais atributos físico-hídricos do solo, já que expressa a dificuldade ou a facilidade com que a água se movimenta em um perfil de solo. Desta forma, é um parâmetro chave no controle de processos hidrológicos (BESKOW et al., 2016) e na avaliação dos impactos relacionados as práticas de uso e manejo do solo e na dinâmica da água e de solutos no solo (REICHARDT; TIMM, 2020). Também é um atributo importante em estudos de infiltração e redistribuição de água, em um perfil de um solo e em projetos de irrigação e drenagem (CHEROBIM et al., 2018). Em suma, a  $K_{sat}$  apresenta alta variabilidade espacial e temporal (SHE et al., 2017), exibindo tendência de não-normalidade e de não-estacionariedade, que devem ser tratadas com ferramentas estatísticas que levem em consideração essas características. Dentre essas ferramentas, tem-se as transformadas de *Wavelets* (uma variável), *Wavelet Coherence* (duas variáveis) e a *Multiple Wavelet Coherence* (mais de duas variáveis) as quais permitem separar a variância total de um conjunto de dados em diferentes variâncias que são plotadas em função da posição (ou localização) e da frequência (ou escala) no domínio em estudo (seja espacial ou temporal) (BISWAS, 2018), podendo ser empregada em séries que possuem comportamento estacionário e não-estacionário neste domínio. A maioria dos estudos recentemente publicados tem usado *Wavelets* em escalas de parcelas experimentais (SHE et al., 2017), sendo escassos trabalhos em escala de bacia hidrográfica.

Vários estudos tem focado na estimativa da  $K_{sat}$  a partir de atributos físicos do solo de fácil determinação, de dados topográficos (PICCIAFUOCCA et al., 2019) e de uso do solo (LI; SHAO; ZHAO, 2019) usando modelos de regressão múltipla. Entretanto, tais modelos ignoram as coordenadas espaciais das variáveis em estudo. Diante disso, a modelagem em espaço de estados torna-se uma alternativa no sentido de contornar essa limitação dos modelos globais. Ela permite estudar o relacionamento entre as variáveis levando em consideração a posição das suas observações e o seu carácter local do comportamento.

Frente ao exposto, este estudo teve como objetivo estimar a  $K_{sat}$  em função de variáveis físicas e químicas do solo, atributos topográficos e de uso do solo em uma transeção espacial de 15 km estabelecida na bacia hidrográfica do Arroio Fragata por meio de *Wavelets* e modelos de espaço de estados.

## 2. METODOLOGIA

O estudo foi conduzido na bacia hidrográfica do Arroio Fragata a montante da seção de controle Ponte Passo dos Carros (Bhaf-PC) foi estabelecida uma transeção espacial de 15 km onde foram demarcados 100 pontos amostrais, equidistantes entre si de 150 m. Em cada ponto amostral, na camada de 0-0,20 m, foram determinadas as seguintes propriedades físico-hídricas do solo: Argila

(GEE; BAUDER, 1986), Carbono Orgânico (TEDESCO et al., 1995), Densidade do solo ( $D_s$ ), Macroporosidade (Macro) (EMBRAPA, 1997) e Condutividade Hidráulica do Solo Saturado -  $K_{sat}$  (LIBARDI, 2005). A partir do modelo digital de elevação hidrológicamente consistente, foi obtido o atributo topográfico Elevação (Elev), em cada ponto, também foi identificado o tipo de uso do solo, o qual foi categorizado a partir dos valores médios de  $K_{sat}$ , em função da sua magnitude.

Neste estudo, adotou-se a *Wavelet* de Morlet e aplicou-se a *Wavelet Coherence* (duas variáveis) and *Multiple Wavelet Coherence* (mais de duas variáveis). Por conseguinte a *Multiple Wavelet Coherence*, de acordo com HU e SI (2016), está baseada em uma série de espectros de potência de onda automática e cruzada, em diferentes escalas e locais espaciais (ou temporais) com a variável resposta e com todas as variáveis preditivas.

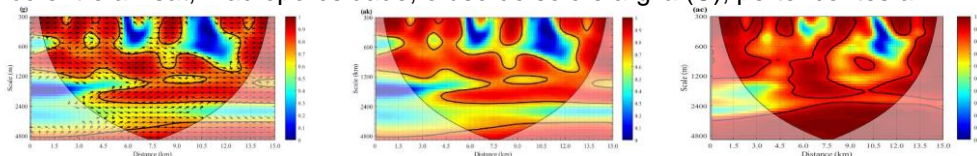
Destaca-se que todos os cenários possíveis, com todas as dimensões, foram modelados por meio de *wavelets*, contudo foram apresentados apenas os que contiveram a maior área de coerência significativa dentro de cada dimensão. Posteriormente, as variáveis contidas nos cenários selecionado, de cada dimensão, foram escalonadas e incorporadas como dados de entrada nos modelos de espaço de estados.

O código em MATLAB de GRINSTED et al. (2004), foi usado para a elaboração dos espectros das *Wavelets Coherence*, enquanto que a rotina para elaborar as *Multiple Wavelets Coherence* está disponível no suplemento de HU e SI (2016). Os modelos de espaço de estados foram obtidos por meio do *software* Matlab versão R2018a.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As áreas significativas dos espectros das *Wavelets* utilizados para selecionar as variáveis preditoras de maior e menor influência de  $K_{sat}$  estão descritos na Tabela 1. A maior área significativa dentre os modelos gerados foi de 56,2%, quando incorporando a macroporosidade argila e o uso do solo, contudo esta área significativa foi bem semelhante quando se utilizou da macroporosidade e uso do solo (53,86%) e apenas macroporosidade (53%). Estimando o Log  $K_{sat}$  apenas a partir da macroporosidade observa-se que esta abrange todas as posições, porém, não possui espectro significativo na escala de 2400 a 4000m (Figura 1A), sendo que ao incorporar à macroporosidade o uso do solo (Figura 1B), pouca alteração se encontra nas áreas significativas.

**Figura 1** - Espectro da Wavelets Coherence entre a  $K_{sat}$  e da macroporosidade (A), *Multiple Wavelet Coherence* entre a  $K_{sat}$ , macroporosidade e o uso do solo (B), *Multiple Wavelet Coherence* entre a  $K_{sat}$ , macroporosidade, o uso do solo e argila (C), pertencentes a BHAf.



Porém, esta variabilidade significativa torna-se mais intensa ao incorporar a argila (Figura 1C), bem como ocorre uma maior predominância tanto em escala como em posição da área total significativa. Mostrando então que esta equação é capaz de melhor descrever o Log  $K_{sat}$  em todas as escalas e posições.

Por conseguinte, a menor área significativa de 11,20%, foi encontrada quando empregando apenas a elevação, na estimativa do Log  $K_{sat}$ .

As Equações do Log  $K_{sat}$  geradas pelos modelos de espaço de estados (expressas como  $\text{Log}_{10}$ ), e valores de seus coeficientes de determinação ( $r^2$ ) (Tabela 1), calculados através de regressões lineares entre os valores medidos e

estimados de Ksat, mostram que a variabilidade do Log Ksat explicado por meio apenas da macroporosidade foi de 80% já ao utilizar-se do Log Elev este percentual de variância explicada diminui para 47%.

**Tabela 1** - Equações de espaço de estado do log<sub>10</sub> da Ksat usando as melhores e as piores combinações definidas com base nas áreas significativas das *wavelets*.

Equação	Área Significativa	r <sup>2</sup>
(Log Ksat) <sub>i</sub> = 2,464(Log Ksat) <sub>i-1</sub> - 1,511(Macro) <sub>i-1</sub> + w <sub>i</sub>	53,30	0,80
(Log Ksat) <sub>i</sub> = 1,006(Log Ksat) <sub>i-1</sub> - 3,199(Log Elev) <sub>i-1</sub> + w <sub>i</sub>	11,20	0,45
(Log Ksat) <sub>i</sub> = 1,763(Log Ksat) <sub>i-1</sub> - 1,241(Macro) <sub>i-1</sub> - 0,487(Log Uso) <sub>i-1</sub>	53,86	0,85
(Log Ksat) <sub>i</sub> = 0,975(Log Ksat) <sub>i-1</sub> + 0,037(Ds) <sub>i-1</sub> - 0,004(Log Uso) <sub>i-1</sub> + w <sub>i</sub>	13,26	0,47
(Log Ksat) <sub>i</sub> = -0,261(Log Ksat) <sub>i-1</sub> + 0,836(Argila) <sub>i-1</sub> + 0,644(Macro) <sub>i-1</sub> - 0,207(Log Uso) <sub>i-1</sub> + w <sub>i</sub>	56,20	0,99
(Log Ksat) <sub>i</sub> = 0,179(Log Ksat) <sub>i-1</sub> + 0,428(Log Elev) <sub>i-1</sub> + 0,155(Ds) <sub>i-1</sub> + 0,236(Log Uso) <sub>i-1</sub> + w <sub>i</sub>	25,72	0,30
(Log Ksat) <sub>i</sub> = 0,118(Log Ksat) <sub>i-1</sub> + 0,419(Log Elev) <sub>i-1</sub> + 0,066(Macro) <sub>i-1</sub> + 0,070(Ds) <sub>i-1</sub> + 0,331(Log Uso) <sub>i-1</sub> + w <sub>i</sub>	49,64	0,99
(Log Ksat) <sub>i</sub> = 0,089(Log Ksat) <sub>i-1</sub> + 0,368(Log Elev) <sub>i-1</sub> + 0,196(Argila) <sub>i-1</sub> + 0,119(Ds) <sub>i-1</sub> + 0,230(Log Uso) <sub>i-1</sub> + w <sub>i</sub>	16,60	0,33
(Log Ksat) <sub>i</sub> = -0,323(Log Ksat) <sub>i-1</sub> - 0,275(CO) <sub>i-1</sub> + 0,987(Argila) <sub>i-1</sub> + 0,743(Macro) <sub>i-1</sub> + 0,108(Ds) <sub>i-1</sub> - 0,225(Log Uso) <sub>i-1</sub> + w <sub>i</sub>	43,20	0,99
(Log Ksat) <sub>i</sub> = 0,425(Log Ksat) <sub>i-1</sub> + 0,395(Log Elev) <sub>i-1</sub> + 0,649(CO) <sub>i-1</sub> - 0,618(Argila) <sub>i-1</sub> + 0,204(Ds) <sub>i-1</sub> - 0,049(Log Uso) <sub>i-1</sub> + w <sub>i</sub>	27,00	0,67
(Log Ksat) <sub>i</sub> = -0,123(Log Ksat) <sub>i-1</sub> + 0,311(Log Elev) <sub>i-1</sub> + 0,277(CO) <sub>i-1</sub> + 0,054(Argila) <sub>i-1</sub> + 0,427(Macro) <sub>i-1</sub> + 0,184(Ds) <sub>i-1</sub> - 0,120(Log Uso) <sub>i-1</sub> + w <sub>i</sub>	43,90	0,99

Ksat: Condutividade hidráulica de solo saturado; Elev: Elevação; CO: Carbono Orgânico; Argila: Argila; Macro: Macroporosidade; Ds: Densidade do Solo e Uso: Tipos de Uso do solo.

Este percentual aumenta para 85%, na *Multiple Wavelet Coherence* quando se utiliza da macroporosidade e do uso do solo para explicar o Log Ksat. Destaca-se que ao utilizar-se da *Multiple Wavelet Coherence*, para definir cenários com dimensões de 4 a 7 variáveis, a variância explicada é de 99%, sendo que todas as equações de melhor desempenho, e por conseguinte, com maior área significativa apresentam a macroporosidade em sua composição.

As propriedades básicas do solo, como frações texturais, têm sido amplamente utilizadas para prever Ksat, contudo a incorporação das propriedades topográficas é algo mais recente (SHE et al., 2017), porém, estas não apresentaram um bom desempenho para a estimação da Ksat neste estudo.

Já o uso do solo apresentou resultados satisfatórios neste estudo, LIZAGA et al. (2019), relatam que as atividades humanas e o manejo da terra podem ter um efeito adicional na reformulação das propriedades do solo no espaço e, portanto, na distribuição espacial delas dentro de uma bacia hidrográfica.

#### 4. CONCLUSÕES

Com base nas *Wavelet Coherence* e *Multiple Wavelet Coherence* foi possível identificar as variáveis, bem como o conjunto de variáveis, que melhor explicam o Log Ksat, tendo como base a abrangência em escalas e posições da sua área de significância da transeção espacial de 15km estabelecida na bacia hidrográfica do Arroio Fragata.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos

Hídricos, pelo aporte físico e financeiro aos bolsistas envolvidos no presente trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BESKOW, SAMUEL et al. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, [s.l.], v. 61, n. 14, p.2567-2578, 15 jul. 2016.
- BISWAS, ASIM. Scale–location specific soil spatial variability: A comparison of continuous wavelet transform and Hilbert–Huang transform. **Catena**, [s.l.], v. 160, p.24-31, jan. 2018.
- CHEROBIM, VEREDIANA FERNANDA et al. Soil surface sealing by liquid dairy manure affects saturated hydraulic conductivity of Brazilian Oxisols. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 203, p.193-196, abr. 2018. Elsevier BV.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212 p.
- Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 1, 2nd ed Agronomy Monograph Vol. 9. ASA-SSSA, Madison, WI, pp. 383–411.
- GRINSTED, A.; MOORE, J. C.; JEVREJEVA, S. **Application of the cross wavelet transform and waveletcoherence to geophysical time series**. *Nonlinear Processes in Geophysics*, European Geosciences Union (EGU), 2004. N. 11 .561-566.p
- HU W, SI BC, BISWAS A, CHAU HW. Temporally stable patterns but seasonal dependent controls of soil water content: Evidence from wavelet analyses. **Hydrolog Proc**. 2017. 31 v. 3697-3707p.
- LI, Xiangdong; SHAO, Ming'an; ZHAO, Chunlei. Estimating the field capacity and permanent wilting point at the regional scale for the Hexi Corridor in China using a state-space modeling approach. **Journal of Soils and Sediments**, [s.l.], p.1-12, 9 abr. 2019.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2ª edição. São Paulo, EDUSP, 2012. 346 p.
- LIZAGA, Ivan et al. Linking land use changes to variation in soil properties in a Mediterranean mountain agroecosystem. **Catena**, [s.l.], v. 172, p.516-527, jan. 2019. Elsevier BV.
- REICHARDT, Klaus; TIMM, Luís Carlos. **Soil, Plant and Atmosphere: Concepts, Processes and Applications**. [s.l.]: Springer International Publishing, 2020. 456 p.
- PICCIAFUOCO, Tommaso et al. On the estimation of spatially representative plot scale saturated hydraulic conductivity in an agricultural setting. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 570, p.106-117, mar. 2019.
- SHE, D. et al. Multi-scale correlations between soil hydraulic properties and associated factors along a Brazilian watershed transect. **Geoderma**, [s.l.], v. 286, p.15-24, jan. 2017. Elsevier BV.
- SHUMWAY, R.H. **Applied statistical time series analyses**. Prentice Hall, Englewood Cliffs. 1988.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2ª edição. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia/UFRGS, 1995. 174p.