

## WAVELETS NO ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO EM ESCALA DE BACIA HIDROGRÁFICA

LUANA NUNES CENTENO<sup>1</sup>; ARLAN DA SILVA FERREIRA<sup>2</sup>; WILLIAN SILVA  
BARROS<sup>3</sup>; LUCIANA MONTEBELLO DE OLIVEIRA<sup>4</sup>; SAMUEL BESKOW<sup>5</sup>; LUÍS  
CARLOS TIMM<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – luananunescenteno@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas – arlansil@yahoo.com.br

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pelotas – wsbarros@hotmail.com

<sup>4</sup>Universidade Federal de Pelotas - lumontebello@hotmail.com

<sup>5</sup> Universidade Federal de Pelotas – samuelbeskow@gmail.com

<sup>6</sup>Universidade Federal de Pelotas - lctimm@ufpel.edu.br

### 1. INTRODUÇÃO

*Wavelets* são funções matemáticas que separam um conjunto de dados em diferentes componentes de frequência (escala), permitindo estudar cada componente com uma resolução adequada a sua escala (translação) (GRAPES, 1995). Elas apresentam vantagens em relação aos métodos tradicionais de Fourier quando a série de dados em análise contém descontinuidades e picos. A transformada em *Wavelets* tem sido aplicada em diversas áreas do conhecimento: em Geociências para análise de imagens (ZHANG; CHEN; QIU, 2017), em Engenharia Elétrica com o intuito de identificar falhas em equipamentos (GRICHE, 2017), em Medicina para analisar batimentos cardíacos em seres humanos (ADAM et al., 2018), dentre outras.

SI e ZELEKE (2005) definem a transformada de *Wavelets* como um conjunto de funções que apresentam a forma de ondas “diminutas” (as chamadas *Wavelet* sem inglês ou Ondaletas em português), geradas por dilatação e translação de uma função base geradora simples. Como exemplo de função geradora pode ser citada a *Wavelet* de Morlet, *Wavelet* de Haar, a família de *Wavelets* de Daubechies, etc (GRAPES, 1995). Segundo BISWAS (2018), a transformada em *Wavelets* permite segregar 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 (espacial ou temporal), ou seja, permite calcular o espectro da variável para cada posição ao longo do espaço. Desta forma, ela permite identificar e caracterizar o comportamento da variável de interesse em diferentes escalas e posições ao longo do domínio de interesse (GUO et al., 2018), podendo ser empregada em séries que possuem comportamento estacionário e não-estacionário neste domínio (BISWAS; SI, 2011).

Neste contexto, as *Wavelets* vem sendo aplicadas no estudo da variabilidade espacial de atributos do solo em escalas menores a nível de áreas experimentais (BISWAS; SI, 2011; SI; ZELEKE, 2005; ZAHO et al., 2018, dentre outros). Entretanto, são raras as aplicações de *Wavelets* no estudo da variabilidade espacial de atributos do solo em escala de bacia hidrográfica.

Dentre os atributos do solo que apresentam maior variabilidade espacial, a condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) merece destaque. A Ksat 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, tem sido usada na simulação hidrológica de dados de vazão (BESKOW et al., 2016) e em estudos de dinâmica da água e de solutos no sistema Solo-Planta-Atmosfera (REICHARDT; TIMM, 2016). Também é 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).

Na maioria das vezes, a Ksat apresenta alta variabilidade espacial e temporal (NOBORIO et al., 2017), complexidade em se obter medições contínuas (GHANBARIAN et al., 2015), além da dificuldade de se obter informações precisas (CHEROBIM et al., 2018). Também apresentam uma tendência de não-normalidade e de não-estacionariedade, que devem ser tratadas com ferramentas estatísticas que levem em consideração essas características, como por exemplo, *Wavelets*.

Frente ao exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho da transformada de *Wavelets* no estudo da variabilidade espacial de dados de condutividade hidráulica do solo saturado determinados ao longo de uma transeção espacial de 15 km estabelecida na Bacia do Arroio Fragata-Pelotas (Rio Grande do Sul), a partir da seção de controle ponte Passo dos Carros.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Caracterização da Área

O estudo foi conduzido na bacia hidrográfica do Arroio Fragata em virtude da importância econômica e social para a região sul do Rio Grande do Sul. 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 ao longo da transeção, equidistantes entre si de 150 m.

### 2.2. Levantamento de dados

Em cada ponto amostral, na camada de 0-0,20 m, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada usando anéis volumétricos (0,05 m de altura x 0,047 m de diâmetro) para determinar a condutividade hidráulica do solo saturado pelo método do permeâmetro de carga constante (LIBARDI, 2012). As amostras em cada ponto foram coletadas em triplicata, totalizando 300 amostras ao longo da transeção.

### 2.3. *Wavelets*: aspectos teóricos

A ferramenta básica na análise em *Wavelets* é a transformada de *Wavelet*, função base geradora simples chamada de *Wavelet mother*, que pode ser classificada em contínua ou discreta (SI, 2008). Dentre as funções geradoras contínuas, a *Wavelet* de *Morlet* (Equação 1) é uma função complexa que tem sido bastante usada no estudo da variabilidade espacial de atributos do solo (SI, 2008) já que permite boa frequência de resolução e boa resolução no espaço ou no tempo (SI, 2008).

$$\psi(\eta) = \pi^{-1/4} e^{j\omega\eta - 0.5\eta^2}$$

Equação (1)

onde  $\omega$  é a frequência adimensional e  $\eta$  é o espaço adimensional. A *Wavelet* Morlet (com  $\omega = 6$ ) é uma boa escolha, pois proporciona um bom equilíbrio entre a localização da função *Wavelet* no espaço e na frequência (SI; SELEKE, 2005). A *wavelet* é “esticada” no espaço ( $x$ ) variando sua(s) escala(s) “ $s$ ”, de modo que  $\eta = s/x$ .

Para uma determinada *Wavelet*  $\Psi(s/x)$ , a transformada de *Wavelet* contínua de uma série espacial de comprimento  $N$  ( $Y_i, i = 1 \dots N$ ) com distância incremental

igual  $\delta x$ , é definida como a convolução de  $Y_i$  com a *Wavelet* escalonada e normalizada (Equação 2).

$$W_i^Y(s) = \sqrt{\frac{\delta x}{s}} \sum_{j=1}^N Y_j \psi \left[ (j-i) \frac{\delta x}{s} \right] \quad \text{Equação (2)}$$

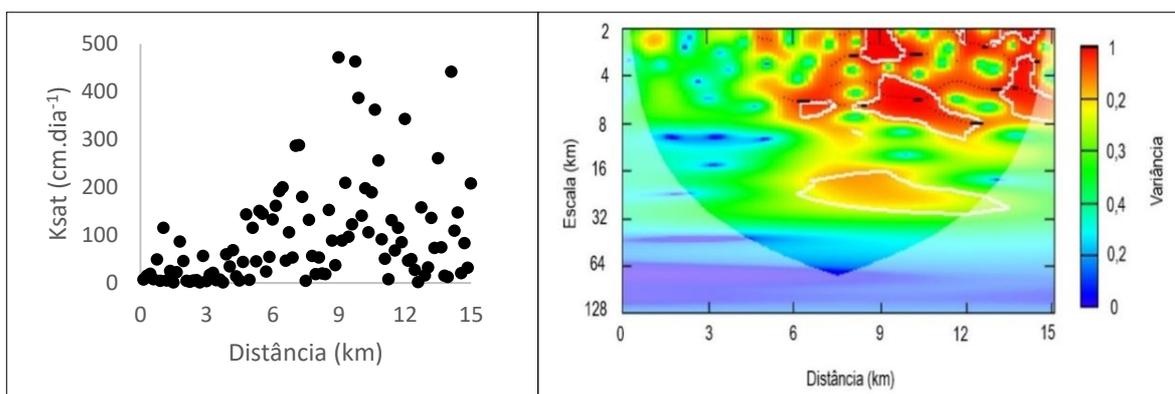
A Equação 2 é geralmente implementada através da transformada rápida de Fourier. Os coeficientes da *Wavelet*  $W_i^Y(s)$  são geralmente complexos e podem ser expresso como  $a + ib$ , onde  $a$  e  $b$  são os componentes reais de  $W_i^Y(s)$ , respectivamente. Para a forma polar de números complexos  $W_i^Y(s) = |W_i^Y(s)|(\cos \theta + i \sin \theta)$ , onde  $\theta = \arctan(b/a)$  e é chamado de fase ou argumento de  $W_i^Y(s)$ . Como o espectro de potência de Fourier, o espectro de potência de *Wavelet* é definido como  $|W_i^Y(s)|^2$  e a fase local é definida como o argumento complexo de  $W_i^Y(s)$ .

Todas as análises e procedimentos estatísticos foram realizados no *software* R versão 3.4.3, pacote *WaveletComp*, versão 1.1 (ROESCH; SCHMIDBAUER, 2018).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de condutividade hidráulica do solo saturado apresentam uma dispersão acentuada ao longo da transeção, principalmente a partir de 4,5 km em relação a origem da transeção (Figura 1).

Observa-se dois padrões de variabilidade espacial dos dados de  $K_{sat}$  ao longo da transeção, onde os valores de  $K_{sat}$  foram menores em pontos próximos a origem, aumentando a medida que se distanciam da origem da transeção, ou seja, existe uma tendência de aumento dos valores de  $K_{sat}$  a medida que a altitude dos pontos aumenta. Este comportamento observado na Figura 1 se reflete no espectro local da *Wavelet* de  $K_{sat}$  (Figura 2), onde nota-se que os dados de  $K_{sat}$  apresentam uma variância significativa do meio para o final da transeção espacial.



**Figura 1:** Diagrama de dispersão dos dados de  $K_{sat}$  ao longo da transeção espacial de 15 km. Eixo horizontal representa a distância (km) entre um ponto e a origem da transeção.

**Figura 2:** Espectro local da *Wavelet* de dados  $K_{sat}$ . Eixo horizontal representa a distância (km) entre um ponto e a origem da transeção

Segundo SI e ZELEKE (2005), a transformada de *Wavelet* em um ponto sempre contém informações de dados referentes a pontos vizinhos, sendo assim, se ela for centralizada perto da origem ou no final da transeção espacial, ocorrem efeitos de borda. A área do espectro onde tais efeitos são relevantes é chamada de cone de influência, ao nível de confiança de 90% adotado neste estudo (Figura 2). Os valores dos coeficientes da *Wavelet* que se situam fora do cone de influência são afetados pela borda. Neste estudo, o espectro local da *Wavelet* apresenta cinco

escalas de variações: que vão desde o azul forte ao vermelho, sendo que quanto mais próximo do tom avermelhado mais altas são as variações.

Em locais que vão da origem da transeção a distância de 2 km e de 5 a 6 km encontram-se variações que correspondem as variações aleatórias de pequena escala (escala de 2 a 3 km). Analisando a Figura 2, observa-se que existem duas escalas de variabilidade para os dados de Ksat: (1) acentuada variabilidade dos dados na escala de 2 a 8 km nas posições em torno de 6 a 7 km, de 8 a 9 km e de 11 a 15 km a partir da origem da transeção; e (2) moderada variabilidade, porém significativa, de Ksat na escala de 15 a 32 km na posição de 6 km até aproximadamente 12 km em relação a origem da transeção (Figura 2).

#### 4. CONCLUSÕES

O comportamento do espectro local da *Wavelet* permitiu identificar duas escalas de variabilidade dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado em função da posição ao longo da transeção espacial.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, MUHAMMAD et al. Automated characterization of cardiovascular diseases using relative wavelet nonlinear features extracted from ECG signals. **Computer Methods And Programs In Biomedicine**, [s.l.], v. 161, p.133-143, jul. 2018.
- 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.
- BISWAS, ASIM; SI, BING CHENG. Application of Continuous Wavelet Transform in Examining Soil Spatial Variation: A Review. **Mathematical Geosciences**, [s.l.], v. 43, n. 3, p.379-396, jan. 2011.
- 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.
- GHANBARIAN, BEHZAD et al. Sample dimensions effect on prediction of soil water retention curve and saturated hydraulic conductivity. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 528, p.127-137, set. 2015.
- GRAPS, A. An Introduction to wavelets, **IEEE Computational Science and Engineering**, vol.2, p. 50-61, 1995.
- GRICHE, Rezki Mohamed;. Detection of muscle fatigue: relative study with different methods. Communications Faculty Of Science University Of Ankara, **Ankara University**. [s.l.], v. 59, n. 2, p.21-28, 2017.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2ª ed. São Paulo, EDUSP, 2012. 346 p.
- NOBORIO, KOSUKE et al. A new and simple method for measuring in situ field-saturated hydraulic conductivity using a falling-head single cylinder. **Paddy and Water Environment**, [s.l.], v. 16, n. 1, p.81-87, 9 out. 2017.
- REICHARDT, KLAUS, LUÍS CARLOS TIMM. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri, SP: Manole, 2016. 548 p.
- ROESCH, ANGI; SCHMIDBAUER, HARALD (2018). **WaveletComp**: Computational Wavelet Analysis. R package version 1.1. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=WaveletComp>>.
- SI, Bing Cheng. Spatial Scaling Analyses of Soil Physical Properties: A Review of Spectral and Wavelet Methods. **Vadose Zone Journal**, [s.l.], v. 7, n. 2, p.547-562, maio 2008.
- 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.
- SI, BING CHENG; ZELEKE, TAKELE B. Wavelet coherency analysis to relate saturated hydraulic properties to soil physical properties. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 41, n. 11, p.1-9, nov. 2005.
- ZHANG, Libao; CHEN, Jie; QIU, Bingchang. Region-of-Interest Coding Based on Saliency Detection and Directional Wavelet for Remote Sensing Images. **Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.23-27, jan. 2017.