WAVELETS: VARIAÇÕES MÚLTIPLAS DE ESCALAS E LOCALIZAÇÕES ENTRE A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADA E ATRIBUTOS BÁSICOS, TOPOGRÁFICOS E DE USO DO SOLO

LUANA NUNES CENTENO[1]; NATHAN BELLUZZO DA SILVEIRA [2]; RODRIGO VALANDRO MAZZARO[3]; ARLAN DA SILVA FERREIRA[4]; LEANDRO SANZI AQUINO[5]; LUÍS CARLOS TIMM[6]

[1,2,3,4,5,6]Universidade Federal de Pelotas – luananunescenteno@gmail.com[1]; nathanbelluzzo@hotmail.com[2]; rvmazzaro@gmail.com[3]; arlansil@yahoo.com.br[4]; leandrosaq@gmail.com[5]; lctimm@ufpel.edu.br[6]

1. INTRODUÇÃO

As propriedades hidráulicas do solo são essenciais para a compreensão adequada dos vários processos do ciclo hidrológico. As decisões de gestão dos recursos hídricos na escala da bacia hidrográfica são auxiliadas por modelos hidrológicos baseados nos parâmetros críticos, que as propriedades hidrológicas do solo podem fornecer (BESKOW et al. 2016; SHE et al. 2017).

A condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat), é uma propriedade hidrológica do solo importante para estudos de manejo do solo e da água, relacionados à agricultura (CHEROBIM et al. 2018) e meio ambiente (YAO et al. 2015), bem como para simular e quantificar o movimento da água e solutos no solo (HWANG et al. 2017). Entretanto, a Ksat 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 (REICHARDT; TIMM, 2020).

Dentre essas ferramentas, as transformadas de Wavelets (uma variável), *Wavelet Coherence* (duas variáveis) e a *Multiple Wavelet Coherence* (mais de duas variáveis) tem merecido destaque na literatura já que 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; BISWAS; SI, 2011; HUANG; WU, 2008), podendo ser empregada em séries que possuem comportamento estacionário e não estacionário neste domínio (CENTENO et al., 2020). 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.

Portanto, objetivo deste estudo foi avaliar as relações espaciais multi-escala entre a Ksat e propriedades básicas do solo, atributos topográficos e usos do solo ao longo de uma transeção de 15 km estabelecida na bacia do Arroio Fragata localizada na região de Pelotas-RS, usando Wavelets.

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 (CO, TEDESCO et al., 1995), Densidade do solo (Ds), Macroporsidade (Macro, EMBRAPA, 1997) e Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat, LIBARDI, 2005). A partir do modelo digital de elevação hidrologicamente 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 Ksat, em função da sua magnitude.

Neste estudo, adotou-se a *Wavelet* de Morlet e aplicou-se a *Wavelet Coherence* (duas variáveis) e *Multiple Wavelet Coherence* (mais de duas variáveis). De acordo com HU et al. (2016), a *Multiple Wavelet Coherence* 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. Todas as combinações possíveis entre a Ksat e as demais variáveis foram modeladas por meio de Wavelets, contudo foram selecionadas as que apresentaram a maior área de coerência significativa, em termos de percentual, dentro de cada combinação.

O código em MATLAB de GRINSTED, MOORE e JEVREJEVA (2004), foi usado para a elaboração dos espectros das *Wavelets Coherence*, enquanto que a rotina para elaborar as *Multiple Wavelet Coherence* está disponível no suplemento de HU e SI (2016).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As áreas significativas dos espectros das Wavelets, utilizados para selecionar as variáveis de maior e menor influência de Ksat, estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis contidas nos melhores e piores cenários, definidas com base nas áreas significativas das wavelets.

	Variável	Área Significativa	r^2
Ksat	Macro	53,30	0,80
Ksat	Elev	11,20	0,45
Ksat	Macro + Uso	53,86	0,85
Ksat	Ds + Uso	13,26	0,47
Ksat	Argila + Macro + Uso	56,20	0,99
Ksat	Elev + Ds + Uso	25,72	0,30
Ksat	Elev + Macro + Ds + Uso	49,64	0,99
Ksat	Elev + Argila + Ds + Uso	16,60	0,33
Ksat	CO + Argila+ Ds + Macro + Uso	43,20	0,99
Ksat	Elev + CO + Argila+ Ds + Uso	27,00	0,67
Ksat	Elev + CO + Argila + Macro + Ds + Uso	43,90	0,99

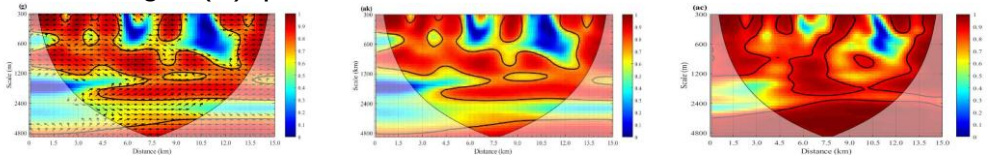
Ksat: Condutividade hidráulica de solo saturado; Elev: Elevação; CO: Carbono Orgânico; Argila: Argila; Macro: Macroporosidade; Ds: Densidade do Solo e Uso: Tipos de Uso do solo.

A maior área significativa dentre cenários gerados foi de 56,2%, quando incorporando a macroporosidade, argila e o uso do solo (Figura1A). Entretanto, a *Wavelet Coherence* média continuou a aumentar conforme o esperado, adicionando mais fatores, mas a área percentual de coerência de significância diminuiu (dados não mostrados).

Quando analisando a Tabela 1, observa-se que o cenário, contendo 3 variáveis, composto pela Ksat, macroporosidade e uso do solo, apresentou 53,86% (Figura 1B) de área significativa.

Figura 1 - Espectro da Wavelets Coherence entre a Ksat e da macroporosidade (A), *Multiple Wavelet Coherence* entre a Ksat, macroporosidade

e o uso do solo (B), *Multiple Wavelet Coherence* entre a Ksat, macroporosidade, o uso do solo e argila (C), pertencentes a BHAF.



Em contrapartida, analisando a Ksat e elevação (Figura não consta no documento), foi onde se encontrou a menor área significativa (11,20%), nas escalas> 2400 m. Os demais cenários apresentaram poucas variações entre si, como podemos observar na Tabela 1.

A macroporosidade do solo foi o melhor atributo individual, para explicar a variação espacial de Ksat, em múltiplos domínios espaciais (53,3%). Também é importante destacar que esta correlação é positiva, de acordo com o sentido das setas. ZHANG et al. (2019), corroboraram com este estudo encontraram em sua pesquisa que a macroporosidade do solo é um componente crucial, pois melhora o desempenho de funções de pedotransferências (FPTs) do solo, quando comparadas a FPTs que não levavam em consideração a macroporosidade.

Incluindo areia, macroporosidade e uso da terra, aumenta-se a explicação da Ksat (Tabela 1). Principalmente, quando analisando a Figura 1 C, na parte central do transecto, já ao utilizar-se da macroporosidade e do uso do solo a variação ao longo de todas as escalas e posições é menos intensa e abrange uma menor área central. Todavia ao comparar visualmente as Figuras 1A com 1B, tem-se a impressão de que a Figura 1B abrange uma maior área, isto pode estar relacionado ao fato de que a área total, não corresponde a uma variação significativa (ou seja, fora do cone de influência) de Ksat.

4. CONCLUSÕES

A análise de *Multiple Wavelet Coherence*, identificou diferentes padrões de relacionamento espacial, ao longo do transecto, mostrando a correlação de diferentes variáveis e a sua capacidade de abrangência de áreas significativas. O que corroborou para se concluir que, as variações da macroporosidade do solo em si, são suficientes para explicar as variações de Ksat, em escalas e localizações múltiplas de domínio espacial. Podendo, portanto ser usada como co-variável para avaliar o potencial de escoamento em diferentes sistemas de uso do solo na bacia hidrográfica do Arroio Fragata.

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 aos Programas de Pós-Graduação em Recursos Hidricos e em Manejo e Conservação do Solo e da Água, pelo aporte físico e financeiro, bem como aos bolsistas envolvidos no presente trabalho.

5. 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 transforms and Hilbert–Huang transform. **Catena**, [s.l.], v. 160, p.24-31, jan. 2018.

BISWAS, Asim; SI, Bing Cheng. Identifying scale specific controls of soil water storage in a hummocky landscape using wavelet coherency. **Geoderma**, [S. l.], v. 165, n. 1, p. 50–59, 2011.

CENTENO, Luana Nunes; et al. Dominant Control of Macroporosity on Saturated Soil Hydraulic Conductivity at Multiple Scales and Locations Revealed by Wavelet Analyses. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [S. l.], 2020.

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, et al. Temporally stable patterns but seasonal dependent controls of soil water content: Evidence from wavelet analyses. **Hydrol Proc**. 2017. 31 v. 3697-3707p.

HUANG, Norden E.; WU, Zhaohua. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. **Reviews of Geophysics**, [S. l.], v. 46, n. 2, p. RG2006, 2008.

HWANG, Hyoun-Tae; et al. Comparison of Saturated Hydraulic Conductivity Estimated by Three Different Methods. **Water**, [S.L.], v. 9, n. 12, p. 942-954, 4 dez. 2017. MDPI AG.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2ª edição. São Paulo, EDUSP, 2012. 346 p.

REICHARDT, Klaus; TIMM, Luís Carlos. **Soil, Plant and Atmosphere:** Concepts, Processes and Applications. [s.i.]: Springer International Publishing, 2020. 456 p.

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.

TEDESCO, M.J.; et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2ª edição. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia/UFRGS, 1995. 174p.

YAO, Rong-Jiang; YANG, et al. Evaluation of pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity in coastal salt-affected mud farmland. **Journal Of Soils And Sediments**, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 902-916, 8 jan. 2015. Springer Science and Business Media LLC.

ZHANG, XI; et al. Effect of Macroporosity on Pedotransfer Function Estimates at the Field Scale. **Vadose Zone Journal**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 1-15, jan. 2019. Wiley.