

## PREDIÇÃO DA RETENÇÃO DE ÁGUA APLICANDO APROXIMAÇÃO GEOESTATÍSTICA EM SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL

Bruno Campos Mantovanelli<sup>1</sup>, Mirta Teresinha Petry<sup>2</sup>, Reimar Carlesso<sup>2</sup>, Max Kleber  
Laurentino Dantas<sup>1</sup>, Leonardo Chechi<sup>2</sup>, Diego Dambrós Londero<sup>2</sup>

**RESUMO:** A estimativa de propriedades hidráulicas por meio de ferramentas estatísticas espaciais ajuda a prever esses atributos para locais não amostrados, em função da associação geográfica entre pontos amostrados e reduzindo a variância do erro de avaliação. Este estudo teve como objetivo elaborar diagramas ternários aplicando técnicas geoestatísticas para solos de áreas irrigadas do Rio Grande do Sul, Brasil. Os dados foram extraídos da base físico-hídrica de áreas irrigadas vinculada ao Sistema Irriga®, do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria. As estimativas do conteúdo de água ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) pelo método de krigagem, foram realizadas aplicando-se apenas a distribuição do tamanho de partículas (areia, silte e argila) considerando o conjunto de dados em um perfil de amostragem de até 0,8 m. Com base na textura, foram estimados os valores do conteúdo de água na capacidade de campo (-10 kPa e -33 kPa) e ponto de murcha permanente (-1500 kPa). Para averiguar o desempenho e a acurácia, foi realizada uma análise estatística através dos seguintes parâmetros: Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e validação cruzada do semivariograma (VC). Diagramas ternários podem servir como ferramentas simplificadas para estimar essas propriedades hidráulicas a partir da distribuição de tamanho de partículas.

**PALAVRAS-CHAVE:** diagramas ternários, krigagem, textura.

## PREDICTION OF WATER RETENTION APPLYING AN GEOSTATISTICAL APPROACH IN SOILS OF RIO GRANDE DO SUL

---

<sup>1</sup> Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

**ABSTRACT:** The estimation of soil hydraulic properties using spatial statistical tools helps to predict these attributes for non-sampled sites, due to the geographical association between sampled points and reducing the variance of the evaluation error. This study aimed to elaborate ternary diagrams applying geostatistical techniques to soils of irrigated areas in the Rio Grande do Sul state, Brazil. The data were extracted from the physical-hydraulic base of irrigated areas linked to the Irriga System®, from the Rural Engineering Department, of Federal University of Santa Maria. The soil water content estimates ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) by the kriging method were performed by applying only the particle size distribution (sand, silt, and clay) considering the data set in a sampling profile up to 0, 8 m. Based on the texture, the values of the water content at field capacity (-10 kPa and -33 kPa) and permanent wilting point (-1500 kPa) were estimated. To determine the performance and accuracy, a statistical analysis was performed using the following parameters: Coefficient of determination ( $R^2$ ), square root mean error (RMSE) and cross-validation of the semivariogram (CV). Ternary diagrams can serve as simplified tools for estimating these hydraulic properties from the particle size distribution.

**KEYWORDS:** ternary diagrams; kriging; texture.

## INTRODUÇÃO

O objetivo da modelagem hidráulica do solo é fornecer uma visão simplificada e abstrata dos complexos padrões hidráulicos em uma amostra de solo (BROWN & HEUVELINK, 2006). Propriedades hidráulicas do solo e os seus modelos, são associados em uma vasta gama de aplicações, incluindo a irrigação (GRASHEY-JANSEN, 2014), modelagem de manejo e áreas agrícolas (HORNE & SCOTTER, 2016) e estudos de longo prazo sobre o efeito do clima e da mudança no uso da terra (SULIS et al., 2011). Os dados necessários para modelos hidráulicos de solo usados em uma determinada aplicação são frequentemente difíceis ou impossíveis de se obter diretamente a partir de medições de campo detalhadas, sendo caro e demorado coletar para cada nova aplicação.

Desde 1970, um grande número de Funções de Pedotransferência (FPTs) para prever propriedades hidráulicas foram desenvolvidas em todo o mundo em escala regional ou global (MICHELON et al., 2010; MCNEILL et al., 2018). Seguindo os estudos de predição tanto de propriedades hidráulicas do solo quanto a retenção de água, técnicas baseadas na abordagem geoestatística, mais precisamente interpolações por krigagem, vem se destacando nestas quantificações, principalmente por considerarem a estrutura de distribuição espacial dos

atributos envolvidos nas estimativas (RAMO et al., 2014). A geoestatística é um método eficiente de estudo para a distribuição espacial de propriedades do solo (BEHERA & SHUKLA, 2015). A estimativa de propriedades hidráulicas por meio de ferramentas estatísticas espaciais ajuda a prever valores em locais não amostrados, em função da associação geográfica entre pontos amostrados e reduzindo a variância do erro de avaliação (SAITO et al., 2005).

A aplicabilidade das técnicas geoestatísticas tem sido reportada em uma série de pesquisas, principalmente aquelas que visam constatar a variabilidade espacial de atributos do solo. Entretanto, a aplicação das técnicas de krigagem não foram ainda estabelecidas para o desenvolvimento de FPTs para realmente derivar propriedades hidráulicas do solo a partir de propriedades físicas básicas e de fácil.

Seguindo os estudos sobre a predição de propriedades hidráulicas do solo para todo o espaço do triângulo textural do solo, propomos uma nova abordagem geoestatística para obter a distribuição espacial dos valores de retenção de água. Desta forma, este estudo teve por objetivo elaborar diagramas ternários aplicando técnicas geoestatísticas para solos de áreas irrigadas do Rio Grande do Sul, Brasil.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os dados foram extraídos da base físico-hídrica de áreas irrigadas vinculada ao Sistema Irriga®, do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria. Os dados incluem informações de 4262 observações abrangendo textura (areia, silte e argila) e propriedades de retenção de água ( $\theta_{cc}$  e  $\theta_{pmp}$ ). Os grupos de referência de solos representados abrangem principalmente Argissolos e Latossolos. Qual o período que foi realizado o estudo

O conjunto de dados foi dividido aleatoriamente em dois subconjuntos, um de desenvolvimento, composto por dois terços dos dados (2842 amostras) e um de validação, com o terço restante dos dados (1420 amostras). As estimativas do conteúdo de água ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) por krigagem ordinária, foram realizadas aplicando-se apenas a distribuição do tamanho de partículas (areia, silte e argila). E assim, com base na textura, estimou-se o conteúdo de água na capacidade de campo (potenciais de -10 kPa e -33 kPa) e ponto de murcha permanente (-1500 kPa).

Os resultados foram apresentados para o triângulo textural, e assim, os triângulos hidráulicos desenvolvidos assumiram que cada valor de conteúdo de água e armazenamento no

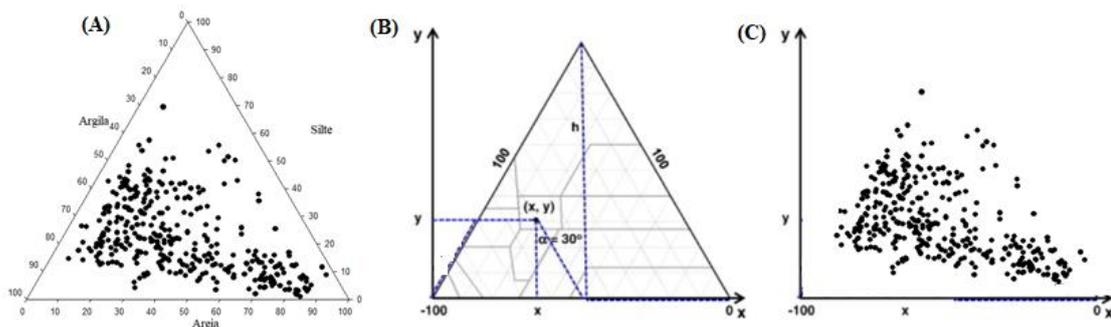
conjunto de dados pode ser representado em um diagrama de textural, nas coordenadas dadas pela distribuição de tamanho de partícula das amostras correspondentes.

Conforme apresentado em Ramos et al. (2014), primeiramente, deve-se assumir que as coordenadas são dadas pela proporção relativa dos constituintes da textura (areia, silte e argila), logo, estas devem ser transformadas em um domínio cartesiano (variação de comprimento no domínio cartesiano foi equivalente a % de variação de massa no triângulo textural) conforme as Equações 1 e 2 e Figura 1.

$$y = \frac{h \times \text{argila}(\%)}{100} \quad (1)$$

$$x = \left( \text{areia}(\%) + \text{argila}(\%) * \tan\left(\alpha * \frac{\pi}{180}\right) \right) \quad (2)$$

em que: h: altura do triângulo (obtida aplicando o teorema de Pitágoras);  $\alpha$ : ângulo de 30° formado entre a direção vertical e a direção diagonal.



**Figura 1.** Distribuição textural do conjunto de dados utilizado no desenvolvimento e validação dos diagramas ternários (A); conversão das coordenadas de textura em coordenadas cartesianas (B); conjuntos de dados de desenvolvimento e validação no domínio cartesiano (C). Adaptado Ramos et al. (2014).

Para obter a distribuição espacial dos valores de retenção de água no solo no triângulo de textura, foi proposto o uso do estimador por krigagem. Portanto, o primeiro passo foi obter um modelo espacial válido, capaz de descrever a variação dos valores de retenção de água observados. Isso geralmente é obtido inferindo-se um semivariograma ao qual um modelo é ajustado, fornecendo os parâmetros necessários para prever a retenção de água em locais não amostrados dentro do triângulo. O semivariograma foi calculado para examinar a correlação espacial dentro dos pontos de dados medidos.

O semivariograma foi calculado para examinar a correlação espacial dentro dos pontos de dados medidos a partir do software GS<sup>+</sup>. A inconsistência espacial foi estimada como um semivariograma que retrata a variabilidade quadrada média entre os dois locais de amostra

vizinhos da distância  $h$  (Isaaks & Srivastava, 1989). Com base na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca, o semivariograma foi estimado pela Equação 3.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

O desempenho e acurácia foi determinado a partir de análise estatística através dos seguintes parâmetros: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e validação cruzada do semivariograma (VC).

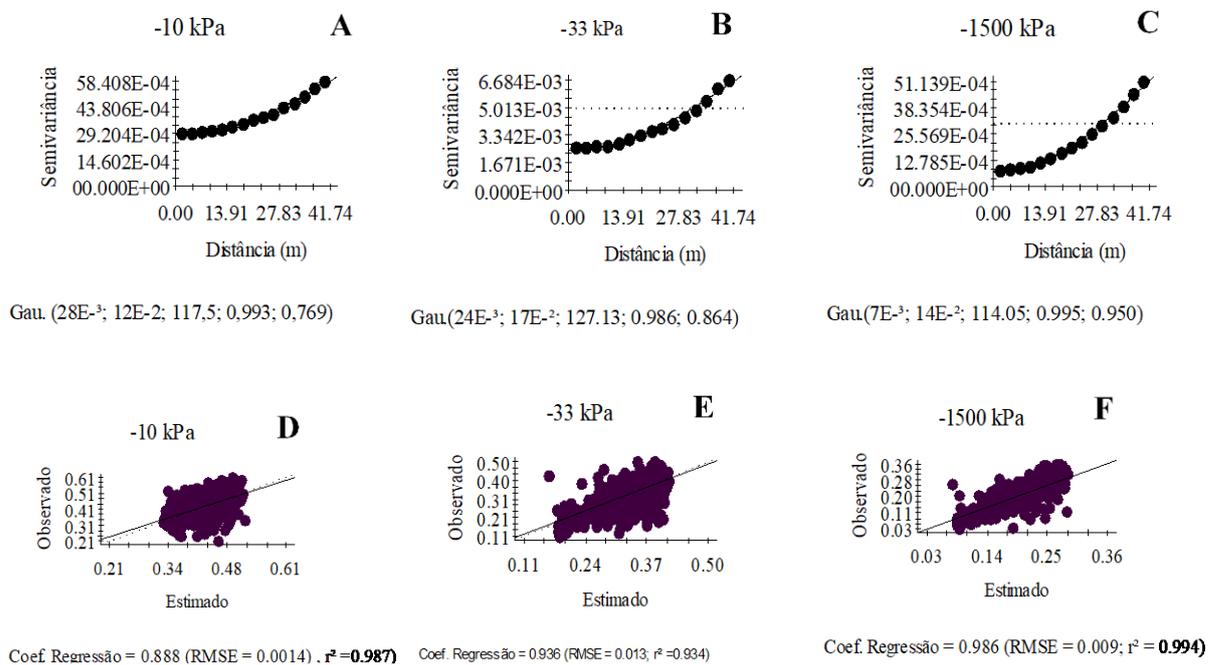
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 (A-B-C) apresenta os semivariogramas experimentais e teóricos obtidos para os potenciais de -10 kPa, -33 kPa e -1500 kPa. Os valores de efeito pepita para todas as estimativas se enquadraram ao modelo gaussiano, correspondendo a 28%, 24% e 7% da variância total, respectivamente, para -10 kPa (A), -33 kPa (B) e -1500 kPa (C). Este comportamento dos erros vinculados ao modelo, indicam que a variação ocorre em escalas muito pequenas para as estimativas a -1500 kPa, enquanto que, as demais não podem ser descritas apenas por variações na textura do solo, devendo algum atributo estrutural ser considerado, destacando aqueles mais sensíveis ao manejo do solo (ex. densidade do solo e macroporosidade).

Os valores de dependência espacial representados para -10 kPa, -33 kPa e -1500 kPa foram, respectivamente, de 76,9%, 86,4 % e 95%. Estes valores indicam a fraca dependência espacial do conjunto amostral. Tal fato é evidenciado pelo ajuste ao modelo gaussiano e pela não distribuição geral de medidas texturais suficientes na formação de coordenadas no plano cartesiano. Dessa forma, o valor de uma variável não se assemelha ao valor de sua amostra vizinha, levando assim, a uma elevada variabilidade espacial. Ramos et al. (2014), em solos de Portugal, associaram estas estimativas elevadas de dependência espacial ao efeito da densidade do solo, matéria orgânica, estrutura, mineralogia do solo, composição química do solo e uso e manejo da terra nas propriedades de retenção de água.

Considerando o alcance de dependência espacial vinculados aos semivariogramas experimentais, as estimativas representam respectivamente 117,5 m (Figura 1A), 127, 13 m (Figura 1B) e 114, 05 m (Figura 1C), estes valores representam a tendência de variação em uma escala de distância, reproduzindo assim, que a associação a estes valores de textura com as

respectivas umidades, tendem a ser semelhantes nestas escalas. Entretanto, deve-se ressaltar que estas estimativas tendem a uma variação em função da não distribuição dos dados nas classes texturais, visto que o modelo gaussiano não apresentou um alcance definido em função de sua tendência linear. Esta condição conforme Seidel & Oliveira (2014), se deve principalmente ao modelo gaussiano, o alcance não ter uma definição objetiva, o que torna necessário mais estudos no sentido de avaliar a influência de definições alternativas de alcance espacial para esses dois modelos, fazendo assim a necessidade de um melhor preenchimento das coordenadas cartesianas do triangulo textural.

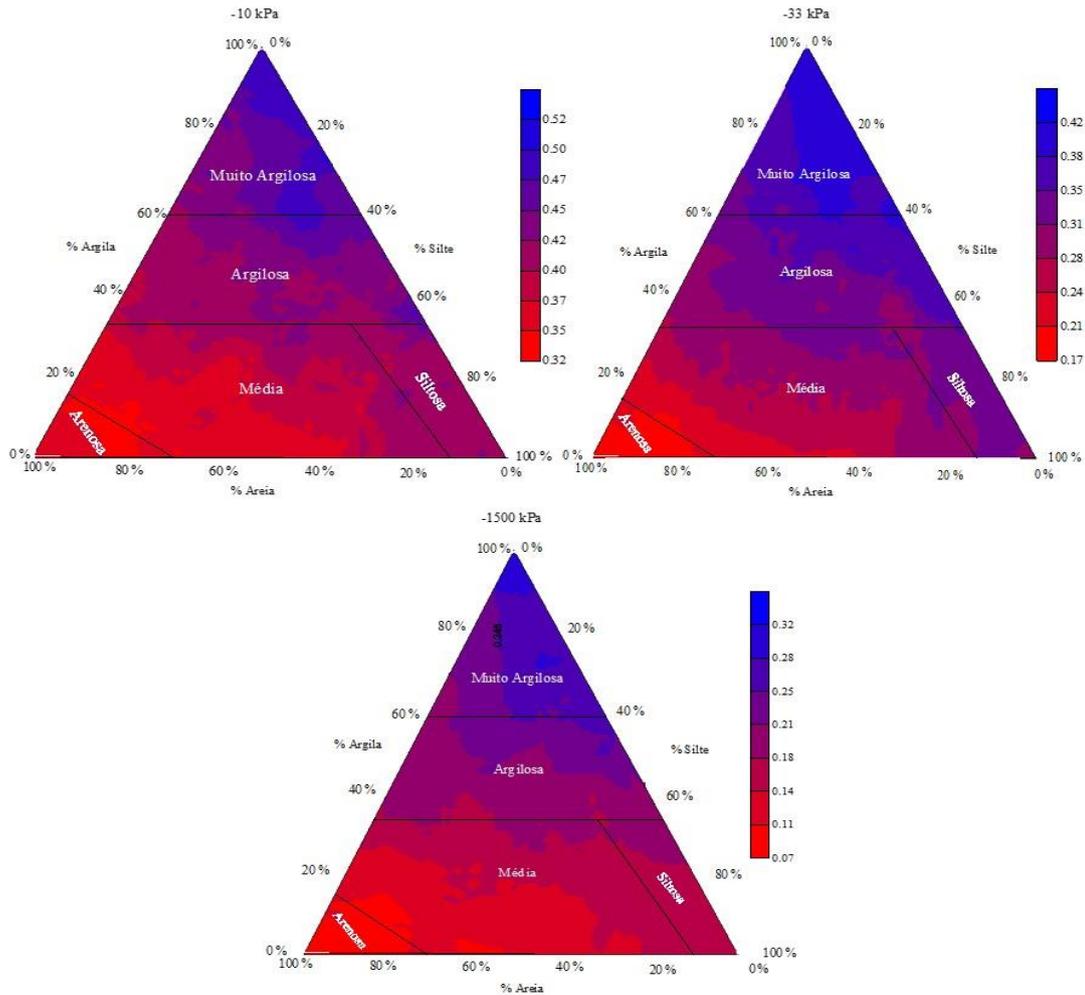


**Figura 2.** Padrão de distribuição espacial de modelagem geoestatística para as estimativas de retenção de água em solos do Rio Grande do Sul em diferentes potenciais matriciais. A-B-C: modelo de semivariograma (efeito pepita; patamar, alcance, R<sup>2</sup>, grau de dependência espacial). D-E-F: Coeficientes de validação cruzada das modelagens de estimativa).

Os ajustes a partir das validações cruzadas (Figura 2 D-E-F), mostram RMSEs extremamente baixos, variando entre 0,0014 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (-10 kPa); 0,009 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (-1500 kPa) e 0,013 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (-33 kPa), tornando real a sua aplicação nas estimativas de retenção de água para o Estado do Rio Grande do Sul. Apesar dos efeitos de variabilidade já evidenciados, as estimativas baseadas nas coordenadas texturais mostram variações a partir do erro médio de 28,6%, 22,4% e 1,7% respectivamente aos potenciais de -10 kPa, -33 kPa e -1500 kPa. Isso pode ser justificado pelo elevado número de observações do conjunto amostral, evidenciando assim, a forte correlação entre os resíduos, mesmo a curtas distâncias. Assim, espera-se uma maior contribuição dos resíduos ao prever o teor de água nessas condições.

A Figura 3 apresenta os diagramas ternários desenvolvidos para estimar os conteúdos de água a partir da distribuição do tamanho de partículas. As escalas variaram entre  $0,52 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  a  $0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para potencial de  $-10 \text{ kPa}$ ,  $0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  a  $0,17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para  $-33 \text{ kPa}$  e  $0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  a  $0,07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para  $-1500 \text{ kPa}$ . Estes resultados corroboram Ramos et al. (2014), que observaram variação para estas mesmas faixas de potenciais. As abordagens revelaram, como esperado, que os valores de retenção de água no solo foram menores nas classes de textura mais grosseiras e aumentaram gradualmente com o incremento dos teores de argila e silte. As previsões para as regiões do triângulo de textura onde poucas informações estavam disponíveis (por exemplo, a classe de textura arenosa e a região do triângulo de textura com teor de argila superior a 65%), tendem a evidenciar os erros já comentados de fraca dependência espacial e elevado efeito pepita.

As previsões para as regiões do triângulo em que não havia informações disponíveis (classe de textura siltosa), estes corresponderam a valores de incerteza muito mais baixos quando comparados com a abordagem. Provavelmente, isso se deve ao uso de uma tendência espacial baseada na textura do solo combinada com resíduos espacialmente correlacionados, que também foram responsáveis pelas informações de textura que não foram incluídas no modelo de tendência. Para as demais regiões onde os diagramas ternários foram bem preenchidos com informações, a variação da estimativa foi bastante baixa a partir da krigagem ordinária, portanto, as estimativas foram consideradas precisas (a região em que a informação estava disponível foi posteriormente definida como correspondendo à área da textura).



**Figura 3.** Diagramas ternários para valores de conteúdo de água no solo nos potenciais matriciais estimado com krigagem ordinária para o estado do Rio Grande do Sul.

## CONCLUSÕES

A abordagem geostatística foi capaz de fornecer estimativas usando apenas a proporção relativa de diferentes partículas granulométricas (areia, silte e argila) como dados de entrada. Entretanto, o elevado erro de efeito pepita é um indicativo de possíveis modificações e inserção de variáveis físicas de domínio estrutural. Desta forma, diagramas ternários podem servir como ferramentas simplificadas para estimar essas propriedades hidráulicas a partir da distribuição de tamanho de partículas.

## REFERÊNCIAS

- Behera, S. K.; Shukla, A. K. Spatial distribution of surface soil acidity, electrical Conductivity, soil organic carbon content and exchangeable Potassium, calcium and magnesium in some cropped acid Soils of India. **Land Degradation & Development**, v. 26, p. 71–79, 2015.
- Brown, J. D.; Heuvelink, G. B. M. 79 Assessing Uncertainty Propagation through Physically Based Models of Soil Water Flow and Solute Transport. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**, v. 32, p. 1-15, 2006.
- Grashey-Jansen, S. Optimizing irrigation efficiency through the consideration of soil hydrological properties – examples and simulation approaches. **Erdkunde**, v. 68, p. 33-48, 2014.
- Horne, D. J.; Scotter, D. R. The available water holding capacity of soils under pasture. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 165-171, 2016.
- Isaaks, E. H.; Srivastava, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, p. 561, 1989.
- Mcneill, S. J.; Lilburne, L. R.; Carrick, S.; Webb, T. H.; Cuthill, T. Pedotransfer functions for the soil water characteristics of New Zealand soils using S-map information. **Geoderma**, v. 326, p. 96-110, 2018.
- Michelon, C. J.; Carlesso, R.; Oliveira, Z. B.; Knies, A. B.; Petry, M. T.; Martins, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 40, p. 848-853, 2010.
- Ramos, T. B.; Horta, A.; Gonçalves, M. C.; Martins, J. C.; Pereira, L. S. Development of ternary diagrams for estimating water retention properties using geostatistical approaches. **Geoderma**, v. 230-231, p. 229-242, 2014.
- Saito, H.; Mckenna, A.; Zimmerman, D. A.; Coburn, T. C. Geostatistical interpolation of object counts collected from multiple strip transects: ordinary kriging versus finite domain kriging, *Stoch. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 19, p. 71–85, 2005.

Seidel, E. J.; Oliveira, M. S. Novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 699-705, 2014.

Sulis, M.; Paniconi, C.; Rivardi, C.; Harvey, R.; Chaumont, D. Assessment of climate change impacts at the catchment scale with a detailed hydrological model of surface-subsurface interactions and comparison with a land surface model. **Water Resources Research**, v. 19, p. 1-22, 2011.