



Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária

SIAGRO

Ciência • Tecnologia • Inovação • Mercado

14 a 16

de outubro de 2025

Embrapa

Instrumentação

São Carlos - SP

Anais



Editores:

Paulo Sergio de Paula Herrmann Junior

Henriette Monteiro Cordeiro de Azeredo

Maria Fernanda Berlingieri Durigan

Luís Henrique Basso

ISSN 2358-9132

Embrapa

Instrumentação

ISSN 2358-9132

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Instrumentação
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

**Simpósio Nacional de
Instrumentação Agropecuária
2025**

Anais do SIAGRO

Ciência, Tecnologia, Inovação e Mercado

Paulo Sergio de Paula Herrmann Junior
Henriette Monteiro Cordeiro de Azeredo
Maria Fernanda Berlingieri Durigan
Luís Henrique Bassoi

Editores

Embrapa Instrumentação
São Carlos, SP
2025

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Instrumentação

Embrapa Instrumentação
Rua XV de Novembro, 1452
Caixa Postal 741
CEP 13560-970 São Carlos, SP
Fone: (16) 2107 2800
Fax: (16) 2107 2902
www.embrapa.br/instrumentacao
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente: Daniel Souza Corrêa

Membros: Elaine Cristina Paris, Maria Alice Martins,
Cristiane Sanchez Farinas, Cíntia Cabral da Costa,
Carlos Renato Marmo, Paulo Renato Orlandi Lasso,
Maria do Socorro Gonçalves Souza Monzane

Capa - Desenvolvimento: NCO; criação: Andréa Lima
Editoração eletrônica: Valentim Monzane

1ª edição

Publicação digital (2025): PDF

As opiniões, conceitos, afirmações e conteúdo desta publicação são de exclusiva e de inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), vinculada ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados internacionais de catalogação (CIP)
Embrapa Instrumentação

S612 Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária (5.: 2025 : São Carlos, SP).

Anais do SIAGRO: ciência, inovação e mercado 2025 – São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2025.

ISSN 2358-9132

1. Instrumentação agropecuária. 2. Automação de processos agrícolas. 3. Agricultura de precisão. 4. Sensores. 5. Equipamentos agrícolas. 6. Monitoramento. 7. Nanotecnologia. 8. Modelagem. 9. Métodos avançados. 10. Inovação. 11. Tecnologias convergentes. I. Herrmann Junior, P. S. P. II. Azeredo, H. M. C. III. Durigan, M. F. B. IV. Bassoi, L. H. V. Título.

CDD 21 ED 681.763

Vera Viana dos Santos Brandão (CRB – 8/7283)

© Embrapa 2025

**SPATIAL VARIABILITY OF SOIL ATTRIBUTES IN RESTORATION AREAS
USING GEOSTATISTICAL TECHNIQUES**Y. C. L. Oliveira¹, A. C. C. Bernardi², M.V. Nakasato³, A. L. T. Souza³¹ Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, SP,
yasminclo@estudante.ufscar.br² Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP, alberto.bernardi@embrapa.br³ Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR, São Carlos, SP,
mar_nakasato@yahoo.com.br, altdesouza@gmail.com

Abstract: Knowledge of the spatial variability of soil properties is essential for vegetation management with a focus on the rational use of inputs. This study assessed the spatial variability of soil attributes in ecological restoration areas using geostatistical methods. Soil fertility data from restoration plots and forest remnants on the banks of the Anhanguera SHP reservoir (Guará, SP) were interpolated using kriging and converted on thematic maps. The soil results showed that the restored areas still differ from reference forests in terms of organic matter, phosphorus, and cation exchange capacity (CEC). Kriging has proven effective in identifying spatial patterns of soil chemical properties, and the resulting maps can guide monitoring and management decisions in restoration areas.

Keywords: geostatistics, kriging, soil fertility, ecological restoration, spatial variability.

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO EM ÁREAS DE
RESTAURAÇÃO USANDO TÉCNICAS DE GEOESTATÍSTICA**

Resumo: O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo é essencial para o manejo da vegetação com foco no uso racional de insumos. Este trabalho avaliou a variabilidade espacial de atributos do solo em áreas de restauração ecológica com uso de métodos geoestatísticos. Foram analisados dados de fertilidade do solo em parcelas restauradas e em fragmentos florestais nas margens do reservatório da PCH Anhanguera (Guará, SP), que foram interpolados por krigagem e convertidos em mapas temáticos. Os resultados mostraram que as áreas restauradas ainda apresentam diferenças em relação às matas de referência, especialmente nos teores de fósforo, matéria orgânica e capacidade de troca catiônica. A técnica de krigagem foi eficaz para identificar padrões espaciais das propriedades químicas do solo, e os mapas resultantes podem ser um guia para o monitoramento e decisões de manejo nas áreas de restauração ecológica.

Palavras-chave: geoestatística, krigagem, fertilidade do solo, restauração ecológica, variabilidade espacial.

1. Introduction

Brazilian riparian corridors have undergone intense degradation, necessitating cost-effective monitoring tools to guide recovery efforts (Rocha et al., 2015). Geostatistical techniques convert discrete soil observations into continuous fertility maps, supporting precision restoration (Yamamoto & Landim, 2013). Combined with economic assessments (Lowenberg-Deboer, 2019) and soil microbiological insights (Moreira & Siqueira, 2006), spatial diagnostics can optimize resource allocation and management. Despite the emerging uses of hyperspectral indices for soils (Nakasato et al., 2024), ground-based sampling remains indispensable for calibrating models, particularly in ILPF mosaics, where

management history generates high heterogeneity (Bernardi et al., 2014).

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

The study was conducted on the left bank of the Anhanguera reservoir (20°29'S, 47°51'W; 548 m a.s.l.) (Figure 1), characterized by a humid subtropical climate (Cwa) and Ultisol-derived Ferralsols (Rossi, 2017). Land use transitioned from pasture to mixed native plantations in 2012 as part of a legal restoration program.

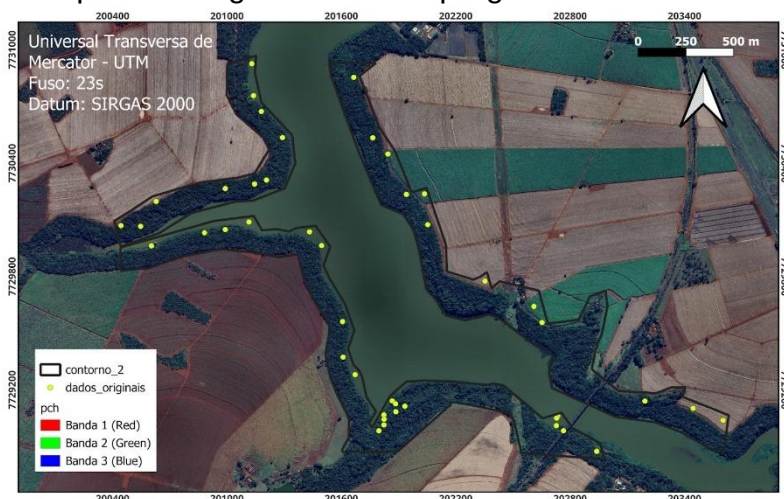


Figure 1 - Maps of the study area located in PCH-Anhanguera reservoir in the municipality of Guará-SP.

2.2. Soil Sampling and Laboratory Analyses

Within four macro-units (RE, RD, MA, MB), we established a 10 × 10 m grid. Composite samples (five subsamples) were extracted from 0–20 cm, air-dried, and sieved to 2 mm. Chemical analyses followed the methods described by Teixeira et al. (2017). The pipette method was used to determine particle size distribution (Kiehl, 2010). Quality control employed reference standards from Ribeiro et al. (1999).

2.3. Geostatistical Modelling

Exploratory statistics (CV, skewness) were computed in R 4.3.1. Semivariograms were modeled with spherical, exponential, and Gaussian functions (McBratney & Webster, 1986) using VESPER 1.6 (Oliveira et al., 2015); the lowest AIC indicated the best fit (Akaike, 1973). Ordinary kriging generated 1 m resolution raster, which were later symbolized in QGIS 3.34.

3. Results and Discussion

Descriptive statistics revealed that available P ($8.2 \pm 4.7 \text{ mg dm}^{-3}$) exhibited the highest coefficient of variation (CV, 58 %), consistent with patterns observed in Brazilian Ultisols by Novais and Smyth (1999). Stronger spatial continuity was observed for CEC and organic matter ($\text{IDE} > 0.75$). Kriged maps located fertility hotspots near former paddock gates, likely reflecting historical fertilizer deposition (Guimarães, 2004). CEC values in restoration belts averaged 56 mmolc dm^{-3} , below the 80 mmolc dm^{-3} reported for adjacent forest fragments (Rocha et al., 2015). Phosphorus limitation appears chronic, as 82 % of RE pixels remained below the 12 mg dm^{-3} threshold suggested by Raij (2011). Integrating hyperspectral tree-level indices (Nakasato et al., 2024) with soil maps could refine fertilizer prescriptions.

Management recommendations include localized P fertilization combined with mulch layers to stabilize inputs, a practice proven effective in similar riparian restorations (Moraes et al., 2008). The adoption of nitrogen-fixing cover crops can accelerate organic matter accrual and improve CEC (Leite, 2004).

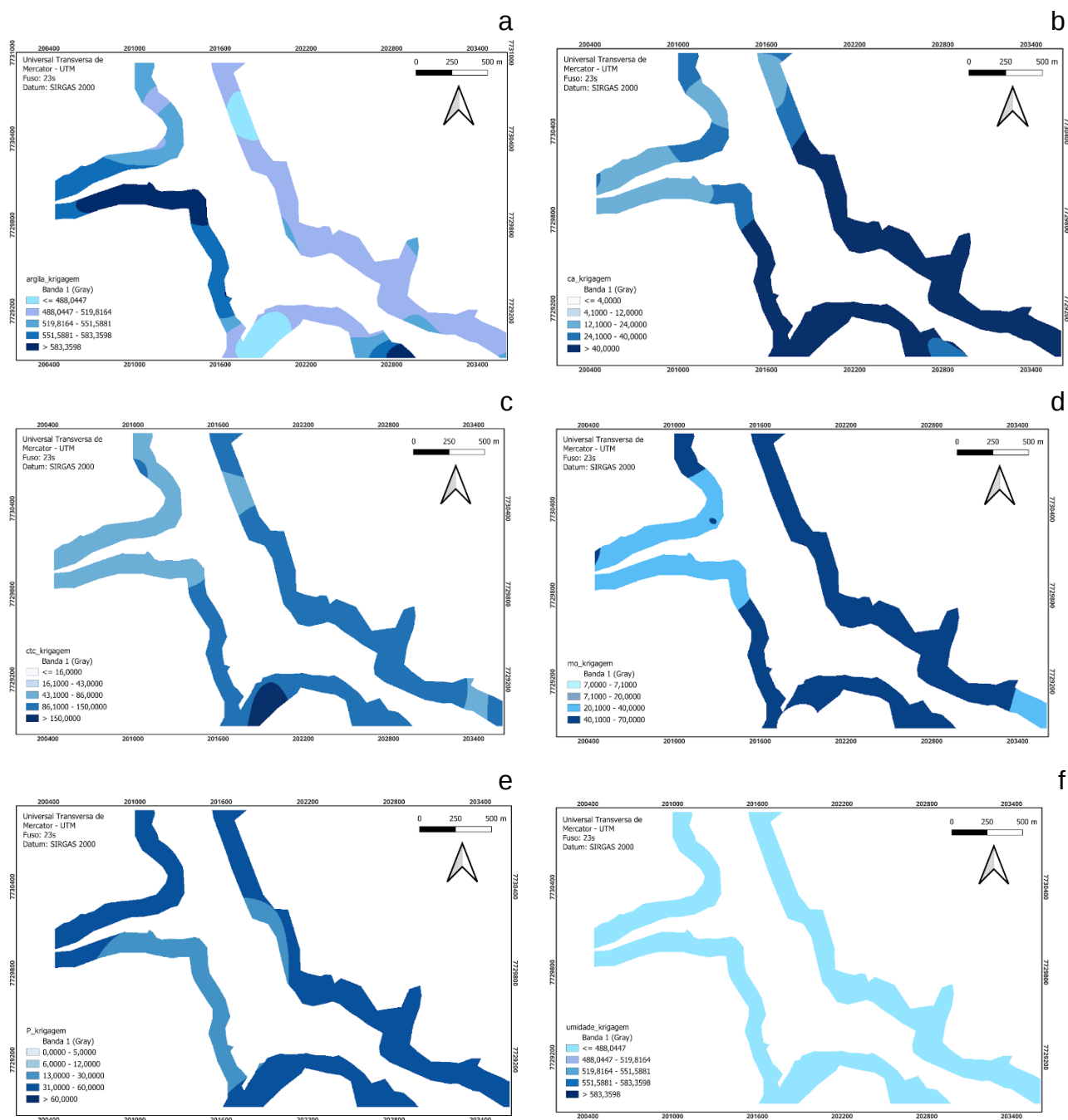


Figure 2- Kriging maps of soil parameters of the study area: a) clay; b) calcium; c) cation exchange capacity (CEC); d) organic matter; e) phosphorus; and f) humidity

4. Conclusions

Geostatistical modeling using ordinary kriging identified persistent fertility gaps twelve years after planting, particularly for P, organic matter, and CEC. Targeted nutrient inputs, applied every two years, are recommended to match reference conditions and sustain the

growth of riparian vegetation.

References:

- Akaike, H. (1973) Information theory and an extension of maximum likelihood principle. In *International Symposium on Information Theory*, 2., (pp. 267-281). Akademia Kiado.
- Bernardi, A. C. C., Bettiol, G. M., Mazzuco, G. G., Esteves, S. N., Oliveira, P. D., & Pezzopane, J. R. M. (2017). Spatial variability of soil fertility in an integrated crop livestock forest system. *Advances in Animal Biosciences*, **8**, 590-593. <https://doi.org/10.1017/S2040470017001145>
- Lowenberg-Deboer, J. The economics of precision agriculture. In: *Precision agriculture for sustainability*. (pp. 481-502). Burleigh Dodds Science Publishing, 2019.
- Guimarães, E. C. (2004). *Geoestatística básica e aplicada*. UFU/FAMAT.
- Kiehl, E. J. (2010). *Manual de edafologia: relações solos-planta* (2nd ed.). Agronômica Ceres.
- Leite, L. F. C. (2004). *Matéria orgânica do solo*. Embrapa Meio-Norte.
- McBratney, A. B., & Webster, R. (1986). Choosing functions for the semivariograms of soil properties and fitting them to sample estimates. *Journal of Soil Science*, **37** 617-639. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1986.tb00392.x>
- Moreira, F. M. S., & Siqueira, J. O. (2006). *Microbiologia e bioquímica do solo* (2nd ed.). UFLA.
- Nakasato, M. V., Souza, A. L. T., & Bernardi, A. C. C. (2024). Waterline distance effects in the recovery of forest structure and soil organic matter 12 years after restoration. *Ecological Engineering*, **206**, 107315. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107315>
- Novais, R. F., & Smyth, T. J. (1999). *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. UFV.
- Oliveira, J. B., Camargo, M. D., Rossi, M., Calderano Filho, B. (1999). *Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida*. Instituto Agronômico/Embrapa Solos.
- Oliveira, R. P., Grego, C. R., & Brandão, Z. N. (2015). *Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o VESPER*. Embrapa.
- Raij, B. van. (2011). *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. IPNI Brasil.
- Ribeiro, A.C., Guimarães, P.T.G., Alvarez, V.V.H. (1999) *Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais* (5a. aproximação). Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais;
- Rocha, J. H. T., et al. (2015). Reflorestamento e recuperação de atributos químicos e físicos do solo. *Floresta e Ambiente*, **22**(3), 299-306.
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solo* (3rd ed.). Embrapa.
- Yamamoto, J. K., & Landim, P. M. B. (2013). *Geoestatística: conceitos e aplicações* (2nd ed.). Oficina de Textos.