

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo deste
documento será
disponibilizado somente a
partir de 04/03/2028

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

MESSIAS JOÃO EDUARDO

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E DO
DESEMPENHO PRODUTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO NOROESTE PAULISTA**

Jaboticabal - SP

2026

MESSIAS JOÃO EDUARDO

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E DO
DESEMPENHO PRODUTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO NOROESTE PAULISTA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Área de Concentração: Ciência do Solo

Orientador(a): Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira

Coorientador(a): Alan Rodrigo Panosso

Jaboticabal - SP

2026

E24v

Eduardo, Messias João

Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e do desempenho produtivo da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista / Messias João Eduardo. -- Jaboticabal, 2026

60 p. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Gener Tadeu Pereira

Coorientador: Alan Rodrigo Panosso

1. Geoestatística. 2. agricultura de precisão. 3. manejo dos solos. 4. mapas de zoneamento. 5. produtividade agrícola. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E DO DESEMPENHO PRODUTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO NOROESTE PAULISTA

AUTOR: MESSIAS JOÃO EDUARDO

ORIENTADOR: GENE TADEU PEREIRA

COORIENTADOR: COORIENTADOR: ALAN RODRIGO PANOSSO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br ALAN RODRIGO PANOSSO
Data: 11/03/2026 10:42:58-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO (Participação Presencial)
Departamento de Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br DIOGO MAZZA BARBIERI
Data: 05/03/2026 11:15:58-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Dr. DIOGO MAZZA BARBIERI (Participação Virtual)
Athenas Consultoria Agrícola e Laboratório / Jaboticabal/SP

Documento assinado digitalmente
gov.br DIEGO SILVA SIQUEIRA
Data: 09/03/2026 18:12:50-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Diretor Executivo DIEGO SILVA SIQUEIRA (Participação Virtual)
Quanticum Inteligência em Solos / Ribeirão Preto/SP

Documento assinado digitalmente
gov.br GLAUCO DE SOUZA ROLIM
Data: 11/03/2026 09:28:28-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM (Participação Presencial)
Departamento de Ciências Exatas / UNESP / Câmpus de Jaboticabal - FCAV

Jaboticabal, 04 de março de 2026.

Dedico este trabalho aos meus amados avós, António Micolo Pizatela, Domingas Raimundo, Pedro Mendes e Rosa Simão Inácio (*in memoriam*): vocês são minha raiz e me ensinaram o verdadeiro amor; aos meus pais, Marcos Eduardo e Isabel António João, e às minhas filhas, Isabela, António Eduardo e Lueji Tchissola.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Nzambi/Deus pela vida; aos meus pais, pela educação, pelos conselhos e por me ajudarem a tornar-me o ser que sou hoje. Estendo estes agradecimentos aos meus irmãos, familiares e amigos, bem como a todas as pessoas que contribuíram, ainda que indiretamente, para que esta etapa da minha vida se concretizasse.

De forma mais específica, àqueles que participaram diretamente neste processo, deixo o meu sincero agradecimento, de coração, por partilharem os vossos conhecimentos e experiências, as vossas forças e, sobretudo, por dedicarem um pouco do vosso precioso tempo para me auxiliar sempre que precisei.

Aos professores Rafael Montanari, Alan Panosso, Gener Tadeu, Newton La Scala, Karina Burger, João de Deus, Mara Cristina, Marcílio Filho, Glauco Rolim, Diego Siqueira e Diogo Barbieri; aos colegas, amigos e companheiros/as TAEs; Afonso Fansoni, Adolfo Pereira, Mara Silvia Luna, Maria Josélia dos Santos, Luiz Miguel, Fernando Manuel, Andréa Rodriguez, Adriana Takakura, Abdulai Dabo Nilton Mário e Orlando, o meu muito obrigado! Twasakidila.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“É preciso ser perseverante e audacioso.
Para alcançar os seus objetivos” (Abel
Epalanga Chivukuvuku)

“Antes de pé lutando do que morrer
ajoelhado mendigando, rios secam e
montanhas desabam, mas nem com isso
as nossas forças se acabam” (Adaptado de
Bruno M., Kudurista)

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E DO DESEMPENHO PRODUTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO NOROESTE PAULISTA

RESUMO

O solo é um sistema natural heterogêneo, cuja variabilidade espacial influencia diretamente a fertilidade, o manejo e o desempenho produtivo das culturas agrícolas. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo caracterizar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e sua relação com a produtividade da cana-de-açúcar no noroeste paulista, com vistas a subsidiar a construção e avaliação de zonas específicas de manejo. Para tanto, foram utilizados 3.212 pontos de amostragem distribuídos em área de cultivo comercial de cana-de-açúcar, nos quais foram avaliados os atributos químicos do solo nas profundidades de 0,00-0,25 m e 0,25-0,50 m: matéria orgânica (MO), pH, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), hidrogênio + alumínio (H+Al), enxofre (S), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%), além da produtividade agrícola expressa em toneladas de cana por hectare (TCH). As análises envolveram estatística descritiva, matriz de correlação de Pearson, análise de componentes principais (ACP), modelagem geoestatística, validação cruzada e interpolação por krigagem ordinária. Os resultados evidenciaram elevada heterogeneidade dos atributos químicos do solo nas duas camadas avaliadas, com baixa variabilidade apenas para pH e variabilidade média para V%. A ACP mostrou que os três primeiros componentes principais explicaram 76,47% da variância total dos dados. O CP1 representou o principal eixo de organização do sistema, expressando contraste entre produtividade, acidez potencial e atributos relacionados à capacidade de troca e à disponibilidade química do solo; o CP2 refletiu a dinâmica de bases trocáveis e da saturação por alumínio; e o CP3 destacou a ação conjunta entre matéria orgânica e fósforo. A modelagem dos semivariogramas indicou predomínio do modelo exponencial e evidenciou dependência espacial forte para TCH e K na camada de 0,00-0,25 m, e dependência espacial moderada para os demais atributos e para todas as variáveis na camada de 0,25-0,50 m. A validação cruzada mostrou que o desempenho preditivo dos modelos variou entre os atributos e entre as profundidades, indicando que a presença de dependência espacial não implica, necessariamente, elevada precisão preditiva para todas as variáveis. Em conjunto, os resultados demonstram que a integração entre estatística multivariada e geoestatística constitui abordagem adequada para caracterizar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e gerar subsídios para a delimitação de zonas específicas de manejo no cultivo da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Geoestatística, agricultura de precisão, manejo dos solos, mapas de zoneamento, produtividade agrícola.

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES AND SUGARCANE PRODUCTIVE PERFORMANCE IN NORTHWESTERN SÃO PAULO

ABSTRACT

Soil is a heterogeneous natural system whose spatial variability directly influences fertility, management, and crop performance. In this context, the present study aimed to characterize the spatial variability of soil chemical attributes and their relationship with sugarcane productivity in northwestern São Paulo State, Brazil, in order to support the development and evaluation of site-specific management zones. A total of 3.212 sampling points were used in a commercial sugarcane area, where the following soil chemical attributes were evaluated at the 0,00-0,25 m and 0,25-0,50 m depths: organic matter (OM), pH, phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), hydrogen plus aluminum (H+Al), sulfur (S), sum of bases (SB), cation exchange capacity (CEC), base saturation (V%), and aluminum saturation (m%), in addition to agricultural productivity expressed as tons of cane per hectare (TCH). Data analysis included descriptive statistics, Pearson's correlation matrix, principal component analysis (PCA), geostatistical modeling, cross-validation, and ordinary kriging interpolation. The results showed high heterogeneity of soil chemical attributes at both depths, with low variability only for pH and medium variability for V%. PCA showed that the first three principal components explained 76.47% of total data variance. PC1 represented the main organizational axis of the system, expressing a contrast among productivity, potential acidity, and attributes related to exchange capacity and soil chemical availability; PC2 reflected the dynamics of exchangeable bases and aluminum saturation; and PC3 highlighted the joint effect of organic matter and phosphorus. Semivariogram modeling indicated a predominance of the exponential model and revealed strong spatial dependence for TCH and K in the 0,00-0,25 m layer, and moderate spatial dependence for the remaining attributes and for all variables in the 0,25-0,50 m layer. Cross-validation showed that predictive performance varied among attributes and between depths, indicating that the presence of spatial dependence does not necessarily imply high predictive accuracy for all variables. Overall, the results demonstrate that the integration of multivariate statistics and geostatistics is an appropriate approach to characterize the spatial variability of soil chemical attributes and to provide support for the delimitation of site-specific management zones in sugarcane cultivation.

Keywords: Geostatistics, precision agriculture, soil management, zoning maps, agricultural productivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Área experimental do estudo, localizada no estado de São Paulo, Brasil, nas proximidades dos municípios de São José do Rio Preto, Catanduva e José Bonifácio, com a distribuição dos 3.212 pontos amostrais utilizados na modelagem variográfica	24
Figura 2 – Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas	30
Figura 3 – Biplot da análise de componentes principais (ACP) com os dois primeiros componentes principais	34
Figura 4 – Mapa de krigagem ordinária do teor de potássio (K) do solo na profundidade de 0,25-0,50 m	41
Figura 5 – Mapa de krigagem ordinária da acidez potencial (H+Al) do solo na profundidade de 0,25-0,50 m	41
Figura 6 – Mapa de krigagem ordinária da saturação por bases (V%) do solo na profundidade de 0,25-0,50 m	42
Figura 7 – Mapa de krigagem ordinária do pH do solo na profundidade de 0,25–0,50	42
Figura 8 – Mapa de krigagem ordinária da matéria orgânica (MO) do solo na profundidade de 0,25–0,50 m	43
Figura 9 – Mapa de krigagem ordinária do teor de fósforo (P) do solo na profundidade de 0,25–0,50 m	43
Figura 10 - Mapa de krigagem ordinária do teor de enxofre (S) do solo na profundidade de 0,25–0,50 m.	44
Figura 11 - Mapa de krigagem ordinária do teor de cálcio (Ca) do solo na profundidade de 0,25–0,50 m.	44
Figura 12 - Mapa de krigagem ordinária do teor de magnésio (Mg) do solo na profundidade de 0,25–0,50 m.	45
Figura 13 - Mapa de krigagem ordinária da soma de bases (SB) do solo na profundidade de 0,25–0,50 m	45
Figura 14 - Mapa de krigagem ordinária da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo na profundidade de 0,25–0,50 m	46
Figura 15 - Mapa de krigagem ordinária da saturação por alumínio (m%) do solo na profundidade de 0,25–0,50 m.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos do solo nas profundidades de 0,00-0,25 m e 0,25-0,50 m, e da produtividade da cana-de-açúcar (TCH)	27
Tabela 2 - Autovalores, variância explicada e coeficientes de correlação das variáveis estudadas com os três primeiros componentes principais.	32
Tabela 3 – Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos do solo e a produtividade da cana-de-açúcar (TCH), nas profundidades de 0,00-0,25 m e 0,25-0,50 m	35
Tabela 4 – Resultados da validação cruzada para as variáveis do solo e a produtividade da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,25 m e 0,25-0,50 m	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	Análises de Componentes Principais
Ca	Cálcio
CA	Coeficiente de Assimetria
CC	Coeficiente de Curtose
CP1, 2 e 3	Componentes Principais
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
CV	Coeficiente de Variação
C ₀	Efeito Pepita
C ₀ + C ₁	Patamar
FAO	Food and Agriculture Organization
FOFA	Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças
H + Al	Hidrogênio mais Alumínio
IDE%	Índice de Dependência Espacial
K	Potássio
m%	Saturação por Alumínio
Mg	Magnésio
MO	Matéria Orgânica
P	Fósforo
R ²	Coeficiente de Determinação
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
S	Enxofre
V%	Saturação por Bases

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 DESENVOLVIMENTO	18
3 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE A - Estatística (Histograma e Box plot)	55
APÊNDICE B - Semivariograma e Validação cruzada	58

1 INTRODUÇÃO

O solo proporciona o ambiente no qual as raízes das plantas se desenvolvem, fornecendo-lhes nutrientes essenciais e benéficos à manutenção da vida vegetal; além disso, seus atributos geralmente determinam a natureza da vegetação presente e a vida animal que essa flora pode sustentar (BRADY; WEIL, 2013). O solo é um corpo heterogêneo e altamente complexo, definido a partir do material de origem e da ação de fatores ambientais. Segundo Xavier (2021), os solos são separados em classes, de acordo com o conjunto de características que reúnem e que se expressam em seus horizontes. Ademais, no caso particular da agricultura, o solo pode ser compreendido também como a base da produção, uma vez que os produtores dependem dele para produzir 95% dos alimentos, o que reforça as discussões sobre o uso eficiente desse recurso, seus impactos e sua relação com a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (EMBRAPA, 2022). Essa preocupação tem levado muitos pesquisadores a buscar os melhores recursos para o manejo adequado do solo na agricultura, com a finalidade de mitigar impactos, melhorar a produção e a produtividade, e garantir a sustentabilidade e a longevidade dos sistemas.

Assim, para a melhoria, eficiência e precisão no manejo do solo e da produção, é necessário conhecer a interação sistêmica entre seus atributos físicos, químicos e biológicos. Diversas técnicas e ferramentas voltadas à agricultura de precisão (AP) vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de melhorar a produção agrícola, especialmente em culturas de grande importância econômica. A cultura da cana-de-açúcar vem contribuindo significativamente para o crescimento econômico do Brasil, particularmente no estado de São Paulo (SILVA et al., 2021), exigindo maior eficiência na produção e na produtividade do setor sucroenergético. Embora o estado possua, em sua predominância, solos pouco férteis (IAC, 2015), São Paulo apresenta a maior produção de cana-de-açúcar do Brasil. Essa cultura possui alta relevância na economia do país, sendo o açúcar um de seus principais derivados e um dos produtos mais comercializados desde o período colonial; posteriormente, surgiram outros derivados da cana-de-açúcar (GAROFALO et al., 2020).

Atualmente, o complexo sucroenergético, composto por açúcar e etanol, ocupa papel de destaque na pauta de exportações. Segundo Nachiluk (2021), em 2020 o setor teve participação de 9,9% nas exportações nacionais (US\$ 9,9 bilhões), configurando-se como o quarto setor mais representativo do país. Do valor total exportado pelo setor, o açúcar representou 87,8%, sendo também o segmento mais representativo no estado de São Paulo, com participação de 37,1% (US\$ 6,4 bilhões). Para que esses avanços resultem em maior eficiência, é fundamental adotar uma abordagem sistêmica e integrada, que considere todos os processos do sistema produtivo, desde o preparo do solo até a comercialização.

Entre as técnicas de manejo e análise do solo, a modelagem da variabilidade espacial dos atributos por meio da geoestatística vem se mostrando eficiente no que diz respeito ao desempenho e à otimização dos recursos. Tavanti et al. (2020) recomendam a geoestatística como ferramenta para estudos futuros em regiões vulneráveis, nas quais a produção agrícola é mais sensível às flutuações climáticas. Enquanto isso, Catelan et al. (2022), em uma abordagem mais sustentável voltada ao aumento da produtividade, sugerem a suscetibilidade magnética (SM) como ferramenta identificadora de áreas com diferentes potenciais de produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. O estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo, bem como a adoção de técnicas que auxiliem em seu manejo, como a geoestatística, é essencial para o adequado desenvolvimento vegetal (DALCHIAVON et al., 2017).

A geoestatística permite estimar a dependência espacial tanto entre valores observados quanto em pontos não amostrados. Por meio da krigagem ordinária, isto é, pela estimativa em locais não amostrados, é possível gerar mapas para o zoneamento e o manejo específico de áreas, contribuindo diretamente para as práticas agrícolas. Essa abordagem também possibilita otimizar o georreferenciamento de propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (CORRÊA et al., 2015), as quais apresentam grande variação espaço-temporal e estão correlacionadas ao potencial produtivo do solo. Na análise simultânea de muitas variáveis, a estatística multivariada torna-se uma ferramenta particularmente importante, pois possibilita obter informações e interpretações que poderiam não ser perceptíveis com o uso da análise estatística univariada (FREITAS et al., 2014), uma vez que permite o agrupamento de observações e o reconhecimento de padrões na base de dados.

Assim, muitos setores agrícolas, como é o caso do setor sucroenergético, vêm implementando o uso dessa ferramenta para a otimização de seus resultados. Dessa forma, a integração da geoestatística e da estatística multivariada no estudo da variabilidade dos atributos do solo constitui uma estratégia eficaz para subsidiar a tomada de decisão no manejo específico da área, promovendo o uso racional dos insumos, a sustentabilidade da produção e o aumento da eficiência agrícola (CARDOZO et al., 2020). Assim, as técnicas geoestatísticas associadas às análises multivariadas configuram-se como ferramentas essenciais para o entendimento das correlações espaciais, temporais e preditivas entre os atributos do solo e a produtividade das culturas. Portanto, a utilização dessa abordagem tem como foco otimizar o aproveitamento de recursos e a redução de custos, orientando o desenvolvimento da produção em função dessa variabilidade, sempre prezando pela sustentabilidade agrícola do sistema por meio da construção e avaliação de zonas específicas de manejo do solo. Portanto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial de atributos químicos do solo, associados à produtividade da cana-de-açúcar, visando subsidiar a construção e a avaliação de zonas específicas de manejo, com foco na otimização do uso de recursos.

3 CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu caracterizar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar no noroeste paulista, evidenciando elevada heterogeneidade nas profundidades de 0,00 a 0,25 m e de 0,25 a 0,50 m. A análise exploratória mostrou que, em ambas as camadas, o pH apresentou baixa variabilidade e V% variabilidade média, enquanto os demais atributos exibiram variabilidade de alta a muito alta magnitude. Esses resultados confirmam a complexidade espacial do sistema avaliado e reforçam a necessidade de abordagens analíticas capazes de captar simultaneamente dispersão, assimetria e dependência espacial.

A matriz de correlação de Pearson evidenciou que os atributos químicos do solo apresentam relações lineares estruturadas entre si, com associações positivas e negativas coerentes com a dinâmica da fertilidade e da acidez do solo. A produtividade da cana-de-açúcar (TCH), por sua vez, apresentou associação com parte dos atributos avaliados, especialmente quando considerada em conjunto com as demais variáveis do sistema, indicando que sua resposta não deve ser interpretada a partir de um único atributo isolado, mas em função de um arranjo químico mais amplo.

A análise de componentes principais mostrou-se eficiente para sintetizar a estrutura multivariada dos dados, uma vez que os três primeiros componentes explicaram 76,47% da variância total. O CP1 representou o principal eixo de organização do sistema, expressando um contraste entre produtividade, acidez potencial e atributos relacionados à capacidade de troca e à disponibilidade química do solo. O CP2 refletiu a dinâmica de bases trocáveis e da saturação por alumínio, enquanto o CP3 destacou a ação conjunta entre matéria orgânica e fósforo. Esses resultados reforçam que a produtividade participa da estrutura multivariada do sistema, mas não de forma linear e independente das demais variáveis.

A modelagem dos semivariogramas evidenciou dependência espacial para os atributos avaliados, com predomínio do modelo exponencial em ambas as profundidades. Na camada de 0,00 a 0,25 m, TCH e K apresentaram dependência espacial forte, enquanto os demais atributos apresentaram dependência moderada. Na profundidade de 0,25 a 0,50 m, todas as variáveis apresentaram dependência espacial moderada. Os alcances observados indicaram continuidade espacial em escalas relativamente curtas, compatível com a heterogeneidade local da área e com

a interpretação de que o ambiente produtivo se organiza em unidades espaciais pequenas a intermediárias. Nesse sentido, o alcance mostrou-se particularmente relevante para caracterizar a escala espacial da variabilidade e subsidiar a reflexão sobre zonas específicas de manejo.

A validação cruzada mostrou que o desempenho preditivo dos modelos variou entre as variáveis e entre as profundidades analisadas. Algumas variáveis apresentaram melhor capacidade relativa de predição, enquanto outras exibiram ajustes mais modestos, indicando que a presença de dependência espacial não implica, necessariamente, elevada precisão preditiva. Assim, os modelos ajustados devem ser compreendidos como instrumentos úteis para a análise espacial e para a interpretação exploratória do sistema, desde que suas limitações sejam explicitamente reconhecidas.

Em conjunto, os resultados demonstram que a integração entre estatística multivariada e geoestatística constitui uma abordagem adequada para o estudo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e de sua relação com a produtividade da cana-de-açúcar. Essa abordagem permitiu identificar padrões espaciais relevantes, caracterizar o ambiente produtivo em diferentes escalas e gerar subsídios para a construção e avaliação de zonas específicas de manejo, com potencial aplicação na otimização do uso de insumos, na racionalização do manejo e na sustentabilidade do sistema produtivo.

Como perspectiva de aprofundamento, recomenda-se que estudos futuros incorporem outras variáveis de manejo e de ambiente, bem como estratégias analíticas complementares, com o objetivo de ampliar a capacidade preditiva dos modelos e refinar a compreensão da dinâmica espacial da produtividade em áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. S.; GUIMARÃES, E. C. Geoestatística e análise fatorial exploratória para representação espacial de atributos químicos do solo, na cafeicultura. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 195-203, abr./jun. 2016.
- AQUINO, R. E. de; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, I. A. de; MANTOVANELI, B. C.; SOARES, M. D. R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 397-406, 2014.
- BERNARDI, A. C. C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1027681/agricultura-de-precisao-resultados-de-um-novo-olhar>. Acesso em: 23 fev. 2026.
- BHATTI, A. U.; MULLA, D. J.; FUHRER, J. A. Identifying and removing spatial correlation from yield experiments. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 6, p. 1523-1528, 1991. DOI: 10.2136/sssaj1991.03615995005500060005x.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x.
- CARDOZO, N. P. et al. A multivariate approach to determine the economic profitability of sugarcane production under diverse climate conditions in Brazil. **Sugar Tech**, [s. l.], v. 22, p. 103-115, 2020. DOI: 10.1007/s12355-019-00754-5.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 695-703, 2003. DOI: 10.1590/S0100-06832003000400014.
- CATELAN, M. G. et al. Rendimento e qualidade da cana-de-açúcar utilizando a suscetibilidade magnética do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 79, n. 4, e20200329, 2022. DOI: 10.1590/1678-992X-2020-0329.
- CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejo em café conilon. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 61-68, 2007. DOI: 10.1590/S1415-43662007000100008.

CLIMATE-DATA. São José do Rio Preto – São Paulo. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/sao-jose-do-rio-preto-4231/>. Acesso em: 19 nov. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF: Conab, v. 2, n. 1, 1. levantamento, safra 2024/25, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 23 jan. 2026.

CORRÊA, A. R. et al. Aspectos do sistema silvipastoril correlacionados com propriedades de um Neossolo Quartzarênico típico em Mato Grosso do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 438-447, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbcs20150018.

CRESSIE, Noel A. C. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley & Sons, 1991.

CRESSIE, Noel A. C. **Statistics for spatial data**. Rev. ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.

DALCHIAVON, F. C. et al. Variabilidade espacial da produtividade do feijoeiro correlacionada com atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 908-916, 2011. DOI: 10.1590/S0006-87052011000400025.

DALCHIAVON, F. C. et al. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 453-461, 2012. DOI: 10.1590/S1806-66902012000300006.

DALCHIAVON, F. C. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com soja sob plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 16, n. 2, p. 144-154, 2017. DOI: 10.5965/223811711622017144.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Solos brasileiros**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros>. Acesso em: 17 nov. 2025.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. da. Visão além do alcance: uma introdução à análise fatorial. **Opinião Pública**, Campinas, v. 16, n. 1, p. 160-185, 2010. DOI: 10.1590/S0104-62762010000100007.

FREITAS, L. et al. Análise multivariada na avaliação de atributos de solos com diferentes texturas cultivados com cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 2, p. 224-233, 2014. DOI: 10.1590/S1806-66902014000200002.

GAROFALO, D. F. T. et al. **Dinâmica na cultura da cana-de-açúcar no Brasil: 1990 a 2018**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2020.

GAZOLA, R. N. et al. Variabilidade espacial das concentrações de nutrientes foliares da soja correlacionadas com atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 64, n. 4, p. 441-449, 2017. DOI: 10.1590/0034-737X201764040014.

GERHARDT, E. J.; FINGER, C. A. G.; LONGHI, S. J.; SCHUMACHER, M. V. Contribuição da análise multivariada na classificação de sítios em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze., baseada nos fatores físicos e morfológicos do solo e no conteúdo de nutrientes da serapilheira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 41-57, 2001. DOI: 10.5902/198050981653.

GIOIA, M. T. **Produtividade e componentes resultados da cana-de-açúcar correlacionados com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho distrófico**. 2011. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2011.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MATA, J. D. V. Análises exploratórias e geoestatísticas da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1149-1157, 2001.

HOU, D.; O’CONNOR, D.; NATHANAIL, P.; TIAN, L.; MA, Y. Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: a critical review. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 231, pt. 1, p. 1188-1200, 2017. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.07.021.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS (IAC). **Solos do Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 2015. Disponível em: <https://solossp.iac.sp.gov.br/>. Acesso em: jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção agrícola municipal 2022: culturas temporárias e permanentes. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em: 27 fev. 2026.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, New York, v. 23, n. 3, p. 187-200, 1958. DOI: 10.1007/BF02289233.

KUMMER, L. et al. Uso da análise de componentes principais para agrupamento de amostras de solos com base na granulometria e em características químicas e mineralógicas. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 11, n. 6, p. 469-480, 2010.
MARIN, F. R. **A cana-de-açúcar e o solo: interações e manejo**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2022.

MATHERON, G. **Traité de géostatistique appliquée**. Tome 1 e 2. Paris: Technip, 1962.

MONTANARI, R. et al. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1811-1822, 2010.

MONTANARI, R. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e físicos de um latossolo em diferentes profundidades sob o cultivo de cana-de-açúcar. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 1-30, 2025. DOI: 10.55905/oelv23n2-114.

NACHILUK, K. Alta na produção e exportações de açúcar marcam a safra 2020/21 de cana. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 16, n. 6, p. 1-5, jun. 2021.

NETO, P. H. W. et al. Correção da acidez do solo em função de modos de incorporação de calcário. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 257-261, 2000. DOI: 10.1590/S0103-84782000000200010.

OLEA, R. A. **Geostatistics for engineers and earth scientists**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.

PELLIN, D. M. P. **Dependência espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Aquidauana, 2013.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.

RIETRA, R. P. J. J. et al. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 48, n. 16, p. 1895-1920, 2017. DOI: 10.1080/00103624.2017.1407429.

SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S.; CECÍLIO, R. A. A classification for a geostatistical index of spatial dependence. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, e0150007, 2016.

SILVA, C. S. da; SILVA, F. L. C. da; PEREIRA, M. G. Análise multivariada e geoestatística no estudo da distribuição espacial de atributos do solo e da vegetação. In: **Silvicultura e manejo florestal**: técnicas de utilização e conservação da natureza. [S. l.: s. n.], 2020. v. 1, p. 14-28. DOI: 10.37885/201202646.

SILVA, D. L. G. et al. Cana-de-açúcar: aspectos econômicos, sociais, ambientais, subprodutos e sustentabilidade. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 10, n. 7, e44410714163, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i7.14163.

SILVA, E. N. da S. et al. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijão-caupi irrigado no cerrado de Roraima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, 2015.

SILVA, G. C. et al. Atributos do solo e desempenho do cupuaçuzeiro consorciado com espécies florestais sob duas densidades de pupunheira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 33, n. 3, e68207, 2023. DOI: 10.5902/1980509868207.

SÓRIA, J. E. **Correlações lineares e espaciais entre atributos físico-químicos de solos de diferentes ambientes de produção de cana-de-açúcar no noroeste do Estado de São Paulo**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2014.

SOUZA, Z. M. et al. **Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar**. [S. l.], 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/238682373>. Acesso em: 23 abr. 2026.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. **Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 40, n. 1, p. 48-56, 2010. DOI: 10.1590/S0103-84782009005000243.

SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. **Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 44, n. 2, p. 261-268, 2014. DOI: 10.1590/S0103-84782014000200011.

TAVANTI, R. F. R. et al. What is the impact of pasture reform on organic carbon compartments and CO₂ emissions in the Brazilian Cerrado?. **Catena**, Amsterdam, v. 194, 104702, 2020.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Spatial dependence and interpolation of soil properties in West Sumatra, Indonesia. 1. Anisotropic variation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 6, p. 1391-1395, 1986.

VALADÃO, F. C. A. et al. Uso de análise multivariada para caracterização de solos sob diferentes usos na Amazônia Meridional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 43, e0180229, 2019. DOI: 10.1590/18069657rbcs20180229.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. Santa Maria: UFSM, 2005. Disponível em: <https://www.ufsm.br/editoras/>. Acesso em: 23 abr. 2026.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. Geostatistics for environmental scientists. 2. ed. **Chichester**: John Wiley & Sons, 2007.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geoestatística para cientistas ambientais**. Oxford: Oxford University Press, 2009.

XAVIER, F. A. S. Solo: definição e importância. In: BORGES, A. L. (ed.). **Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. cap. 1, p. 15-25.

YOGITHA, N. et al. Sugarcane and the Brazilian economy: current perspectives. **International Sugar Journal**, [s. l.], v. 122, n. 1458, p. 486-491, 2020.