



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO - UFRPE
UNIDADE ACADÊMICA DE SERRA TALHADA – UAST
BACHARELADO EM AGRONOMIA

EDNAETE BEZERRA DE ALCÂNTARA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DO TEOR DE CARBONO ORGÂNICO
DO SOLO EM ÁREAS DE MANGA (*MANGIFERA INDICA* L.) NO
SUBMÉDIO DO VALE DO SÃO FRANCISCO**

SERRA TALAHADA – PE

2026

EDNAETE BEZERRA DE ALCÂNTARA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DO TEOR DE CARBONO ORGÂNICO
DO SOLO EM ÁREAS DE MANGA (*MANGIFERA INDICA* L.) NO
SUBMÉDIO DO VALE DO SÃO FRANCISCO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Bacharelado em
Agronomia na Unidade Acadêmica de
Serra Talhada (UAST) da Universidade
Federal Rural de Pernambuco (UFRPE),
como requisito parcial para a obtenção do
título de Engenheira Agrônoma.

Orientador (a): José Raliuson Inácio
Silva

SERRA TALAHADA – PE
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Danilo Trindade Barbosa – CRB-4 002285/O

A347v Alcântara, Ednaete Bezerra de.
Variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo em áreas de manga (*mangifera indica* L.) no submédio do Vale do São Francisco / Ednaete Bezerra de Alcântara. – Serra Talhada, 2026.
62 f.; il.

Orientador(a): José Raliuson Inácio Silva.
Co-orientador(a): Ednaete Bezerra.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica Serra Talhada - UAST, Bacharelado em Agronomia, Serra Talhada, BR-PE, 2026.

Inclui referências.

1. Solos. 2. Geoestatística. 3. Geoprocessamento. 4. Mapas 5. Manga. I. Silva, José Raliuson Inácio, orient. II. Título

CDD 630

EDNAETE BEZERRA DE ALCÂNTARA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DO TEOR DE CARBONO ORGÂNICO
DO SOLO EM ÁREAS DE MANGA (*MANGIFERA INDICA* L.) NO
SUBMÉDIO DO VALE DO SÃO FRANCISCO.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Bacharelado em
Agronomia na Unidade Acadêmica de
Serra Talhada (UAST) da Universidade
Federal Rural de Pernambuco (UFRPE),
como requisito parcial para a obtenção do
título de Engenheira Agrônoma.

Aprovado em: 16/07/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Raliuson Inácio Silva – UAST/UFRPE
Orientador

Prof. Dr. Elisiane Alba (Examinador Interno)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Ailton Carvalho (Examinador Interno)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado discernimento, sabedoria e por ter me abençoado durante todo o processo e até o presente momento, fortalecendo-me durante os momentos difíceis nos quais pensei em desistir.

Aos meus pais, Luciede Bezerra de Alcântara e Laércio José de Alcântara, por serem minha maior fonte de inspiração, força e coragem, e por me impulsionarem na busca por melhores condições de vida para nós, permitindo-me demonstrar-lhes que o estudo abres portas.

Ao meu orientador, José Raliuson Inácio Silva, e à sua esposa e minha grande amiga, Edinete Sousa, pelo apoio e incentivo constantes durante toda a jornada da graduação. Agradeço a Raliuson pela excelente orientação, por todo o conhecimento transmitido e pela confiança depositada em meu trabalho. À Edinete, o meu muito obrigada por ter sido um pilar nos momentos bons e ruins da vida acadêmica, pelo carinho e pela torcida de sempre; sem a ajuda de vocês, eu não teria chegado até aqui.

À minha amiga, Gabrielle Siqueira, pelo o apoio e incentivo a não desistir quando achei que não conseguiria seguir em frente, e por demonstrar tanto carinho e cuidado, sempre me lembrando do que sou capaz.

À minha amiga Amanda Rayane e aos seus pais, Iracy Barbosa e Joaquim Ângelo, por terem me acolhido em sua casa no início da graduação em período online, quando eu não tinha acesso à internet em casa. Sem a ajuda de vocês, eu nem teria tentado o curso; se cheguei até aqui, foi graças a esse apoio. Amanda, minha amiga, obrigada por todos os dias compartilhados, tanto os felizes quanto os tristes. Sou imensamente grata pelas conversas, pelo incentivo e por acreditar no meu potencial. Acima de tudo, obrigada por não soltar a minha mão quando pensei em largar tudo e voltar para casa.

Às minhas irmãs, Ednaeli Bezerra e Ednairam Bezerra, e aos meus irmãos, Ednaelson José, Hélio Pedro e Edinelsom Bezerra, que acompanharam toda esta trajetória. Em especial à Ednaeli, meu muito obrigada pelo incentivo, apoio constante e por todas as orações pedindo proteção e discernimento para mim.

À minha amiga Carol, por todos os conselhos, pelo companheirismo, pelo incentivo constante e por sempre me incluir em suas orações.

À minha amiga Edilene Ferreira e aos seus pais, Mariza e Edimilson, pelo apoio, pelos conselhos preciosos e pelas palavras de encorajamento que sempre me fortaleceram.

Ao técnico Agrícola Nelram Cabral pelos ensinamentos sobre o cultivo de maracujá e pelo incentivo e apoio no início da graduação.

À minha amiga, Beatriz Jardeu, por sempre ter me colocado em suas orações e pelo carinho e apoio durante essa jornada.

À dona Lena que foi uma grande incentivadora da minha jornada de vida acadêmica.

À minha tia Beta, por sempre está me apoiando e colocando-me em suas orações.

À Aparecida Honorato, por ter cedido espaço em sua casa para que eu pudesse acessar internet para estudar.

A todos muito abrigada, serei eternamente grata!

“Para que todos vejam, e saibam, e considerem, e juntamente entendam que a mão do senhor fez isso.” (Bíblia sagrada, 2015, Isaías 41:20).

RESUMO

Este trabalho analisou a variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo em áreas cultivadas com manga no Submédio do Vale do São Francisco, em três propriedades localizadas nos municípios de Petrolina, Cabrobó e Petrolândia, no estado de Pernambuco. A pesquisa teve como objetivo caracterizar a distribuição espacial do carbono orgânico nas camadas de 0–20 cm e 20–40 cm, utilizando estatística descritiva e técnicas geoestatísticas, como semivariograma e krigagem, a fim de subsidiar o manejo localizado do solo. As amostras de solo foram coletadas em malha georreferenciada e posteriormente submetidas à análise química para determinação do carbono orgânico. Os dados foram avaliados por meio de medidas estatísticas, como média, mediana, desvio-padrão e coeficiente de variação, além da análise da dependência espacial. Foram testados diferentes modelos de semivariograma, permitindo identificar o comportamento espacial do atributo em cada área e profundidade estudada. Com base nesses resultados, foram elaborados mapas de distribuição do carbono orgânico, evidenciando a variabilidade existente dentro dos pomares. De forma geral, observou-se que os maiores teores médios de carbono orgânico ocorreram na camada superficial de 0–20 cm, enquanto houve redução dos valores na camada de 20–40 cm, indicando menor acúmulo de matéria orgânica em profundidade. Entre as áreas avaliadas, Petrolândia apresentou os maiores valores médios de carbono orgânico, seguida de Petrolina e Cabrobó, demonstrando diferenças importantes entre os sistemas de manejo e as condições locais. A análise geoestatística mostrou dependência espacial do atributo em todas as áreas, o que confirma a existência de padrões de distribuição no solo e reforça a necessidade de estratégias específicas de manejo. Os mapas gerados por krigagem permitiram visualizar zonas com maiores e menores concentrações de carbono orgânico, mostrando que a distribuição desse atributo não é homogênea nas áreas estudadas, destacando a localidade de Petrolândia com os maiores teores de Carbono orgânico no solo. Concluiu-se que há redução considerável do carbono orgânico na camada subsuperficial, que a distribuição desse atributo varia entre as áreas produtivas de manga, e que a geoestatística é uma ferramenta importante para diagnosticar essa variabilidade. Dessa forma, os resultados reforçam a utilidade de mapas de variabilidade espacial para orientar estratégias de manejo, conservação do solo e incremento da matéria orgânica em pomares de manga.

Palavras-chave: Solo, Krigagem, Geoprocessamento, Semivariograma, Mapa, Matéria orgânica

ABSTRACT

This study analyzed the spatial variability of soil organic carbon content in mango-growing areas in the Submédio do Vale do São Francisco, across three farms located in the municipalities of Petrolina, Cabrobó, and Petrolândia, in the state of Pernambuco, Brazil. The research aimed to characterize the spatial distribution of organic carbon in the 0–20 cm and 20–40 cm soil layers using descriptive statistics and geostatistical techniques, such as semivariogram analysis and kriging, in order to support site-specific soil management. Soil samples were collected in a georeferenced grid and subsequently subjected to chemical analysis to determine organic carbon content. The data were evaluated using statistical measures such as mean, median, standard deviation, and coefficient of variation, as well as spatial dependence analysis. Different semivariogram models were tested, allowing the spatial behavior of the attribute to be identified in each area and depth studied. Based on these results, organic carbon distribution maps were produced, highlighting the variability existing within the orchards. In general, the highest mean organic carbon contents were observed in the surface layer of 0–20 cm, while lower values were recorded in the 20–40 cm layer, indicating less accumulation of organic matter at greater depth. Among the evaluated areas, Petrolândia showed the highest mean organic carbon values, followed by Petrolina and Cabrobó, revealing important differences among management systems and local conditions. Geostatistical analysis showed spatial dependence of the attribute in all areas, confirming the existence of distribution patterns in the soil and reinforcing the need for specific management strategies. The kriging maps made it possible to visualize zones with higher and lower organic carbon concentrations, showing that the distribution of this attribute is not homogeneous in the studied areas, highlighting the Petrolândia location as having the highest soil organic carbon levels. It was concluded that there is a considerable reduction in organic carbon in the subsurface layer, that the distribution of this attribute varies among mango production areas, and that geostatistics is an important tool for diagnosing this variability. Therefore, the results reinforce the usefulness of spatial variability maps to guide management strategies, soil conservation, and the increase of organic matter in mango orchards.

Keywords: Soil, kriging, Geoprocessing, Semivariogram, Map, Organic matter

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização das áreas de estudo e seus grids de amostragem	28
Figura 2 - Prancha 1; procedimentos metodológicos, peneiração das TSFA (A); pesagem das amostras e organização (B, C e D), solução de dicromato de potássio (E) e amostras com o dicromato de potássio (F).	29
Figura 3 - Prancha 2; amostras com os agentes (G); solução de sulfato ferroso amoniacal (H); titulação (I) e coloração ideal (verde) após a titulação (J).	30
Figura 4 - Semivariograma experimental (Melhor modelo: Gaussiano) do teor de carbono orgânico do solo na área de Cabrobó na profundidade de 0-20 cm...	39
Figura 5 - Mapa de variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo na camada de 0-20 cm em área de manga de Cabrobó, obtido por krigagem	40
Figura 6 - Semivariograma experimental do tipo Esférico da área de Cabrobó na profundidade de 20-40 cm.....	42
Figura 7 - Mapa de variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo na camada de 20-40 cm em área de manga de Cabrobó, obtido por krigagem	43
Figura 8 - Semivariograma experimental do tipo Exponencial da área de Petrolina na profundidade de 0-20 cm.	45
Figura 9 - Mapa de variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo na camada de 0-20 cm em área de manga de Petrolina, obtido por krigagem.	45
Figura 10 - Semivariograma experimental do tipo da área de Petrolina na profundidade de 20-40 cm.....	47
Figura 11 - Mapa de variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo na camada de 20-40 cm em área de manga de Petrolina, obtido por krigagem	48
Figura 12 - Semivariograma experimental do tipo Exponencial da área de Petrolândia na profundidade de 0-20 cm.	50
Figura 13 - Mapa de variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo na camada de 0-20 cm em área de manga de Petrolândia, obtido por krigagem	51
Figura 14 - Semivariograma experimental do tipo Exponencial da área de Petrolândia na profundidade de 20-40 cm.	53

Figura 15 - Mapa de variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo na camada de 20-40 cm em área de manga de Petrolândia, obtido por krigagem	53
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise da estatística descritiva do CO nas áreas nas camadas de 0-20 e 20-40	35
Tabela 2 - Análise da estatística descritiva do MO nas áreas nas camadas de 0-20 e 20-40	37
Tabela 3 - Métricas de erro da validação cruzada dos semivariogramas experimentais da área de Cabrobó na profundidade de 0-20 cm.....	39
Tabela 4 - Porcentagem de área ocupada por classe de Carbono orgânico do solo em área de manga em Cabrobó na profundidade de 0-20 cm.	41
Tabela 5 - Métricas de erro da validação cruzada dos semivariogramas experimentais da área de Cabrobó na profundidade de 20-40 cm.....	42
Tabela 6 - Porcentagem de área ocupada por classe de Carbono orgânico do solo em área de manga em Cabrobó na profundidade de 20-40 cm	44
Tabela 7 - Métricas de erro da validação cruzada dos semivariogramas teóricos da área de Petrolina na profundidade de 0-20 cm.	44
Tabela 8 - Porcentagem de área ocupada por classe de Carbono orgânico do solo em área de manga em Petrolina na profundidade de 0-20 cm.....	46
Tabela 9 - Métricas de erro da validação cruzada dos semivariogramas experimentais da área de Petrolina na profundidade de 20-40 cm.	47
Tabela 10 - Porcentagem de área ocupada por classe de Carbono orgânico do solo em área de manga em Petrolina na profundidade de 20-40 cm.....	49
Tabela 11 - Métricas de erro da validação cruzada dos semivariogramas teóricos da área de Petrolândia na profundidade de 0-20 cm	49
Tabela 12 - Porcentagem de área ocupada por classe de Carbono orgânico do solo em área de manga em Petrolândia na profundidade de 0-20 cm.....	51
Tabela 13 - Métricas de erro da validação cruzada dos semivariogramas experimentais da área de Petrolândia na profundidade de 20-40 cm.	52
Tabela 14 - Porcentagem de área ocupada por classe de Carbono orgânico do solo em área de manga em Petrolândia na profundidade de 20-40 cm.	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 A cultura da manga	17
3.2 A mangicultura no Vale do Submédio São Francisco	18
3.3 Agricultura de precisão	19
3.4 Variabilidade espacial de atributos químicos do solo	21
3.5 Geoestatística	23
3.6 Métodos de espacialização	23
3.7 Semivariogramas	24
3.8 Carbono orgânico e matéria orgânica no solo em áreas de agricultura	25
4. METODOLOGIA	27
4.1 Localização e caracterização das áreas de estudo	27
4.2 Coleta de solo	Erro! Indicador não definido.
4.3 Análise do Carbono Orgânico no solo	28
4.4 Análise geoestatística	31
4.5 Procedimentos para espacialização do carbono orgânico do solo	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 Estatística descritiva do teor de carbono orgânico em áreas de manga	35
5.2 Variabilidade espacial do CO em área de manga em Cabrobó	38
5.3 Variabilidade espacial do CO em área de manga em Petrolina	44
5.4 Variabilidade espacial do CO em área de manga em Petrolândia	49
6 CONCLUSÃO	55
7 BIBLIOGRAFIA	56

1. INTRODUÇÃO

A manga mundialmente se sobressai como uma das frutas de maior valor comercial em muitas regiões, especialmente as tropicais. Globalmente é considerada uma das frutas mais delicadas e apreciadas do mundo (CUNHA et al., 1994). Sendo consumida principalmente *in natura*, além de ser transformada em vários produtos, tais como polpas simples, sucos, sorvetes, geleias, gelatinas, compotas, entres outros. Além disso, a fruta apresenta um valor nutritivo significativo (Fonseca et al., 2006).

No Brasil, a fruta é cultivada em todas as áreas fisiográficas por seu cultivo em sistemas irrigados em condições semiáridas brasileiras estima-se em 69% e 76% da área plantada e de produção no país, assim como também contempla 90% da exportação nacional de manga (EMBRAPA, 2010).

Mundialmente o Brasil é considerado um dos maiores produtores de manga, ocupando a 6ª posição do ranking de maior produção, ficando abaixo apenas da Índia, Indonésia, China, Paquistão e México. Embora esteja presente em sua totalidade no país, as regiões Nordeste e Sudeste são as mais significativas para o mercado, concentrando 99% da produção nacional, destacando preferencialmente o Nordeste com 82% da produção (EMBRAPA, 2024).

Segundo Lobato (2023), destaca os principais estados produtores da frutífera, sendo a Bahia, Pernambuco e São Paulo, com produção de 633,151 toneladas (t), 444.750 (t) e 164.326 (t), respectivamente.

Por meio da agricultura de precisão (AP), o produtor consegue realizar a aplicação adequada de fertilizantes que são utilizados para elevar a produtividade das culturas, assim como substituir os nutrientes do solo que são exportados na colheita. Esse tem sido essencial para reverter a propensão de declínio dos nutrientes e da produtividade no solo (Artuzo, 2017).

As partículas minerais do solo promovem ao sistema variadas melhorias desde de quando dispostas de maneira a formar agregados, destacando-se a proteção contra os processos erosivos, aeração do solo, favorecimento no desenvolvimento do sistema radicular dos vegetais, proteção da matéria orgânica do solo, entre outros.

Nesse contexto o teor de carbono orgânico pode ser utilizado como um indicativo da qualidade física do solo e biológica, uma vez que o mesmo está relacionado com os atributos como matéria orgânica, textura, microbiano e teor de carbono orgânico e também na estabilidade dos agregados do solo (Neto et al., 2015)

Miguel (2010) relata em seu trabalho que a variabilidade espacial dos variados atributos do solo incluídos no desenvolvimento da produção agrícola em grandes extensões de terras, pode ser moderadamente elevada. E os atributos químicos do solo demonstram-se de maneira bem diferenciada ao longo do horizonte, após passarem por contínuas modificações ocasionadas pelos trabalhos agrícolas e, por consequência, dos processos erosivos.

Nesse aspecto, Neto et al. (2015), ainda afirmam em seu trabalho que a estrutura do solo é dependente das ações entre os constituintes orgânicos e as partículas primárias, para que haja o estabelecimento dos agregados. Sendo o carbono orgânico total um dos fatores que interferem na agregação do solo, visto que o mesmo possui uma relevância na estabilidade dos agregados.

A análise da dependência espacial de variáveis associadas com a agricultura de precisão é de suma importância para a caracterização da terra e para a confecção de mapas temáticos, onde eles facilitam a compreensão do comportamento e do evento dessas variáveis nas áreas de estudo, como resultado, da interferência no processo de produção (Cruz, 2014).

Tendo em vista que, a variabilidade espacial pode ser analisada através das técnicas de geoestatística, que se baseia na estimativa das variáveis regionalizadas, na qual os números obtidos de uma variável estão, de certa forma, relacionados a sua distribuição espacial, de modo que estudos realizados a curtas distâncias se equiparam mais que aos realizados a distâncias maiores (Miguel, 2010).

Diante disso, o presente trabalho apresentou como objetivo a realização da análise da variabilidade espacial do carbono orgânico em três áreas produtivas de manga.

2. OBJETIVOS

2.1. *Objetivo Geral*

Objetivou-se analisar a variabilidade espacial do carbono orgânico de três áreas produtivas de manga.

2.2. *Objetivos específicos*

- Caracterizar a variabilidade espacial do Carbono orgânico do solo em áreas cultivadas com manga;
- Avaliar a eficiência de diferentes métodos de interpolação para confecção de mapas de variabilidade espacial;
- Confeccionar mapas de variação do carbono orgânico total do solo para cultura da manga.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. *A cultura da manga*

A mangueira (*Mangifera indica* L.), teve sua origem no Sul da Ásia, precisamente na Índia, onde é cultivada há mais de 4.000 anos, e do arquipélago Malaio, de onde se propagou por outras áreas do mundo, tais como as Américas (Cunha et al., 1994). Foi levada de leste a oeste da África e América pelas rotas comerciais marítimas entre Europa e Ásia e em seguida para o Brasil (Cunha et al., 1994; Lobato, 2023), o primeiro país a cultivar a mangueira nas Américas, com a introdução dos primeiros cultivos da cultura no estado da Bahia pelos portugueses no século XVI (16) (Lobato, 2023; Simão, 1971).

A mangicultura no território nacional, historicamente era realizada de modo extensivo, sendo predomínio, há algumas décadas, da existência de pomares de mangueira em propriedades pequenas sem tecnologia adequada e de plantios esparsos nos quintais de residências urbanas e de chácaras (Neto, 2009). A exploração econômica da espécie era sustentada quase exclusivamente no extrativismo das variedades nativas ou crioulas, como Bourbon, Espada, Coquinho, Rosa e Ouro, entre outras, e firmava-se no comércio interno (Gayet, 1994). Com o passar das décadas, o perfil da atividade alterou-se subitamente, observando-se a crescente implantação de cultivos das variedades de mangueira oriundas da América do Norte, tais frutos eram geralmente exportados para os mercados internacionais (Neto, 2009).

Os primeiros pomares das referidas variedades- Tommy Atkins, Haden e Keitt- foram implantados especialmente durante a década de 1970, na Região Sudeste, precisamente no estado de São Paulo, de onde foram disseminadas gradativamente para o restante do país, e pelos polos da agricultura irrigada do Nordeste, nos anos posteriores. No Nordeste, o cultivo da manga é realizado em todos os estados, especialmente em áreas irrigadas da região semiárida, que possuem excelentes condições para o desenvolvimento da cultura e obtenção de uma alta produtividade e qualidade de frutos (Oliveira et al., 2010; Souza et al., 2002).

A cultura da mangueira no Brasil pode, diante do exposto, ser separado em duas fases bem diferentes: a primeira, caracterizada pelos cultivos

extensivos de variedades locais, com ausência de tecnologias adequadas e direcionadas essencialmente ao mercado interno, e a segunda, caracterizada pelo alto nível tecnológico utilizado em todas atividades relacionadas ao manejo da cultura, tais como irrigação, indução floral e nutrição mineral, pelo uso de variedades oriundas do continente Norte-Americano e pela estabilização da participação nacional mediante conquista dos diversos mercados internacionais, gravada especialmente pelo Vale do São Francisco, principalmente na região do Submédio São Francisco (Araújo et al., 2002; Souza et al., 2002).

Atualmente as variedades de mangas mais comercializadas e populares são oriundas da Flórida, destacando-as, a Haden, Kent, Tommy e Palmer, isso é devido às suas características, como firmeza, um sabor agradável, aroma, pouca ou com nenhuma fibra, e bem suculentas, o que influencia na comercialização das frutíferas na atualidade (Lobato, 2023).

No Brasil, existe uma grande diversidade de manga com fins para diferentes utilizações, tais como exemplo, a manga Tommy Atkins, que abrange cerca de 80% das plantações, já no México, 50% das exportações são da mesma. Na Venezuela, a variedade Haden representa 80% das exportações. Tratando-se para uso do consumo in natura, tem-se as variedades Palmer, Keity, Tommy Atkins, e Haden. Já para a produção de compota em calda, as frutas mais utilizadas são a São Quirino, Carlota, Imperial e Nom Plus Ultra. Existem outras variedades utilizadas para a fabricação de néctar também, como Carlota, Palmer e Manga D`água (Donadio, 1980).

3.2. A mangicultura no Vale do Submédio São Francisco

O Vale do Submédio São Francisco, caracteriza-se por possuir um clima semiárido tropical, com reduzida umidade, baixas precipitações pluviométricas e o elevado fotoperíodo que oferece condições ambientais expressivamente favoráveis à exploração de frutíferas (Araújo; Lima, 2009).

O desenvolvimento da mangicultura no Vale do Submédio São Francisco, inicialmente foi estimulado pela perspectiva de atender ao comércio externo, porém o mercado nacional ainda concentrava a maior parte da produção. A presença de um mercado interno de maior dimensão confirma ao setor uma certa

autonomia na organização dos métodos de produção, o tal compreende produtores de diferentes categorias (Neto, 2009).

Segundo Neto (2009) recentemente, o Vale do Submédio São Francisco apresentou mais de 90% das exportações nacionais de mangas, concentrando as variedades Tommy Atkins, Kent, Keitt, Haden e Palmer, ressaltando que as exportações do Vale do Submédio São Francisco são destinadas principalmente à Europa e aos Estados Unidos.

É considerado um dos principais polos de produção e de maior exportação de manga nacionalmente, possuindo uma área de aproximadamente de 22 mil ha, aplicados principalmente nos municípios de Petrolina, em Pernambuco, e Juazeiro, na Bahia. Sendo cerca de 70% desse total destinado aos cultivos que estão em crescente ou plena produção e 30% ainda em processo de implantação. Apresentam pomares de alto nível tecnológico e grandes consumidores de capital. A manga é explorada na região tanto pelas seções da agricultura empresarial, expressa pelas grandes, média e pequenas empresas agrícolas localizadas nas variadas fronteiras públicas de irrigação ou nas margens do Rio São Francisco, assim como pelos produtores familiares, localizados nas áreas dessas fronteiras irrigadas (Araújo; Lima, 2009).

3.3. Agricultura de precisão

A agricultura de precisão, também conhecida por AP no Brasil, é um sistema de produção utilizado por agricultores de países com tecnologia avançada, denominado por eles de *Precision Agriculture*, *Precision Farming*, *Site-Specific Crop Management* (Manzatto et al., 1999).

A mesma teve seu início na década de 80, quando na Europa foi produzido o primeiro mapa de produtividade e, nos Estados Unidos, foi feita a primeira adubação com doses variadas. Mas, o processo que determinou a implementação da AP foi com o surgimento do GPS (Sistema de Posicionamento Global por Satélites), no ano de 1990 (Molin, 2013).

No Brasil, a agricultura de precisão foi inserida na metade da década de 90, porém os avanços mais significativos só ocorreram a partir do ano 2000, com a utilização de máquinas dotadas de receptores GPS e produção de mapas de

produtividade (SENAR, 2019). Todavia, nos últimos anos vem sendo observado o crescimento da AP através da utilização de amostragens georreferenciadas para mapeamento da fertilidade do solo e distribuição de corretivos em taxa variável (Resende et al., 2010).

A resolução atualmente usada é a de enfocar enormes áreas e compreendê-las como homogêneas, considerando o conceito da necessidade média para a aplicação de insumos, como fertilizantes, água, defensivos, entre outros, fazendo assim, por exemplo, a mesma quantidade e/ou formulação de fertilizante seja usada para toda a área, atendendo somente as necessidades médias e não levando em conta, desta forma, as necessidades específicas de cada divisão do campo. O mesmo ocorre para os demais insumos, ocasionando como resultado em uma lavoura com desuniformidade de produtividade (Capelli, 1999).

De acordo com Fatorgis (1998), a agricultura de precisão assegura reverter a situação atual possibilitando a aplicação de insumos agrícolas nas áreas corretas e nas quantidades pretendidas. O termo AP abrange a utilização de tecnologias atuais para o manejo do solo, culturas e insumos, de modo correto às variações espaciais e temporais em relação a fatores que afetam a produtividade das mesmas (Tschiedel; Ferreira, 2002).

Batchelor et al. (1997) afirma que a agricultura de precisão é uma filosofia no manejo dentro de uma fazenda na qual os agricultores são capazes de identificar a variabilidade presente em um campo, e, portanto, manejar aquela variabilidade para aumentar mais a produtividade e os lucros.

Tschiedel; Ferreira (2002) relatam em seu trabalho que o manejo da variabilidade é o segredo para o uso decisivo da tecnologia de agricultura de precisão. E que o mapeamento detalhado dos fatores de produção e aplicação localizada de insumos são os fundamentos básicos do sistema.

Dallmeyer; Schlosser (1999) argumentam em seu trabalho que a agricultura de precisão reúne o uso de tecnologias atuais para a realização do manejo do solo, insumos e culturas de modo mais correto para as variações espaciais e temporais nos elementos que prejudicam a produtividade das mesmas. O que tem levado a esse novo mecanismo de atividade agrícola é o uso de três tecnologias vigentes, que são o uso de sistemas de informações

geográficas (SIG), o sensoriamento remoto, e o sistema de posicionamento global (GPS).

A agricultura de precisão é um conceito que envolve o desenvolvimento e a adoção de técnicas de gestão, aprimorado no aprendizado com o principal objetivo de otimizar a rentabilidade. Este sistema possibilita atividades de gerenciamento com computador pessoal, possibilitando administrar cada local do campo corretamente, se é economicamente e tecnicamente oportuno administrá-lo a este nível (Tschiedel; Ferreira, 2002).

Baseada na análise da variabilidade espacial, constituindo um anexo com a geoestatística, cuja causa é o estudo da variabilidade espacial para aperfeiçoar o desenvolvimento de modificação das informações pontuais em superfície contínua (Clark, 1984).

Segundo Gentil & Ferreira (1999) a agricultura de precisão garante maiores benefícios para os produtores desse sistema, tais como a redução do grave problema do risco da atividade agrícola; redução dos custos da produção; uma melhor, rápida e certa tomada de decisão; um controle de toda a situação, pela utilização da informação; maior produtividade da lavoura; um maior tempo livre para o administrador; e uma melhoria do meio ambiente pela redução do uso de defensivos.

3.4. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo

A variabilidade espacial dos atributos do solo origina-se desde sua origem e continua após eles chegarem ao estado de equilíbrio dinâmico. O solo por ser um sistema altamente heterogêneo, o estudo da sua variabilidade espacial é essencial, necessitando ser levado em conta no momento da amostragem. Relacionado às muitas combinações que estão dependentes as substâncias do solo e às contínuas reações químicas que acontecem na solução do solo, os atributos químicos possuem uma maior variação do que os físicos e, por consequência, demandam de um maior número de amostras para avaliá-los internamente da mesma área (Cavalcante, 2008).

A análise da variabilidade espacial pode ser realizada em grandes áreas, englobando vários tipos de solos, e em áreas pequenas. Para que a mesma seja

representada em uma área, uma das formas mais utilizadas é por meio de mapas de isolinhas, porém, para a confecção desses mapas é essencial que a variável a ser retratada seja conhecida, assim como sua distribuição. No conhecimento da variabilidade espacial, a forma mais comum de representação é a utilização de técnicas de geoestatística (Machado, 2007).

Vários fatores, sejam de causa natural ou antrópica, produzem a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo. O estudo desses fatores, tais como os fatores de formação do solo- clima, relevo, organismo, material de origem e tempo, assim como também as atividades de manejo- adubações, rotações de culturas, aração, gradagem, entres outros, torna-se essencial para a estratificação de uma área em partes homogêneas que requerem uma prática específica colaborando, como, na aplicação racional de corretivos e fertilizantes, atividade introduzida no contexto do manejo sustentável dos recursos agrícolas (Burak, 2012; Cambardella et al., 1994). Porém, a separação desses diferentes fatores é prejudicada visto que eles são variados e atuam conjuntamente no solo.

A variabilidade dos atributos do solo em relação aos fatores de formação do solo, em menor proporção como a da seção de uma paisagem (Terço inferior, médio e superior), tem influência direta pela dinâmica da água, que possui forte vínculo com o relevo. Esse aspecto produz fluxos de materiais compondo as causas ambientais de maiores importâncias na variabilidade de atributos do solo (Ceddai et al., 2009).

Segundo Burak (2012) com a utilização do solo, a variabilidade espacial natural presente pode ser mudada em relação ao efeito das práticas de preparo do solo, efeitos residuais de corretivos e de adubos, os sistemas de manejo utilizados, a forma de aplicação de insumos, entre outros fatores que são capazes em algumas ocasiões tanto elevar a heterogeneidade do solo como baixa-la.

Para estudar ou expressar a variabilidade espacial de algum atributo, é de suma importância ter as coordenadas dos pontos de onde as amostras foram coletadas (Vieira, Xavier, Grego, 2008).

3.5. Geoestatística

Machado (2007) relata em sua pesquisa que a geoestatística é um dispositivo estatístico usado para o estudo da variabilidade espacial, permitindo a compreensão dos resultados baseados na disposição da variabilidade natural dos atributos analisados, levando em conta a dependência espacial no interior de intervalo de amostragem.

Segundo Vieira, Xavier e Grego (2008) a geoestatística é a forma mais adequada para analisar a presença da dependência espacial. A dependência espacial, é avaliada por meio do semivariograma e pelo método de interpolação conhecido por Krigagem, utiliza a dependência espacial entre as amostras próximas para avaliar os resultados em qualquer posição no interior do campo. Ademais, para Cruz (2014) várias vezes, dois atributos se relacionam entre si e no espaço, estando uma delas mais complicada de mensurar à campo ou mesmo ainda, sua determinação tenha um custo maior.

Essa dependência espacial entre dois atributos no espaço pode ser representada por um semivariograma cruzado, e caso ele exista, o método conhecido de cokrigagem pode ser usado para calcular aquele mais complicado de estimar, usando-se as informações de ambas. Portanto, a cokrigagem pode ter uma melhor precisão em relação a krigagem de uma variável simples, no momento em que o variograma cruzado demonstrar uma dependência forte entre as duas variáveis.

3.6. Métodos de espacialização

Diversos métodos estão acessíveis no Sistema de Informações Geográficas (SIG) para o mapeamento da variabilidade espacial de determinado atributo. Porém, nem todos os métodos sugeridos respondem eficientemente questões simples relacionadas a forma, orientação do domínio, tamanho a ser levado em consideração na interpolação, e nem oferecem informações sobre a imprecisão espacial ligada aos valores estimados (Assad et al., 2003).

Voltz et al. (1997) em seus estudos, analisaram as variações das propriedades do solo em uma escala regional, comparando-se o método da

ponderação por Krigagem, o método dos polígonos de influência e a ponderação em relação à distância quadrática. Chegaram ao resultado que o método de ponderação por Krigagem apresentou melhores resultados.

Assad et al. (2003) em seu trabalho relata que os métodos de Krigagem ordinária, Krigagem associada com os modelos de tendências e a Krigagem por indicação nos modelos de indicação nos modelos elevação quando foram comparados apresentaram incertezas nos valores estimados. Já Krivoruchko (2001) em seu trabalho utilizou esses mesmos métodos, estabeleceu mapas de probabilidade por meio das Krigagens lineares e não lineares, em medições nos contaminantes dos solos.

3.7. Semivariogramas

Os semivariogramas são formados por meio de malhas com disposição regular ou, na ocasião em que são irregulares, resultantes regularizadas. Os valores analisados a serem expostos à variografia precisam ser atingidos de bases semelhantes ou então regularizados e os cálculos são realizados em condução previamente estabelecidas, objetivando o entendimento da variabilidade espacial do estudo (Sturaro, 2015).

O semivariograma possibilita verificar uma dependência espacial entre semivariância fornecida pela variação do valor de uma variável e as amostras restantes e a distância que divide tais amostras (VIEIRA, 2000). Posteriormente a elaboração dos semivariogramas dos valores experimentais, busca-se organizar um modelo matemático que simbolize o mais próximo possível a configuração dos mesmos (ANDRADE, 2017).

Segundo Sturaro (2015) o semivariograma possui a função de representar basicamente a ideia intrínseca, que é usada em Geoestatística para representar a variabilidade espacial em uma direção pré-estabelecida. O mesmo consiste em um gráfico das semivariâncias das diferenças dos valores experimentais localizados a intervalos regulares. Em situações estacionárias, o valor médio previsto é constante ou nulo, o que leva à redução do semivariograma à média quadrática das diferenças dos números.

3.8. *Carbono orgânico e matéria orgânica no solo em áreas de agricultura*

O solo é considerado um importante e estratégico reservatório de estoque de carbono, apresentando mais que o triplo do valor de carbono da paisagem ou o dobro do valor presente na atmosfera terrestre. Sendo o carbono do solo fortemente relacionado com a fertilidade, visto que está relacionado com as características físicas, químicas e biológicas. Além disso, é um atributo essencial no assunto das mudanças climáticas, uma vez que o CO₂ é um dos principais gases causadores do efeito estufa (Delarmelina et al., 2021).

O carbono é incorporado ao solo por meio dos restos vegetais e sua entrada no solo é dependente da incorporação do componente orgânico por meio da morte de alguns elementos da biomassa que estão acima e abaixo do solo, de folhas caídas das plantas, restos de animais mortos e de exploração dos recursos vegetais, com suas variadas etapas de decomposição. Atuando diretamente nas interações dos vegetais com o solo, através dos exsudatos radiculares (Romão, 2012; Nutrição de safras, 2026).

Romão (2012) ainda ressalta que a soma dos materiais orgânicos é essencial para solos produtivos, uma vez liberam de forma gradativa os nutrientes (reduzindo os processos de volatilização, lixiviação e fixação). Vale ressaltar que essa liberação depende do grau de decomposição, que é influenciada pela temperatura, textura, umidade, mineralogia do solo e composição química do atributo orgânico usado.

Parewa (2023), afirma em seu trabalho que as regiões áridas e semiáridas, possuem uma rápida diminuição dos níveis de Carbono em decorrência das práticas agrícolas incorretas. E que em solos arenosos e franco-arenosos, as suas perdas são menores, girando em média de 2,0%.

Além disso, Parewa (2023) ainda relata que a diminuição do estoque do carbono orgânico no solo interfere na sua fertilidade e a sua regulação as mudanças climáticas. Já com a elevação da matéria orgânica do solo (MOS) ocorrerá melhorias na fertilidade do solo e propriedades físicas do solo, promovendo maior desenvolvimento das plantas e redução do impacto da seca, aperfeiçoando a forma de adaptação e favorecendo o cultivo agrícola menos susceptível as mudanças do clima.

A MOS por sua vez é constituída pelo carbono orgânico, ou seja, oriunda de processos biológicos, em distintas etapas de decomposição, englobando todo os componentes da natureza e animal, elementos humificadas e elementos carbonizados. Sendo considera um dos pilares da produtividade nos solos agrícolas, auxiliando na melhoria dos atributos químicos, físicos e biológicos dos solos de cultivos agrícolas (Lucas, 2025).

Segundo Neto et al. (2015), a matéria orgânica é um dos fundamentais operadores da formação e estabilização dos agregados do solo, sendo que a sua redução no solo devido a processos erosivos e sucessivos cultivos são uma das maiores causas de da desestruturação de solo em áreas cultivadas. Lucas (2025), ainda relata em seu trabalho que essa estabilização dos agregados, asseguram uma melhor infiltração de água, densidade superficial menor, facilidade de enraizamento das plantas e uma proteção contra processos erosivos.

4. METODOLOGIA

4.1. *Localização e caracterização das áreas de estudo*

O trabalho teve como estudo três áreas produtivas de mangueiras com aproximadamente de 4 a 5 anos de idade. A Fazenda Catavento localizada no município de Petrolina-PE ($7^{\circ} 37'35''\text{S}$ a $9^{\circ}43'56''\text{S}$; $41^{\circ} 12'11''\text{W}$ a $39^{\circ} 7'27''\text{C}$; altitude média de 370 m) (Figura 1). O município está introduzido na região semiárida do Estado Pernambucano, fixado na depressão sertaneja, apresentando um relevo suave a ondulado, abrangendo um importante polo cultural de frutificação nacional (Medeiros et al., 2013; Silva et al., 2019).

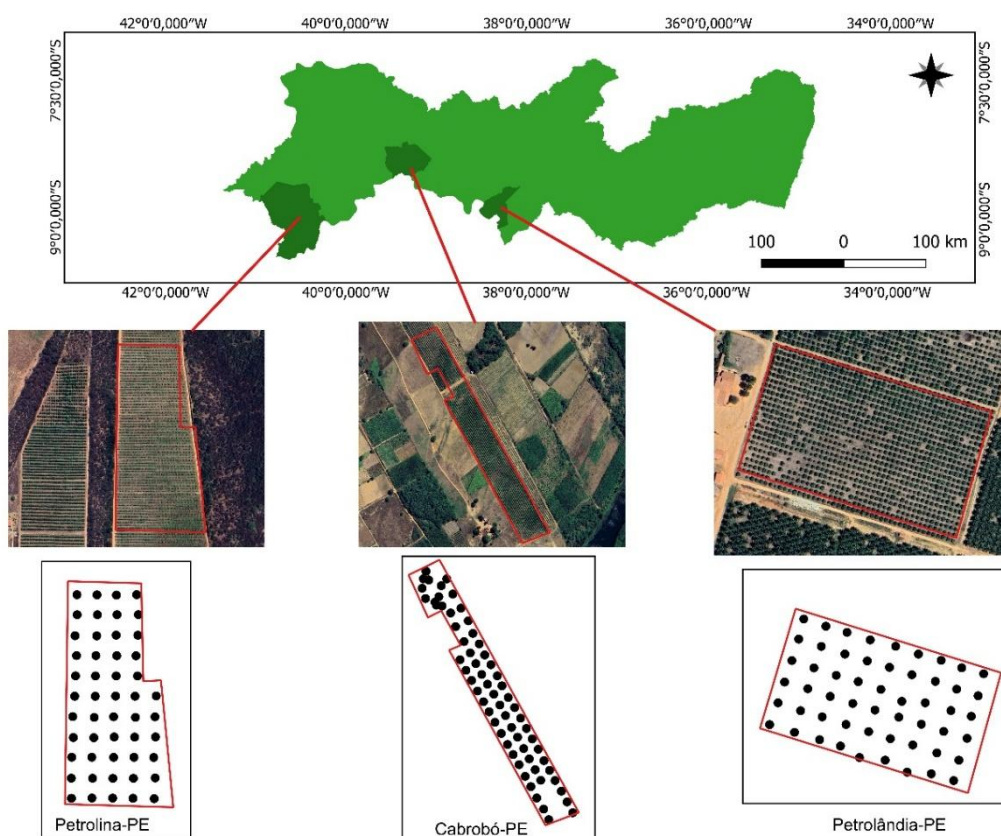
O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, é do tipo BSw'h'– Semiárido quente, com o evento de duas estações bem estabelecida, sendo elas, a estação seca entre os meses de maio a outubro e a estação chuvosa entre os meses de novembro a abril. A mesma possui uma média pluviométrica de 567 mm ano^{-1} , com uma distribuição espacial desuniforme, a temperatura média anual é de $26,3^{\circ}\text{C}$ e a umidade do ar é de 58% (Silva et al., 2019).

A Fazenda WG localizada no município de Cabrobó-PE ($08^{\circ} 30' 40''\text{S}$; $39^{\circ} 18' 24''\text{W}$, com altitude média de 325 m) (Figura 1). O clima da região de acordo com a classificação de Köppen-Geiger é do tipo é do tipo BSw'h'-Semiárido quente, apresentando chuvas de verão. Com início das chuvas em novembro e fim em abril. Com uma precipitação média anual de 431,8 mm. Inserido majoritariamente na unidade geoambiental da depressão Sertaneja, é uma região caracterizada nacionalmente pela produção agrícola que engloba a atividade da fruticultura irrigada, com destaque para as culturas de cebola e arroz (Beltrão et al., 2005; Pereira et al., 2025).

A Fazenda Fertilago localizada no município de Petrolândia-PE ($08^{\circ}58'45''\text{S}$; $38^{\circ}13'10''\text{W}$; a uma altitude de 283 m) (Figura 1). O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger é do tipo é do tipo BSw'h'– Semiárido quente, com temperatura anual média girando por volta de 25°C e média pluviométrica anual de 671 mm (Parahyba et al., 2004). Sendo sua economia voltada para a agricultura, pecuária, e a pesca, contando também com algumas indústrias e prestadoras de serviços (Santos, 2023).

As áreas foram amostradas tentando-se formar um grid retangular uniforme com malha regular georreferenciada, com distância entre os pontos de amostragens de 30 m, formando uma malha de aproximadamente 50 pontos (Figura 1). Em cada ponto foi coletado uma amostra de solo e suas respectivas coordenadas com auxílio de sistema GNSS (base + rover) da STONEX. A coleta foi efetuada com um Trado holandês, retirando-se uniformemente em cada amostra o volume e profundidade. As amostras foram retiradas em uma profundidade de 0-20 cm e 20-40 cm.

Figura 1 - Mapa de localização das áreas de estudo e seus grids de amostragem



Fonte: A autora, 2026.

4.2. Análise do Carbono Orgânico no solo

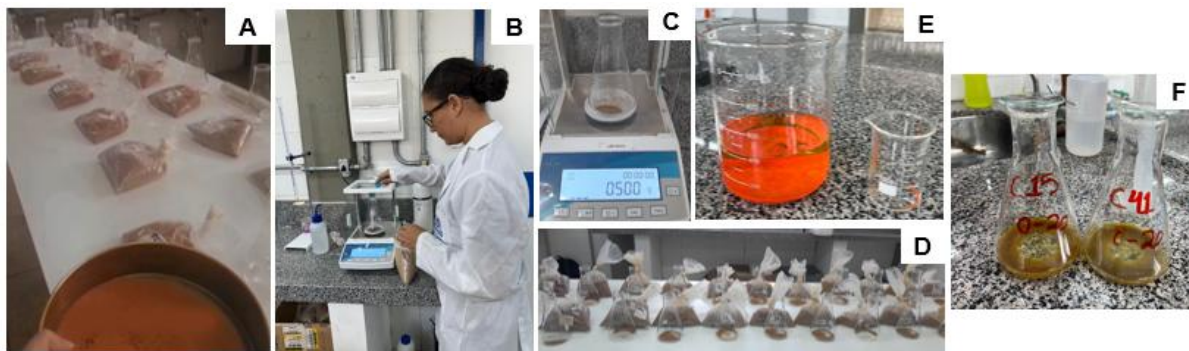
As amostras de solo coletadas foram submetidas à determinação do teor de carbono orgânico (CO), seguindo a metodologia descrita no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (Teixeira et al., 2017). As análises

foram realizadas no Laboratório de Solo e Água da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST).

Inicialmente, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm para obtenção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). Posteriormente, aproximadamente 20 g de TFSA de cada amostra, foram maceradas e passados em peneira de 80 mesh para garantir maior homogeneidade do material.

Para a determinação do carbono orgânico, foram pesados 0,5 g da amostra de solo em erlenmeyers de 250 mL. Em seguida, adicionaram-se 10 mL de solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) a $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ (Figura 3). Os erlenmeyers foram acoplados a um sistema de condensação simples, constituído por um tubo de ensaio contendo água e protegido com papel-alumínio, sendo a vedação realizada com placa de vidro. As amostras foram então submetidas à digestão em placa aquecedora, sob fervura branda, durante 5 minutos.

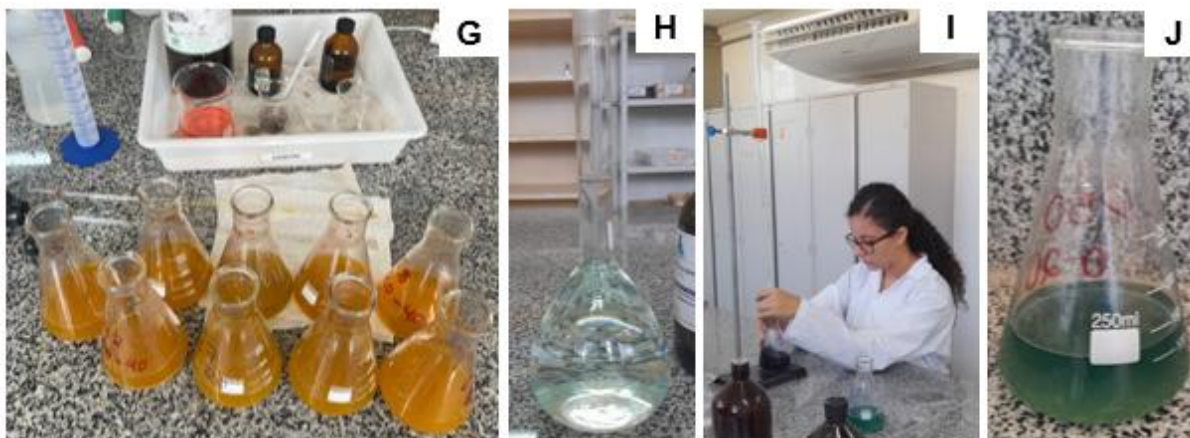
Figura 2 - Prancha 1; procedimentos metodológicos, peneiração das TSFA (A); pesagem das amostras e organização (B, C e D), solução de dicromato de potássio (E) e amostras com o dicromato de potássio (F).



Fonte: imagens cedidas por Luiz Emanuel (2026) e Josefa Edinete (2026).

Após o resfriamento, foram adicionados 80 mL de água destilada, 1 mL de ácido ortofosfórico e três gotas de solução indicadora de difenilamina (10 g L^{-1}). A seguir, procedeu-se à titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) $0,05 \text{ mol L}^{-1}$, utilizando bureta graduada. O ponto final da titulação foi identificado pela mudança de coloração da solução, de azul para verde (Figura 4).

Figura 3 - Prancha 2; amostras com os agentes (G); solução de sulfato ferroso amoniacal (H); titulação (I) e coloração ideal (verde) após a titulação (J).



Fonte: imagens cedidas por Luiz Emanuel (2026) e Josefa Edinete (2026).

Paralelamente, foi realizada uma prova em branco contendo apenas 10 mL da solução de dicromato de potássio, submetida aos mesmos procedimentos analíticos. Os volumes consumidos de sulfato ferroso amoniacal nas amostras e no branco foram registrados para posterior cálculo do teor de carbono orgânico.

A porcentagem de carbono orgânico presente nas amostras foi calculada a partir da diferença entre os volumes gastos na titulação do branco e das amostras, pela equação 1 apresentada a seguir:

$$\text{g de carbono/kg de TFSE} = 0,06 \times V(40 - V_a \times f) \times "f" \quad (1)$$

de modo que:

TFSE = terra fina seca em estufa.

V = volume de bicromato de potássio empregado.

V_a = volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra.

f = 40/volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da prova em branco.

0,06 = fator de correção, decorrente das alíquotas tomadas.

"f" = fator de correção para TFSE.

4.3. *Análise geoestatística*

Os resultados obtidos foram organizados em uma planilha eletrônica contendo as coordenadas geográficas (em UTM) dos pontos de coleta e os resultados correspondentes, com isso foram submetidos à análise estatística descritiva, para a obtenção da média, moda, mediana, mínimo, máximo, desvio-padrão, coeficiente de variação. Antes da aplicação das técnicas de espacialização, os dados foram submetidos ao teste de normalidade do Kolmogorov-Smirnov, com nível de significância de 5%.

Usou-se a geoestatística para avaliar a variabilidade espacial do atributo estudado, de acordo com Vieira et al. (1983). Para a realização da análise estatística, foi necessário saber se existia dependência espacial ou não do atributo estudado, o que foi verificado por meio do semivariograma.

O semivariograma é uma esquematização gráfica entre a semivariância $\gamma(h)$, expressa na coordenada Y, em relação a uma determinada distância (h), expressa na coordenada X. O semivariograma pode ser estimado pela Equação 2 a seguir:

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

Em que $N(h)$ expressa o número de pares de valores medidos, $Z(x)$, $Z(x+h)$, separados por uma específica distância (h). Os números de Z podem ser qualquer uma das propriedades analisadas, enquanto os números de x_i e $x_i + h$ são determinados de acordo com as posições dos pontos amostrais no campo.

Com o cálculo do semivariograma, os valores da semivariância $\gamma(h)$ e da distância (h) foram organizados em gráficos de dispersão, possuindo como valores de Y as semivariâncias e X, as distâncias. Nesse gráfico, ajustou-se em função matemática, usando alguns critérios, a conhecer o efeito pepita (C_0), sendo quanto maior o valor do efeito pepita, mais fraca é a dependência espacial de um atributo; é o número da semivariância, quando a distância é semelhante a zero (0); patamar (C_0+C_1); ao passo que a distância aumenta, também a o aumento do valor da semivariância, até número máximo, pelo qual a mesma se estabiliza, nomeado alcance (a) e é a distância limite da dependência espacial, que expressa o raio de uma circunferência, em que os número são tão

semelhantes que se transformam em correlacionados (Machado et al, 2007; Vieira, 1997).

Caso venha ter dependência espacial, ou seja, quando a função $y(h)$ seja dependente da distância (h), os valores próximos forem semelhantes, possibilitará estimar valores para os locais onde o atributo não foi medido.

4.4. Procedimentos para espacialização do carbono orgânico do solo

Em seguida, os dados da planilha eletrônica foram importados no software R Studio, onde foi capaz de realizar uma análise geoestatística dos dados referentes às amostras coletadas e visualizar o melhor ajuste para o semivariograma experimental. Ajustou-se o semivariograma experimental referente aos modelos, para medir o grau de dessemelhança entre os pares de pontos conforme a distância entre eles aumenta, esperando em que distâncias curtas a semivariância fosse pequena e em distâncias longas a semivariância fosse alta.

Após a produção do semivariograma experimental, foram analisados três diferentes modelos teóricos de semivariograma esférico (Equação 3), exponencial (Equação 4) e gaussiano (Equação 5).

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{A} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{A} \right)^3 \right] \quad 0 < h < A \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-\frac{h}{A}} \right] \quad 0 < h < A \quad (4)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-\frac{h^2}{A^2}} \right] \quad 0 < h < A \quad (5)$$

onde C_0 é o efeito pepita, $C_1 + C_0$ o patamar e A o alcance.

Para avaliar a qualidade dos modelos teóricos, foi utilizada a técnica de validação cruzada. Para escolher o melhor modelo de semivariograma teórico

nas camadas das áreas estudadas realizou-se a análise das métricas de validação cruzada, analisando os seguintes critérios: ME (Erro Médio), em que quanto mais próximo de zero (0) melhor será, pois menor será a subestimação ou superestimação dos resultados; VE (Variância do erro), indicado se a variabilidade de predição se encontrava calibrada, por tanto, quanto mais próximo de 1 (um), melhor; RMSE (Raiz do Erro Quadrático Médio), que mediu a magnitude dos erros, quanto menor, melhor e, GDE (Grau de Dependência Espacial), que analisou o quanto da variação total foi controlada pelo efeito pepita em comparação ao patamar, classificado como forte (< 25%), moderado (25%-75%) ou fraco (> 75%).

Com isso calculou-se o Erro Médio (EM- Equação 6), a variância do erro médio (Equação 7), a raiz do erro quadrático médio (RMSE- Equação 8), a porcentagem do RMSE (Equação 9) e Grau de Dependência Espacial por meio da equação 10.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)$$
(6)

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{1}{n - p} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$
(7)

Em que:

Em: erro médio

y_i: valor real observado

y[^]_i : valor previsto ou medida

n: número de observações

p: número de coeficientes no modelo (incluindo a constante, se houver)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$
(8)

$$RMSE\% = \left(\frac{RMSE}{\bar{y}} \right) \times 100 \quad (9)$$

Em que:

n: número total de observações.

i: índice da observação.

y_i: valor **observado** (real) da observação **i**.

y[^]_i: valor **previsto** (estimado) pela modelagem ou cálculo para a observação **i**.

y⁻: média dos valores observados **y_i**.

$$GDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \cdot 100 \quad (10)$$

Escolhido o semivariograma teórico e constatada a dependência espacial, aplicou-se a técnica da krigagem para realizar estimativas em locais não amostrados. A krigagem envolve a interpolação da superfície de cada variável, mostrando a distribuição espacial dela; ou seja, permite identificar a localização de valores extremos, o grau de homogeneidade e os gradientes de distribuição.

Após a realização da interpolação foi realizada a criação e confecção dos mapas temáticos do carbono orgânico em cada área de estudo. Todas as análises e geração dos mapas foram realizadas com o software R versão 4.1.2 (TEAM, 2021); e o pacote gstat, utilizado para análise geoestatística (10.32614/CRAN.package.gstat).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Estatística descritiva do teor de carbono orgânico em áreas de manga

Os teores de CO no solo tiveram variações em função da área e profundidade do solo (Tabela 1). No geral, os maiores teores médios de CO foram observados na camada superficial (0-20 cm) para todas as áreas estudadas. Isso pode ser justificado pela dinâmica natural do elemento no ambiente, uma vez que a superfície concentra o maior aporte de resíduos vegetais, serapilheira e atividade biológica.

Tabela 1 - Análise da estatística descritiva do CO nas áreas nas camadas de 0-20 e 20-40

Métricas	Camada 0-20 cm			x	Camada 20-40 cm		
	PE	PET	CAB		PE	PET	CAB
	C (g Kg ⁻¹)						
Média	16,020	18,498	5,602		10,493	12,564	4,503
Moda	9,424	42,220	3,180		8,165	9,796	3,669
Mediana	16,04	18,693	5,455		9,364	11,664	4,402
DP	5,014	5,278	1,947		4,612	4,705	1,427
Máximo	25,732	32,893	13,327		23,623	24,980	8,180
Mínimo	8,103	9,286	0,497		3,731	5,878	1,620
CV	31,240	28,236	35,686		49,254	40,338	32,415

Fonte: A autora, 2026.

Com relação às áreas analisadas, a área Petrolândia (PET) se sobressaiu com o maior valor médio na camada de 0-20 cm (18,498 g kg⁻¹), em seguida Petrolina (PE) (16,020 g kg⁻¹). Por outro lado, a área de Cabrobó (CAB) foram encontrados os menores resultados, 5,602 g kg⁻¹ na camada superficial (0-20 cm).

Ao observar a mudança para a camada 20-40 cm, verificou-se uma diminuição acentuada nos valores médios de CO nas áreas PE e PET, com redução de 32,08% em PET e de 34,52% em PE em relação à camada 0-20 cm. A região CAB, apesar de ter mantido os menores valores da análise (4,503 g kg⁻¹), apresentou uma melhor estabilidade vertical, com uma menor perda

proporcional do carbono em profundidade. Segundo Marques et al. (2011), os teores do carbono orgânico dissolvido normalmente diminuem com avanço da profundidade das camadas, por conta da retenção que ocorre nas camadas superficiais.

Além disso, observa-se uma proximidade dos valores de média, mediana e moda em praticamente todas as camadas das áreas, destacando-se a camada de 0 a 20 cm da área PET (Média de 18,498 g kg⁻¹, mediana de 18,693 g kg⁻¹ e moda de 24,490 g kg⁻¹), sugerindo que os dados tendem a um comportamento de distribuição normal, sem interferências discrepantes de valores.

Já os valores máximos e mínimos de 32,893 g kg⁻¹ (PET) e 0,497 g kg⁻¹ (CAB) na camada de 0-20 e de 24,980 g kg⁻¹ (PET) e 1,620 g kg⁻¹ (CAB) na camada de 20-40, demonstram que em valores máximos em PET possuem uma capacidade mais massiva de estocagem de carbono na superfície e subsuperfície. Enquanto os valores mínimos de CAB demonstram que a área possui pontos de pobreza de matéria orgânica, até mesmo na superfície. E isso pode estar relacionado com o tipo de solo, idade do cultivo, tratamentos culturais, entre outros aspectos edafoclimáticos (Barros, 2019).

No que se refere a variabilidade dos dados, os coeficientes de variação (CV) mostram uma heterogeneidade que segue de uma variabilidade média (12% a 60%) em todas as profundidades das áreas analisadas (Tabela 1), de acordo com os parâmetros de classificação propostos por Warrick e Nielsen (1980) para os atributos físicos e químicos do solo. Na camada de 0-20 cm, os resultados do CV foram levemente moderados e próximos entre si, variando de 28% (PET) a 35,686% (CAB).

Porém, ao se observar a camada de 20-40 cm, analisou-se um comportamento diferente entre as áreas. Nas localidades PE e PET, verificou-se um aumento significativo na heterogeneidade espacial do carbono orgânico, apresentando a elevação do CV para 49,254% (PE) e 40,338% (PET).

Esse aumento da variabilidade em subsuperfície reflete em uma dinâmica edáfica na literatura, sendo constantemente atribuída ao desenvolvimento errático e ramificado da zona radicular das plantas e também pela ocorrência específicas de lixiviação do carbono orgânico dissolvido (Grego & Vieira, 2005). Enquanto as camadas superficiais passam por mudanças antrópicas e subsídio

de resíduos orgânicos de forma mais homogênea, as camadas mais subsuperficiais ficam dependentes da distribuição intrínseca das raízes, o que promove o acúmulo de maiores concentrações do elemento a pequenas distâncias. Tal aspecto também é constatado por Marques et al. (2011).

Diferentemente, a localidade de CAB apresentou uma tendência oposta, reduzindo o seu CV de 35,686% na camada de 0-20 cm para 32,415% na camada de 20-40 cm. Essa diminuição da variabilidade em subsuperfície, quando associado aos baixos valores médios do carbono orgânico analisados nessa área (4,503 g kg⁻¹), exibem que o manejo adotado na localidade CAB induziu o solo a um estado uniforme de esgotamento de sua matéria orgânica. Em solos que passam por processos intensos de revolvimento, que pode ser o caso da área CAB, ocorre a promoção da quebra dos agregados que exprimem a MO, fornecendo-a para os microrganismos que a decompõem, causando perdas de CO no solo (Cerri et al., 2023).

Quando se analisa os valores da matéria orgânica (MO) (Tabela 2), como esperado, apresentam um comportamento proporcional aos padrões analisados para o carbono orgânico (Tabela 1 e tabela 2). A camada de 0-20 cm obteve os maiores teores de MO em todas as variáveis, demonstrando médias de 31,890% para a área PET e 27,618% para a área PE, à medida que a localidade CAB permaneceu no limite inferior com média de 9,658%.

Tabela 2 - Análise da estatística descritiva do MO nas áreas nas camadas de 0-20 e 20-40

Métricas	Camada 0-20			Camada 20-40		
	PE	PET	CAB	PE	PET	CAB
	MO (%)					
Média	27,618	31,890	9,658	18,090	21,661	7,763
Moda	16,247	42,220	5,482	14,076	16,888	6,326
Mediana	27,668	32,228	9,404	16,144	20,109	7,589
DP	8,643	9,100	3,356	7,952	8,112	2,460
Máximo	44,362	56,708	22,975	40,726	43,065	14,103
Mínimo	13,970	16,010	0,858	6,432	10,133	2,793
CV	31,240	28,236	35,686	49,254	40,338	32,415

Fonte: A autora, 2026.

Essa correlação direta ocorre porque o carbono orgânico é um elemento fundamental da estrutura molecular dos compostos húmicos, sendo um atributo em maior concentração na MO do solo, normalmente 58% (Dieckow et al., 2004).

5.2. Variabilidade espacial do CO em área de manga em Cabrobó

Ao se analisar a variabilidade espacial do carbono Orgânico no solo na camada de 0-20 cm, na área cultivada com manga na área de Cabrobó- PE, observou-se variações nos desempenhos entre os modelos de semivariograma testados na validação cruzada (Tabela 3). A escolha do melhor modelo para a modelagem do semivariograma teórico e posterior interpolação por Krigagem fundamentou-se na junção dos baixos valores de erro e no potencial de demonstrar a dependência espacial do atributo.

Observando os valores das Métricas de erro da validação cruzada dos semivariogramas teóricos o modelo Gaussiano obteve o melhor desempenho, principalmente em relação ao Erro médio (ME) de 0,0001, o valor bem mais próximo de zero entre os outros testados. Essa métrica demonstra que esse modelo tende a não realizar subestimativas ou superestimativas dos teores de Carbono orgânico no local de estudo. Apesar do modelo Exponencial tenha demonstrado valores de erro absoluto um pouco menores, como o RMSE (1,98) e %RMSE (36,38%), e um Grau de Dependência Espacial (GDE) de 6,13%, o valor do alcance ficou acima de 9000,0 m, não sendo um valor fisicamente adequado para as condições de estudo.

Em compensação, o modelo Gaussiano resultou em um GDE de 59,34%, índice caracterizado como moderado (25%-75%). Já o modelo esférico resultou em um comportamento similar, com GDE de 59,51% e RMSE de 2,09, mas, obteve um erro médio ligeiramente maior (0,0011).

Tabela 3 - Métricas de erro da validação cruzada dos semivariogramas experimentais da área de Cabrobó na profundidade de 0-20 cm.

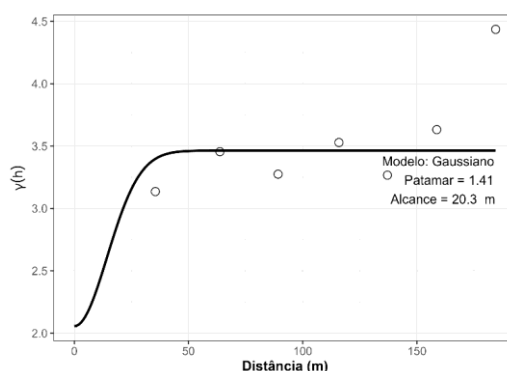
Modelo	ME	VE	RMSE	GDE	%RMSE
Esférico	0,0011	1,32	2,09	59,51	38,34
Exponencial	0,0026	1,15	1,98	6,13	36,38
Gaussiano	0,0001	1,23	2,09	59,34	37,79

Fonte: A autora, 2026.

Partindo-se para a análise do semivariograma experimental gaussiano (Figura 5), observa que o efeito pepita (C_0) que é a ponto onde a curva cruza o eixo Y (distância zero), revelou em um valor de aproximadamente de 2,06 e um valor do patamar parcial de 1,41, gerando em um patamar total de aproximadamente 3,47. A existência do efeito pepita reflete na variabilidade ao acaso em pequenas distâncias que a menor distância de amostragem, comum pelas microvariações de solos cultivados e ao histórico do manejo cultural.

O alcance da dependência espacial por sua vez foi estimado em 20,3 m. O alcance representa o limite de distância em que as amostras de solo armazenam correlação espacial entre si. Por tanto, esse valor demonstra que as amostragens de solo ou as intervenções de manejo da matéria orgânica distanciadas a 20,3 m apresentam dependência espacial e podem ser mapeadas. Em estudos de semivariograma, o valor de alcance representa a distância máxima na qual os pontos amostrais apresentam correlação espacial.

Figura 4 - Semivariograma experimental (Melhor modelo: Gaussiano) do teor de carbono orgânico do solo na área de Cabrobó na profundidade de 0-20 cm.



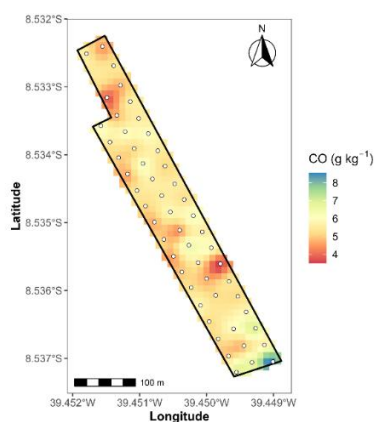
Fonte: A autora, 2026.

O mapa temático da variabilidade espacial oriundo por meio da interpolação por Krigagem ordinária (Figura 6) da distribuição espacial do carbono orgânico na camada de 0-20 cm, apresentou um padrão de mudança suave e contínuo, formando manchas delineadas ao decorrer da área de manga em Cabrobó.

É possível observar que teores de carbono orgânico oscilam predominantemente em uma faixa de 4 a 8 g kg⁻¹. Há uma heterogeneidade espacial na área, com uma predominância de teores intermediários a baixos entre 5 e 5 g kg⁻¹) na maior parte da extensão central e noroeste da área. Pontos localizados de tonalidades avermelhadas (5 g kg⁻¹) aparecem de forma isolada nas extremidades do mapa. Esses pontos específicos de menor teor de CO podem inferir em zonas expostas a maior tráfego de máquinas (entrelinhas), áreas com textura de solo diferenciada (maiores frações de areia) ou com menores deposições de resíduos vegetais, que propiciam em uma rapidez da mineralização do material orgânico no solo.

Por outro lado, a extremidade final inferior do mapa destaca-se por trazer os maiores teores acumulados do CO, obtendo teores próximos a 8 g kg⁻¹. Tal enriquecimento localizado pode estar ligado a zonas de manejo diferenciadas com maior porte de adubação orgânica, manutenção de cobertura vegetal ou acúmulo natural de umidade e depressões no relevo que beneficiam a deposição de materiais orgânicos no solo.

Figura 5 - Mapa de variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo na camada de 0-20 cm em área de manga de Cabrobó, obtido por krigagem



Fonte: A autora, 2026.

A partir do mapa pode-se analisar a porcentagem de área ocupada (Tabela 4), ao analisar os teores e suas respectivas porcentagem é possível observar que o carbono orgânico na área estudada em Cabrobó possui predominância na classe de 5 a 6 g kg⁻¹, ocupando 68,52 % da zona, seguida próxima pela classe de 4 a 5 g kg⁻¹ (18,04%) e pela classe 6 a 7 g kg⁻¹ (10,36%).

Tabela 4 - Porcentagem de área ocupada por classe de Carbono orgânico do solo em área de manga em Cabrobó na profundidade de 0-20 cm.

Teor de carbono (g/kg)	<4	4-5	5-6	6-7	>7
Porcentagem de área ocupada (%)	1,34	18,04	68,52	10,36	1,73

Fonte: A autora, 2026.

Quando se analisa a camada de 20-40 cm, o comportamento espacial do carbono orgânico (CO) do solo, houve mudanças em comparação a camada de 0-20 cm, demonstrando uma forte desalinhamento espacial do atributo na camada subsuperficial (Tabela 5). Entre os modelos avaliados na validação cruzada, o modelo Esférico apresentou melhor desempenho.

A escolha do modelo esférico foi justificada, principalmente, pelo o valor do seu ME de 0,00000024, o qual demonstrou o menor número entre os modelos testados. O modelo exponencial, embora tenha obtido um RMSE um pouco menor (1,48), demonstrou uma maior GDE (22,25) em relação aos demais métodos. O modelo gaussiano também não foi escolhido pois apresentou um erro médio ligeiramente maior (0,002) do que o ME do modelo esférico, possuindo uma chance maior de subestimar ou superestimar os dados. Além do mais, o modelo esférico apresentou uma forte GDE (0), consolidando a escolha do mesmo.

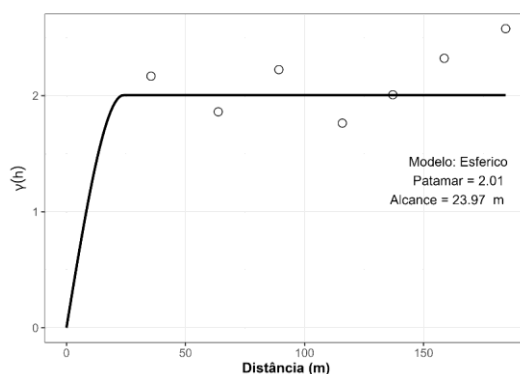
Tabela 5 - Métricas de erro da validação cruzada dos semivariogramas experimentais da área de Cabrobó na profundidade de 20-40 cm.

Modelo	ME	VE	RMSE	GDE	%RMSE
Esférico	0,00000024	1,13	1,50	0	33,16
Exponencial	0,00005	1,0	1,48	22,25	32,74
Gaussiano	0,002	0,852	1,50	3,29	32,95

Fonte: A autora, 2026.

Quando se observa o semivariograma experimental (Figura 7), o modelo escolhido estimou um patamar de 2,01, um alcance de 23, 97 m e um efeito pepita inicializado em 0.

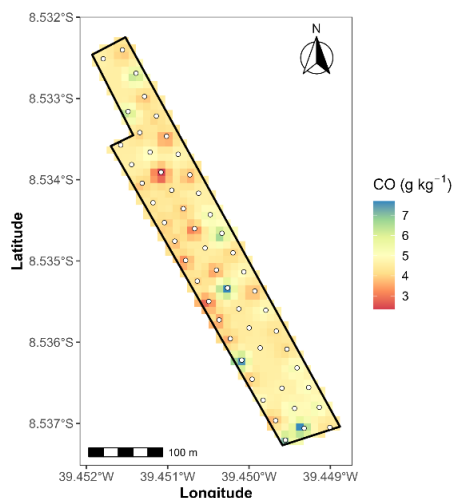
Figura 6 - Semivariograma experimental do tipo Esférico da área de Cabrobó na profundidade de 20-40 cm.



Fonte: A autora, 2026.

No mapa temático da variabilidade espacial na camada de 20-40 cm (Figura 8), houve um padrão de mapeamento fragmentado e descontínuo visualmente, a uma elaboração isolada de pequenos grupos de alta ou baixa concentração ao redor dos pontos de amostragem específicos.

Figura 7 - Mapa de variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo na camada de 20-40 cm em área de manga de Cabrobó, obtido por krigagem



Fonte: A autora, 2026.

Se observa que os teores nessa camada tiveram uma redução geral em comparação à camada de 0-20 cm, girando em sua maior extensão entre 3 e 7 g kg⁻¹. É visível um predomínio nas faixas de 5 a 6 g kg⁻¹ e 4 a 5 g kg⁻¹), inferindo-se que o interior amostral da área é consideravelmente homogêneo em teores baixos de carbono. Existe também a presença de pontos específicos de tons avermelhados, próximos a 3 g kg⁻¹, surgindo de forma localizada no centro e mais ao norte da zona, revelando a restrição severa de matéria orgânica nesses pontos.

Ao contrário, é também possível analisar focos localizado de maior acúmulo de carbono atingindo ou superando 7 g kg⁻¹ que aparecem em focos no centro-sul e na extremidade sudeste do mapa. Em profundidades de 20-40 cm, essas exceções não representam zonas de manejo contínuas, mas, interações pontuais do local de coleta, tais como a presença direta de uma raiz pivotante ou mais profunda do cultivo no momento da amostragem, ou fendas físicas no solo que favoreceram o lixiviamento da matéria orgânica.

Ao se observar a porcentagem de área ocupada por classe de CO (Tabela 6), é notório a dominância da classe de 4 a 5 g kg⁻¹, abrangendo 76,20% da área total. Ao se adicionar essa porcentagem à classe inferior a 4 g kg⁻¹, que representou 11,13% da extensão, obtém-se um valor alarmante 87,33% da área subsuperficial de Cabrobó que possui teores de carbono orgânico abaixo de 5 g kg⁻¹.

Tabela 6 - Porcentagem de área ocupada por classe de Carbono orgânico do solo em área de manga em Cabrobó na profundidade de 20-40 cm

Teor de carbono (g/kg)	<4	4-5	5-6	6-7	>7
Porcentagem de área ocupada (%)	11,13	76,2	9,4	2,5	0,77

Fonte: A autora, 2026.

5.3. Variabilidade espacial do CO em área de manga em Petrolina

Ao se analisar a variabilidade espacial do carbono orgânico no solo na camada de 0-20 cm, na área cultivada com manga em Petrolina- PE, observou-se variações nos desempenhos entre os modelos de semivariogramas testados na validação cruzada (Tabela 7). O Exponencial apresentou o melhor desempenho para representar a distribuição do carbono orgânico do solo. Uma vez que apresentou os menores valores RMSE (4,70) e %RMSE (29,36%), de modo prático tais valores indicam que os teores de carbono estimado por Krigagem ordinária usando-se o modelo exponencial são os que mais aproximam-se dos teores verdadeiros analisados em campo. Complementar a isso, o mesmo modelo demonstrou um ME mais próximo de zero (-0,0081) e uma menor VE (0,99) entre todos os modelos avaliados.

Tabela 7 - Métricas de erro da validação cruzada dos semivariogramas teóricos da área de Petrolina na profundidade de 0-20 cm.

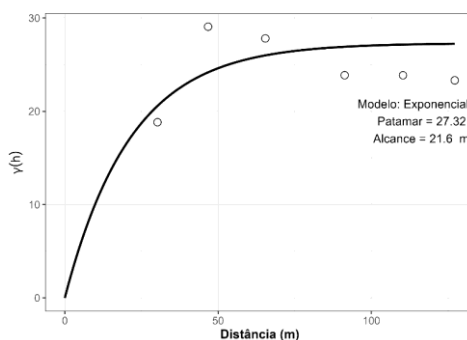
Modelo	ME	VE	RMSE	GDE	%RMSE
Esférico	-0,011	1,31	5,11	0,048	31,94
Exponencial	-00081	0,99	4,70	0,10	29,36
Gaussiano	-0,019	2,23	5,11	0,034	36,49

Fonte: A autora, 2026.

O modelo de semivariograma escolhido estimou um patamar de 27,32, um alcance de 21,6 m (Figura 9). Observa-se que a curva teórica intercepta o

eixo das ordenadas (Y) basicamente na origem. Isso é um indicativo de que o efeito pepita tem um valor muito próximo de zero (0). Como esse efeito é mínimo nesta área, infere-se que o CO possui uma elevada continuidade espacial a curtas distâncias.

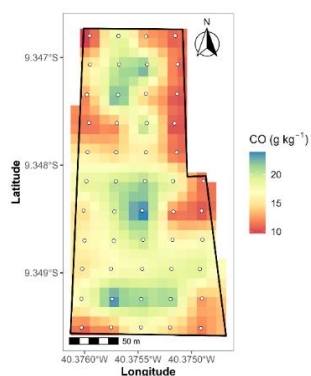
Figura 8 - Semivariograma experimental do tipo Exponencial da área de Petrolina na profundidade de 0-20 cm.



Fonte: A autora, 2026.

A espacialização dos teores de Carbono orgânico por meio do mapa de Krigagem, demonstra a dependência espacial e evidencia uma heterogeneidade na camada superficial do solo (Figura 10). Os teores de CO na extensão oscilam de valores críticos, próximos a 10 g kg^{-1} , até índices mais elevados, superiores a 20 g kg^{-1} .

Figura 9 - Mapa de variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo na camada de 0-20 cm em área de manga de Petrolina, obtido por krigagem.



Fonte: A autora, 2026.

O mapa revelou a separação da extensão em zonas localizadas de manejo. Visualmente há grupo de pontos com maiores valores acima de 20 g kg^{-1} , concentrados na região central, faixa sul-central e faixa norte central da área. Tais pontos indicam locais onde há uma melhor eficiência na preservação

da matéria orgânica, possivelmente associados à projeção da copa das mangueiras que depositam serapilheira e resíduos de podas e a armazenagem de água e nutrientes pela fertirrigação na linha de plantio.

Em compensação, as extremidades da área preferencialmente a faixa leste e os extremos norte e sul, exibiram os menores teores de carbono orgânico, resultando em teores abaixo de 15 g kg^{-1} . Essas partes limitantes, demonstram o efeito de borda, com maior susceptibilidade à erosão, maior trânsito de maquinários e menor uniformidade na distribuição da irrigação.

Partindo para a porcentagem de área ocupada do CO na camada superficial (Tabela 8), os dados evidenciam que a maior parte da extensão se encontra na classe de $15 \text{ a } 20 \text{ g kg}^{-1}$, incluindo 53,46% da área total. Somada à classe superior maior de 20 g kg^{-1} , que ocupa 12,21% da área, verifica-se que 65,67% da área total do cultivo evidência teores de CO considerados elevados. Esse predomínio de faixas mais elevadas reflete em um balanço positivo entre a deposição de folhas, descarte de podas e raízes vivas e a taxa de mineralização do solo, assegurada pela umidade constante do sistema de irrigação.

Tabela 8 - Porcentagem de área ocupada por classe de Carbono orgânico do solo em área de manga em Petrolina na profundidade de 0-20 cm.

Teor de carbono (g/kg)	<10	10-15	15-20	>20
Porcentagem de área ocupada (%)	0,46	33,87	53,46	12,21

Fonte: A autora, 2026.

Em contrapartida, a classe que corresponde a teores inferiores a 10 g kg^{-1} , ocupou uma fração de apenas 0,46% da área analisada, a qual representaria porções de degradação severa ou de esgotamento do solo. A classe intermediária ($10 \text{ a } 15 \text{ g kg}^{-1}$) obtendo 33,87% de ocupação.

Quando se analisa o carbono orgânico na camada subsuperficial (20-40 cm), na extensão de Petrolina, é possível observar um desenvolvimento diferente daquele visto na superfície, conforme exibem os índices de validação cruzada (Tabela 9). Os ajustes dos semivariogramas demonstraram que as mudanças físicas e biológicas que acontecem em profundidade alteram o procedimento como a variabilidade espacial do carbono se estabelece no perfil do solo.

Tabela 9 - Métricas de erro da validação cruzada dos semivariogramas experimentais da área de Petrolina na profundidade de 20-40 cm.

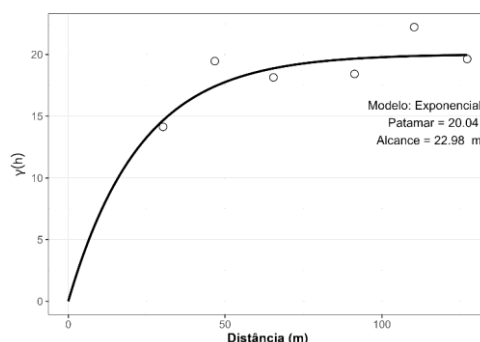
Modelo	ME	VE	RMSE	GDE	%RMSE
Esférico	-0,0000008	1,084	4,65	20	44,39
Exponencial	-0,007	1,11	4,19	1	39,93
Gaussiano	-0,007	1,10	4,65	1	39,70

Fonte: A autora, 2026.

Diante dos modelos avaliados, o modelo exponencial foi o mais preciso, registrando a menor RMSE (4,19) e um %RMSE de 39,93%. Apesar do modelo gaussiano ter obtido um valor ligeiramente menor de %RMSE (39,70), ele obteve um RMSE maior (4,65) e uma maior VE (1,10), o que confirma o modelo exponencial com maior estabilidade preditiva no geral.

Analisando o semivariograma teórico (Figura 11), é possível observar que o modelo exponencial atingiu a estabilização da variância em um patamar de 20,04, um valor menor em comparação ao da camada superficial (27,32). Essa diminuição no patamar considera a diminuição natural nos teores absolutos e na variabilidade total do carbono de acordo com o avanço da profundidade do solo, um processo comum em regiões agrícolas onde a maior atividade de contribuição biológica acontece na área de interação solo-atmosfera.

Figura 10 - Semivariograma experimental do tipo da área de Petrolina na profundidade de 20-40 cm.



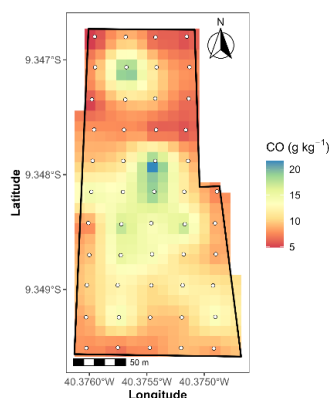
Fonte: A autora, 2026.

No entanto, o alcance espacial registrou um rápido acréscimo, estabelecendo-se em 22,98 m. Esse aumento sugere que as zonas homogêneas

de carbono se aproximam de serem mais amplas em profundidade do que na superfície. Tal característica, pode estar associada com a distribuição do CO na subsuperfície que deixa de ser influenciado pela direta e localizada deposição de resíduos das partes aéreas da mangueira, passando a considerar de maneira mais homogênea o avanço do sistema radicular profundo e a umidade localizada produzida pela irrigação com o decorrer do tempo.

Visualmente o mapa de variabilidade espacial (Figura 12), revela uma heterogeneidade do solo, onde os valores de CO variam de teores muito baixos, próximos de 5 g kg^{-1} , até picos isolados que passam dos 20 g kg^{-1} , é notório que o padrão de distribuição espacial apresentou zonas específicas mais suaves, validando o aumento do alcance espacial. O principal núcleo de acúmulo de CO ($>20 \text{ g kg}^{-1}$) ficou localizado na região central da extensão, seguida por outro núcleo na parte norte da extensão.

Figura 11 - Mapa de variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo na camada de 20-40 cm em área de manga de Petrolina, obtido por krigagem



Fonte: A autora, 2026.

Por outro lado, as zonas com menores teores de carbono ($<10 \text{ g kg}^{-1}$) aumentaram significativamente nessa camada, dominando praticamente toda a extremidade norte, a borda leste e toda a parte sul da extensão.

Ao se analisar a distribuição percentual das áreas ocupadas (Tabela 10) há uma inversão evidente do padrão visto na camada de 0-20 cm. Os dados revelam que a classe abaixo de 10 g kg^{-1} tornou-se a mais dominante na área, compreendendo 47,70% da área total analisada. Juntamente à classe intermediária (10 a 15 g kg^{-1}), que abrangeu 43,32%, obtiveram 91,02% ao todo

da camada de 20-40 cm que possui teores de carbono orgânico localizados abaixo de 15 g kg⁻¹.

Tabela 10 - Porcentagem de área ocupada por classe de Carbono orgânico do solo em área de manga em Petrolina na profundidade de 20-40 cm.

Teor de carbono (g/kg)	<10	10-15	15-20	>20
Porcentagem de área ocupada (%)	47,7	43,32	8,76	0,23

Fonte: A autora, 2026.

Já as classes de maiores teores passaram por uma diminuição na profundidade de 20-40 cm. A faixa de 15 a 20 g kg⁻¹ diminuiu para 8,76% da extensão, enquanto a classe acima de 20 g kg⁻¹ reduziu-se a um nível insignificante, ocupando apenas 0,23% da área.

5.4. Variabilidade espacial do CO em área de manga em Petrolândia

Dentre as métricas de erro da validação cruzada avaliadas (Tabela 11) na área de Petrolândia (PET) na camada superficial (0-20 cm), o modelo exponencial demonstrou melhor desempenho e ajuste para representar a distribuição espacial do carbono orgânico.

Tabela 11 - Métricas de erro da validação cruzada dos semivariogramas teóricos da área de Petrolândia na profundidade de 0-20 cm

Modelo	ME	VE	RMSE	GDE	%RMSE
Esférico	-0,020	1,64	5,06	2,02	27,36
Exponencial	-0,015	1,29	4,77	1,68	25,82
Gaussiano	-0,019	1,74	5,06	2,32	28,30

Fonte: A autora, 2026.

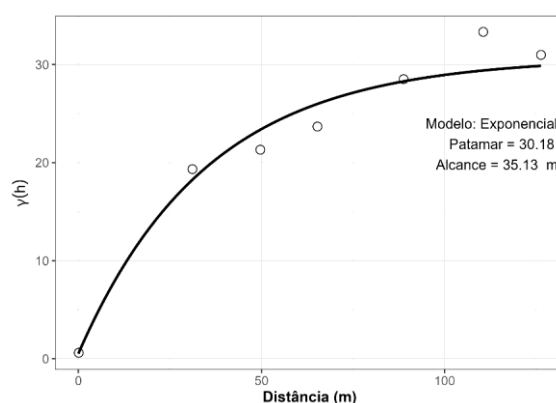
A certeza de escolha no modelo exponencial se dá em decorrência dos seus menores valores do RMSE (4,77) e %RMSE (25.82%). No que se refere a tendência e estabilidade das estimativas, o modelo exponencial também se demonstrou como sendo o mais representativo. Obtendo um ME próximo de

zero (-0,015) e uma menor VE (1,29), em comparação ao modelo esférico (ME= -0,015; VE= 1,64) e o gaussiano (ME= -0,019; VE= 1,74).

Além disso, o modelo exponencial apresentou um menor GDE (1,68) em relação ao esférico (2,02) e ao gaussiano (2,32), inferindo-se em uma modelagem mais suave à continuidade espacial real do carbono na camada de 0-20 cm.

Ao observar o comportamento do CO na camada superficial na área de Petrolândia, de acordo com o modelo exponencial (Figura 13), o modelo teve sua estabilização da variância em um patamar de 30,18. Esse valor alto indica que a camada de 0 a 20 cm apresenta uma maior variabilidade e amplitude nos teores de carbono do que as áreas analisadas anteriormente.

Figura 12 - Semivariograma experimental do tipo Exponencial da área de Petrolândia na profundidade de 0-20 cm.

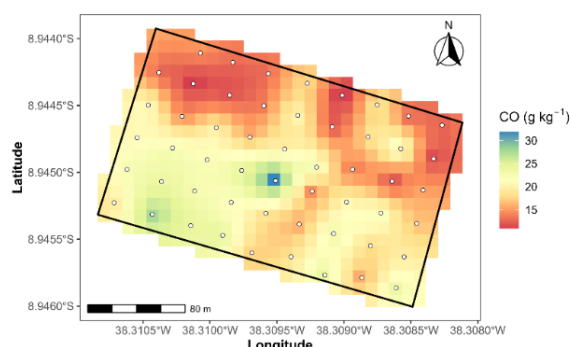


Fonte: A autora, 2026.

Por sua vez, o alcance espacial obtido foi de 35,13 m. Esse valor é um indicativo que os valores do CO se relacionam espacialmente em distâncias maiores na área. Dados espaciais com alcance com esse grau sugerem uma distribuição espacial mais contínua e a produção de manchas homogêneas mais abrangentes na extensão.

A espacialização dos teores do CO na camada superficial demonstrou uma variabilidade espacial com a produção de manchas contínuas e definidas ao longo da extensão (Figura 14). Os teores do carbono orgânico na camada de 0-20 cm modificaram desde teores próximos a 15 g kg⁻¹ até valores máximos que alcançaram os 30 g kg⁻¹ (mancha azulada), sinalizando um local com boa retenção de matéria orgânica superficial.

Figura 13 - Mapa de variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo na camada de 0-20 cm em área de manga de Petrolândia, obtido por krigagem



Fonte: A autora, 2026.

Quando partimos para a porcentagem de área ocupada por classe de carbono orgânico no solo de Petrolândia (Tabela 12), é possível observar que a classe 15 a 20 g kg⁻¹ foi a dominante na extensão, ocupando 39,24% da área total, próxima pela classe de 20 a 25 g kg⁻¹, que ocupou 33,76%. Essas classes juntas representam 73% da área total da superfície, possuindo uma consolidação de CO entre 15 a 25 g kg⁻¹. E se for somado as os pontos que ultrapassam esses teores, a classe de 25 a 30 g kg⁻¹ (3,38%) e a classe maior que 30 g kg⁻¹ (0,21), obtendo-se 76,59% da extensão se encontra em nível de carbono orgânico satisfatório.

Tabela 12 - Porcentagem de área ocupada por classe de Carbono orgânico do solo em área de manga em Petrolândia na profundidade de 0-20 cm.

Teor de carbono (g/kg)	<15	15-20	20-25	25-30	>30
Porcentagem de área ocupada (%)	23,42	39,24	33,76	3,38	0,21

Fonte: A autora, 2026.

No entanto, a classe abaixo de 15 g kg⁻¹ ocupou 23,42% da área. Embora apresente um valor inferior, esse percentual não pode ser negligenciado, porque representa à parte mais crítica localizada na região noroeste do mapa. Tal aspecto comprova que, apesar da extensão ser majoritariamente rico em CO na camada de 0 a 20 cm, existe uma porção bem definida que possivelmente sofre com a degradação rápida da matéria orgânica.

Analisando-se a camada de 20-40 cm, dentre os modelos avaliados o modelo exponencial demonstrou o melhor resultado para ser utilizado (Tabela 13). A escolha foi explicada pelo fato de o modelo exponencial ter apresentado as menores métricas de erro, marcando a menor RMSE (4,01) e o menor %RMSE (31,92%). Por outro lado, os modelos Esférico e Gaussiano obtiveram menor precisão, exibindo um valor semelhante e mais elevado de RMSE (4,22).

No que se refere à estabilidade e dispersão dos resíduos, o modelo exponencial também apresentou o melhor desempenho, pontuando um VE de 1,12. Tal aspecto infere-se em uma distribuição mais homogênea e controlada dos desvios, à medida que o modelo gaussiano, por exemplo, mostrou uma alta oscilação em subsuperfície ao obter um VE de 2,01. Em relação ao ME todos os modelos obtiveram valores baixos e bem próximos de zero, oscilando entre 0,010 (esférico) e 0,014 (exponencial), indicando menor erro de subestimação ou superestimação na área.

Tabela 13 - Métricas de erro da validação cruzada dos semivariogramas experimentais da área de Petrolândia na profundidade de 20-40 cm.

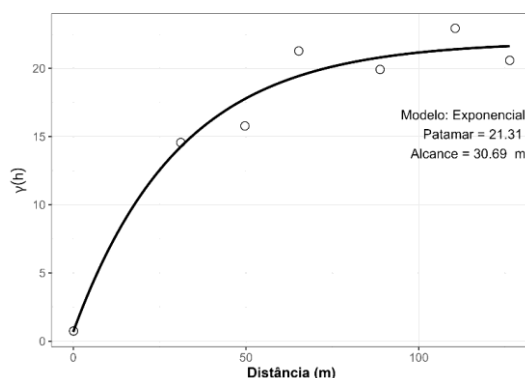
Modelo	ME	VE	RMSE	GDE	%RMSE
Esférico	0,010	1,50	4,22	3,40	33,63
Exponencial	0,014	1,12	4,01	3,05	31,92
Gaussiano	0,013	2,01	4,22	3,76	39,30

Fonte: A autora, 2026.

Além disso, o modelo exponencial evidenciou o menor valor de GDE (3,05) quando comparado ao esférico (3,40) e ao Gaussiano (3,76), validando maior suavidade à continuidade espacial real das camadas inferiores do solo.

Partindo-se para a análise do semivariograma exponencial (Figura 15), o modelo obteve uma estabilização na variância em um patamar de 21,31. Quando comparado ao patamar da camada superficial (30,18), aponta-se uma diminuição na variação total do CO. Tal decréscimo é uma resposta esperada em áreas de cultivo, pois as camadas mais subsuperficiais recebem menores interferências diretas das mudanças e aportes biológicos do que acontecem na superfície.

Figura 14 - Semivariograma experimental do tipo Exponencial da área de Petrolândia na profundidade de 20-40 cm.

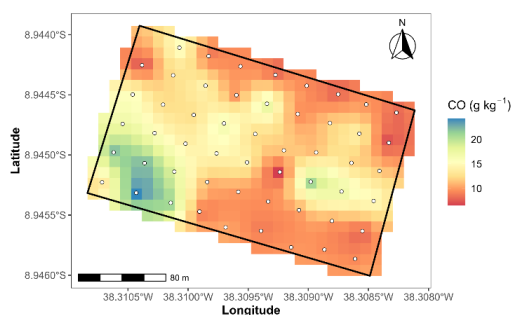


Fonte: A autora, 2026.

Em contrapartida, o alcance espacial se estabilizou em 30,69 m, registrando uma pequena diminuição em relação ao alcance superficial (35,13). Isso indica que a zona de influência entre as amostras diminuiu na subsuperfície, fazendo com que a determinação de distribuição espacial do carbono orgânico se torne sutilmente mais dividida em subsuperfície.

Ao se analisar o mapa de variabilidade espacial do teor de carbono orgânico (Figura 16), observa-se o valor máximo em 20 g kg^{-1} e menor de 10 g kg^{-1} . Demonstrando uma redução dos teores de carbono em profundidade.

Figura 15 - Mapa de variabilidade espacial do teor de carbono orgânico do solo na camada de 20-40 cm em área de manga de Petrolândia, obtido por krigagem



Fonte: A autora, 2026.

A maior extensão de retenção do CO ($> 20 \text{ g kg}^{-1}$) mudou da parte central onde se encontrava na superfície e se estabeleceu de maneira pontual na porção sudoeste do mapa, enquanto uma porção de menor expressão aparecem na parte centro-leste. Essas partes determinam as porções de máxima ação das

raízes profundas e a influência direta da umidade formando o bulbo úmido da irrigação constante.

Por outro lado, as porções com teores menores de CO ($< 15 \text{ g kg}^{-1}$) cresceram significativamente na subsuperfície, abrangendo praticamente toda a parte norte, a borda noroeste e quase toda a parte sul e sudeste da área.

A verificação das áreas ocupadas por cada classe de CO na subsuperfície demonstrou, de maneira quantitativa a redução dos estoques de matéria orgânica na camada 20-40 em Petrolândia (Tabela 14). Os dados obtidos evidenciam que a classe de 10 a 15 g kg^{-1} tornou-se a superior na subsuperfície, totalizando 47,68% de toda a área avaliada. Além disso, observa-se uma expansão da classe inferior a 10 g kg^{-1} , que passou a ocupar 31,65% da área. Ao somar essas classes, obtém-se 79,33% da área total da camada de 20-40 cm que possuem teores de CO localizados abaixo de 15 g kg^{-1} .

Tabela 14 - Porcentagem de área ocupada por classe de Carbono orgânico do solo em área de manga em Petrolândia na profundidade de 20-40 cm.

Teor de carbono (g/kg)	<10	10-15	15-20	>20
Porcentagem de área ocupada (%)	31.65	47.68	15.19	5.49

Fonte: A autora, 2026.

Por outro lado, as classes superiores passaram por um declínio em sua representatividade espacial. A classe intermediária a alta, de 15 a 20 g kg^{-1} , que na camada de 0-20 apresentou uma expressiva dominância, diminui-se para apenas 15,19% da área. O contexto de diminuição é ainda mais agravante na classe superior a 20 g kg^{-1} , que passou a pontuar uma pequena fração de 5,49% da extensão.

6. CONCLUSÃO

Ocorre redução considerável do teor de carbono orgânico na camada de 20-40cm em áreas de manga.

O modelo de semivariograma teórico exponencial é o que melhor representa os fenômenos espaciais do carbono orgânico em áreas de manga.

Mapas temáticos da distribuição espacial de carbono orgânico são fundamentais para direcionar o produtor na adoção de manejos que aumentem de forma eficiente o teor de carbono orgânico do solo.

Diante disso, a utilização dos mapas de variabilidade espacial confeccionadas servirão para orientar na aplicação localizada de adubos orgânicos, compostos e condicionadores de solo, concentrando-se o aporte nas zonas com menores teores de CO, em especial as classes abaixo de 10 g kg⁻¹ em Petrolina e abaixo de 5 g kg⁻¹ em Cabrobó.

Na fazenda localizada em Cabrobó-PE deve-se tomar medidas de aporte massivo da matéria orgânica, como adubação verde, trituração/incorporação dos resíduos de poda na superfície do solo para reverter o esgotamento de CO.

Já nas fazendas localizadas em Petrolina-PE e Petrolândia-PE pode-se manter e expandir as práticas de deposição de serrapilheira e outros resíduos vegetais sob a projeção da copa das mangueiras.

7. BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, T. G.; FERREIRA, J. M.; BASSI, B.; EVARISTO, J. W.; VENDRUSCULO, L. G. **Modelagem de semivariogramas para a distribuição de teor de matéria orgânica do solo no município de Sapezal (MT)**. In: ENCONTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIAS AGROSSUSTENTÁVEIS E VI JORNADA CIENTÍFICA DA EMBRAPA. AGROSSILVIPASTORIL, 6., 2017, Sinop, MT. Resumos... Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 251-254. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1139814/1/2017-cpamt-lgv-modelagem-semivariogramas-distribuicao-teor-materia-organica-solo-aspezal-mt-p-251-254.pdf> . Acesso em: 11 ago. 2025.

ARAÚJO, J. L. P.; CORREIA, R. C.; ARAÚJO, E. P.; BRITO, W. S. F. **Custos de produção e rentabilidade**. In: GENÚ, P. J. C.; PINTO, A. C. Q. A cultura da mangueira. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2002. p. 445-452.

ARAÚJO, J. L. P.; LIMA, M. A. C. **Aspectos socioeconômicos da Mangicultura no Vale do Submédio São Francisco**. Brasília: Embrapa, 2009. 37-40 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/882753/1/Pinheiro.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2025.

ARTUZO, F. D.; FOGUESATTO, C. R.; SILVA, L. X. **Agricultura de precisão: inovação para a produção mundial de alimentos e otimização de insumos agrícolas**. Revista Tecnologia e Sociedade , Paraná, 2017.

ASSAD, E. D.; MACEDO, M. A.; JÚNIOR, J. Z.; PINTO, H. S.; BRUNINI, O. **Avaliação de métodos geoestatísticos na espacialização de índices agrometeorológicos para definir riscos climáticos**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 2, pág. 233-242, fev. 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/tQbcvchMnsDnwB6YcqXPntJ/?lang=pt>. Acesso em : 18 ago. 2025.

BATCHELOR, B.; WHIGHAM, K.; DEWITT, J., et al. **Precision agriculture: introduction to precision agriculture**. Iowa Cooperative Extension, 1997. 4p.

BELTRÃO, B. A.; MASCARENHAS, J. C.; MIRANDA, J. L. F.; JÚNIOR, L. C. S.; GALVÃO, M. J. T. G.; PEREIRA, S. N. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: estado de Pernambuco: diagnóstico do município de Cabrobó**. Recife: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2005. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/server/api/core/bitstreams/17ca5ff0-eadb-46a7-a9df-e5cee17486fd/content>. Acesso em: 22 jun. 2026.

BERNARDI, A. C. C.; BUENO, J. O. A.; LAURENTI, N.; SANTOS, K. E. L.; ALVES, T. C. **Efeito da calagem e fertilizantes aplicados à taxa variável nos atributos químicos do solo e custos de produção de pastagem de capim Tanzânia manejadas intensivamente**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2018. 15 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1101049/efeito-da-calagem-e-fertilizantes-aplicados-a-taxa-variavel-nos-atributos-quimicos-do-solo-e-custos-de-producao-depastagem-de-capim-tanzania-manejadas-intensivamente>. Acesso em: 13 ago. 2025.

BÍBLIA SAGRADA: **Nova versão internacional**. São Paulo: Editora Vida, 2015.

BURAK, D. L.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V. **Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob cafeeiro Conilon: relação com textura, matéria orgânica e relevo**. *Bragantia*, Campinas, v. 1, pág. 1330-1339, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/DSYhrC8TCjhG96VpQdVbNDf/?lang=pt>. Acesso em: 11 ago. 2025.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO; R.F.; KONOPKA, A.E. **Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils**. *Soil Science Society of American Journal*, v.58, p.1501-1511, 1994. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>. Acesso em: 11 ago. 2025.

CAPELLI, N.L. **Agricultura de precisão - Novas tecnologias para o processo produtivo**. LIE/DMAQAG/ FEAGRI/UNICAMP, 1999.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. **Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 6, pág. 2345-2356, dez. 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/cTwHsDTsvFzsWVMQYsthxgP/?lang=pt>. Acesso em: 11 ago. 2025.

CEDDIA, M.B.; VIEIRA, S.R.; VILLELA, A.L.O.; MOTA, L.S.; ANJOS, L.H.C.; CARVALHO, D.F. **Topography and spatial variability of soil physical properties**. *Scientia Agricola*, v.66, p.338-352, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sa/a/zkfy3LqDp4jPF7g6BBVZMPg/?lang=en>. Acesso em: 11 ago. 2025.

CLARK, I. **Practical geostatistics**. London: Elsevier, 1984. p. 129.

CRUZ, L. E. C.; FILIPPINI, J. M. A.; PARFITT, J. M. B.; PILLON, C. N. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. In: BERNARDI, Alberto Carlos de Campos et al. (Ed.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 209-216. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1004844/1/Pillon211Agriculturadeprecisao2014.pdf>. Acesso em: 11 atrás. 2025.

CUNHA, G. A. P; SAMPAIO, J. M. M; NASCIMENTO, A. S; FILHO, H. P. S; MEDINA, V. M. **Manga para exportação: aspectos técnicos da produção**. Brasília, DF: Embrapa-SPI, 1994. 35 p. (Embrapa-SPI. Publicações Técnicas FRUPEX, n. 8).

DELARMELINA, W. M.; CALDEIRA, M. V. W.; JÚNIOR, D. G.; GODINHO, T. O.; CALIMAN, J. P.; GONÇALVES, E. O.; KUNZ, S. H.; PEREIRA, M. G.; SILVA, C. S. **Atributos do solo e variabilidade espacial do estoque de carbono orgânico do solo sob a Mata Atlântica**, Brasil. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 3, pág. 1528-1551, **27 nov. 2022**. DOI: 10.5902/1980509867028. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/653L9xxk9XBzTCpp84Txx3w/?lng=en>. Acesso em: 21 jun. 2026.

DONADIO, L. C. **Cultura da mangueira processada**. São Paulo: Livro Cereais, 1980.

EMBRAPA. **O Brasil bate recorde de receita e exportação com mangá produzido no Nordeste**. Embrapa Semiárido, 3 jul. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/87702249/brasil-bate-recorde-de-receita-e-exportacao-com-manga-produzida-no-nordeste>. Acesso em: 7 ago. 2025.

FONSECA, Nelson; CUNHA, GAP da; NASCIMENTO, AS do; SANTOS FILHO, HP. **A cultura do mangá**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 63 p. (Coleção Plantar, 53). ISBN 85-7383-371-8.

GAYET, J. P. **The european mango market: Brazil leads in Europe**. Fruitrop, n. 2, p. 11-12, 1994.

KRIVORUCHKO, K. **Using linear and-nom kriging interpolators to produce probability maps**. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR MATHEMATICAL GEOLOGY, 2001. Cancun. Proceedings... Cancun: International Association for Mathematical Geology, 2001. p. 1-18.

LOBATO, G. M. **Recursos genéticos e melhoramento da mangueira no Brasil**. Chapadinha, MA: Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de Chapadinha - CCCh, Curso de Agronomia. 2023. 38 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia). Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/7119/1/GISELLYMARTINSLOBATO.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2025.

LUCAS, Gabriel João Moreira de. **Matéria orgânica e carbono no solo**. IBA, 23 fora. 2025. Disponível em: <https://iba.agr.br/materia-organica-e-carbono-no-solo/>. Acesso em: 21 jun. 2026.

MACHADO, L. O.; LANA, Â. Q.M.; LANA, R. M. Q. ; GUIMARÃES, E. C.; FERREIRA, C. V. **Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema de plantio convencional**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 4, pág. 747-757, jun. 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/dBh83v3Kj8cpSnRmFXVf65t/?lang=pt>. Acesso em: 11 ago. 2025.

MANZATTO, C.V.; BHERING, S.B.; SIMÕES, M. **Agricultura de precisão: propostas e ações da Embrapa solos**.

MEDEIROS, M. C. G.; NASCIMENTO, T. A.; SILVA JÚNIOR, E. O.; AMORIM, A. C.; NÓBREGA, R. S. **Caracterização dos índices térmicos e pluviométricos no semiárido pernambucano: o caso do município de Petrolina - Pernambuco - Brasil**. In: WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 1., 2013, Campina Grande - PB. Anais... Campina Grande: Editora Realize, 2013. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/wiasb/2013/Modalidade_4datahora_1

_11_2013_13_01_45_idinscrito_378_3d37430a79f33f4e638ecd1fed80c08a.pdf. Acesso em: 14 ago. 2025.

MIGUEL, F. R. M. **Variabilidade espacial de atributos do solo e produtividade em área cultivada com cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico. 2010. Dissertação (Mestrado) - Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2010. 80 fls. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstitutoposgraduacao/repositorio/storage/teses_dissertacoes/pb1214608.pdf. Acesso em: 18 nov. 2025.

MOLIN, J. P. **Agricultura de Precisão**. In: BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Agricultura de precisão / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e cooperativismo. – Brasília : Mapa/ACS, 2013. 36 p.

NETO, F. C. C.; SAMPAIO, F. M. T.; VELOSO, M. E. C.; MATIAS, S. S. R.; ANDRADE, F. R.; LOBATO, M. G. R. **Variabilidade espacial dos agregados e carbono orgânico total em Neossolo Litólico Eutrófico no município de Gilbués, PI**. Revista Ciência Agronômica, v. 1, pág. 75-83, jan./mar. 2015. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1015138/1/CarbonoOrganicoMarcosEmanuel.pdf> Acesso em: 21 jun. 2026.

NETO, F. P. L. **Histórico da mangicultura no Vale do Submédio São Francisco**. Brasília: Embrapa, 2009. 35-36 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/882753/1/Pinheiro.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2025.

Nutrição de Safras. **O carbono e os exsudatos no desenvolvimento das plantas**. Nutrição de Safras, 2026. Disponível em: <https://nutricaoodesafras.com.br/o-carbono-e-os-exsudatos-nodesenvolvimento-das-plantas>. Acesso em: 23 jun. 2026.

OLIVEIRA, A.R.; et al. **Cultivo da mangueira**. 2. Brasília- DF: Embrapa semiárido, 2010.

PARAHYBA, R. B. V.; SILVA, F. H. B. B.; SILVA, F. B. R.; FILHO, J. C. A.; LOPES, P. R. C.; SILVA, D. F.; LIMA, P. C.. **Diagnóstico agroambiental do município de Petrolândia - Estado de Pernambuco**. Dezembro 2004. Série Circular Técnica, n. 29. Recife: Embrapa Solos; Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2004. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/965992/1/circtec292004petrolandia.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2026.

PAREWA, Hanuman Prasad; MEENA, Vijay Singh; MEENA, Sunita Kumari; CHOUDHARY, Anirudh; KUMAR, Manoj. **Estratégias de gestão de carbono para sistemas de produção alimentar sustentáveis**. In: *Sustentabilidade do Solo Agrícola e Gestão de Carbono*. 2023. p. 69-98. DOI: 10.1016/B978-0-323-95911-7.00003-7.

PEREIRA, Artenízia Luzia da Silva; PACHECO, Clécia Simone Gonçalves Rosa; FLORÊNCIO, Roberto Remígio; SANTOS, Carlos Alberto Batista dos.

Agricultura sustentável: quintais produtivos no semiárido cabroboense. Revista Acadêmica Online, 2025. DOI: 10.36238/2359-5787.2025.v11n56.1415. Disponível em: <https://www.revistaacademicaonline.com/index.php/rao/article/view/1415/1457>. Acesso em: 22 jun. 2026.

RESENDE, A. V.; SHIRATSUCHI, L. S.; COELHO, A. M.; CORAZZA, E. J.; VILELA, M. F.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; BASSOI, L. H.; NAIME, J. M. **Agricultura de precisão no Brasil: avanços e impactos no manejo e na conservação do solo, na sustentabilidade e na segurança alimentar.** In: LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; ARAÚJO, A. S. F. (Ed.). Agricultura conservacionista no Brasil. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 468- 488. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1008255>. Acesso em: 13 ago. 2025.

RESENDE, A. V.; SHIRATSUCHI, L. S.; COELHO, A. M.; CORAZZA, E. J.; VILELA, M. F.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; BASSOI, L. H.; NAIME, J. M. **Agricultura de Precisão no Brasil: Avanços, Dificuldades e Impactos no Manejo e Conservação do solo, Segurança Alimentar e Sustentabilidade.** Anais: XVIII REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA - Novos Caminhos para a Agricultura Conservacionista no Brasil, 2010. 23 p.

ROMÃO, R. L. **Carbono orgânico em função do uso do solo.** 2012. Trabalho de conclusão de curso (Zootecnia) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus de Jaboticabal, Jaboticabal, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/39852b11-1a25-4765-87ef-b e e1a2dbfe23/content>. Acesso em: 21 jun. 2026.

SANTOS, L. S. **Estudo dos impactos socioambientais decorrentes do uso e ocupação do solo às margens do Lago de Itaparica, no município de Petrolândia - PE.** 2023. Artigo apresentado ao curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Recursos Hídricos para o Semiárido — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Salgueiro, PE, 2023. Disponível em: <https://releia.ifsertaope.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1124/1/TCC%20-%20ESTUDO%20DOS%20IMPACTOS%20SOCIOAMBIENTAIS%20DECORRENTES%20DO%20E%20OCUPA%20-%20SOLO%20-%20MARGENS%20DO%20LAGO%20DE%20ITAPARICA%20-%20MUNIC%20-%20PE.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2026.

SENAR - Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Agricultura de precisão: conceitos.** Brasília: SENAR, 2019. 28 p. (Coleção SENAR, 244). Disponível em: https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/244_AP_Agricultura-de-precisao-para-todos.pdf. Acesso em: 09 ago. 2025.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL (SENAR). **Agricultura de precisão: distribuidor em taxa variável.** Brasília: Senar, 2020. 80 p. Disponível em: https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/245_AGRICULTURA-DE-PRECISAO-DISTRIBUIDOR-EM-TAXA-VARIAVEL.pdf . Acesso em: 13 ago. 2025.

SILVA, O.; LOPES, P. M. O.; MOURA, G. B. A.; SILVA, É. F. de F.; SILVA, J. L. B.; BEZERRA, A. C. **Evolução espaço-temporal do risco de manipulação da cobertura vegetal de Petrolina-PE**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 34, n. 1, pág. 89-99, 2019. DOI: 10.1590/0102-7786334018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333487409_Evolucao_EspacoTemporal_do_Risco_de_Degradacao_da_Cobertura_Vegetal_de_Petrolina-PE#pf3. Acesso em: 14 ago. 2025.

SIMÃO, S. **Manual de fruticultura**. São Paulo: Ceres, 1971. 530 p.

SOUZA, J. S.; ALMEIDA, C. O.; ARAÚJO, J. L. P.; CARDOSO, C. E. L. **Aspectos socioeconômicos**. In: GENUÍ, P. J. C.; PINTO, A. C. Q. A cultura da mangueira. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2002. p. 19-29.

STURARO, J. R. **Geoestatística básica**. Rio Claro: UNESP, Departamento de Geologia Aplicada - IGCE, 2015. Apostila. Disponível em: <https://igce.rc.unesp.br/Home/Departamentos47/geologiaaplicada/apostila-basica.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2025.

TEXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEXEIRA, W. G. (EDITORES). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 574 p. 978-85-7035-771-7.

TSCHIEDEL, Mauro; FERREIRA, Mauro Fernando. **Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 159-163, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/54b6LCQHHRJsnwqdCTGKHtB/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 09 ago. 2025.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

VIEIRA, S. R. **Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP)**. Bragantia, Campinas, v. 56, n. 1, p. 25-39, 1997. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/wKW4WXWNkXfQBrxzCRjDTqF/?lang=pt>. Acesso em: 14 ago. 2025.

VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A.; GREGO, C. R. **Aplicações de geoestatística em pesquisa com cana-de-açúcar**. In: MIRANDADINARDO, L. L.; VASCONCELOS, A C. M.; LANDELL, M. G. A (Ed.). Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 839-852. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/17769/aplicacoes-de-geoestatistica-em-pesquisas-com-cana-de-acucar>. Acesso em: 11 ago. 2025.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. **Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties**. Hilgardia, 51:1-75, 1983. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/287453567_Geostatistical_theory_and_application_to_variability_of_some_agronomical_properties. Acesso em: 14 ago. 2025.

VOLTZ, M.; LAGACHERIE, P.; LOUCHART, X. **Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area**. European Journal of Soil Science, Oxford, v. 48, p. 19-30, 1997.