



Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE
Unidade Acadêmica de Serra Talhada – UAST
Bacharelado em Agronomia

Wagner Martins dos Santos

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS EM UM
CAMBISSOLO HÁPLICO TA EUTRÓFICO TÍPICO**

Serra Talhada – PE

2020

Wagner Martins dos Santos

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS EM UM
CAMBISSOLO HÁPLICO TA EUTRÓFICO TÍPICO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada do curso de Bacharelado em Agronomia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Alan Cesar Bezerra

Serra Talhada – PE

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas

Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S237v Santos, Wagner Martins dos
VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS EM UM CAMBISSOLO
HÁPLICO TA EUTRÓFICO TÍPICO / Wagner Martins dos Santos. - 2020.
37 f. : il.
- Orientador: Alan Cesar Bezerra.
Inclui Referências.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Bacharelado em Agronomia, Serra Talhada, 2020.
1. Geoestatística. 2. atributos químicos. 3. variabilidade. 4. dependência espacial. I. Bezerra,
Alan Cesar, orient. II. Título

CDD 630

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS EM UM
CAMBISSOLO HÁPLICO TA EUTRÓFICO TÍPICO**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural de Pernambuco/Unidade
Acadêmica de Serra Talhada do curso
de Bacharelado em Agronomia como
requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Agronomia.

Aprovada em _____ de _____ de 2020.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alan Cezar Bezerra
(Orientador, UAST/UFRPE)

Prof. Dr. Alexandre Campelo de Oliveira
(Examinador interno, UAST/UFRPE)

Agrônomo Msc. Denizard Oresca
(Examinador externo, UAST/UFRPE)

Serra Talhada – PE

2020

DEDICO

Ao senhor Deus por ter me fortalecido e me mantido no caminho certo;

Dedico esta pesquisa aos meus pais. Sem eles nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me proporcionar perseverança e nunca me desamparar.

Aos meus pais Francisco Martins de Sousa e Jacira dos Santos pelo apoio e incentivo durante toda minha vida e todos os sacrifícios que fizeram por mim.

A minha irmã Gislaine Martins dos Santos pela amizade e atenção dedicadas sempre que precisei.

A minha noiva Lady Daiane Costa de Sousa, por todo apoio e compreensão em todos os momentos dessa jornada. Por sempre ter estado ao meu lado me fazendo ter forças e nunca desistir, e sorrir mesmo nos momentos mais tristes.

Aos meus familiares Ana Cacilda dos Santos, Cristiane Alves de Sousa, Eleonor Martins de Sousa Costa, José Braz da hora, Maria de Fátima Martins da hora, Maria Salomé Alves, Thaynnary Martins da hora, Thalison José martins da hora, Thomaz Ferreira dos Santos, Wilian Ferreira dos Santos e Werley Ferreira dos Santos.

Ao meu orientador, Alan César Bezerra, por toda a dedicação a sua profissão, pelo apoio, paciência e ensinamentos a mim destinados e ao professor Alexandre Campelo de Oliveira por disponibilização dos dados.

A todos os meus professores que contribuíram na minha jornada, obrigado por todo o conhecimento compartilhado.

Aos meus amigos Allan Alexandre Jorge Bem, Artur José dos Santos, Eron Pereira da Silva, Irlândio De Sá Santana, Ivia Mayara Nunes Melo, Jandis Ferreira Nunes De Araujo, João Pedro Alves De Souza Santos, José Orlando Nunes Da Silva, Leonardo Francelino De Souza, Luiz Fernando De Lima Pereira, Lucas Henrique Maciel, Renan Matheus Cordeiro Leite, Matheus Araujo Costa, Victor Henrique De Lima Gomes, Willyan Cesar Cavalcante Novaes, entre tantos outros.

À banca pela disponibilidade de avaliar o trabalho.

“Um herói pode ser qualquer um, até mesmo um homem fazendo algo tão simples e reconfortante como colocar um casaco em torno dos ombros de um menino, para que ele saiba que o mundo não acabou.”

Batman

SUMÁRIO

RESUMO	1
1. INTRODUÇÃO	3
2. REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 IMPORTÂNCIA DOS NUTRIENTES	4
2.2 FERTILIZANTES	5
2.3 SUSTENTABILIDADE	6
2.4 GEOESTATÍSTICA E AGRICULTURA DE PRECISÃO	6
3. OBJETIVOS	10
3.1 OBJETIVO GERAL	10
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
4. METODOLOGIA	11
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
6. CONCLUSÕES	23
REFERÊNCIAS	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Análise descritiva dos atributos químicos do solo para as profundidades 0-10 cm e 10-20 cm.....	14
Tabela 2- Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos do solo na profundidade de 0-10 e 10-20 cm.....	16

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Exemplo de semivariograma.	8
Figura 2- Localização da área experimental, Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Microrregião do Pajeú, Pernambuco, Brasil.....	11
Figura 3- Grid de coleta das amostras.	12
Figura 4- Modelos e parâmetros (efeito pepita; patamar; alcance) dos semivariogramas dos atributos K (potássio), P (fósforo), pH e Na (sódio) para a profundidade de 0-10 cm.	17
Figura 5- Modelos e parâmetros (efeito pepita; patamar; alcance) dos semivariogramas dos atributos Ca (cálcio), Mg (magnésio) e MO (matéria orgânica) para a profundidade de 0-10 cm.	17
Figura 6- Modelos e parâmetros (efeito pepita; patamar; alcance) dos semivariogramas dos atributos H+Al (acidez potencial), SB (soma de bases) e CTC a pH 7.0 para a profundidade de 0-10 cm.....	18
Figura 7- Modelos e parâmetros (efeito pepita; patamar; alcance) dos semivariogramas dos atributos K (potássio), P (fósforo), pH e Na (sódio) para a profundidade de 10-20 cm.	18
Figura 8- Modelos e parâmetros (efeito pepita; patamar; alcance) dos semivariogramas dos atributos Ca (cálcio), Mg (magnésio) e MO (matéria orgânica) para a profundidade de 10-20 cm.	19
Figura 9- Modelos e parâmetros (efeito pepita; patamar; alcance) dos semivariogramas dos atributos H+Al (acidez potencial), SB (soma de bases) e CTC a pH 7.0 para a profundidade de 10-20 cm.....	19
Figura 10- Mapas dos atributos químicos P (fósforo), K (potássio), Na (sódio), pH, Ca (cálcio), Mg (magnésio), H+Al (acidez potencial), MO (matéria orgânica), SB (soma de bases) e CTC a pH 7.0 na profundidade de 0-10 cm.....	21
Figura 11- Mapas dos atributos químicos P (fósforo), K (potássio), Na (sódio), pH, Ca (cálcio), Mg (magnésio), H+Al (acidez potencial), MO (matéria orgânica), SB (soma de bases) e CTC a pH 7.0 na profundidade de 10-20 cm.....	22

Wagner Martins dos Santos, Bacharelado em Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Novembro de 2020. **Variabilidade espacial dos atributos químicos em um Cambissolo Háplico Ta eutrófico típico.**
Orientador: Prof. Dr. Alan Cesar Bezerra.

RESUMO

Tecnologias inovadoras, como expansão do plantio direto, sistemas integrados de produção e biotecnologia das culturas, estão se tornando cada vez mais importantes no nosso país, denotando a importância, do desenvolvimento de técnicas que permitam o uso mais eficiente dos recursos. Dito isso a variabilidade espacial de atributos químicos de solo foi avaliada em uma área experimental na Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST) em solo classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico Típico, com objetivo de analisar o comportamento espacial das variáveis: Fósforo (P), pH, Potássio (K), Sódio (Na), Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Matéria Orgânica (M.O), Acidez Potencial (H+Al), Soma de Bases (SB) e Capacidade de Troca de Cátions (CTC) a pH 7.0. Os dados foram coletados em uma grade de amostra dividida em 4 parcelas contendo 16 subparcelas cada de 3,75x3m, resultando em 128 amostras simples divididas em profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20cm. Os dados foram analisados por estatística descritiva e geoestatística por meio da análise de dependência espacial e ajuste dos semivariogramas utilizado o software livre R versão 3.5.1. A maioria dos atributos avaliados apresentou coeficiente de variação (CV) médio, com o maior valor de CV encontrado para a variável K, 102.79 na profundidade de 0-20 e o menor valor para pH, 3.58. A maioria dos atributos apresentou efeito pepita puro podendo ser resultante de erro de medidas ou pelo espaçamento ser maior do que o necessário para identificar a dependência espacial sendo assim ajustados ao modelo linear, entre as variáveis que se ajustaram aos modelos a maioria apresentou dependência espacial fraca com a variável SB apresentando melhor dependência espacial.

Palavras chaves: Geoestatística, atributos químicos, variabilidade, dependência espacial.

Agronomy Bachelor, Federal Rural University of Pernambuco / Academic Unit of Serra Talhada, November 2020. **Spatial variability of chemical attributes in a typical eutrophic Ta Haplic Cambissol**. Advisor: Prof. Dr. Alan Cesar Bezerra.

ABSTRACT

Innovative technologies, such as the expansion of no-till, integrated production systems, and crop biotechnology, are becoming increasingly important in our country, showing the importance of developing techniques that allow more efficient use of resources. That said, the spatial variability of chemical soil attributes was evaluated in an experimental area at the Federal Rural University of Pernambuco / Serra Talhada Academic Unit (UFRPE / UAST) in soil classified as Typical Cambisol Háplico Ta Eutrófico Typico, to analyze the spatial behavior of the variables: Phosphorus (P), pH, Potassium (K), Sodium (Na), Aluminum (Al), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Organic Matter (MO), Potential Acidity (H + Al), Sum Bases (SB) and Cation Exchange Capacity (CTC) at pH 7.0. The data were collected in a sample grid divided into 4 plots containing 16 subplots each of 3.75x3m, resulting in 128 simple samples divided into depths from 0 to 10 cm and 10 to 20 cm. The data were analyzed using descriptive and geostatistical statistics using spatial dependence analysis and adjustment of semivariograms using the free software R version 3.5.1. Most of the evaluated attributes had an average coefficient of variation (CV) with the highest CV value found for variable K, 102.79 at the depth of 0-20, and the lowest value for pH, 3.58. Most of the attributes showed a pure nugget effect, which may be the result of measurement errors or because the spacing is greater than necessary to identify the spatial dependence, thus being adjusted to the linear model, among the variables that fit the models, the majority presented weak spatial dependence with the variable SB presenting better spatial dependence.

Keywords: Geostatistics, chemical attributes, variability, spatial dependence.

1. INTRODUÇÃO

Segundo estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU) a população atingirá em 2050 um total de 9.7 bilhões de habitantes (MACEDO et al., 2017), refletindo diretamente na necessidade de aumento na produção de alimentos e conservação de áreas produtivas. Assim, os produtores deverão tornar suas produções mais eficientes, tanto em quantidade quanto em qualidade, atendendo em conjunto os interesses econômicos e ecológicos.

Desta forma, estudos voltados para as variáveis presentes no meio agrícola, tais como as propriedades químicas do solo que refletem diretamente na produtividade, são de extrema importância para elevar a eficiência neste meio (DE SOUZA et al., 2008). Principalmente quando nos referimos a um cenário que frequentemente considera as áreas como homogêneas, desconsiderando a existência da variabilidade, fazendo que as aplicações de fertilizantes ocorrem em mesma quantidade em toda área (MACHADO et al., 2007). Mueller et al., (2013) relatam a importância da gerência adequada desta atividade, com intuito de evitar super ou subestimativa da quantidade necessária de aplicação, reduzindo os possíveis impactos ambientais e econômicos.

Entres os impactos ocasionados pela aplicação inadequada de fertilizantes temos a toxicidade, oriunda de quantidades inadequadas de determinados nutrientes, como mostrado por Souza (2018), que relata a importância do boro no algodoeiro mas que em excesso pode induzir toxicidade; Comiran (2019), que descreve os problemas causados pelo cobalto na soja, que é essencial na fixação biológica de nitrogênio, mas em excesso causa manchas necróticas nos cotilédones e folhas com folíolos cloróticos, diminuindo a absorção de ferro; e Souza et al., (2019) que demonstra os efeitos tóxicos causados pela aplicação de ureia, na germinação de sementes de rabanete e couve.

Tecnologias inovadoras, como expansão do plantio direto, sistemas integrados de produção e biotecnologia das culturas, estão se tornando cada vez mais importantes no nosso país (SIMÕES, 2017.), denotando a importância, do desenvolvimento de técnicas que permitam o uso mais eficiente dos recursos. Evidenciando a importância de ferramentas como a geoestatística, que permite estabelecer a correlação existente entre as variáveis que aparentemente possam apresentar aleatoriedade (YAMAMOTO et al., 2015), utilizando-se de semivariogramas, que expressam a dependência espacial entre as

amostras, e a krigagem, que permite a estimativa de valores, possibilitando a determinação da variabilidade de toda a área (VIEIRA, 2000).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 IMPORTÂNCIA DOS NUTRIENTES

A designação dos elementos minerais em macro e micronutrientes, não obrigatoriamente os classificam, como menos ou mais importantes, onde são absorvidos de diferentes formas por cada espécie, como verificado no fruto do cafeeiro por Catani & Moraes (1964) e, absorvendo-se então, desde elementos essenciais (aqueles quais a planta não vive sem) a elementos tóxicos (FAQUIN, 2005). Essas evidências reforçam a importância da relação solo-planta, conhecendo então, a composição do solo e como os nutrientes se distribuem pelo mesmo, uma vez que, a falta, ou quantidades insuficientes ou exageradas prejudicam a cultura.

Como visto por Zambolim & Ventura (2016) que os nutrientes em alguns casos, contribuem para resistência a doenças que reduzem a qualidade e produção. Por sua vez, Mendonça et al., (2003) verificou a influência do Alumínio (Al) na absorção de macronutrientes por duas cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.), observando a redução na taxa de absorção, sendo Mg, Ca, P e K com as taxas mais afetadas. Rosolem (1984) notou redução na produção de sorgo sacarino (*Sorghum bicolor*) para relações de Mg/K menores que 0,6 e Ca/K menores que 7,4. De Almeida et al., (2009) constatou aumento no crescimento da mamoneira (*Ricinus communis*) em resposta a adubação fosfatada. Andrade et al., (2000), obtendo aumento na produtividade do capim-elefante cv. Napier, em cerca de 86% com adubação nitrogenada e potássica. Albino & Campo (2001) relata a essencialidade do molibdênio para a soja por participar no processo de fixação biológica do nitrogênio, por meio da nitrogenase e Veloso et al., (1995) constatou influência do manganês sobre o desenvolvimento da pimenteira do reino (*Piper nigrum* L.) tanto em excesso como em sua ausência.

Pesquisas essas, que deixam notório a importância, de se ter controle detalhado sobre os níveis de nutrientes presente na área de produção, para assim manejá-los de forma correta.

2.2 FERTILIZANTES

Os fertilizantes estão definidos na legislação brasileira (Decreto 86.955, de 18 de fevereiro de 1982) como: substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes das plantas; e sua importância consiste na capacidade de repor nutrientes que são retirados do solo, pela atividade de colheita onde são retirados pela própria planta e pela lixiviação por meio da água que percola no solo, possuindo assim, participação fundamental no aumento da produtividade (Dias & Fernandez, 2006).

Reetz (2017) cita a importância do manejo adequado às aplicações, relatando ainda, a relevância do seu uso, como exemplo os fertilizantes nitrogenados, que contribuem para a alimentação de 48% da população, e afirma que sem o uso dessa prática o mundo só produziria metade dos seus alimentos básicos, aumentando-se a necessidade de aumentar ou explorar mais áreas de produção, intensificando a problemática ambiental.

Além de benefícios existem também malefícios que podem ser provocados, principalmente quando utilizados de forma irracional, como a salinização do solo, como reforçado por Dias (2004). Este autor alega que a causa desse problema é um conjunto de fatores “manejo de irrigação, chuvas insuficientes para lixiviação e uso de altas doses de fertilizantes”, decrescendo a produtividade da cultura à medida que se aproxima ou ultrapassa os valores de salinidade tolerados pela cultura, agindo na redução da própria fertilidade, da capacidade de infiltração e redução do potencial osmótico (SCHOSSLER, 2012); e a toxicidade, oriunda de quantidades inadequadas de determinados nutrientes, como mostrado por Sestren & Kroplin (2009), que verificou toxicidade causada por boro no algodão, cultura na qual é requerido em grande quantidade; Sfredo & Borkert (2004), que descreve os problemas causados pelo Cobalto na soja, que é essencial na fixação biológica de nitrogênio, mas em excesso diminui a absorção de ferro, e Furlani (1976) que identifica o excesso de cloro devido a aplicação de Cloreto de potássio, sendo responsável por redução no crescimento, necrose e desfolhamento no cafeeiro (*Coffea arábica* L. cv. catuai).

Dessa maneira, notasse a importância do uso da tecnologia para a aplicação de fertilizantes, que permita ajustar as doses de aplicação e a realização de diversos processos analíticos, para definir a disponibilidade de nutrientes no solo e teores nas plantas, obtendo-se melhor eficiência deste processo (REETZ, 2017).

2.3 SUSTENTABILIDADE

Os impactos causados ao meio ambiente vem sendo cada vez mais evidenciados, em parte por uma gama de acontecimentos de grande porte, como exemplo as queimadas ocorridas na Amazônia e o rompimento da barragem de Brumadinho, ambos em 2019. Esses fatos comovem as pessoas pelo mundo, e funcionam como uma espécie de “propaganda” para uma reflexão séria sobre a temática ambiental, que vem ganhando cada vez mais força, em que segundo Jacobi (2005) observando-se o quadro socioambiental das sociedades contemporâneas demonstra que os impactos gerados pelos humanos ao meio ambiente estão cada vez mais complexos, tanto em termos quantitativos como em termos qualitativos.

A sustentabilidade ambiental, é então um desafio para a agricultura, assim como descrito por Assad (2004), onde visando-se o aspecto econômico, se introduz uma cultura que naturalmente não pertencia à determinado ambiente, tornando necessário, manter os impactos resultantes dessa pratica em níveis mínimos, melhorando a eficiência de aplicação e diminuído a dependência do uso de insumos externos e recursos não renováveis (ARTUZO, 2017).

Tecnologias inovadoras, como expansão do plantio direto, sistemas integrados de produção e biotecnologia das culturas, que buscam uma agricultura sustentável, estão se tornando cada vez mais importante no nosso país (SIMÕES; SOLER; PY, 2017.), denotando a importância, do desenvolvimento de técnicas que permitam o uso mais eficiente dos recursos naturais.

Logo, se encontramos em crescimento na tendência de aumentar a produção de forma sustentável, não podendo se resumir em apenas expansão das áreas, mas se produzir mais focando no adequado manejo da cultura e do solo, como exemplo o uso eficiente de insumos externos (RIBEIRO; MARINHO; ESPINOSA, 2018).

2.4 GEOESTATISTICA E AGRICULTURA DE PRECISÃO

As tecnologias surgem como solução para se manejar o solo, buscando o uso eficiente dos recursos e gerando economia (DE CARVALHO 2002), aplicando-se, então, o manejo de forma localizada e em quantidades suficientes (sem deficiência ou exagero). Para tanto, essa prática sendo necessário o conhecimento da variabilidade dos fatores envolvidos na atividade agrícola, seja eles climáticos ou edáficos, sendo possível

identificar relatos de problemas devido ao desconsiderar a variação destes fatores, como o descrito por Raun & Johnson (1999), que estimam a perda de 15,9 bilhões dólares devido a ineficiência do uso do nitrogênio.

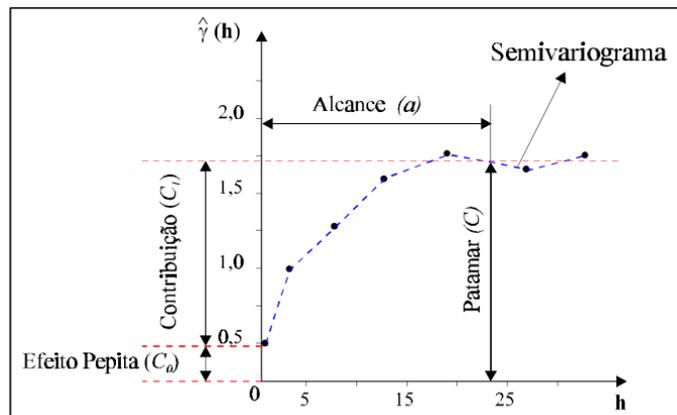
Para se minimizar tamanhas perdas, realiza-se o levantamentos de características no solo através de análises e coletas de dados, os quais, podem ser analisados de forma espacial por ferramentas de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), contribuindo para este sistema um método estatístico determinado como Geoestatística (VALENCIA; MEIRELLES; BETTINI 2004).

A geoestatística permite entender como as propriedades se comportam, definida como subárea da estatística que estuda variáveis regionalizadas (YAMAMOTO, 2015), considerando a localização geográfica e a dependência espacial (CAMARGO, 1998). A krigagem é um desses modelos diferenciada dos demais por estimar uma matriz de covariância espacial, determinando pesos as amostras, tratando da redundância dos dados, a vizinhança utilizada para a interpolação e o erro do valor estimado (CAMARGO, 1998)

A krigagem possibilita a estimativa de pontos desconhecidos a partir de pontos conhecidos atribuindo pesos as amostras (JAKOB, 2016) e seus valores não depende do valor dos dados, mas do número de pontos, suas posições e modelo de semivariograma (MACHADO; BERNARDI; SILVA, 2004), e por meio do semivariograma, determina-se o grau de dependência espacial entre as amostras o que permite a estimativa de parâmetros utilizados no processo de interpolação. Tendo como fim deste processo a viabilidade de geração de mapas descritivos da área, auxiliando na agricultura de precisão.

Os semivariogramas tem como característica descrever tanto qualitativa quanto quantitativamente a variação espacial, realizando a análise estrutural dos dados e modelando-os estaticamente no espaço (DOS SANTOS et al., 2018; MELLO et al., 2005), é constituído por (figura 1): alcance: distância na qual as variáveis apresentam correlações espaciais; patamar: a partir desse ponto as variáveis não apresentam mais dependência espacial; efeito pepita: responsável por revelar a descontinuidade do semivariogramas à medida que se aproxima de zero; contribuição: é a diferença entre o patamar e o Efeito Pepita (CAMARGO, 1988).

Figura 1- Exemplo de semivariograma.



FONTE: Camargo (1998)

Entres os modelos, mesmo existindo infinitas funções que se ajustem aos semivariogramas, verifica-se que alguns satisfazem as maiorias das aplicações (STURATO, 2015), divididos em dois tipos: modelos com patamar, citados na geoestatística como modelos transitivo, onde alguns atingem o patamar assintoticamente e o alcance é arbitrariamente definido como a distância correspondente a 95% do patamar; e modelos sem patamar que não atingem o patamar, aumentando a medida que a distância aumenta, sendo utilizados para modelar fenômenos com capacidade infinita de dispersão (CAMARGO, 1988). Desta forma os modelos com patamar mais utilizados são: modelo esférico (Esf); modelo exponencial (Exp); modelo gaussiano (Gau) e modelo linear (efeito pepita puro), matematicamente suas fórmulas são expressas por Sturato (2015) da seguinte forma:

Modelo esférico

$$\text{Esf}(h) = c \left[\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right] \text{ para } h \leq a$$

$$\text{Esf}(h) = c, \text{ para } h > a$$

Modelo exponencial

$$\text{Exp}(h) = c[1 - e^{-h/a}]$$

Modelo Gaussiano

$$\text{Gau}(h) = c[1 - e^{-h^2/a^2}]$$

Modelo linear

Linear(h) = c, para qualquer h

em que:

c - patamar;

a – amplitude variográfica.

Machado et al. (2007); Dalchiavon et al., (2011); Dalchiavon et al., (2017); Lima, Souza, Silva (2010); e Lima et al., (2010), são exemplos de trabalhos que analisaram a variabilidade espacial de atributos químicos no solo. Machado et al. (2007) avaliou por meio da geoestatística na profundidade 0 a 20 cm a distribuição e a dependência espacial dos atributos químicos do solo em uma lavoura sob sistema de plantio convencional em solo caracterizado como Latossolo Vermelho, determinando: pH; P e K; Ca ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Mg ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), H + Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), B ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Cu ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Fe ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Mn ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Zn ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), S ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), M.O ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), soma de bases ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC efetiva ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC a pH 7.0 ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e saturação por bases (%), analisados por estatística descritiva e pela análise de dependência espacial, com base nos semivariogramas ajustados, obtendo-se respectivamente os valores médios: 5.96, 17.31, 110.60, 1.76, 0.46, 3.46, 0.35, 1.32, 35.80, 2.80, 3.51, 18.97, 3.08, 2.33, 2.51, 5.97, e 38.17.

Dalchiavon et al., (2011) avaliou a variabilidade espacial do feijoeiro em função da variabilidade dos atributos químicos do solo caracterizado como Latossolo Vermelho Distroférico em sistema de plantio direto, determinando para os atributos do solo na profundidade de 0 a 20 cm: P (mg dm^{-3}), M.O (g dm^{-3}), pH, K ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), Ca ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), Mg ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), H+Al ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), soma de bases ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC a pH 0.7 ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) e saturação de bases (%), analisados por estatística descritiva, regressão linear e análise geoestatística por meio do Gamma Design Software 7.0, obtendo-se respectivamente os valores médios: 28.40, 25.30, 2.07, 5.05, 28.80, 18, 27.60, 52.04, 79.83, e 64.

Dalchiavon et al., (2017) avaliou variabilidade espacial de atributos da soja e de atributos do solo num Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto, determinando para os atributos do solo na profundidade de 0 a 20 cm: P (mg dm^{-3}), Ca^{+2} ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), Mg^{+2} ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), K^+ ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), Al^{+3} ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$ ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), pH (CaCl_2), M.O (g dm^{-3}), soma de bases ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC a pH 7.0 ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) e saturação por base (%), analisados por estatística descritiva, análise de correlação,

regressão linear e análise geoestatística por meio do Gamma Design Software 7.0, obtendo-se respectivamente os valores médios: 19.6, 20.4, 14.90, 1.90, 0.12, 32.90, 5.40, 36.30, 70.2, 52.10.

Lima, Souza, Silva (2010) avaliou a variabilidade espacial dos atributos de fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo na profundidade de 0 a 20 cm, a fim de estimar o número de subamostras de solo em área de vegetação natural em processo de regeneração, determinando pH, P (mg dm^{-3}), K (mg dm^{-3}), Ca ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Mg ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC efetiva ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC a pH 7.0 ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), soma de bases ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), saturação de bases (%) e saturação por alumínio (%), analisando por meio da estatística descritiva, teste Kolmogorov-Smirnov ($p < 0,05$) e geoestatística utilizando o software GS⁺, obtendo-se respectivamente os valores médios: 4.71, 2.44, 49.43, 0.39, 0.80, 0.73, 6.07, 1.32, 2.12, 7.46, 17.25, 34.97.

Lima et al., (2010) avaliou a variabilidade espacial dos atributos químicos e da produção de pimenta-do-reino na projeção da copa e profundidade de 0 a 20cm em solo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, determinado: P (mg dm^{-3}), K (mg dm^{-3}), Ca ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Mg ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), pH, soma de bases ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), saturação por bases (%) e CTC a pH 7.0 ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), , analisando-os por meio da estatística descritiva, teste Kolmogorov-Smirnov e geoestatística utilizando o software GS⁺, obtendo-se respectivamente os valores médios: 32.10, 69, 0.77, 0.52, 0.51, 3.91, 4.70, 1.50, 27.4.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o comportamento espacial das variáveis: Fósforo (P), pH, Potássio (K), Sódio (Na), Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Matéria Orgânica (M.O), Acidez Potencial (H+Al), Soma de Bases (SB) e Capacidade de Troca de Cátions (CTC) a pH 7.0 no solo, através de modelos geoestatísticos.

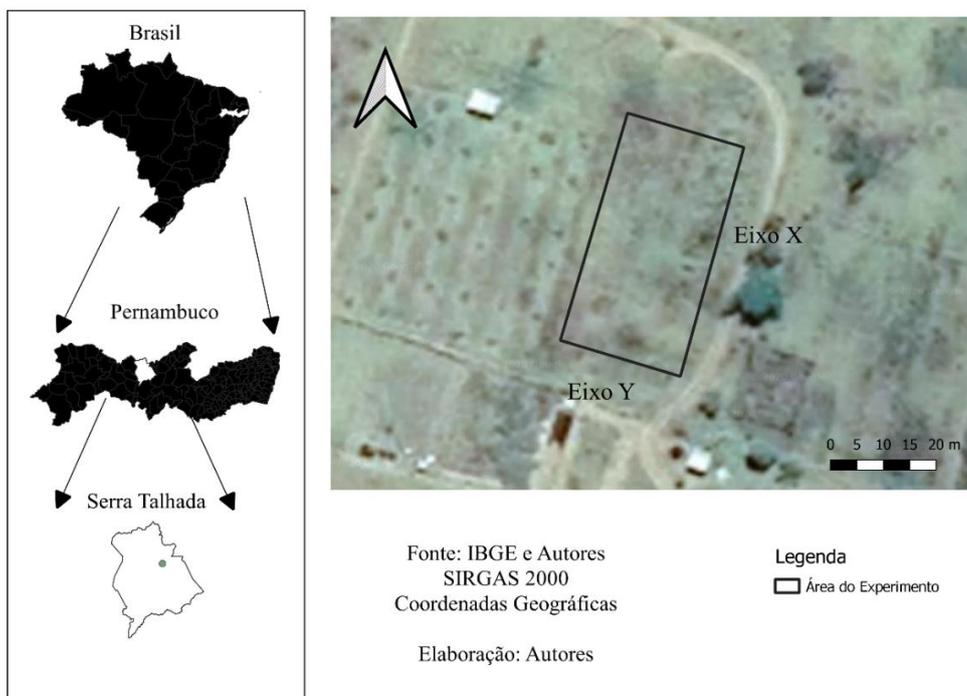
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar a existência de dependência espacial das variáveis de fertilidade do solo;
- Mapear a variabilidade espacial para cada variável.

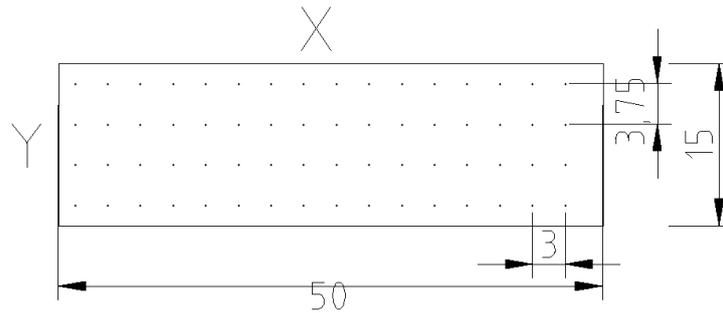
4. METODOLOGIA

O experimento foi realizado em área experimental localizada na Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST) na Mesorregião do Sertão Pernambucano, Microrregião do Pajeú, região denominada semiárido, quente e seco, com clima enquadrando-se no tipo BSw^h conforme a classificação de Köppen, em solo classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico Típico (SANTOS et al., 2013), no qual ocorreu uma condução de experimento utilizando-se as culturas sorgo (IPA 467 - 4 - 2) e milho (BRS 1501) submetidos a quatro diferentes lâminas de irrigação (28%, 36%, 44% e 52 % da E_{Tc}) com água salobra classificada como C3 segundo Richards (1954), e quatro diferentes doses de nitrogênio (0, 100, 200 e 300 kg ha⁻¹), possuindo área com dimensões de 15 x 52 m (Figura 2), sendo divididas em 4 parcelas contendo 16 subparcelas cada de 3.75 x 3 m, resultando em 128 amostras divididas em: 64 amostras para a profundidade de 0 a 10 cm e 64 amostra para profundidade de 10 a 20 cm (Figura 3).

Figura 2- Localização da área experimental, Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Microrregião do Pajeú, Pernambuco, Brasil.



FONTE: Figura autoral.

Figura 3- Grid de coleta das amostras.

FONTE: Figura autoral.

Foram coletadas amostras simples com auxílio de um trade holandês, sendo misturadas em seguida de acordo com suas respectivas profundidades, afim de se obter amostras compostas, as quais foram devidamente encaminhadas para análises químicas na Estação Experimental de Cana de Açúcar do Carpina/Laboratório de Análise de Solo da UFRPE, sendo determinados teores de Fósforo (P), pH, Potássio (K), Sódio (Na), Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Matéria Orgânica (M.O), Soma de Bases (SB), Acidez Potencial (H+Al) e a Capacidade de Troca de Cátions (CTC) de acordo com a metodologia proposta pela Embrapa (1997), os resultados foram então submetidos a estatística descritiva obtendo-se média, mediana, mínimo, máximo, desvio-padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose.

A assimetria permite classificar uma distribuição entre simétrica e assimétrica, sendo simétrica quando os valores de media, moda e mediana são próximos ou iguais resultando em um coeficiente igual ou muito próximo a 0, e assimétrico quando tais valores não são equivalentes resultando em um coeficiente distante de 0; A curtose permite analisar o comportamento da distribuição em relação a distribuição padrão (curva normal) também em torno do valor central 0 (CORTEZ et al., 2011; PETRUCCI; OLIVEIRA, 2017).

Para determinar a variabilidade espacial dos nutrientes utilizou-se da geoestatística para averiguar a existência ou não de dependência espacial entre os valores com auxílio de semivariogramas (Equação 1) (VIEIRA et al., 1983):

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

em que:

$\hat{\gamma}(h)$ - é o valor estimado da semivariância dos dados experimentais;

$Z(x_i + h)$ e $Z(x_i)$ - são os valores observados da variável regionalizada;

$N(h)$ - o número de pares de valores medidos, separados por uma distância h .

Para os ajustes dos semivariogramas determinou-se os parâmetros efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$), variância estrutural (C_1) e alcance (a), com ajustes de três modelos “esférico (Esf), exponencial (Exp) e gaussiano (Gau) (SOUZA, 1997).

Após a geração dos semivariogramas, foi determinado o modelo que melhor se ajustou aos valores experimentais e erros padronizados com média próxima a zero e desvio padrão próximo à unidade, com a validação cruzada (VAUCLIN et al., 1983). Para tanto, assume-se que algumas amostras não foram coletadas, estima-se o seu valor com dados vizinhos e verifica-se o erro da estimativa.

Para determinar o grau de variabilidade e de dependência espacial utilizou-se respectivamente o critério proposto por Warrick (1998), sendo baixa variabilidade quando $CV < 15\%$, média para o intervalo 15 - 50%, e alta variabilidade quando $CV > 50\%$, e o critério proposto por Cambardella et al., (1994), onde valores inferiores a 25% caracterizam forte dependência espacial, entre 25% e 75% moderada, enquanto que acima de 75% fraca dependência, sendo o índice de dependência espacial (IDE) determinado pela equação 2:

$$IDE = \left(\frac{C_0}{C} \right) * 100 \quad (2)$$

em que:

C_0 = efeito pepita;

C = patamar.

Ao final desenvolveu-se a construção dos mapas dos nutrientes com a krigagem ordinária, técnica de interpolação que permite visualizar a distribuição espacial da variável. Essa etapa, assim como a execução das análises estatísticas e geoestatística foi utilizado o software livre R versão 3.5.1 (R CORE TEAM, 2018), com os pacotes geoR (RIBEIRO e DIGGLE, 2018), Hmisc (FRANK et al., 2019), calibrate (GRAFFELMAN, 2013), fields (NYCHKA et al., 2017), e fBasics (WUERTZ et al., 2017).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os resultados da estatística descritiva onde algumas variáveis possuem altos coeficiente de variação (CV) em ambas profundidades (0-10 cm e 10-20 cm), como K (87.99 e 102.79) e Na (67.73 e 52.40), valores médios para P (19.22 e 22.02),

Mg (25.14 e 24.27), M.O (18.93 e 22.54), H+Al (18.53 e 23,53) e SB (15.06 e 15.77) , e valores baixos para pH (6,79 e 3,58) e CTC a pH 7.0 (13.16 e 13.08), enquanto Ca apresentou valor baixo (11.22) para profundidade 0-10 cm e valor médio (15.82) para profundidade 10-20 cm (tabela 1). Os baixos valores para o CV demonstram menor heterogeneidade desse atributo para a área de estudo, ou seja, os valores estão menos discrepantes entre si do que os que apresentam valores de CV mais altos (SANTOS et al., 2012), sendo assim, com apenas três variáveis apresentando CV baixo para pelo menos uma das profundidades, acredita-se que os valores de CV mais altos pode ser originado devido a tendência gerada pela execução de experimentos na área, a qual foi submetida a tratamentos específicos.

Tabela 1- Análise descritiva dos atributos químicos do solo para as profundidades 0-10 cm e 10-20 cm.

Profundidade 0-10								
Atributo	Média	Md	S	CV	Max	Min	s	k
P (mg/dm ³)	397.86	390	76.46	19.22	670	260	0.82	1.19
K (cmol/dm ³)	0.73	0.42	0.64	87.99	2.95	0.12	1.66	2.22
Na (cmol/dm ³)	0.09	0.08	0.06	67.73	0.41	0.01	2.52	8.07
Ca (cmol/dm ³)	3.49	3.50	0.39	11.22	4.80	2.80	0.53	1.01
Mg (cmol/dm ³)	2.33	2.28	0.59	25.14	3.90	1.35	0.63	-0.09
pH	7.13	7.08	0.48	6.79	10.30	6.30	4.23	26.01
MO (%)	0.97	0.97	0.18	18.93	1.63	0.67	0.67	1.16
H + Al	1.23	1.20	0.23	18.53	2.10	0.70	0.84	3.02
SB	6.65	6.45	1.00	15.06	10.10	4.86	1.16	1.36
CTC	7.89	7.65	1.04	13.16	12.05	5.86	1.47	2.99
Profundidade 10-20								
Atributo	Média	Md	S	CV	Max	Min	s	k
P (mg/dm ³)	390.47	400	85.98	22.02	660	220	0.61	0.90
K (cmol/dm ³)	0.62	0.34	0.64	102.79	2.82	0.09	1.68	1.84
Na (cmol/dm ³)	0.11	0.10	0.06	52.40	0.29	0.02	0.63	-0.12
Ca (cmol/dm ³)	3.32	3.30	0.53	15.82	4.60	2.30	0.39	-0.32
Mg (cmol/dm ³)	2.43	2.40	0.53	24.27	3.90	1.20	0.21	-0.24
pH	7.05	7.00	0.25	3.58	7.60	6.50	0.04	-0.22
MO (%)	0.82	0.74	0.18	22.54	1.41	0.52	0.99	0.80
H + Al	1.09	1.10	0.26	23.53	1.70	0.50	0.25	-0.53
SB	6.47	6.42	1.02	15.77	9.10	4.79	0.46	-0.55
CTC	7.57	7.44	0.99	13.08	10.30	5.79	0.63	-0.13

Md: mediana; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Max: máximo; Min: mínimo; s: assimetria; k: curtose; P: fósforo; K: potássio; Na: sódio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; MO: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca de cátions – $CTC = SB + (H^+ + Al^{3+})$; SB: Soma de bases - $Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+$; H+Al: Acidez potencial.

Também foi observado a maioria das variáveis com valores de assimetria e curtose distantes do valor central 0 (tabela 1), apresentando assim, distribuição anormal ou assimétrica, resultados semelhantes encontrados por Aquino et al. (2014). Ressaltando que a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística sendo mais importante a ocorrência do efeito proporcional em que a média e a variância dos dados não sejam constantes (CAVALCANTE et al., 2007; ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; WARRICK; NIELSEN, 1980).

Há uma relação entre K e Na, uma vez que no solo como cátion monovalente (Na⁺) e em grandes quantidades é capaz de ser adsorvido aos coloides do solo e deslocar o K⁺ desse processo de troca (OLIVEIRA et al., 2010), sendo ambos influenciados pelo manejo de água no solo (ISABELA et al., 2017). Enquanto pH pode influenciar a disponibilidade dos nutrientes no solo, como apresentado por Rosa et al. (2016) que verificou que a disponibilidade do P aumentou significativamente com o aumento do pH no solo. Além disso, o pH também exerce influência sobre a CTC que representa a quantidade de cátions retidos no solo, a SB, por ser a soma dos teores de cátions permutáveis, diferindo da CTC por não considerar H⁺ e Al³⁺, e H+Al onde as hidroxilas reagem com os íons H⁺ e Al³⁺ adsorvidos, liberando então as cargas que ocupavam disponibilizando-as para os íons Ca²⁺ e Mg²⁺, que por sua vez influência nos valores de CTC e SB (RONQUIM, 2010; MALAVOLTA, 1984).

Com base nos semivariogramas experimentais, foram ajustados modelos teóricos do tipo esférico, gaussiano, exponencial e linear, adotando-se modelo isotrópico. Observa-se a ocorrência de efeito pepita puro, no qual o valor de semivariância é igual ao patamar para qualquer valor de distância, para todas as variáveis da profundidade de 10-20 cm, com exceção do H+Al, e para as variáveis P, K e Na na profundidade de 0-10cm, indicando assim, uma independência espacial ou variação inexplicada, não ocorrendo correlação espacial e os valores se comportando de forma aleatória, esse comportamento pode ser resultante de erro de medidas ou pelo espaçamento ser maior do que o necessário para identificar a dependência espacial, sendo o modelo linear o único aplicável para tal comportamento (CORTEZ et al., 2011; MACHADO et al., 2007; SOUZA; COGO; VIEIRA, 1998).

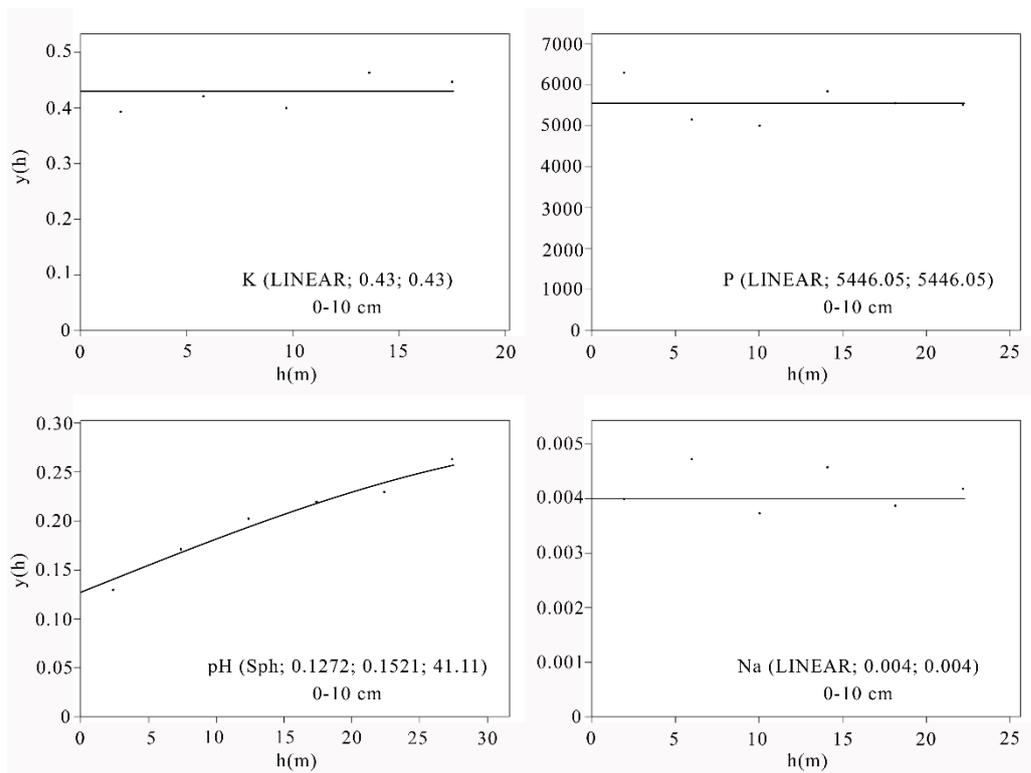
Tabela 2- Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos do solo na profundidade de 0-10 e 10-20 cm.

Profundidade 0-10 cm								
Atributo	Co	C	A	m	v	IDE	Classificação	Modelo
P	5446.05	5446.05	0	-----	-----	-----	-----	Linear
K	0.43	0.43	0	-----	-----	-----	-----	Linear
Na	0.004	0.004	0	-----	-----	-----	-----	Linear
Ca	0.065	0.089	12.79	0.0029	1.463	72.59	Moderada	Sph
Mg	0.278	0.256	33.84	-0.0011	1.128	108.55	Fraca	Gau
pH	0.127	0.152	41.11	-0.0005	1.420	83.59	Fraca	Sph
MO	0.025	0.027	19.88	-0.0015	1.153	91.49	Fraca	Gau
H +Al	0.04	0.02	34.19	-0.0015	1.081	200	Fraca	Sph
SB	0.25	0.79	5.42	0.00013	0.981	31.65	Moderada	Sph
CTC	0.698	0.67	36.78	-0.0022	1.260	103.40	Fraca	Sph
Profundidade 10-20 cm								
Atributo	Co	C	A	m	v	IDE	Classificação	Modelo
P	7387.57	7387.57	0	-----	-----	-----	-----	Linear
K	0.4	0.4	0	-----	-----	-----	-----	Linear
Na	0.0033	0.0033	0	-----	-----	-----	-----	Linear
Ca	0.28	0.28	0	-----	-----	-----	-----	Linear
Mg	0.36	0.36	0	-----	-----	-----	-----	Linear
pH	0.06	0.06	0	-----	-----	-----	-----	Linear
MO	0.033	0.033	0	-----	-----	-----	-----	Linear
H +Al	0.0431	0.0265	17.49	-0.00153	1.232	162.54	Fraca	Sph
SB	1	1	0	-----	-----	-----	-----	Linear
CTC	0.92	0.92	0	-----	-----	-----	-----	Linear

Co: efeito pepita; C: patamar; A: Alcance; m e v: coeficientes para validação cruzada; IDE: índice de dependência espacial; Sph: esférico; Gau: gaussiano; P: fósforo; K: potássio; Na: sódio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; MO: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca de cátions – $CTC = SB + (H^+ + Al^{3+})$; SB: Soma de bases - $Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+$; H+Al: Acidez potencial.

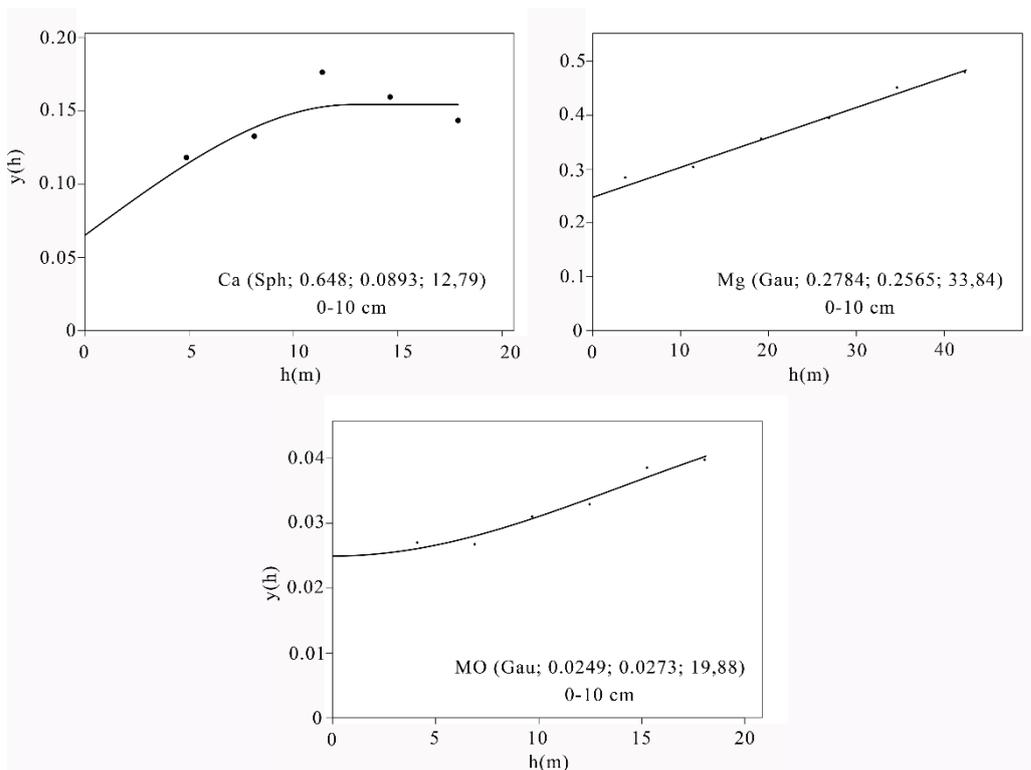
Por sua vez as variáveis Ca, pH, H+Al, SB e CTC se ajustaram ao modelo Esférico, e Mg e M.O se ajustaram ao modelo Gaussiano, na profundidade de 0 – 10 cm, H+Al também se ajustou ao modelo esférico na profundidade de 10-20 cm. Em relação à dependência espacial, foi moderada para Ca (72.59) e SB (31.65), e fraca para Mg (108.55); pH (83.59) e M.O (91.49), H+Al (200 e CTC (103.40) na profundidade 0-10 cm e fraca para H+Al (162.54) em 10-20 cm, para as demais variáveis que foram ajustadas ao modelo linear não foi possível determinar o IDE, lembrando que somente este índice não é suficiente para indicar o ajuste que melhor representa a variabilidade (CORTEZ et al., 2011). Nas figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9 encontram-se os semivariogramas ajustados para cada variável nas respectivas profundidades 0-10 e 10-20 cm.

Figura 4- Modelos e parâmetros (efeito pepita; patamar; alcance) dos semivariogramas dos atributos K (potássio), P (fósforo), pH e Na (sódio) para a profundidade de 0-10 cm.



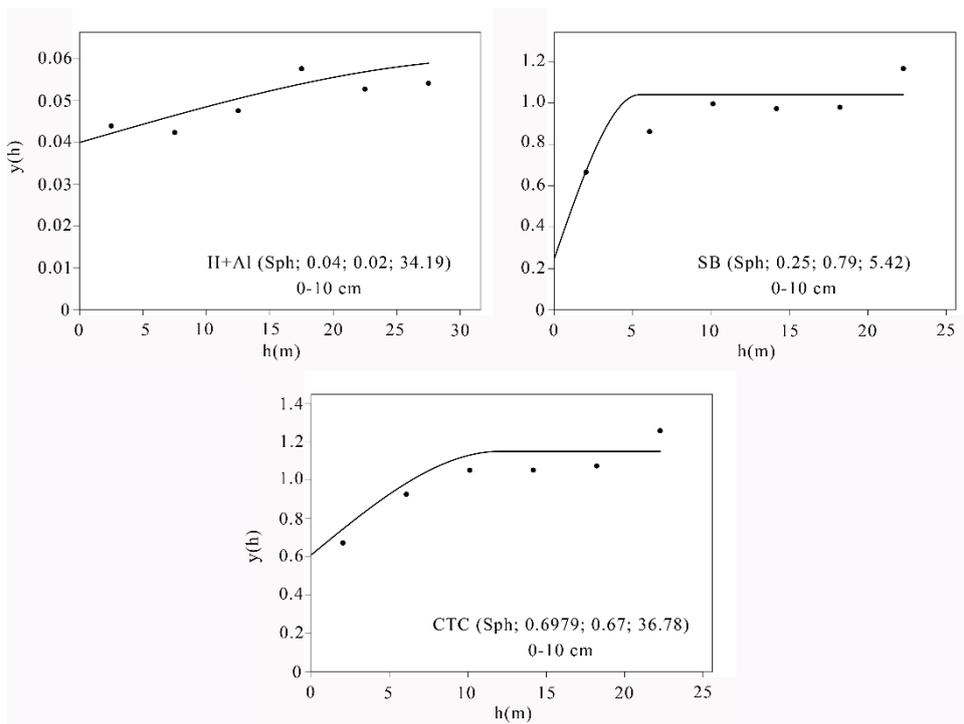
FONTE: autoral.

Figura 5- Modelos e parâmetros (efeito pepita; patamar; alcance) dos semivariogramas dos atributos Ca (cálcio), Mg (magnésio) e MO (matéria orgânica) para a profundidade de 0-10 cm.



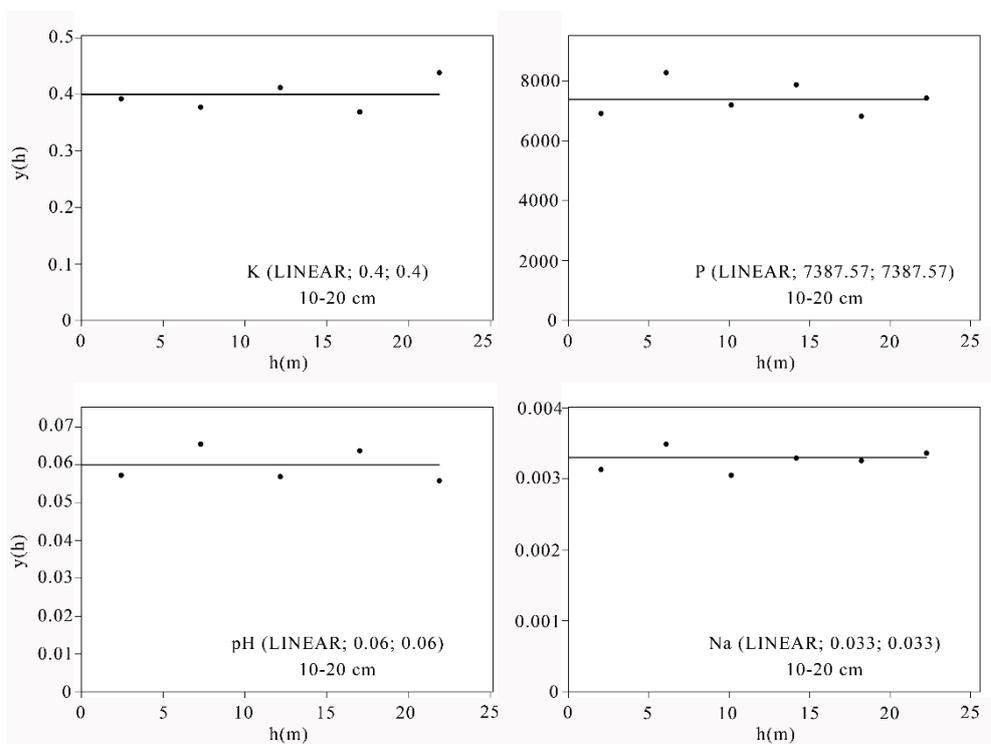
FONTE: autoral.

Figura 6- Modelos e parâmetros (efeito pepita; patamar; alcance) dos semivariogramas dos atributos H+Al (acidez potencial), SB (soma de bases) e CTC a pH 7.0 para a profundidade de 0-10 cm.



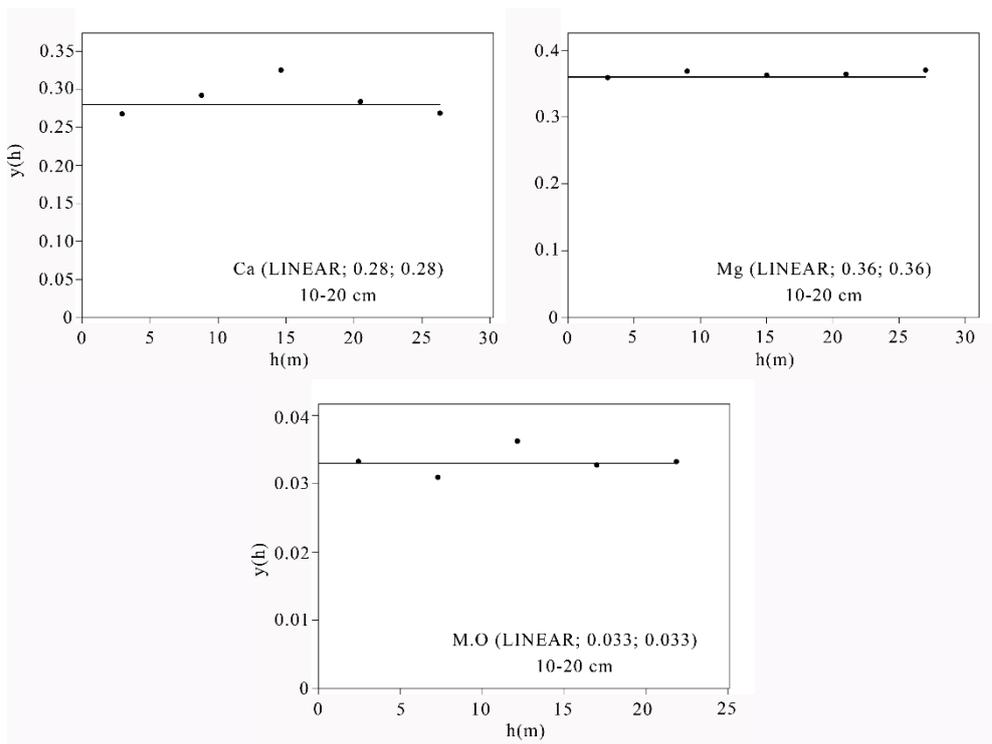
FONTE: Gráficos autorais.

Figura 7- Modelos e parâmetros (efeito pepita; patamar; alcance) dos semivariogramas dos atributos K (potássio), P (fósforo), pH e Na (sódio) para a profundidade de 10-20 cm.



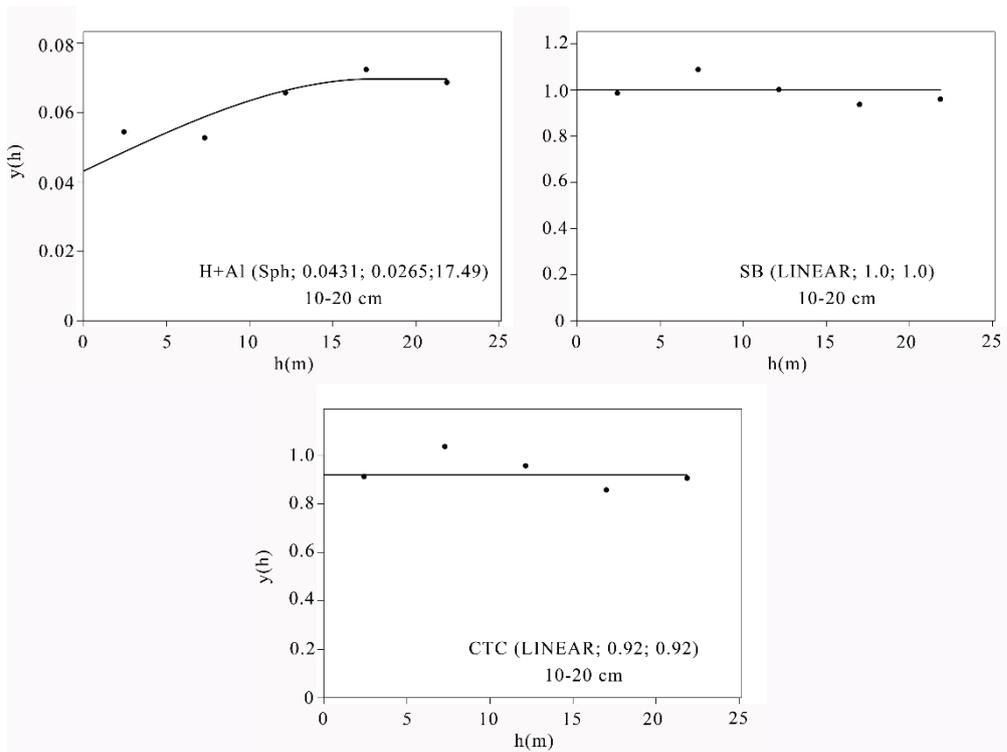
FONTE: Gráficos autorais.

Figura 8- Modelos e parâmetros (efeito pepita; patamar; alcance) dos semivariogramas dos atributos Ca (cálcio), Mg (magnésio) e MO (matéria orgânica) para a profundidade de 10-20 cm.



FONTE: Gráficos autorais.

Figura 9- Modelos e parâmetros (efeito pepita; patamar; alcance) dos semivariogramas dos atributos H+Al (acidez potencial), SB (soma de bases) e CTC a pH 7.0 para a profundidade de 10-20 cm.



FONTE: Gráficos autorais.

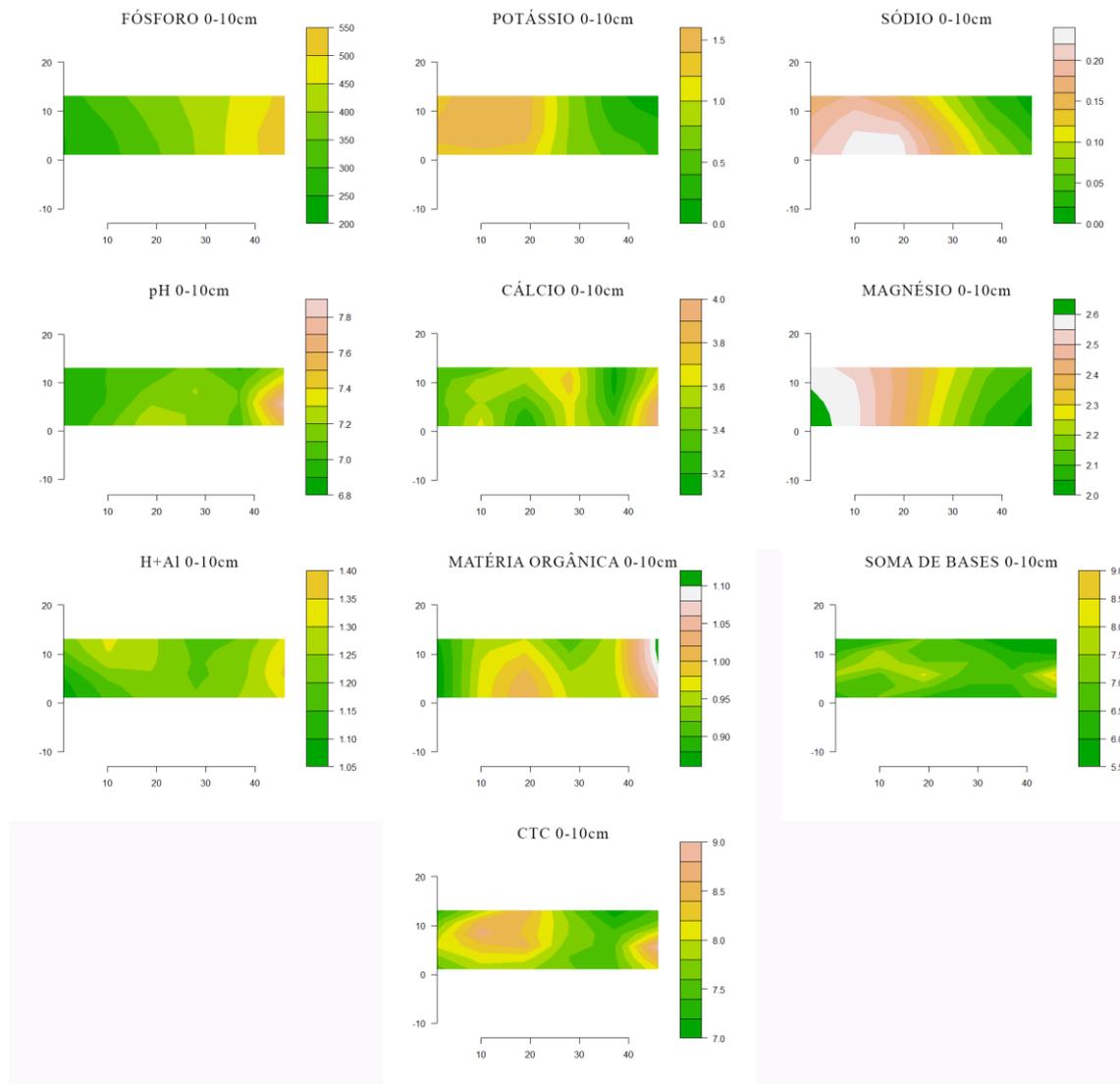
Machado et al., (2007) e Dalchiavon et al., (2011) encontraram efeito pepita puro para o P, enquanto Machado et al., (2007) encontrou efeito pepita puro para K e Lima et al., (2010) efeito pepita puro para SB e CTC, e em Dalchiavon et al., (2011) os modelos para Ca, Mg, pH e M.O ocorrendo da mesma forma que o encontrado no presente trabalho, respectivamente, Esferico; Gaussiano; Esferico; Gaussiano, já Lima; Souza; Silva, (2010) também encontrou o ajuste esférico para os atributos H+Al, SB e CTC.

Contudo, verifica-se divergências em Machado et al. (2007) no qual ajustou o Ca ao modelo gaussiano e M.O ao esférico, enquanto Lima; Souza; Silva, (2010) ajustou o Mg ao esférico e Dalchiavon et al., (2017) que ajustou o Ca e Mg ao modelo exponencial e o pH ao modelo Gaussiano. Tais divergências podem ser relacionadas as diferenças de profundidades utilizadas, predominando nestes trabalhos a profundidade de 0-20 cm, podendo ser está uma faixa mais adequada para a caracterização da variabilidade do solo do que as faixas de 0-10 e 10-20 cm, uma vez que ocorreram um numero expressivo de variáveis com efeito pepita puro, ainda podendo ser relacionada ao tipo de solo, cultivo e manejo (MAGALHÃES et al., 2013) e erros de amostragem.

O alcance é um parâmetro importante na escolha do melhor ajuste, representando a máxima distância que as variáveis se correlacionam entre si e o número de amostras utilizadas na interpolação, sendo maior o número quanto maior o raio de alcance, uma vez que valores que não estejam nesse alcance passam a ter distribuição aleatoria e por isso não são utilizados, (MACHADO et al., 2007), desta forma os maiores valores de alcance nos permite uma maior abrangência de pontos amostrados, contribuido para o processo de determinação dos pontos não amostrados. O maior alcance foi de 41.11 para o pH, e o menor de 5.42 para o SB, lembrando que algumas variáveis podem necessitar de valores menores ou maiores para determinar sua variabilidade na área, já que as mesmas não possuem valores uniformes disponiveis no solo (ZANÃO JÚNIOR; LANA; GUIMARÃES, 2007).

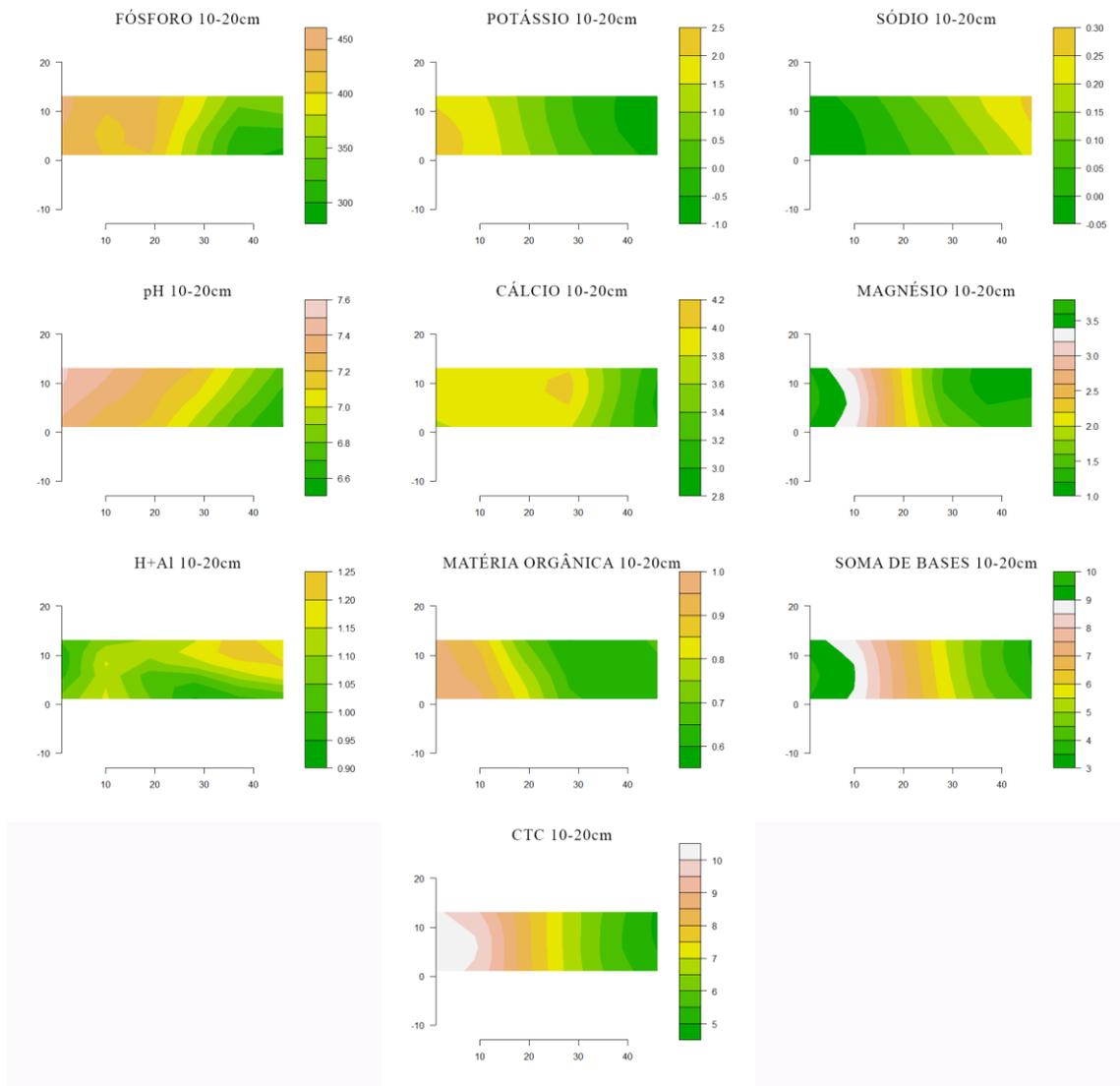
Na figura 10 e 11 encontram-se os mapas obtidos pela krigagem, essencial para visualização da variabilidade de cada atributo no solo. Observou-se que em geral nas figuras 10 e 11 que o P apresentou maiores valores em áreas que o pH se encontrava na faixa de 7.0 e 7.4, diferindo de Rosa et al. (2016) que identificou maiores valores de P em torno de 6.5.

Figura 10- Mapas dos atributos químicos P (fósforo), K (potássio), Na (sódio), pH, Ca (cálcio), Mg (magnésio), H+Al (acidez potencial), MO (matéria orgânica), SB (soma de bases) e CTC a pH 7.0 na profundidade de 0-10 cm



FONTE: Figuras autorais.

Figura 11- Mapas dos atributos químicos P (fósforo), K (potássio), Na (sódio), pH, Ca (cálcio), Mg (magnésio), H+Al (acidez potencial), MO (matéria orgânica), SB (soma de bases) e CTC a pH 7.0 na profundidade de 10-20 cm.



FONTE: Figuras autorais.

Ainda na figura 11 notou-se o K com comportamento inverso ao Na, tal comportamento podendo ser originado através da proximidade química de ambos como cátions monovalentes, em que no solo e em grandes quantidades um é capaz de ser adsorvido aos colóides do solo enquanto desloca o outro do complexo de troca (OLIVEIRA et al., 2010), como também devido as diferentes lâminas de irrigação aplicadas utilizando água salobra. Observa-se na profundidade 10-20 cm uma relação positiva entre pH, CTC e SB, e uma relação negativa entre o pH e H+Al, comportamento esperado uma vez que, a medida que o pH aumenta ocorre um aumento das cargas negativas do complexo de troca e mais alumínio é precipitado, influenciando assim na capacidade de retenção de cátions no solo, a qual contribui para a fertilidade do solo,

possibilitando que mais cátions possam ser adsorvidos as coloides do solo e auxiliando na redução das perdas por lixiviação (CONDE, 2012; CHAVES; FARIAS, 2008), resultando coincidente ao encontrado por Lima et al., (2010), os maiores valores de CTC em geral também coincidiram com os maiores valores de M.O, atributo que também contribui para o aumento de cargas negativas no solo, como encontrado por Artur et al., (2003), ressaltando a importância da incorporação de M.O nos solos. A relação dos mapas de Ca e Mg divergiram do encontrado por Machado et al., (2007), os quais os mapas gerados foram bastantes semelhantes, em que justificou tão comportamento pela fonte em comum: o calcário, o qual não foi aplicado na área deste estudo.

6. CONCLUSÕES

Encontrou-se (CV) médio para a maioria os atributos, com o maior para o K, 102.79 e o menor valor para pH, 3.58, ambos na profundidade de 0-20.

A maioria dos atributos apresentou efeito pepita puro podendo predominando assim o modelo linear.

Para os atributos que não apresentaram efeito pepita puro, a maioria se ajustou ao modelo esférico seguido do gaussiano, predominando dependência espacial fraca.

O maior alcance encontrado para as variáveis estudadas foi de 41.11 para o pH, e o menor de 5.42 para o SB.

O atributo K apresentou comportamento inverso ao Na, enquanto o pH apresentou uma relação positiva com a CTC e SB e uma relação negativa com o H+Al, os maiores valores de CTC também coincidiram com os maiores valor de M.O.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. C. et al. Produtividade e valor nutritivo do capim-elefante cv. Napier sob doses crescentes de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 29, n. 6, p. 1589-1595, 2000.
- ALBINO, U. B.; CAMPO, R. J. Efeito de fontes e doses de molibdenio na sobrevivencia do Bradyrhizobium e na fixacao biologica de nitrogenio em soja. **Embrapa Soja-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2001.
- AQUINO, R. E. DE et al. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 1, p. 32–41, 2014.
- ARTUR, A. G. et al. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 141–149, 2014.
- ASSAD, M. L. L.; ALMEIDA, J. Agricultura e sustentabilidade. **Contexto e Desafios**, 2004.
- ARTUZO, F. D.; FOGUESATTO, C. R.; DA SILVA, L. X. Agricultura de precisão: inovação para a produção mundial de alimentos e otimização de insumos agrícolas. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 13, n. 29, p. 146-161, 2017.
- CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. Geoprocessamento para projetos ambientais. São José dos Campos: INPE, 1998
- CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciencia Rural**, v. 37, n. 2, p. 394–400, 2007.
- CATANI, R. A. & MORAES, F. P. A composição química do cafeeiro. Quantidade e distribuição de N, P 2 O 5, K 2 O, CaO e MgO em cafeeiro de 1 a 5 anos de idade. **Revista da Agricultura** , v. 33, p. 45-52, 1958.
- COMIRAN, A. G. Aplicação de cobalto e molibdênio na cultura da soja. 2019.
- CONDE, R.P. 2000. Geoestatística aplicada a avaliação de reservas e controle de lavra na mina de cana brava (GO). Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia), **Instituto de Geociências-Universidade de São Paulo**. São Paulo, 161 p.
- CORTEZ, J. W. et al. Atributos físicos do argissolo amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1207–1216, 2011.
- CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo e na disponibilidade de cálcio, magnésio e fósforo. **Revista Caatinga**, v. 21, n. 5, p. 75–82, 2008.
- DALCHIAVON, F. C. et al. Variabilidade espacial da produtividade do feijoeiro correlacionada com atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistema de semeadura direta. **Bragantia**, v. 70, n. 4, p. 908–916, 2011.

- DALCHIAVON, F. C. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com soja sob plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 2, p. 144–154, 2017.
- DA SILVA, I. P. et al. Crescimento e nutrição de mudas de pinhão manso influenciados pela substituição do potássio pelo sódio. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 1, p. 194–199, 2014.
- DE ALMEIDA JÚNIOR, A.B. et al. Efeito de doses de fósforo no desenvolvimento inicial da mamoneira. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 1, 2009.
- DE CARVALHO, J. R. P.; DA SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, 2002
- DE MENDONÇA, R. J. et al. Efeito do alumínio na absorção e na utilização de macronutrientes em duas cultivares de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 7, p. 843-848, 2003.
- DE SOUZA, E. R. et al. Variabilidade espacial das frações granulométricas e da salinidade em um Neossolo Flúvico do semi-árido. *Ciencia Rural*, v. 38, n. 3, p. 698–704, 2008.
- Frank E Harrell Jr, with contributions from Charles Dupont and many others. (2019). Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 4.2-0. <https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>
- DIAS, V. P.; FERNANDES, E. Fertilizantes: uma visão global sintética. 2006.
- DIAS, N. S. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade em solo cultivado com melão rendilhado sob ambiente protegido. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2004.
- DOS SANTOS, D. et al. Uma introdução ao semivariograma: e sua importância dentro da geoestatística. Simpósio Nacional de Geografia e Gestão Territorial e Semana Acadêmica de Geografia da Universidade Estadual de Londrina, v. 1, p. 539-549, 2018.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise do solo. 3ª ed. Rio de Janeiro, (Embrapa – CNPS. Documentos, 132), 2011. 230 p.
- FAQUIN, V. Nutrição mineral de plantas. 2005.
- FURLANI, A. M. C. et al. Efeitos da aplicação de cloreto e de sulfato de potássio na nutrição do cafeeiro. 1976.
- JACOBI, P. Educar para a Sustentabilidade: complexidade, reflexividade, desafios. *Revista educação e pesquisa*, v. 31, n. 2, p. 233-250, 2005.
- JAKOB, A. A. E. A krigagem como método de análise de dados demográficos. **Anais**, p. 1-21, 2016.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. An introduction to applied geostatistics. **New York, Oxford University**, p. 561, 1989.
- MACHADO, L. DE O. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 591–599, 2007.

MAGALHÃES, S. S. DE A. et al. Estoque de nutrientes sob diferentes sistemas de uso do solo de Colorado do oeste-RO. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 1, p. 63–72, 2013.

NYCHKA D.; FURRER R.; PAIGE J.; SAIN S. (2017). “fields: Tools for spatial data.” doi: 10.5065/D6W957CT (URL:<http://doi.org/10.5065/D6W957CT>), R package version 9.8-3, <URL:<https://github.com/NCAR/Fields>>.

OLIVEIRA, F. C. et al. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **revista brasileira de ciências agrárias**, v. 5, n. 3, p. 406–412, 2010.

PAULO J. RIBEIRO JR; PETER J.; DIGGLE, MARTIN S.; ROGER B.; BRIAN R. (2020). **geoR: Analysis of Geostatistical Data**. R package version 1.8-1. <https://CRAN.R-project.org/package=geoR>

PETRUCCI, E.; OLIVEIRA, L. A. DE. Coeficientes de assimetria e curtose nos dados de vazão média mensal da bacia do Rio Preto-BA. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, p. 158–170, 2017.

REETZ, Harold F. Fertilizantes e seu uso eficiente. Tradução: Alfredo Scheid Lopes. São Paulo: **ANDA**, 2017.

R Core Team (2020). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RICHARDS, L. A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington DC, US Department of Agriculture, 1954. 160 p. (USDA Agricultural Handbook, 60).

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; BRINHOLI, O. Efeito das relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K do solo na produção de sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 12, p. 1443-1448, 1984.

SANTOS, K. S. et al. Spatial variability of physical attributes of soil in alluvial valley of semiarid region of Pernambuco State. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 828–835, 2012.

SANTOS, H. G. et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2013. 353 p.

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. RICARDO. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistema de manejo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 22, p. 77–86, 1998.

SOUZA JUNIOR, J. P. Silício como mitigador de deficiência e toxicidade de boro na cultura do algodão cultivado em solução nutritiva. 2018.

SOUZA, D. S. S. et al. Estudo da toxicidade da ureia na germinação de rabanete e couve. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 13, n. 3, p. 262-270, 2019.

VELOSO, C. A. C. et al. Influência do manganês sobre a nutrição mineral e crescimento da pimenteira do reino (*Piper nigrum*, L.). **Scientia Agricola**, v. 52, n. 2, p. 376-383, 1995.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. [s.l.] New York, Academic, 1980. p. 319–344.

WUERTZ D.; SETZ T.; CHALABI Y. (2017). fBasics: Rmetrics - Markets and Basic Statistics. R package version 3042.89. <https://CRAN.Rproject.org/package=fBasics>

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. Geoestatística: conceitos e aplicações. **Oficina de textos**, 2015.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidade em um Latossolo Vermelho sob semeadura direta. **Ciencia Rural**, v. 37, n. 4, p. 1000–1007, 2007.

ZAMBOLIM, L.; VENTURA, J. A. Resistência a doenças induzida pela nutrição mineral de plantas. 2016.