

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM DIFERENTES MÉTODOS DE POSICIONAMENTO

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES IN DIFFERENT POSITIONING METHODS

YASMIM MARTINS CAMAPUM

Instituto Federal Goiano - Campus Ceres / GO

ym.camapum@gmail.com

ARIEL MUNCIO COMPAGNON

Instituto Federal Goiano - Campus Ceres / GO

ariel.compagnon@ifgoiano.edu.br

VANESSA LIMA CORNÉLIO

Instituto Federal Goiano - Campus Ceres / GO

vanessa.agroifg@gmail.com

ANA PAULA SANTOS OLIVEIRA

Instituto Federal Goiano - Campus Ceres / GO

anapaula.oliveira@ifgoiano.edu.br

Resumo: Resultante da formação e desenvolvimento de suas características intrínsecas, o solo é um sistema extremamente heterogêneo por sua constituição conter diferentes tipos de materiais orgânicos, minerais e propriedades químicas. Objetivou-se avaliar a variabilidade e dependência espacial de atributos químicos (cálcio, magnésio, fósforo, potássio, alumínio e acidez potencial) da fertilidade do solo e realizar a comparação de três métodos de posicionamentos para a determinação das coordenadas geográficas, sendo eles: GNSS acoplado à Leica GS-900, GNSS Garmin Etrex 30 e app Trimble Outdoors Navigator, para interpolação dos mapas. A área de estudo está localizada em Ceres - GO, em um latossolo vermelho de textura média. Determinou-se uma malha amostral em uma área de 7,11 ha com espaçamento de 30 x 30 m para mapear as amostras avaliadas, na profundidade de 0,00-0,20 m. Efetuou-se as análises das amostras de solo coletadas e a análise descritiva dos resultados. Após a interpolação dos dados, por meio do programa QGIS com o complemento Smart-Map, utilizando-se da geoestatística, gerou-se os variogramas e posterior mapas de variabilidade com informações espaciais dos dados georreferenciados. As maiores variabilidades foram observadas para Al, P, Mg e Ca, sucessivamente. A malha amostral se mostrou adequada para verificação da variabilidade e dependência espacial dos atributos químicos do solo. Os mapas produzidos pelos diferentes métodos de posicionamento apresentaram padrões análogos, permitindo a utilização do aplicativo de celular como alternativa mais rentável para obtenção das coordenadas geográficas, atendendo os requisitos para a visualização das áreas com necessidade individualizada, para uma recomendação mais assertiva de forma localizada.

Palavras-chave: Aplicativo. Fertilidade do solo. Geoestatística. Georreferenciamento.

Abstract: Resulting from the formation and development of its intrinsic characteristics, soil is an extremely heterogeneous system due to its composition, which includes different types of organic materials, minerals, and chemical properties. This study aimed to evaluate the spatial variability and dependence of soil fertility chemical attributes (calcium, magnesium, phosphorus, potassium, aluminum, and potential acidity) and to compare three positioning methods for determining geographic coordinates: GNSS coupled with Leica GS-900, GNSS Garmin Etrex 30, and the Trimble Outdoors Navigator app for map interpolation. The study area is located in Ceres, Goiás,

on a medium-textured red latosol. A sample grid was established over an area of 7.11 hectares, with a spacing of 30 x 30 m to map samples at a depth of 0.00–0.20 m. Soil samples were analyzed and a descriptive analysis of the results was conducted. After interpolating the data using QGIS with the Smart-Map plugin and geostatistics, variograms and subsequent variability maps were generated with spatial information from the georeferenced data. The greatest variabilities were observed for Al, P, Mg, and Ca, in that order. The sampling grid proved to be adequate for verifying the spatial variability and dependence of soil chemical attributes. The maps produced by different positioning methods showed analogous patterns, allowing the use of a mobile application as a more economical alternative for obtaining geographic coordinates, meeting the requirements for visualizing areas with specific needs for more precise and localized recommendations.

Keywords: Application. Soil fertility. Geostatistics. Georeferencing.

Introdução

O uso da agricultura de precisão (AP) torna-se cada vez mais presente, proporcionando um desempenho mais qualitativo através das tecnologias de georreferenciamento potencializando zonas de manejo para uma melhor tomada de decisão, devido ao uso de práticas agrícolas aliadas a mecanização, tendo em vista, a variabilidade da produtividade da lavoura através de uma amostragem sistemática do solo. O processo é originado na coleta de dados, interpretação e criação dos mapas através do georreferenciamento para a execução na prática com a recomendação adequada.

A coleta de amostras de solos em malhas amostrais por meio de georreferenciamento e com o auxílio das ferramentas como a geoestatística, possibilita identificar zonas com restrições químicas que podem limitar o rendimento das culturas, permitindo a adoção de práticas de manejo específico para cada zona (CHERUBIN et al., 2015). As análises químicas determinam graus de deficiência de elementos do solo, avalia-se a fertilidade do solo para realizar a quantificação de condições que podem afetar a produtividade e desenvolvimento das plantas através de extratores.

A variabilidade espacial é uma característica intrínseca a todas as interações naturais, especialmente em sistemas dinâmicos e complexos, como as interações solo-planta. O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo auxilia na interpretação das zonas de manejo e na racionalização de insumos como no uso da taxa variável de calcário, fertilizantes (BERNARDI et al., 2015), tendo em vista, a caracterização da área de forma heterogênea, com diferentes propriedades químicas. Dessa forma, o manejo de fertilizantes é determinado para cada área conforme o detalhamento das propriedades específicas para correção do perfil, conforme a necessidade de cada nutriente.

Uma das principais dificuldades no uso do geoprocessamento é o alto custo dos softwares especializados. Além disso, a falta de qualificação técnica dos profissionais que irão operar essas ferramentas, que muitas vezes exigem treinamentos especializados e, em alguns casos, o domínio de línguas estrangeiras (REGHINI; CAVICHIOLI, 2020). Com os avanços na tecnologia de georreferenciamento, especialmente o uso de dispositivos móveis com GNSS (Sistemas Globais de Navegação por Satélite) integrado, esse cenário está mudando, facilitando a implementação da agricultura de precisão de forma mais acessível e econômica. Atualmente, aplicativos de mapeamento e coleta de dados permitem que agricultores obtenham contribuições exatas diretamente pelo celular, viabilizando práticas como a aplicação de insumos em taxas variáveis, de acordo com as necessidades específicas de cada área do campo. Essa acessibilidade à tecnologia de localização reduz os custos de mapeamento tradicional e amplia a capacidade de monitoramento em tempo real, aumentando a eficiência dos recursos e contribuindo para um manejo agrícola mais sustentável.

De acordo com essas informações, o objetivo do presente trabalho foi avaliar e mapear a variabilidade espacial de atributos químicos da fertilidade do solo (Ca, Mg, Al, H + Al, P e K), comparando três métodos de posicionamento, sendo GNSS acoplado à Leica GS-900 (Estação total), GNSS Garmin Etrex 30 e app Trimble Outdoors Navigator para a determinação das coordenadas geográficas de cada ponto.

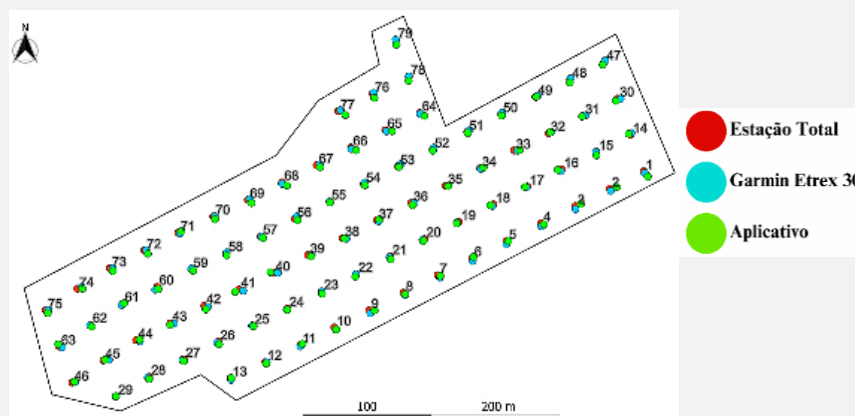
Material e métodos

A área de estudo experimental está localizada no Instituto Federal Goiano - Campus Ceres, no município de Ceres - GO, com coordenadas de 15°20'46" S e longitude 49°35'50" W, altitude média de 560 m. O solo presente na região é definido como Latossolo Vermelho de textura média, com histórico de cerca de dez anos de sistema convencional de preparo do solo e com semeaduras sucessivas de milho (*Zea mays* L.) para silagem e sorgo forrageiro [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], na qual, estabeleceu-se uma malha amostral com 79 pontos espaçados em 30 x 30 m, em uma área de 7,11 ha, coletados conforme exposta na Figura 1.

Os pontos foram alocados com estacas e auxílio de uma trena. Posteriormente, georreferenciados utilizando-se GNSS acoplado à estação total (Leica modelo GS-900),

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, p. 110-129, jun. 2025. ISSN 1981-4089
 aparelho GNSS de navegação (Garmin - modelo Etrex 30) e por meio do aplicativo Trimble
 Outdoors Navigator (celular smartphone da marca Sony, modelo M6).

Figura 1. Malha amostral com os pontos de diferentes obtenções de coordenadas.



Fonte: Autores.

Os pontos representados com a coloração vermelho, azul e verde descrevem respectivamente, as coordenadas coletadas através da Estação total GNSS acoplado à Leica GS-900, aparelho GNSS Garmin de navegação Etrex 30 e o aplicativo de celular Trimble Outdoors Navigator por meio do celular Smartphone Sony modelo M6 (Figura 1). Em vista disso, nota-se que houve pouca discrepância dentre as diferentes fontes de obtenção de coordenadas, com precisão avaliada inferior a um metro dentre as aferições testadas.

As amostras de solo foram coletadas com auxílio de um balde plástico, sacos de identificação e um perfurador de solos elétrico na camada de 0,00-0,20 m, sendo retirada uma amostra a cada ponto, devidamente identificadas e levadas ao Laboratório de Solos do IF Goiano Campus Ceres. O processo de preparo das amostras de solo envolve a secagem de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), destorroamento para desagregar o solo em partículas menores, pesagem representativa e o peneiramento da amostra em uma peneira com malha de 2 mm (n.º 10), selecionando a granulometria do solo.

As análises químicas do solo foram realizadas seguindo os procedimentos de Silva et al. (1998), nas quais para Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) por meio da extração com solução KCl 1M com a determinação por espectrofotometria de absorção atômica; a Acidez Potencial ou pH total (H + Al), medida pela extração da acidez dos solos com acetato de cálcio tamponado e determinado por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo: líquido; o Alumínio

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, p. 110-129, jun. 2025. ISSN 1981-4089
(Al), por meio da determinação volumétrica com solução diluída de NaOH; a extração de Fósforo (P) pela determinação por espectrofotômetro UV/Vis e Potássio (K) com a determinação por espectrofotometria de chama.

Os dados obtidos para cada variável foram submetidos a análise estatística descritiva, calculando-se as medidas de posição (média, mediana, mínimo e máximo), medidas de dispersão (amplitude, desvio padrão e coeficiente de variação), medidas de assimetria, curtose, e teste de normalidade (Anderson-Darling) pelo programa computacional Assistat.

Posteriormente, para caracterizar a variabilidade e a dependência espacial dos atributos químicos do solo, utilizou-se a geoestatística através de semivariogramas, mediante uso do programa computacional QGIS, por meio do complemento Smart-Map, no qual realiza a seleção de pontos que o sistema considera discrepante, realizando a filtragem dos dados atípicos que estão muito abaixo ou muito acima dos outros valores (*outliers*), conforme descritos na Tabela 1, no qual se configura de suma importância a identificação dos outliers para evitar valores extremos que possam influenciar durante a análise dos dados, conduzindo distorções. Os *outliers* eliminados não se diferiram entre as diferentes obtenções de coordenadas geográficas, dessa forma, foram os mesmos pontos retirados nos três métodos de posicionamento.

Tabela 1. Pontos resultantes da filtragem de dados com discrepância (*outliers*).

Variáveis	Pontos Eliminados
Cálcio (Ca)	77
Magnésio (Mg)	03
Acidez Potencial (H+Al)	10
Alumínio (Al)	47 e 61
Fósforo (P)	25 e 71
Potássio (K)	06, 08 e 24

Fonte: Autores.

Nos semivariogramas ajustados determinou-se os seguintes parâmetros: efeito pepita (C_0); patamar (C_0+C) e alcance da dependência espacial (a). De acordo com Cambardella et al. (1994), o quociente entre o efeito pepita e o patamar, $C_0/(C_0+C)$, possibilita a classificação da dependência espacial dos resultados. Conforme a metodologia proposta por Dalchiavon e Carvalho (2012), realizou-se a interpretação proposta para o avaliador da dependência espacial. A seleção dos modelos para a caracterização da variabilidade e dependência espacial dos

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, p. 110-129, jun. 2025. ISSN 1981-4089
atributos químicos do solo foi determinada por meio do uso da geoestatística, através de semivariogramas ajustados baseando-se na avaliação da menor soma de quadrados do resíduo (SQR) e melhor coeficiente de determinação (R^2), testando-se os modelos esférico, exponencial, gaussiano e linear.

Através da estimativa dos semivariogramas experimentais e o ajuste dos modelos teóricos dos semivariogramas ajustados os dados foram interpolados pelo método da krigagem, para posterior confecção dos mapas variabilidade da fertilidade química do solo de cada atributo, permitindo uma tomada de decisão para um manejo mais assertivo.

Resultados e discussão

A análise descritiva obteve os resultados dos atributos químicos da fertilidade do solo de cálcio, magnésio, acidez potencial, alumínio, fósforo e potássio convertidos de forma padronizada em $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, conforme descrito na Tabela 2. Exibe medidas de tendência central (média e mediana) que descrevem os valores típicos das variáveis, forma de distribuição ou simetria de amostra (valores mínimos e máximos) que descrevem a distribuição de frequências no quanto os dados variam, isto é, o quanto disperso eles são. Ademais, a amplitude medida pela diferença entre o valor máximo e o valor mínimo, o desvio padrão definido pelo grau de dispersão em torno do valor típico e o coeficiente de variação (adimensional) que determina a variabilidade do conjunto de dados através da divisão do desvio padrão e sua média expresso em porcentagem.

Por meio da análise exploratória dos dados, nota-se que na Tabela 2, a maior média e amplitude avaliada foi para cálcio com $2,63 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e $7,49 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente, enquanto que correlacionado, as menores medidas de média e amplitude foram para Al com $0,12 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$, podendo ser justificada pelas sucessivas correções realizadas na área. As medidas de tendência central de média e mediana das variáveis em estudo evidenciaram valores relativamente semelhantes para todos os atributos químicos nas densidades amostrais utilizadas, apontando uma simetria entre a distribuição dos dados obtidos, apesar disso, o teste de Anderson-Darling não determinou critérios de distribuição normal para fósforo e alumínio. Contudo, essa normalidade dos dados não é um requisito exigido na geoestatística (OLIVEIRA et al., 2015).

Tabela 2. Parâmetros de estatística descritiva para os atributos químicos do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P), alumínio (Al) e acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$). Ceres - GO. Outubro/2024.

Variáveis	Média	Med	Mínimo	Máximo	A	σ	CV	Cs	Ck	TN
Cálcio	2,63	2,49	0,45	7,94	7,49	1,19	45,29	1,25	4,06	Sim
Magnésio	1,75	1,71	0,18	4,8	4,62	0,81	46,58	0,60	1,35	Sim
Potássio	0,40	0,39	0,10	0,79	0,69	0,12	29,84	0,74	1,20	Sim
Fósforo	1,11	0,97	0,39	3,13	2,73	0,52	46,69	1,17	1,94	Não*
Alumínio	0,12	0,11	0,02	0,9	0,88	0,11	93,42	4,09	22,75	Não*
Acidez Potencial	2,54	2,5	0,8	4,5	3,7	0,73	28,81	0,23	0,07	Sim

Med: mediana; A: amplitude; σ : desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose; TN: teste de normalidade de Anderson-Darling. *Distribuição assimétrica de probabilidade.

Fonte: Autores.

Para os parâmetros máximo e mínimo, que permite analisar o quanto cada atributo variou dentro da área experimental amostrada, devido ao solo possuir fatores heterogêneos durante a sua estruturação, nota-se que esses valores resultaram em variações distintas dentre os nutrientes em estudo. Em vista disso, observa-se que o atributo de Ca obteve maior variação com valor mínimo de $0,45 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e máximo de $7,84 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$, enquanto que, o K obteve a menor variação entre $0,10 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e $0,79 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente, indicando pouca alteração do nutriente em toda área.

Dalchiavon et al. (2012) determinam que, a variabilidade de um atributo é classificada conforme a magnitude de seu coeficiente de variação (CV), classificando-o como baixo ($\text{CV} < 10\%$), médio ($10\% < \text{CV} < 20\%$), alto ($20\% < \text{CV} < 30\%$) e muito alto ($\text{CV} > 30\%$). Diante disso, os atributos químicos resultaram em um coeficiente de variação muito alto, exceto para Potássio e Acidez Potencial que apresentaram teores altos. Corroborou-se com Matias et al., (2019) que, analisando a eficiência de diferentes redes de amostragem na identificação da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, obtiveram valores Ca e Mg com coeficiente de variação muito alto todas as malhas amostrais estudadas. Santos et al. (2015), estudando a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, encontraram valores médios e altos de CV% e associaram esses resultados ao uso de fertilizantes no solo. Essa variação estimada era esperada devido a variabilidade presente nas propriedades químicas do solo, sendo

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, p. 110-129, jun. 2025. ISSN 1981-4089
resultante da complexa interação entre seu processo de formação e suas práticas de manejo do solo e das culturas gerando um grande impacto na superfície do solo (CARVALHO et al., 2003).

Observa-se na Tabela 2 que a maioria dos atributos químicos do solo resultaram em coeficiente de assimetria (C_s) positivos e de distribuição assimétrica, isso se dá devido aos valores das variáveis não estarem próximos a 0 (menor a assimetria), sendo o Al o atributo que apresentou maior assimetria e H+Al, Mg e K os componentes que apresentaram menor assimetria. Artes (2014) fundamenta como o grau de desvio ou afastamento da simetria de uma distribuição. Dessa forma, é classificada como simétrica quando as medidas de tendência central coincidem, no mesmo ponto, havendo um equilíbrio na distribuição. Quando o equilíbrio não ocorre, ou seja, as medidas de tendências centrais (média e mediana) recaem em pontos diferentes da distribuição é classificada como assimétrica, podendo ser subdivida em distribuição assimétrica negativa ou distribuição assimétrica positiva.

As variáveis são classificadas como curtose de distribuição platicúrtica com valores positivos, com exceção para o Al (0,07), determinado como distribuição leptocúrtica. Baseando-se na metodologia de classificação proposta por Petrucci e Oliveira (2017), que determina em uma distribuição normal, com a curva de dados no valor de 0,263, é denominada mesocúrtica, quando os elementos estão distribuídos ao longo da amostra, concentrando-se na parte central. Se o C_k tiver valor inferior a 0,263 é classificada como leptocúrtica. Já em uma distribuição platicúrtica, o coeficiente de curtose é maior que 0,263.

No semivariograma ajustado avaliou-se o efeito pepita (C_0) indicando a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores que entre as amostradas, no qual, quanto mais próximo de 0, mais significativo, abrangendo todas as variáveis resultantes no presente estudo, demonstradas na Tabela 3. O patamar (C_0+C) é determinado pelo valor da semivariância relacionada ao seu alcance. O alcance (A) refere-se ao limite da distância da dependência espacial e a variância (C) definida pela diferença entre o patamar e o efeito pepita que representa a semivariância estruturada espacialmente (CAMBARDELLA et al., 1994).

Os modelos selecionados foram classificados como esférico, linear com patamar, linear e exponencial, variando conforme o método de posicionamento de cada atributo químico. Em concordância Santos et al. (2015), obtiveram K ajustado para o modelo esférico, Ca para esférico e Mg como exponencial. Enquanto Morato et al. (2021), verificaram melhor ajuste do

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, p. 110-129, jun. 2025. ISSN 1981-4089
 modelo exponencial para acidez potencial e cálcio, magnésio e fósforo para o gaussiano e potássio para o modelo esférico.

Todas as variáveis em estudo exibiram dependência espacial, por não possuírem efeito pepita puro (EPP), com exceção dos atributos Potássio e Alumínio que obtiveram distribuição aleatória, ou seja, EPP, no qual o C_0 possui o mesmo valor que o C_0+C (patamar), indicando que o espaçamento entre as amostras foi maior que o necessário para constatar sua dependência espacial (CAMBARDELLA et al., 1994; ZANÃO JUNIOR et al., 2010).

É relevante notar que, todos os valores de alcance atingidos (Tabela 3) são maiores que o valor do espaçamento entre as amostras (30 m), revelando que as amostras se correlacionam entre si e podem ser interpoladas (VIEIRA et al., 2007), não apresentando distribuição aleatória. Os resultados variaram conforme a forma de obtenção de coordenadas. O Alcance determina a distância espacial correlacionada entre os resultados obtidos, pode ser considerado o principal parâmetro gerado pela geoestatística por determinar a distância em que uma variável está sinalizando sua continuidade espacial, a partir da qual o comportamento espacial do atributo torna-se completamente aleatório (LEMOS FILHO et al., 2008).

Tabela 3. Parâmetros ajustados ao semivariograma a partir das análises geoestatísticas.

Receptor	Modelo	$C_0^{(1)}$	$C_0 + C^{(2)}$	$C^{(3)}$	$A^{(4)}$	$R^2^{(5)}$	$SQR^{(6)}$	$GDE^{(7)}$	$ADE^{(8)}$
Cálcio (Ca)									
GNSS	Esférico	0,807	1,081	0,274	100,861	0,199	0,063	74,65	Mod
Estação T. App	Linear com patamar	0,821	1,083	0,262	78,317	0,231	0,060	75,80	Fraca
	Esférico	0,728	1,087	0,359	85,370	0,259	0,055	66,97	Mod
Magnésio (Mg)									
GNSS	Exponencial	0,196	0,600	0,404	107,245	0,634	0,011	32,66	Mod
Estação T. App	Esférico	0,318	0,587	0,269	101,026	0,754	0,005	54,17	Mod
	Exponencial	0,025	0,588	0,563	74,483	0,675	0,008	4,25	Forte
Potássio (K)									
GNSS	Esférico	0,008	0,011	0,003	100,429	0,519	0,000	72,72	Mod
Estação T. App	Linear com patamar	0,008	0,011	0,003	98,327	0,526	0,000	72,72	Mod
	Linear com patamar	0,008	0,011	0,003	97,679	0,619	0,000	72,72	Mod
Fósforo (P)									
GNSS	Exponencial	0,114	0,212	0,098	156,321	0,605	0,001	53,77	Mod
Estação T. App	Exponencial	0,106	0,209	0,103	122,157	0,442	0,002	50,71	Mod
	Exponencial	0,140	0,214	0,074	210,992	0,661	0,001	65,42	Mod
Alumínio (Al)									
GNSS	Linear com patamar	0,003	0,005	0,002	91,357	0,572	0,000	60	Mod
Estação T. App	Linear com patamar	0,003	0,005	0,002	75,655	0,421	0,000	60	Mod
	Linear com patamar	0,003	0,005	0,002	84,781	0,521	0,000	60	Mod
Acidez Potencial (H+Al)									

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, p. 110-129, jun. 2025. ISSN 1981-4089

GNSS	Linear	0,432	0,520	0,088	173,667	0,552	0,012	83,07	Fraca
Estação T.	Linear	0,446	0,515	0,069	174,404	0,621	0,005	86,60	Fraca
App	Linear	0,440	0,513	0,073	166,872	0,546	0,009	85,76	Fraca

(¹): Efeito pepita; (²): Patamar; (³): Variância; (⁴): Alcance; (⁵): Coeficiente de determinação; (⁶): Soma dos quadrados do erro; (⁷): Grau de dependência; (⁸): Classificação do Grau de Dependência.

Fonte: Autores.

Obteve-se resultados da soma de quadrados dos resíduos (SQR) baixos e próximos a 0 para todas as variáveis em estudo. Esse parâmetro é responsável por avaliar o nível de variância presente nos atributos, e idealmente deve possuir um menor valor que determina a dispersão dos pontos, ou seja, visa encontrar um melhor ajuste com menos variações entre os dados. Quanto menor o valor do SQR, mais significativo se torna, apresentando uma melhor estimativa da variabilidade dependente, bem como é observado na Tabela 3.

O quociente definido pela razão entre o efeito pepita e o patamar [$C_0/(C_0+C)$] dos resultados, expresso em percentagem, permite a classificação do grau de dependência espacial (ADE), sendo considerada forte quando a razão for $\leq 25\%$, moderada quando > 25 e $\leq 75\%$ e fraca se $> 75\%$ (CAMBARDELLA et al., 1994). Os atributos potássio (moderada), fósforo (moderada), alumínio (moderada) e acidez potencial (fraca) apresentaram o mesmo grau de dependência espacial para os três métodos de posicionamento. O atributo cálcio resultou em uma dependência moderada para GNSS e para o aplicativo, enquanto para a estação total apresentou fraca dependência. O atributo magnésio apresentou classificação forte para o aplicativo e moderada para GNSS e Estação total. Cambardella et al. (1994) observaram que os atributos com alta dependência espacial são predominantemente influenciados pelas características internas do solo, como textura e mineralogia. Por outro lado, aqueles que são impactados por fatores externos, como práticas de cultivo e uso de fertilizantes, tendem a exibir uma dependência espacial mais fraca. Morato et al. (2021), avaliando variabilidade espacial de atributos químicos da fertilidade do solo, também obtiveram graus de ADE variando entre forte, moderada e fraca dependência.

Utilizou-se a geoestatística como um meio auxiliar, por permitir a construção de um modelo de semivariograma que melhor descrevesse a variabilidade espacial dos dados utilizados no processo de interpolação. É importante ressaltar que o modelo ajustado representa a tendência de semivariância em relação à distância, com a krigagem sendo o método de interpolação que pode fornecer maior precisão às estimativas geradas (JOHANN et al., 2004).

Por conseguinte, a partir dos dados amostrais obtidos, torna-se possível a geração dos mapas de variabilidade espacial, expressos nas Figuras de 2 a 7, por meio de métodos de interpolação através de técnicas de georreferenciamento. As classes de cada mapa foram selecionadas com base nos resultados obtidos das análises químicas visando uma melhor visualização e identificação com maior clareza da variabilidade presente na área em estudo, não levando em consideração a faixa dos teores adequados de cada nutriente.

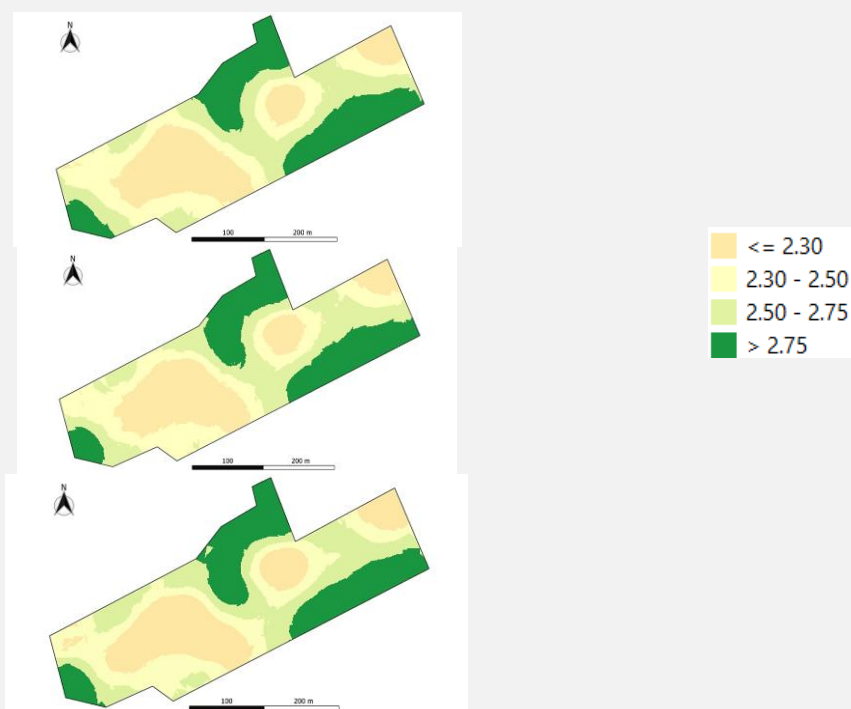
Tomou-se como embasamento o Guia de Interpretação de Análise de Solo e Foliar (PREZOTTI, GUARÇONI, 2013) para as análises da fertilidade dos atributos químicos. Os teores de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) estão diretamente interligados com o teor de acidez dos solos, dessa forma, solos ácidos apresentam baixas quantidades dos mesmos. Para Cálcio (Figura 2) a classe de interpretação varia de $< 1,5$ (baixo), $1,5-4,0$ (médio) e $> 4,0$ (alto) (PREZOTTI, GUARÇONI, 2013). Na área, a faixa variou de $2,30$ a $2,75 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ estando com teores médios por toda extensão da área, não apresentando deficiência deste nutriente. A malha amostral dos três diferentes métodos de posicionamento foi capaz de identificar os locais que houve diferentes teores do nutriente no solo.

Figura 2. Mapas de fertilidade de Cálcio pelos três métodos diferentes de obtenção de coordenadas geográficas.

Mapa por E.
Total⁽¹⁾

Mapa GNSS⁽²⁾

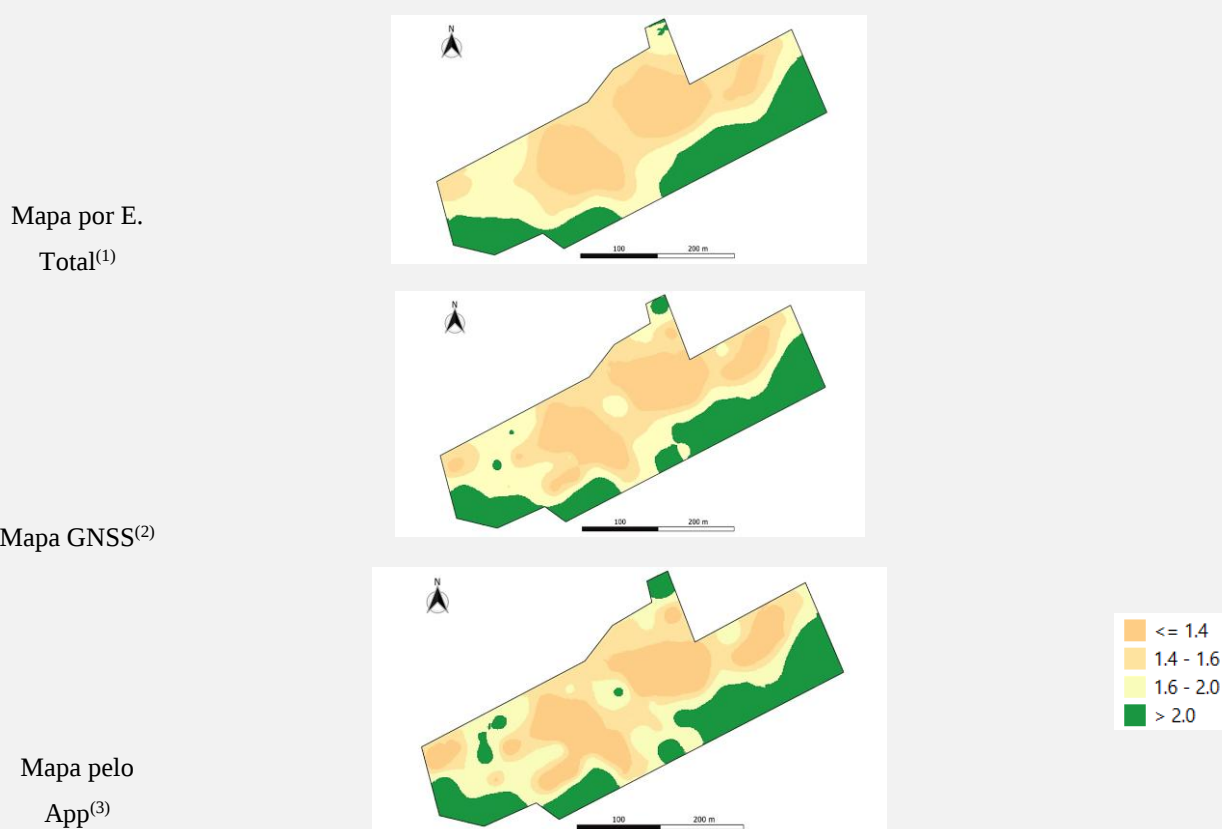
Mapa
App⁽³⁾ pelo



⁽¹⁾: Estação Total; ⁽²⁾: GNSS Garmin Etrex 30; ⁽³⁾: Aplicativo de celular.
Fonte: Autores.

Enquanto para Magnésio (Figura 3) sua faixa de classes são de $< 0,5$ para baixo, $0,5-1,0$ para médio e $> 1,0$ para teores considerados altos (PREZOTTI, GUARÇONI, 2013), nota-se que variou entre $1,4$ a $2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, apresentando altos valores por toda a área em estudo, o que pode ser justificado pelo histórico de aplicações de corretivos de calcário dolomítico que fornece maiores teores de Mg no perfil do solo. A obtenção de coordenadas pelo aplicativo móvel foi obtida em zonas de maior concentração de nutrientes (representadas pela cor verde), embora em menor quantidade quando comparadas às obtidas pela estação total. No entanto, a análise geoestatística ainda permite identificar áreas que requerem maiores solicitações de nutrientes, atingindo o objetivo de captar a variabilidade espacial do atributo na área.

Figura 3. Mapas de fertilidade de Magnésio pelos três métodos diferentes de obtenção de coordenadas geográficas.

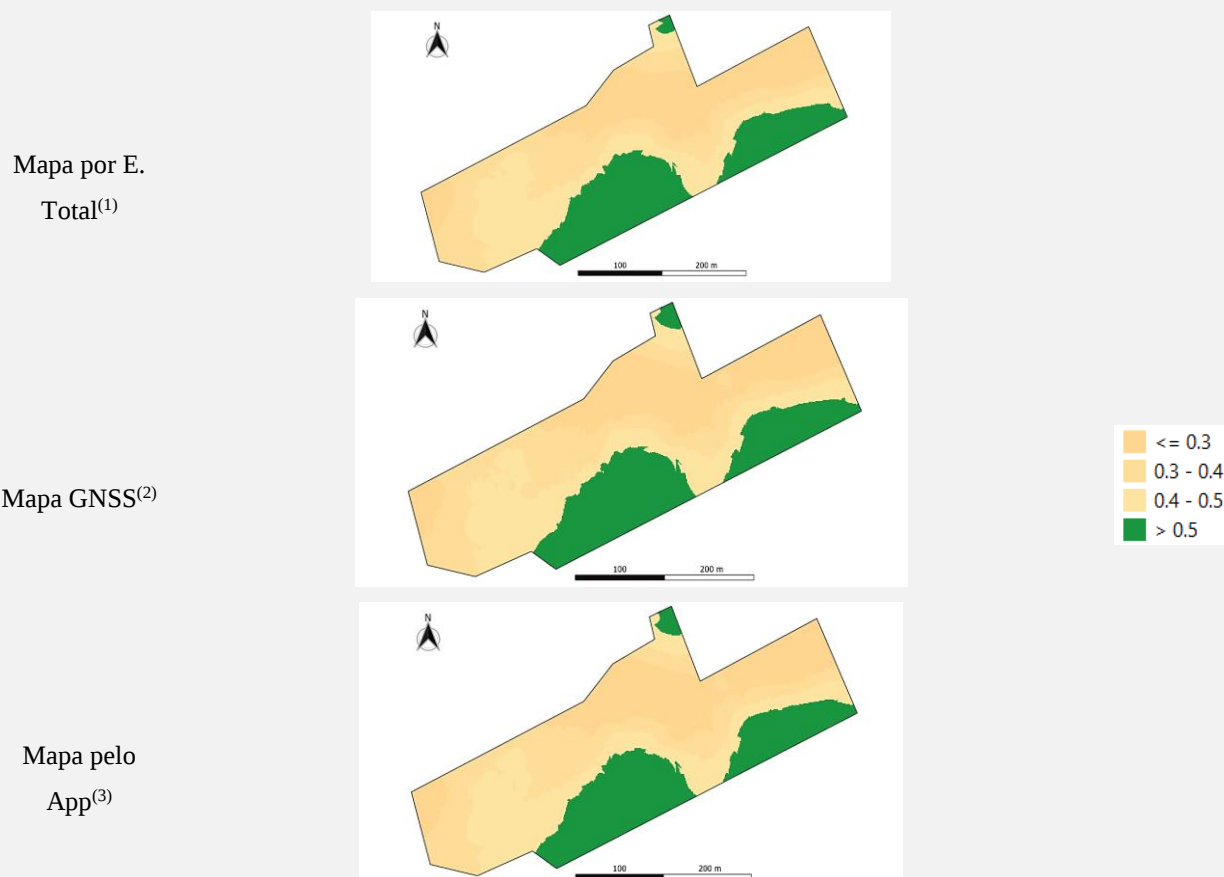


(¹): Estação Total; (²): GNSS Garmin Etrex 30; (³): Aplicativo de celular.
Fonte: Autores.

As classes de interpretação para potássio disponível, pelo extrator Mehlich-1, em função de culturas anuais, são de $< 0,5$, $0,5-1,2$ e $> 1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para baixo, médio e alto, respectivamente (PREZOTTI, GUARÇONI, 2013). A Figura 4 demonstra a baixa fertilidade

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, p. 110-129, jun. 2025. ISSN 1981-4089
de Potássio na área com variação de 0,3 a 0,5 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Evidencia-se a pequena variação visual desempenhada pelos três diferentes métodos de posicionamento.

Figura 4. Mapas de fertilidade de Potássio pelos três métodos diferentes de obtenção de coordenadas geográficas.

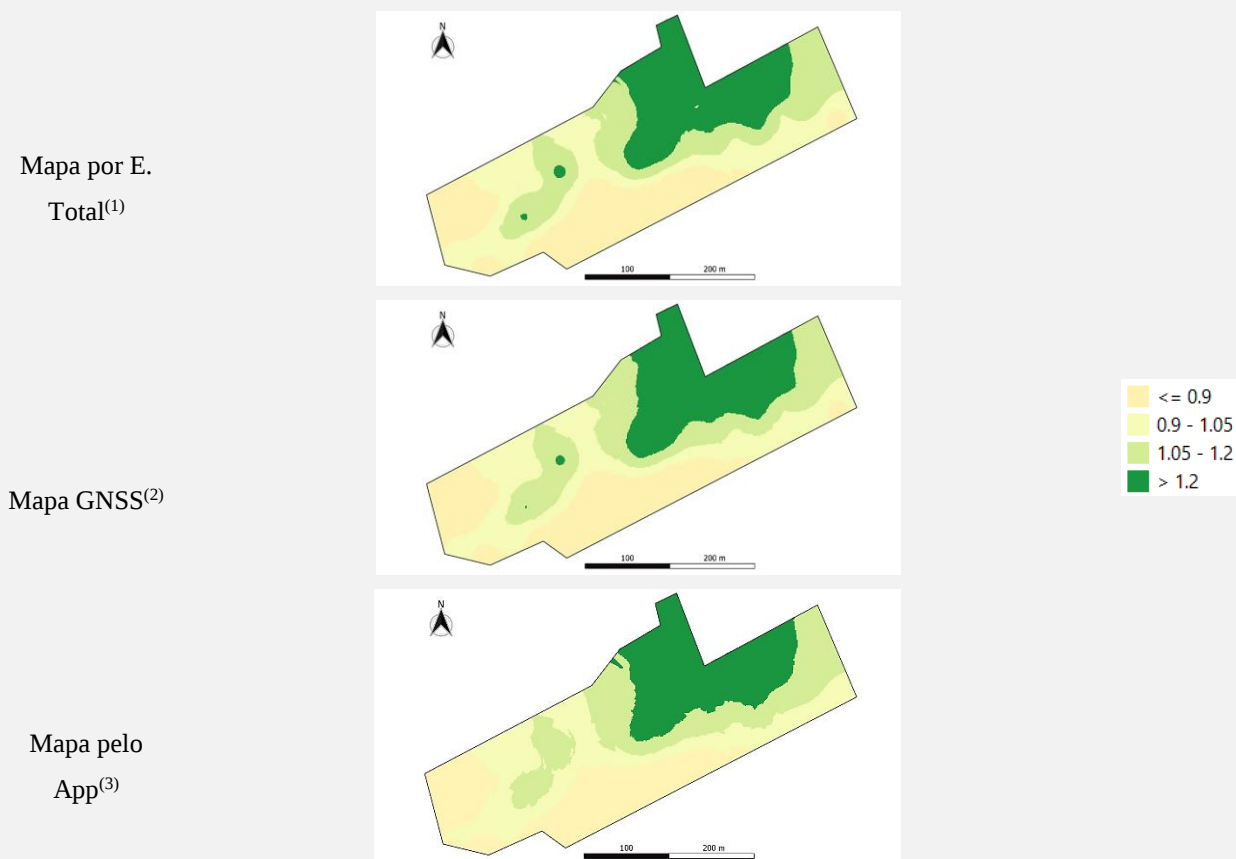


⁽¹⁾: Estação Total; ⁽²⁾: GNSS Garmin Etrex 30; ⁽³⁾: Aplicativo de celular.

Fonte: Autores.

Já para o teor de fósforo “disponível” realizado pelo extrator Mehlich-1, os teores baseando-se em culturas anuais, têm-se < 0,3 classificado como baixo, 0,3-0,5 como médio e > 0,5 como alto (PREZOTTI, GUARÇONI, 2013). A área possui uma variação entre 0,9 a 1,2 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, não ocorrendo deficiência desse nutriente. Na área houve variância de 0,3 a 0,5 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, revelando a deficiência deste nutriente em grande parte da área avaliada, conforme exposta na Figura 5. Ao lado esquerdo central do mapa destaca-se somente dois pequenos pontos que diferiram na precisão comparativa entre a Estação Total e GNSS em relação ao App, denotando assim, a grande representatividade da distribuição espacial do atributo na área experimental.

Figura 5. Mapas de fertilidade de Fósforo pelos três métodos diferentes de obtenção de coordenadas geográficas.

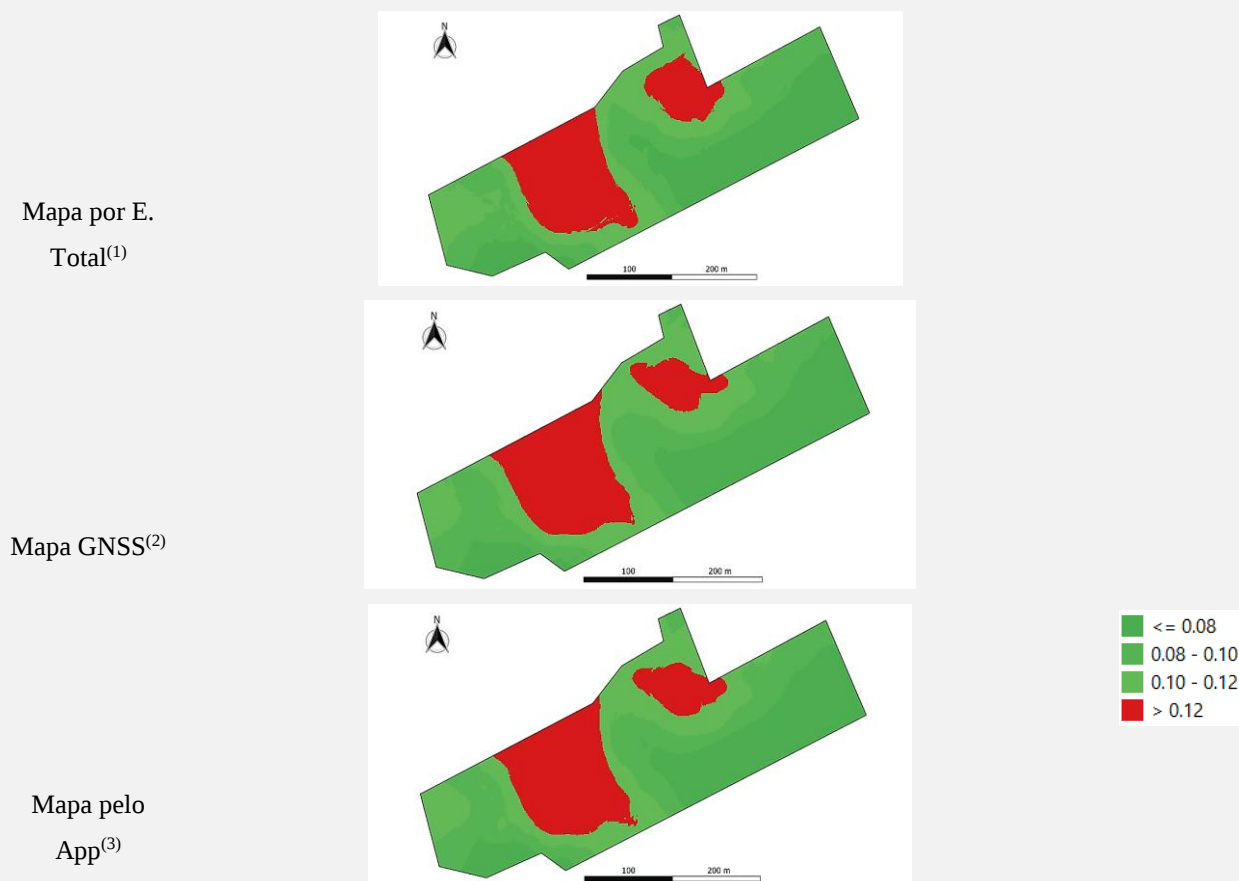


(¹): Estação Total; (²): GNSS Garmin Etrex 30; (³): Aplicativo de celular.

Fonte: Autores.

Para Alumínio ($\text{Al}^{3+} \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), < 0,3 é considerado baixo, 0,3-1,0 médio e > 1 para alto (PREZOTTI, GUARÇONI, 2013), tendo em vista que esse é um elemento extremamente prejudicial e tóxico para as plantas e seu sistema radicular, e gera engrossamento e redução da formação dos pelos radiculares. Dessa forma, o ideal é minimizar ao máximo os malefícios causados pela sua presença. Os mapas de Alumínio presentes na Figura 6 demonstram uma variação desse elemento na área de 0,8 a 0,12 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, considerado um teor médio. Os três métodos de posicionamento demonstraram características semelhantes por todo mapeamento. Nota-se que as áreas que apresentaram os maiores teores de Al são semelhantes às que apresentaram as menores faixas de Ca e Mg, podendo realizar uma correlação para um manejo de correção do solo, quando comparado aos mapas de fertilidade expostos nas Figuras 2 e 3.

Figura 6. Mapas de fertilidade de Alumínio pelos três métodos diferentes de obtenção de coordenadas geográficas.



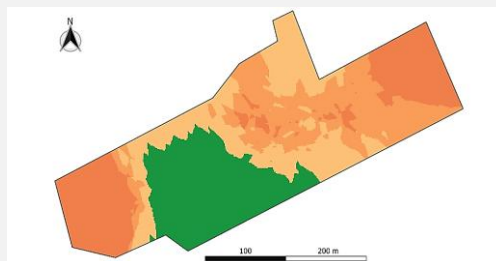
(¹): Estação Total; (²): GNSS Garmin Etrex 30; (³): Aplicativo de celular.

Fonte: Autores.

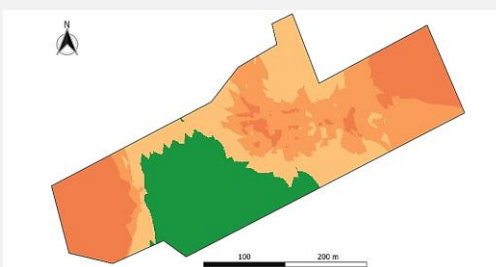
A acidez potencial ou também chamada acidez total possui como teores de base em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ < 2,5; 2,5-5,0 e > 5, para baixo, médio e alto, respectivamente (PREZOTTI, GUARÇONI, 2013). Analisando-se os dados da área em estudo temos teores variando entre 2,3 a 2,6 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, classificando localidades com baixos teores a médios. Este atributo possui maior relevância para realizar o cálculo da CTC Total do solo (T) para traçar estratégias de manejo para a fertilidade do solo. Os três mapas caracterizaram similaridades em suas respectivas visualizações (Figura 7).

Figura 7. Mapas de fertilidade de Acidez Potencial pelos três métodos diferentes de obtenção de coordenadas geográficas.

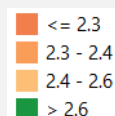
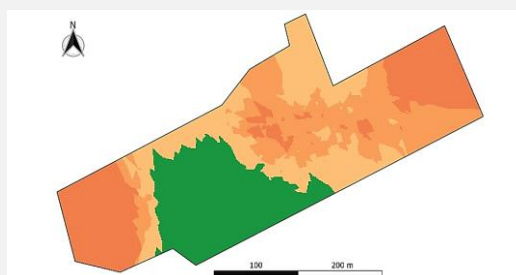
Mapa por E.
Total⁽¹⁾



Mapa GNSS⁽²⁾



Mapa pelo
App⁽³⁾



(¹): Estação Total; (²): GNSS Garmin Etrex 30; (³): Aplicativo de celular.

Fonte: Autores.

Diante do exposto, a malha amostral adotada foi suficiente para a determinação da variabilidade de atributos químicos do solo e a dependência espacial das variáveis Ca, Mg, K, P, Al e H + Al. Nota-se que os diferentes métodos de posicionamentos utilizados não se diferiram de forma significativa, observando-se visualmente os mapas dos atributos químicos da fertilidade do solo, tornando assim possível a análise de forma sucinta das áreas que apresentaram heterogeneidade, demonstrada nas diferentes colorações de acordo com as suas classes. O atributo Magnésio foi o que apresentou maior diferença, mesmo que de forma sucinta, para o aplicativo com regiões localizadas de coloração verde em comparação com a Estação Total, que demonstrou tons bege nas regiões centrais da lateral esquerda.

Obteve-se a média de três pontos selecionados de forma aleatória em cada região do mapa lateral esquerda, lateral direita e central e medindo conforme a régua disponibilizada pelo comando do QGIS, resultando-se em uma distância média entre pontos georreferenciados da Estação Total em comparação com o aplicativo de 0,91 m, indicando uma margem de erro do equipamento GNSS do celular abaixo de 1 m, evidenciando o *smartphone* como uma alternativa de baixo custo.

Um estudo realizado por Sampaio et al. (2020) demonstrou que as diferenças obtidas entre os dados medidos pela Estação Total e pelo aplicativo medidas foi em média de 0,69 m, considerando-se uma obtenção melhor que um posicionamento absoluto por técnicas GNSS. Ademais, reforça que no decorrer do procedimento em campo, observou-se que a determinação dos ângulos do aplicativo não pode ser feita imediatamente após o direcionamento do celular para o ponto desejado, devido os valores gerados pelo sensor necessitarem de intervalo para se estabilizar e fornecer valores mais coerentes com os valores reais, aferindo maior precisão.

Denota-se a precisão do uso do aplicativo como uma ferramenta viável para o georreferenciamento, aplicando-se técnicas da Agricultura de Precisão para a produção dos mapas de variabilidade com características análogas. Em vista disto, torna-se uma vantajosa alternativa com um custo inferior aos outros métodos que apresentam maior precisão, adquirindo resultados semelhantes entre os posicionamentos, gerando economia para o produtor no processo de amostragem. Em vista disso, a partir de técnicas de georreferenciamento aliadas a agricultura de precisão para mapear a área em estudo, tornou-se possível a identificação da heterogeneidade dos atributos químicos disponíveis no perfil do solo, facilitando assim, a tomada de decisão para correção de nutrientes que apresentaram deficiências, com a possibilidade de aplicações em taxa variável que permite variar a taxa de insumos agrícolas em diferentes pontos do talhão, visando a economia para o produtor aliada ao uso do aplicativo para obter as coordenadas geográficas durante a amostragem.

Conclusões

O aplicativo é uma alternativa interessante pela sua alta praticidade, atendendo os requisitos para a visualização das áreas com necessidade individualizada, para uma recomendação mais assertiva com manejo localizado.

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, p. 110-129, jun. 2025. ISSN 1981-4089

A malha amostral se mostrou adequada para verificação da variabilidade e dependência espacial dos atributos químicos do solo nos três métodos de obtenções de coordenadas GNSS.

Com uma margem de erro inferior a 1 m em comparação com a Estação Total, o aplicativo demonstrou uma precisão satisfatória para fins de amostragem e mapeamento de variabilidade espacial.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal Goiano Campus Ceres, pela concessão de bolsa de iniciação científica, e realização das análises de solo.

Referências

ARTES, R. **Coeficiente de Assimetria**. Insper, 11p, 2014. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~mbranco/MedidasdeAssimetria_2014.pdf>. Acesso em: 28/09/2024.

BERNARDI, A. C.; BETTIOL, G. M.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. **Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo**. Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília v. 32, n. 1/2, p. 205-221, 2015.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOWAK, 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 american journal, v.58, p.1501-1511, 1994.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. **Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP)**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, p. 695-703, 2003.

CHERUBIN, M. R.; SANTI, A. L.; EITELWEIN, M.T.; AMADO, T. J. C.; SIMON, D. H. & DAMIAN, J. M. **Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 50, n. 2, p. 168-177, 2015.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P. **Correlação Linear e Espacial dos Componentes de Produção e Produtividade da Soja**. Revista Ciências Agrárias, v. 33, n. 2, p. 541-552, 2012.

- Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 18, n. 1, p. 110-129, jun. 2025. ISSN 1981-4089
- LEMON FILHO, L. C. A. L.; OLIVEIRA, E. L. DE; FARIA, M. A. DE; ANDRADE, L. A. DE B. **Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.).** Revista Ciência Agronômica, v.39, p.193-202, 2008.
- JOHANN, J. A.; OPAZO, M. A. U.; SOUZA, E. G.; ROCHA, J. V. **Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR.** R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 8:212- 219, 2004.
- MATIAS, S. S. R., MATOS, A., LANDIM, J., FEITOSA, S., ALVES, M. A., & SILVA, R. (2019). **Recomendação de calagem com base na variabilidade espacial de atributos químicos do solo no Cerrado brasileiro.** Revista de Ciências Agrárias, 42(4), 896-907.
- MORATO, L. X. O.; OLIVEIRA, G. C.; SILVA, V. A. **Variabilidade espacial de atributos químicos da fertilidade do solo da fazenda Varginha.** Brazilian Journal of Development, v.7, n. 12, p. 119119-119135, 2021.
- OLIVEIRA, I.A.; MARQUES JUNIOR, J.; COSTA CAMPOS, M.C.; DE AQUINO, R.E.; DE FREITAS, L.; SILVA SIQUEIRA, D; DA CUNHA, J.M. **Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM.** Revista Brasileira de Ciência do Solo. v. 29, n. 3, p. 668-681, 2015.
- PETRUCCI, E.; DE OLIVEIRA, L. A. **Coefficientes 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, v. 1, p. 158-170, 2017.
- PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. M. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar.** Vitória, ES: Incaper, 2013. 104 p.
- RABELO, A. J. C.; CAETANO, J. O.; CRUZ, S. J. S. **Alterações de atributos químicos e físicos de um Latossolo Vermelho na sucessão milho-soja.** Científica, v. 47, n. 2, p. 221-230, 2019.
- REGHINI, F. L.; CAVICHIOLI, F. A. **Utilização de geoprocessamento na agricultura de precisão.** Revista Interface Tecnológica, v. 17, n. 1, p. 329-339, 2020.
- SANTOS, E. O. D. J.; GONTIJO, I.; SILVA, M. B. D.; DRUMOND, A. P. **Variabilidade espacial de macronutrientes em uma lavoura de café conilon no Norte do Espírito Santo.** Revista Ciência Agronômica, v. 46, n. 3, p. 469-476, 2015.
- SAMPAIO, L. F.; BANDEIRA, A. L.; VEIGA, L. A. K.; ALVES, S. D. S. O.; RODRIGUEZ, F. C.; DE MEDEIROS, L. Í. B. **Análise da viabilidade do uso de dados provenientes de sensores presentes em smartphones visando a mensuração de ângulos e distâncias.** Congresso Nacional de Engenharia de Agrimensura (CONEA), 2020.
- VIEIRA, V. A. S.; MELLO, C. R.; LIMA, J. M. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma microbacia hidrográfica.** Ciência e Agrotecnologia, v.31, p.1477-1485, 2007.

ZANÃO JUNIOR, L. A. Z.; LANA, R. M. Q.; ZANÃO, M. P. C.; GUIMARÃES, E. C.
Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um Latossolo em sistema de plantio direto. Revista Ceres, v. 57, n. 3, p. 429-438, 2010.