



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Densidade Amostral, identificação da variabilidade espacial de atributos químicos e susceptibilidade magnética do solo no Cerrado Piauiense

Sammy Sidney Rocha Matias¹, Ana Alice Salmito Nolêto de Campos Ferreira², Ariane da Silva Lopes Rocha Ascenso², Maria de Fátima Marques Pires², Priscila Alves Barroso³

¹Prof. Dr. da Universidade Estadual do Piauí – UESPI/Campus Dep. Jesualdo Cavalcanti Barros. Corrente-PI, Brasil. E-mail: ymmsa2001@yahoo.com.br (<https://orcid.org/0000-0002-5729-3284>). ²Doutoranda em Ciências Agrárias, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Cinobelina Elvas, Endereço: BR 135, Planalto Horizonte, s/n, Bom Jesus – PI, CEP: 64900-000. E-mail: analice@ufpi.edu.br (<https://orcid.org/0009-0003-1423-1766>). E-mail: arianeascenso@ufpi.edu.br (<https://orcid.org/0000-0002-2898-4174>). E-mail: fatimapiresbl@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-2829-8016>). ³Profa. Dra da Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Cinobelina Elvas, Endereço: BR 135, Planalto Horizonte, s/n, Bom Jesus – PI, CEP: 64900-000. E-mail: pa.barroso@ufpi.edu.br (<https://orcid.org/0000-0003-1749-1961>).

Artigo recebido em 29/11/2024 e aceito em 27/02/2025

RESUMO

A composição florística e do solo no Cerrado é variada, indicando que o solo necessita de preparos específicos, que facilite um manejo agrícola sustentável e a preservação ambiental. Neste contexto, técnicas não destrutivas, como a susceptibilidade magnética, podem identificar a diversidade e as características do solo com um menor número de amostras. Este estudo verificou a susceptibilidade magnética e atributos químicos do solo por meio de diferentes densidades amostrais, na região do MATOPIBA. O trabalho foi conduzido no município de Barreiras do Piauí. A área em estudo foi delimitada e georreferenciada, em 1 hectare (100 x 100 m), foram aplicadas três densidades amostrais (10 x 10, 20 x 20 e 30 x 30 m), com coletas a 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m, totalizando 242 amostras. Avaliaram-se pH, matéria orgânica, P, Ca, K, Mg, H+Al, Al, CTC e V%. A susceptibilidade magnética foi analisada por meio de balança, e os dados, analisados por estatística univariada, descritiva, multivariada e geoestatística. A densidade 30 x 30 m apresentou variabilidade definida com menos amostras. A correlação entre os atributos químicos e susceptibilidade magnética foi insignificante, exceto para CTC e matéria orgânica na densidade 10 x 10 m a 0,0-0,20 m. Os mapas de krigagem revelaram áreas com menores concentrações de nutrientes, permitindo um manejo conforme as necessidades locais. Uma análise multivariada indicou que as malhas 10 x 10 e 30 x 30 m são as mais adequadas para estudos de variabilidade espacial. Palavras-chave: Magnetização, Manejo, Preservação, Solo.

Sample density, identification of spatial variability of chemical attributes and magnetic susceptibility of soil in the Piaui Cerrado

ABSTRACT

The floristic and soil composition of the Cerrado is varied, indicating that the soil requires specific preparations to facilitate sustainable agricultural management and environmental preservation. In this context, non-destructive techniques, such as magnetic susceptibility, can identify the diversity and characteristics of the soil with a smaller number of samples. This study verified the magnetic susceptibility and chemical attributes of the soil through different sampling densities in the MATOPIBA region. The work was conducted in the municipality of Barreiras do Piauí. The area under study was delimited and georeferenced, in 1 hectare (100 x 100 m), three sampling densities were applied (10 x 10, 20 x 20 and 30 x 30 m), with collections at 0.0-0.20 and 0.20-0.40 m, totaling 242 samples. pH, organic matter, P, Ca, K, Mg, H+Al, Al, SB, CTC and V%. Magnetic susceptibility was analyzed using a scale, and the data was analyzed using univariate, descriptive, multivariate and geostatistical statistics. The densities and depths, but the 30 x 30 m density showed defined variability with fewer samples. The correlation between chemical attributes and magnetic susceptibility was insignificant, except for CTC and organic matter at density 10 x 10 m at 0.0-0.20 m. The kriging maps revealed areas with lower nutrient concentrations, allowing management according to local needs. A multivariate analysis indicated that the 10 x 10 and 30 x 30 m grids are the most suitable for spatial variability studies.

Keywords: preservation, soil, management, magnetization.

Introdução

O Cerrado brasileiro é uma das regiões com maior biodiversidade em recursos naturais do mundo, ocupando aproximadamente 25% do território nacional e integrando áreas de grande importância para a produção agrícola do país. Nos últimos anos, a região conhecida como MATOPIBA, que engloba os Estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, destacou-se pela rápida expansão de atividades agrícolas, especialmente para a produção de grãos e fibras (Cardoso & Amorim, 2024).

O avanço intensivo das atividades agrícolas no Cerrado brasileiro tem levantado preocupações significativas em relação à sustentabilidade ambiental, particularmente devido ao conhecimento insuficiente sobre as características do solo e a variabilidade de seus atributos químicos e físicos. Essa falta de informações detalhadas complica a avaliação dos impactos das práticas agrícolas na saúde do solo e nos serviços ecossistêmicos. Estudos indicam que a agricultura intensiva associada ao desconhecimento sobre a aptidão dos solos e suas propriedades específicas, pode levar à degradação do solo, incluindo erosão, compactação e perda de fertilidade, o que acaba afetando os serviços ecossistêmicos (Pereira et al., 2023).

No manejo agrícola sustentável, é fundamental entender a variabilidade espacial dos atributos do solo para otimizar a utilização de insumos e minimizar o impacto ambiental. Uma das ferramentas promissoras nesse sentido é a geoestatística, que permite a modelagem espacial de atributos do solo e a criação de mapas que facilitam o planejamento de manejo localizado, conhecido como agricultura de precisão (Monteiro et al., 2024 e Matos et al., 2024).

Dentro das técnicas de geoestatística, a krigagem destaca-se por estimar as covariâncias espaciais e fazer previsões minimizando a variância da estimativa, confiando na configuração espacial das amostras e na estrutura de dependência da variável (Sohrabian, 2021). Esse método utiliza semivariogramas para quantificar a dependência espacial, aumentando a precisão das interpolações. Nesse sentido, os semivariogramas capturam o grau de correlação espacial entre os pontos amostrados, permitindo previsões mais confiáveis em locais não amostrados (Jalane et al., 2024).

Com base nesses princípios, a susceptibilidade magnética tem sido explorada como uma variável complementar em estudos de variabilidade espacial do solo. Essa medida física está relacionada à presença de certos minerais no solo. Pesquisas indicam que a susceptibilidade

magnética se correlaciona com vários atributos químicos do solo, particularmente em relação à matéria orgânica e à capacidade de troca catiônica (Kruglov et al., 2023), aprimorando a compreensão da variabilidade e fertilidade do solo. Essa relação é crucial para a agricultura de precisão, especialmente em regiões com limitações inerentes ao solo, como é o caso dos solos do Cerrado. Além disso, técnicas de mapeamento tem sido empregado para prever padrões espaciais de susceptibilidade magnética, revelando uma variabilidade significativa influenciada por fatores como material original e topografia (Zhou et al., 2022; Matos et al., 2023).

A expansão agrícola no Cerrado piauiense aumenta os riscos de degradação dos solos, enquanto o desconhecimento sobre sua variabilidade espacial dificulta práticas sustentáveis. Ferramentas como a susceptibilidade magnética e diferentes densidades amostrais podem ajudar a identificar essa variabilidade e subsidiar um manejo mais eficiente e sustentável.

Portanto, a hipótese do trabalho é que a densidade amostral afeta a detecção da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e que a susceptibilidade magnética é uma ferramenta eficiente e econômica para identificar esses padrões, contribuindo para o manejo agrícola sustentável no Cerrado piauiense.

Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo principal identificar a variabilidade dos atributos químicos do solo por meio de diferentes densidades amostrais e avaliar a correlação entre esses atributos e a susceptibilidade magnética em uma área de Cerrado piauiense. Especificamente, o estudo visou: (1) definir a densidade amostral mais adequada para identificar a variabilidade dos atributos químicos do solo, (2) quantificar os teores desses atributos em função de escalas adequadas ao desenvolvimento agrícola, (3) determinar zonas de manejo específico que representem a espacialização dos atributos do solo, e (4) testar a aplicabilidade da susceptibilidade magnética como ferramenta de mapeamento para auxiliar no planejamento do manejo sustentável no Cerrado piauiense.

Material e métodos

Descrição da localização do experimento, metodologia de campo e variáveis analisadas

O experimento foi conduzido no município de Barreiras do Piauí (10°03' de latitude sul e 45°68' de longitude oeste), região da chapada das Mangabeiras, sub-região do MATOPIBA. O local

apresenta clima semiúmido (classificação de Köppen Aw'), com temperatura média de 27°C e precipitação anual de cerca de 1200 mm, concentrada de novembro a abril. A área selecionada, de 1 hectare (100 x 100 m), é representativa dos solos do cerrado piauiense.

Para investigar a variabilidade dos atributos do solo e a susceptibilidade magnética, a área de estudo foi dividida em três grades amostrais com espaçamentos de 10 x 10 m, 20 x 20 m e 30 x 30 m, resultando em três densidades amostrais diferentes para comparação. As amostras foram coletadas em duas profundidades: 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m, totalizando 242 amostras (121 pontos de coleta para cada profundidade).

A coleta foi realizada manualmente com trado de caneco. E posteriormente, as amostras foram direcionadas para o Centro de Análises de Solo e Planta da Universidade Estadual do Piauí (UESPI), em Corrente-PI, para serem secas ao ar e

passadas em peneira de 2 mm antes das análises químicas e susceptibilidade magnética.

Foram realizadas as seguintes análises químicas em cada amostra: pH (em água), teores de fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}), alumínio (Al^{+3}), de acordo com as recomendações da Teixeira et al. (2017). Com os valores obtidos nas análises do solo, foi possível calcular a soma de bases (SB), a capacidade de trocas de cátions efetiva (t) e potencial (T), percentagem de saturação por alumínio (m) e bases (V).

O valor da susceptibilidade magnética (SM, χ) foi mensurado no laboratório da Universidade Estadual do Piauí (UESPI) para todas as amostras, empregando-se uma balança analítica conforme o método descrito por Siqueira et al. (2010) (Figura 1). O aparato para medição da SM inclui uma balança analítica, um ímã, um suporte para o ímã e um porta amostra.

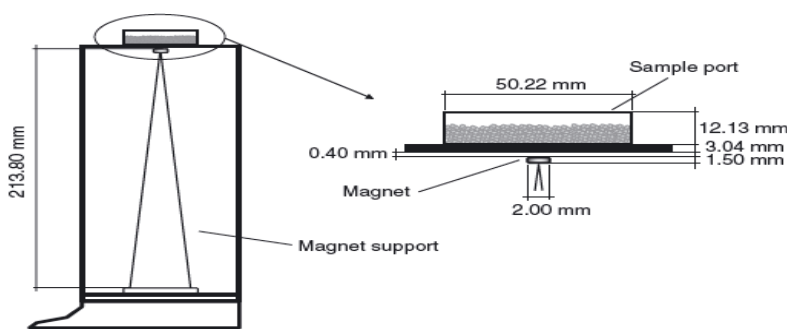


Figura 1. Esquema de medição da susceptibilidade (SM) com uso de uma balança analítica
Fonte: Adaptado de Siqueira et al. (2010).

Análise estatística

Para a análise estatística descritiva, realizou-se um estudo exploratório com o software MINITAB (Minitab Release, 2000), incluindo o cálculo de medidas de localização (média, mediana, mínimo e máximo), variabilidade (coeficiente de variação) e tendência central (assimetria e curtose) para avaliar a normalidade dos atributos do solo. Utilizou-se a classificação de variabilidade de Warrick & Nielsen (1980), categorizando variabilidade baixa para valores de coeficiente de variação menores que 12%, média entre 12% e 60% e alta para valores superiores a 60%.

As correlações entre as variáveis foram determinadas pela correlação de Pearson ($p < 0,05$), classificadas de acordo com Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009) como fraca (0,1 a 0,3), moderada (0,4 a 0,6) e forte (0,7 a 1,0). Correlações lineares fortes foram consideradas significativas para coeficientes maiores que +0,60 (positiva) ou

menores que -0,60 (negativa). A análise da geoestatística dos semivariogramas foi analisada no software GS+ (Robertson, 2008), utilizando modelos esférico, exponencial e gaussiano para ajuste dos dados.

A predição dos atributos em zonas não amostradas foi realizada por krigagem, gerando mapas de contorno no programa Surfer (2000). A escolha dos modelos teóricos baseou-se na soma dos quadrados dos resíduos (SQR), no coeficiente de determinação (R^2) e no coeficiente de correlação obtido pela validação cruzada. O grau de dependência espacial (GDE) foi categorizado conforme Cambardella et al. (1994), com dependência fraca ($>75\%$), moderada (25% a 75%) e forte ($<25\%$) a partir da razão entre o efeito pepita e o patamar (C_0/C_0+C_1).

Para a análise multivariada, foi realizada uma análise de agrupamento hierárquico (Sneath & Sokal, 1973) para identificar as semelhanças entre as amostras de solo em relação às características químicas. Os coeficientes de dissimilaridade foram

calculados com base na distância euclidiana, e os agrupamentos foram construídos pelo método de ligação completa (Hair et al., 2005). Os tratamentos, definidos pela malha e profundidade do solo, foram agrupados usando o método UPGMA (Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean) e o método de Tocher, ambos baseados na matriz de distância euclidiana dos parâmetros químicos. A consistência dos agrupamentos, foi validada pelo coeficiente de correlação cofenética (Sokal & Rohlf, 1962).

Adicionalmente, os dados foram submetidos à Análise de Componentes Principais (PCA), usando a matriz de covariância das variáveis originais para a extração de autovalores e autovetores. Os scores dos tratamentos foram

plotados em um *biplot* para os dois primeiros componentes principais. Todas as análises foram realizadas com a versão 4.0.5 do software R (R Cran, 2022).

Resultados e Discussão

Os resultados da análise descritiva para os atributos químicos e susceptibilidade magnética (SM) do solo, são demonstrados nas tabelas 1, 2 e 3. De acordo com os resultados obtidos na análise descritiva dos atributos do solo e SM, as medidas de tendência central, média e mediana apresentam-se próximas em todas as densidades amostrais (10 x 10, 20 x 20 e 30 x 30 m) e nas profundidades estudadas, sendo esse um dos indicadores que os dados estão adequados para o uso da geoestatística.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos químicos e susceptibilidade magnética em duas profundidades, na densidade amostral 10 x 10 m na região de Barreiras do Piauí.

Variáveis	Média	Mediana	Max	Min.	Assimetria	Curtose	CV	N
Profundidade de 0,0-0,20 m								
pH	4,61	4,48	7,01	3,55	1,52	3,11	12,61	121
K	0,03	0,03	0,14	0,0	1,92	5,21	76,56	121
Ca	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	121
Mg	0,40	0,40	1,00	0,10	0,98	2,10	37,48	121
SB	0,43	0,42	1,04	0,21	1,02	2,11	34,83	121
CTC T	2,64	2,50	7,69	0,65	1,52	4,23	46,02	121
CTC t	1,07	1,02	2,70	0,42	1,26	3,45	33,11	121
V	20,40	16,24	75,91	4,37	2,19	5,51	70,44	121
Al	0,64	0,60	2,40	0,20	1,96	6,89	50,55	121
m	58,05	58,15	88,76	26,89	-0,12	-0,57	22,11	121
P	1,56	1,18	4,89	0,05	0,96	0,26	74,86	121
M,O	0,68	0,63	3,07	0,15	3,77	25,22	46,63	121
SM	0,15	0,01	4,29	0,00	5,87	37,33	353,01	121
Profundidade de 0,20-0,40 m								
pH	5,34	5,19	8,87	4,03	1,65	4,98	13,09	121
K	0,02	0,02	0,13	0,0	2,17	6,28	107,65	121
Ca	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	121
Mg	0,35	0,30	0,90	0,10	1,06	1,38	45,25	121
SB	0,37	0,33	0,90	0,11	0,97	1,09	42,76	121
CTC T	1,71	1,58	9,23	0,20	2,78	16,04	65,01	121
CTC t	0,82	0,72	4,95	0,30	5,65	45,90	58,25	121
V	30,63	22,69	100,00	3,51	0,04	1,29	75,61	121
Al	0,45	0,40	4,40	0,10	6,36	52,90	98,26	121
m	51,69	49,75	90,26	9,96	1,42	-0,07	31,14	121
P	1,48	1,24	6,34	0,05	1,23	1,06	90,09	121
M,O	0,45	0,43	3,07	0,0	7,08	66,92	60,48	121
SM	0,36	0,01	8,83	0,0	5,15	31,42	311,87	121

CV: Coeficiente de Variação [$CV\% = (\text{Desvio-padrão}/\text{Média}) \times 100$]; Potencial hidrogeniônico (pH em água); Matéria orgânica (MO), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Soma de Base (SB), Capacidade de troca catiônica (CTC) total (T) e efetiva (t), Saturação por bases (V%), Alumínio (Al), Saturação por alumínio (m), Fósforo (P) e Susceptibilidade Magnética (SM). Max = valores máximos, Min = valores mínimos, N = Número de amostras.

Fonte: Autores (2024).

Em relação a assimetria e a curtose, os valores obtidos (Tabelas 1, 2 e 3), tiveram uma variação, sendo observados valores próximos à zero e valores distantes de zero, principalmente na profundidade de 0,20-0,40 m. No primeiro resultado a distribuição do tipo normal e no segundo caso, a distribuição apresentam calda de

frequência mais alongado para esquerda, e também para direita. De forma geral os dados ficaram, em concordância com os observados por outros autores como Siqueira et al. (2010), Matos et al. (2023) e Monteiro et al. (2024) que estudaram variabilidade espacial em atributos do solo.

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos químicos e susceptibilidade magnética em duas profundidades, na densidade amostral 20 x 20 m na região de Barreiras do Piauí.

Variáveis	Média	Mediana	Max	Min.	Assimetria	Curtose	CV	N
Profundidade de 0,0-0,20 m								
pH	4,61	4,46	7,01	3,55	1,48	3,56	12,68	61
K	0,02	0,02	0,14	0,0	2,71	9,49	82,45	61
Ca	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	61
Mg	0,42	0,40	1,00	0,10	0,95	1,83	40,23	61
SB	0,44	0,43	1,04	0,21	1,01	1,85	37,49	61
CTC T	2,42	2,38	4,98	0,65	0,49	-0,13	41,33	61
CTC t	1,07	1,01	2,70	0,42	1,62	4,96	35,39	61
V	23,01	20,51	75,91	6,27	1,87	3,76	69,59	61
Al	0,62	0,50	2,40	0,20	2,69	10,82	56,20	61
m	56,25	57,70	88,76	30,49	0,09	-0,50	23,40	61
P	1,57	1,18	4,69	0,05	0,94	0,14	74,37	61
MO	0,70	0,59	3,07	0,15	3,87	21,39	56,04	61
SM	0,16	0,01	3,67	0,0	5,51	34,41	320,43	61
Profundidade de 0,20-0,40 m								
pH	5,40	5,19	7,33	4,53	1,34	1,48	11,81	61
K	0,01	0,02	0,09	0,0	1,60	4,36	96,40	61
Ca	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	61
Mg	0,35	0,30	0,90	0,10	1,04	0,82	52,43	61
SB	0,37	0,32	0,90	0,11	0,96	0,53	50,37	61
CTC T	1,63	1,43	4,12	0,20	0,65	-0,42	59,47	61
CTC t	0,77	0,72	1,60	0,31	0,73	0,96	35,89	61
V	32,87	23,73	100,00	4,10	1,13	0,24	76,48	61
Al	0,40	0,40	1,20	0,10	1,30	2,37	53,98	61
m	51,17	49,51	88,94	9,96	-0,08	-0,34	32,98	61
P	1,49	1,13	6,34	0,05	1,39	1,62	95,00	61
MO	0,47	0,42	3,07	0,0	6,16	44,47	77,59	61
SM	0,50	0,01	8,83	0,0	4,22	19,49	290,19	61

CV: Coeficiente de Variação [$CV\% = (\text{Desvio-padrão}/\text{Média}) \times 100$]; Potencial hidrogeniônico (pH em água), Matéria orgânica (MO), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Soma de Base (SB), Capacidade de troca catiônica (CTC) total (T) e efetiva (t), Saturação por bases (V%), Alumínio (Al), Saturação por alumínio (m), Fósforo (P) e Susceptibilidade Magnética (SM). Max = valores máximos, Min = valores mínimos, N = Número de amostras.

Fonte: Autores (2024).

Com base na classificação de Warrick & Nielsen (1980), observou-se que os atributos do solo e a susceptibilidade magnética do solo (SM) foram classificados como baixos, médios e altos em ambas as profundidades analisadas. Embora os valores do coeficiente de variação (CV) estejam dentro do esperado para estudos de campo, ele não é um indicador ideal para a variabilidade espacial dos atributos do solo e da SM, pois em campo

podem ser encontrados valores extremos, tanto muito altos quanto muito baixos (Tabelas 1, 2 e 3).

Apenas o pH e a saturação por alumínio apresentaram valores de CV menor que 30%, ou seja, houve uma baixa. Segundo Agegnehu et al. (2023) essa variabilidade pode estar associada a diversos fatores como a formação do solo (que inclui a composição mineralógica) tipo de manejo, topografia e práticas agrícolas.

Estudo sobre a variabilidade espacial de atributos químicos no cerrado piauiense, realizado

por Matias et al. (2015), também revelaram valores de CV semelhantes aos obtidos neste trabalho.

Tabela 3. Estatística descritiva dos atributos químicos e susceptibilidade magnética em duas profundidades, na densidade amostral 30 x 30 m na região de Barreiras do Piauí.

Variáveis	Média	Mediana	Max	Min.	Assimetria	Curtose	CV	N
Profundidade de 0,0-0,20 m								
pH	4,56	4,46	5,80	3,88	1,12	0,69	10,48	45
K	0,03	0,02	0,10	0,0	1,36	2,27	73,88	45
Ca	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45
Mg	0,42	0,40	1,00	0,20	1,43	3,55	37,07	45
SB	0,45	0,43	1,04	0,22	1,41	3,46	35,24	45
CTC T	2,74	2,50	6,79	0,65	1,21	2,79	41,41	45
CTC t	1,10	1,02	2,20	0,52	1,25	2,16	30,49	45
V	20,06	16,36	75,91	5,26	2,71	8,55	71,24	45
Al	0,64	0,60	1,70	0,20	1,58	3,36	45,43	45
m	57,63	57,92	79,24	26,89	-0,30	-0,27	21,52	45
P	1,60	1,24	4,50	0,05	0,74	0,06	69,57	45
MO	0,71	0,59	3,07	0,32	4,22	22,62	59,27	45
SM	0,10	0,01	1,90	0,0	5,31	31,28	285,87	45
Profundidade de 0,20-0,40 m								
pH	5,33	5,21	7,33	4,38	1,26	1,97	11,27	45
K	0,02	0,02	0,10	0,0	1,87	4,71	104,99	45
Ca	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45
Mg	0,31	0,30	0,70	0,10	0,64	0,82	38,38	45
SB	0,33	0,32	0,73	0,12	0,64	1,10	35,95	45
CTC T	1,60	1,46	3,69	0,40	0,75	-0,15	58,75	45
CTC t	0,73	0,70	1,58	0,40	1,61	3,57	34,96	45
V	31,27	21,20	100,00	6,17	1,35	1,09	78,91	45
Al	0,39	0,40	1,20	0,10	1,83	5,06	52,84	45
m	52,33	49,75	81,18	23,59	0,01	-0,46	27,26	45
P	1,52	1,34	4,79	0,05	1,04	0,34	86,23	45
MO	0,47	0,42	3,07	0,0	5,61	35,44	87,02	45
SM	0,21	0,01	2,86	0,0	3,96	18,67	231,80	45

CV: Coeficiente de Variação [$CV\% = (\text{Desvio-padrão}/\text{Média}) \times 100$]; Potencial hidrogeniônico (pH em água), Matéria orgânica (MO), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Soma de Base (SB), Capacidade de troca catiônica (CTC) total (T) e efetiva (t), Saturação por bases (V%), Alumínio (Al), Saturação por alumínio (m), Fósforo (P) e Susceptibilidade Magnética (SM). Max = Máximos, Min = Mínimos, N = Número de amostras. Fonte: Autores (2024).

Ao analisar a correlação linear de Pearson para os atributos químicos e a susceptibilidade magnética do solo (Tabelas 4, 5 e 6), observa-se que a maioria das variáveis apresentou interações positivas significativas, com nível de probabilidade de $p < 0,01$. Nos atributos com correlações negativas a esse nível, destacam-se pH e P (-0,4); Mg^{2+} e m (-0,5); SB e m (-0,5); CTC T e V (-0,6); m e V (-0,4). A correlação entre CTC t e SM foi negativa

apenas na Tabela 4, com valor de -0,1 e significância de $p < 0,05$.

Essa correlação negativa pode ser atribuída a vários fatores que influenciam ambas as variáveis, entre esses fatores, pesquisas destacam a composição e estrutura do solo (Ayoubi et al., 2018) e a presença de agente contaminantes (Rousse et al., 2023).

Tabela 4. Correlação linear de Pearson entre os atributos químicos e susceptibilidade magnética em duas profundidades, na densidade amostral 10 x 10 m na região de Barreiras do Piauí.

Profundidade de 0,0-0,20 m											
	pH	K	Mg	SB	CTC T	CTC t	m	V	Al	P	MO
K	0,017										
Mg	-0,041	-0,076									
SB	-0,038	0,080	0,988**								
CTC T	-0,059	0,147	-0,076	-0,053							
CTC t	-0,030	0,257**	0,365**	0,405**	0,219**						
m	0,027	0,148	-0,599**	-0,576**	0,275**	0,437**					
V	-0,041	-0,063	0,544**	0,534**	-0,631**	0,098	-0,434**				
Al	-0,015	0,244**	-0,056	-0,018	0,264**	0,907**	0,744**	-0,140			
P	-0,407**	0,011	-0,037	-0,035	0,092	-0,121	-0,046	-0,062	-0,116		
MO	-0,115	0,103	-0,052	-0,036	0,114	0,109	0,096	0,100	0,135	-0,021	
SM	-0,034	-0,070	-0,081	-0,092	0,066	-0,181*	-0,144	-0,100	-0,156	0,168	0,251**
Profundidade de 0,20-0,40 m											
K	-0,003										
Mg	0,148	-0,061									
SB	0,148	0,081	0,990**								
CTC T	0,126	0,080	0,100	0,111							
CTC t	-0,004	0,216*	0,348**	0,378**	0,063						
m	-0,026	0,128	-0,589**	-0,570**	-0,000	0,349**					
V	-0,131	-0,097	0,374**	0,360**	-0,602**	0,038	-0,361**				
Al	-0,057	0,204*	0,022	0,051	0,028	0,944**	0,580**	-0,088			
P	-0,345**	-0,053	-0,180*	-0,187*	-0,042	-0,113	-0,034	0,034	-0,055		
MO	-0,152	0,094	0,066	0,079	0,012	0,114	0,003	0,074	0,095	-0,115	
SM	0,051	-0,088	-0,078	-0,091	0,010	-0,116	-0,002	-0,103	-0,093	0,176*	-0,015

** e* Significativo a ($p < 0,01$ e $p < 0,05$), respectivamente, pelo teste F

Fonte: Autores (2024).

Entre as correlações positivas a $p < 0,01$, foram identificadas: K com CTC t e Al^{3+} (0,2); Mg^{2+} com SB, CTC t e V (0,9, 0,3 e 0,5); SB com CTC t e V (0,4 e 0,5); CTC T com CTC t, m e Al^{3+} (0,2); CTC t com m e Al^{3+} (0,4 e 0,9); m com Al^{3+} (0,7); e M.O. com SM (0,2). Todas essas correlações foram observadas na profundidade de 0,0-0,20 m. Na profundidade de 0,20-0,40 m, os resultados das correlações foram, em grande parte,

semelhantes aos da profundidade superior, tanto para correlações negativas quanto positivas. De acordo com Moreira et al. (2020), variáveis com correlação negativa tendem a se comportar de forma inversa, de modo que o aumento de uma resulta na diminuição da outra. Já nas correlações positivas, o aumento de uma variável tende a acompanhar o aumento da outra.

Tabela 5. Correlação linear de Pearson entre os atributos químicos e susceptibilidade magnética em duas profundidades, na densidade amostral 20 x 20 m na região de Barreiras do Piauí.

Profundidade de 0,0-0,20 m											
	pH	K	Mg	SB	CTC T	CTC t	m	V	Al	P	MO
K	0,067										
Mg	-0,048	-0,098									
SB	-0,039	0,044	0,990**								
CTC T	0,010	-0,145	-0,035	-0,055							
CTC t	0,007	0,047	0,385**	0,393**	0,045						
m	0,051	0,043	-0,630**	-0,626**	0,136	0,377**					
V	-0,083	0,070	0,561**	0,573**	-0,688**	0,179	-0,397**				
Al	0,027	0,030	-0,060	-0,056	0,075	0,896**	0,712**	-0,082			
P	-0,314*	-0,059	0,061	0,053	-0,023	-0,143	-0,120	-0,038	-0,181		
MO	-0,106	0,104	-0,078	-0,063	-0,033	-0,020	0,014	0,212	0,009	-0,162	
SM	-0,104	0,052	-0,043	-0,036	0,188	-0,139	-0,193	-0,143	-0,134	0,092	0,228
Profundidade de 0,20-0,40 m											

K	0,136											
Mg	0,019	0,045										
SB	0,031	0,135	0,996**									
CTC T	0,086	0,257*	0,167	0,189								
CTC t	0,156	0,339**	0,605**	0,630**	0,184							
m	0,037	0,137	-0,697**	-0,679**	-0,010	0,086						
V	-0,174	-0,174	0,406**	0,387**	-0,667**	0,162	-0,398**					
Al	0,173	0,318*	-0,090	-0,061	0,073	0,736**	0,702**	-0,129				
P	-0,338**	-0,110	-0,204	-0,212	-0,326*	-0,235	0,058	0,134	-0,117			
MO	-0,114	0,049	0,058	0,062	0,041	0,053	-0,022	0,099	0,014	-0,135		
SM	0,108	-0,050	-0,097	-0,101	-0,003	-0,147	0,052	-0,126	-0,100	0,181	-0,053	

** e* Significativo a ($p < 0,01$ e $p < 0,05$), respectivamente, pelo teste F

Fonte: Autores (2024).

Segundo a classificação de Figueiredo Filho & Silva Júnior (2009), as correlações negativas entre pH e P, Mg^{2+} e m, SB e m, CTC T e V, e entre m e V, com nível de significância de $p < 0,01$, bem como a correlação entre CTC t e SM com $p < 0,05$, foram consideradas fracas, apresentando valores entre -0,2 e 0,3.

Para as correlações positivas significativas a $p < 0,01$, observou-se que as associações de K com CTC t e Al^{3+} , Mg^{2+} com CTC t, CTC T com CTC t,

m e Al^{3+} , e M.O. com SM também são classificadas como fracas.

Em relação às correlações moderadas (0,4 a 0,6), destacaram-se Mg^{2+} com V, SB com CTC t e V, e CTC t com m. Já as correlações fortes (0,7 a 1,0) foram identificadas entre Mg^{2+} e SB, CTC t e Al^{3+} , m e Al^{3+} . Esses resultados foram confirmados nas tabelas 4, 5 e 6, para ambas as profundidades e espaçamentos diferentes.

Tabela 6. Correlação linear de Pearson entre os atributos químicos e susceptibilidade magnética em duas profundidades, na densidade amostral 30 x 30 m na região de Barreiras do Piauí.

Profundidade de 0,0-0,20 m												
	pH	K	Mg	SB	CTC T	CTC t	m	V	Al	P	MO	
K	0,078											
Mg	0,063	0,069										
SB	0,073	0,212	0,990**									
CTC T	-0,141	0,353*	-0,113	-0,060								
CTC t	-0,005	0,380*	0,434**	0,480**	0,331*							
m	-0,114	0,079	-0,639**	-0,615**	0,302*	0,341*						
V	0,032	-0,006	0,606**	0,593**	-0,615**	0,082	-0,512**					
Al	-0,044	0,318*	-0,041	0,006	0,410**	0,880**	0,722**	-0,228				
P	-0,553**	-0,042	-0,234	-0,235	0,164	-0,228	0,082	-0,163	-0,132			
MO	-0,182	0,036	-0,062	-0,056	-0,097	0,051	0,058	0,430**	0,088	-0,043		
SM	-0,207	-0,023	-0,268	-0,265	0,264	-0,156	0,116	-0,225	-0,034	0,349*	-0,069	
Profundidade de 0,20-0,40 m												
K	-0,134											
Mg	0,142	-0,111										
SB	0,120	0,062	0,985**									
CTC T	0,248	0,151	-0,017	0,009								
CTC t	0,156	0,315*	0,534**	0,590**	0,166							
m	0,003	0,209	-0,547**	-0,513**	0,042	0,326*						
V	-0,230	-0,123	0,445**	0,426**	-0,721**	0,027	-0,410**					
Al	0,122	0,351*	0,082	0,143	0,198	0,883**	0,698**	-0,214				
P	-0,329*	-0,041	-0,334*	-0,343*	-0,147	-0,326*	0,048	0,017	-0,201			
MO	-0,226	0,092	0,112	0,129	-0,014	0,104	-0,009	0,133	0,053	-0,123		
SM	0,067	-0,198	-0,185	-0,220	0,169	-0,264	0,048	-0,222	-0,196	0,348*	0,004	

** e* Significativo a ($p < 0,01$ e $p < 0,05$), respectivamente, pelo teste F.

Fonte: Autores (2024).

A análise dos semivariogramas mostrou que os atributos do solo e a susceptibilidade magnética (SM) apresentaram dependência espacial em diferentes densidades amostrais e profundidades (Tabelas 7, 8 e 9).

As modelagens identificaram ajustes aos modelos esférico, gaussiano e exponencial, exceto

para o elemento Cálcio, que apresentou efeito pepita puro. Esse resultado sugere que as densidades amostrais empregadas não foram suficientes para detectar a variabilidade espacial desse elemento tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas atributos químicos e susceptibilidade magnética em duas profundidades, na densidade amostral 10 x 10 m na região de Barreiras do Piauí.

Variáveis	Modelo	Co	C ₀ +C ₁	GDE	Alcance	R ²	CRVC	
							b	A
Profundidade de 0,0-0,20 m								
pH	Esférico	0,001	0,954	0,10	7,7	0	0,95	0,06
K	Esférico	0,000031	0,000575	5,39	17,2	0,84	0,91	0
Ca	Linear	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP
Mg	Esférico	0,00039	0,02238	1,74	11,4	0,44	0,16	0,34
SB	Esférico	0,00056	0,02262	2,48	12,3	0,6	0,28	0,31
CTC T	Exponencial	0,163	1,498	10,88	12	0,5	0,4	0,97
CTC t	Esférico	0,0086	0,1322	6,51	11,9	0,67	0,09	0,97
V	Esférico	6,4	183	3,50	9,1	0,03	-0,32	26,44
Al	Exponencial	0,0173	0,1136	15,23	15,6	0,66	0,07	0,6
m	Exponencial	24,5	174,5	14,04	17,1	0,54	0,187	47,09
P	Esférico	0,573	1,384	41,40	44,9	0,9	0,99	0,01
MO	Exponencial	0,026	0,119	21,85	16,2	0,69	0,39	0,41
SM	Exponencial	0,0636	0,2082	30,55	123,6	0,72	0,79	0,03
Profundidade de 0,20-0,40 m								
pH	Esférico	0,193	0,643	30,02	47	0,83	0,77	1,19
K	Esférico	0,000001	0,000479	0,21	9,6	0,04	0,67	0,01
Ca	Linear	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP
Mg	Gaussiano	0,00211	0,02382	8,86	12,29	0,9	-0,77	0,62
SB	Gaussiano	0,00215	0,0241	8,92	12,12	0,89	-0,82	0,67
CTC T	Esférico	0,001	1,011	0,10	7,7	0	0,2	1,38
CTC t	Esférico	0,0354	0,2618	13,52	13,2	0,69	0,45	0,45
V	Esférico	1	487	0,21	7,7	0	0,07	28,42
Al	Esférico	0,0328	0,2266	14,47	13,8	0,65	0,51	0,21
m	Exponencial	23	255,1	9,02	15,3	0,81	0,23	39,04
P	Esférico	0,16	1,684	9,50	37,7	0,95	0,91	0,11
MO	Esférico	0,023	0,097	23,71	11,3	0,22	-0,25	0,57
SM	Esférico	0,001	0,954	0,10	7,7	0	0,95	0,06

C₀= efeito pepita; EPP- Efeito Pepita Puro, C₀+C₁= patamar; GDE= grau de dependência espacial; R²= coeficiente de determinação do modelo; CRVC = coeficiente de regressão da validação cruzada; b = coeficiente angular; a = intercepto.

Fonte: Autores (2024).

Os modelos presentes nesse estudo também foram encontrados por Barros et al. (2022) em pesquisa realizada em solo do Cerrado piauiense.

A pesquisa de Taghdis et al. (2021) indica que o modelo esférico descreveu efetivamente o comportamento espacial dos parâmetros magnéticos e das propriedades do solo, sugerindo que a dependência espacial pode diminuir após uma certa distância.

Para os autores, Siqueira et al. (2010), Monteiro et al. (2024) e Matos et al. (2024), os modelos ajustados para atributos químicos e susceptibilidade magnética (SM) são considerados transitivos, pois apresentam um patamar onde, a partir de certa distância entre amostras, a dependência espacial se perde.

A análise do grau de dependência espacial, dada pela relação C₀/(C₀+C₁), classificou como forte a dependência para todos os atributos e

profundidades analisados, conforme a classificação de Cambardella et al. (1994) (Tabelas 7, 8 e 9). Assim, a distribuição dos atributos químicos e da SM no espaço não é aleatória, uma vez que todos apresentaram alto grau de dependência espacial.

A forte dependência espacial observada é intensamente influenciada por características

intrínsecas do solo, como textura e mineralogia; já os atributos com dependência fraca ou moderada sofrem maior influência de fatores externos, como fertilização, preparo e cultivo do solo (Cambardella et al., 1994; Souza et al., 2014, Monteiro et al., 2024 e Matos et al., 2024).

Tabela 8. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas atributos químicos e susceptibilidade magnética em duas profundidades, na densidade amostral 20 x 20 m na região de Barreiras do Piauí.

Variáveis	Modelo	Co	C ₀ +C ₁	GDE	Alcance	R ²	CRVC	
							b	a
Profundidade de 0,0-0,20 m								
pH	Esférico	0,022	0,391	5,63	45,9	0,96	0,87	0,58
K	Exponencial	0,000105	0,000621	16,91	13,5	0,22	0,22	0,02
Ca	Linear	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP
Mg	Esférico	0,0004	0,0284	1,41	12,5	0,33	-1,79	1,16
SB	Esférico	0,00001	0,02842	0,04	16,6	0,65	-1,13	0,95
CTC T	Esférico	0,001	0,883	0,11	17,7	0,82	-0,24	2,94
CTC t	Gaussiano	0,0001	0,1512	0,07	19,57	0,82	-0,74	1,86
V	Gaussiano	0,1	257,3	0,04	17,49	0,7	-0,17	27,1
Al	Gaussiano	0,0001	0,1312	0,08	21,99	0,84	-0,16	0,72
m	Gaussiano	0,1	175,6	0,06	17,49	0,96	51,84	0,07
P	Gaussiano	0,362	1,35	26,81	29,44	0,83	0,98	0,09
MO	Gaussiano	0,0001	0,1972	0,05	23,38	0,82	0,65	0,24
SM	Exponencial	0,0001	0,3152	0,03	76,2	0,84	0,03	0,92
Profundidade de 0,20-0,40 m								
pH	Gaussiano	0,025	0,535	4,67	37,58	0,91	1,5	-2,79
K	Exponencial	0,000071	0,000319	22,26	7,2	0,00	1,11	0
Ca	Linear	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP
Mg	Esférico	0,0001	0,0332	0,30	14,7	0,82	-2,04	1,08
SB	Esférico	0,0001	0,034	0,29	13,9	0,82	-2,08	1,15
CTC T	Exponencial	0,333	0,888	37,50	36,3	0,69	1,05	-0,1
CTC t	Gaussiano	0,0001	0,0823	0,12	21,82	0,93	0,4	0,45
V	Esférico	1	508,2	0,20	13,4	0,39	-0,25	39,77
Al	Gaussiano	0,0001	0,0505	0,20	22,34	0,93	0,24	0,3
m	Esférico	0,1	274	0,04	14,5	0,58	-1,28	118,16
P	Gaussiano	0,001	1,92	0,05	28,05	0,95	1,49	-0,64
MO	Gaussiano	0,0001	0,1772	0,06	19,57	0,73	0	0,47
SM	Gaussiano	0,001	0,892	0,11	30,31	0,9	1,33	-0,05

C₀= efeito pepita; EPP- Efeito Pepita Puro, C₀+C₁= patamar; GDE= grau de dependência espacial; R²= coeficiente de determinação do modelo; CRVC = coeficiente de regressão da validação cruzada; b = coeficiente angular; a = intercepto.

Fonte: Autores (2024).

O alcance indica a distância máxima em que um ponto influencia outro em relação a uma variável. Quanto maior o alcance, mais homogênea é a distribuição dessa variável na área de estudo (Vogado et al., 2020).

Os resultados desta pesquisa apontam que para os atributos do solo analisados, o alcance variou de 7,2 a 123,6 m, considerando diferentes densidades amostrais e profundidades (Tabelas 7, 8 e 9). Esse valor representa a distância em que uma

variável regionalizada mantém continuidade espacial; acima dela, o comportamento passa a ser totalmente aleatório (Lemos Filho et al., 2008).

O coeficiente de determinação espacial (R²) expressa, em porcentagem, quanto da variação nos valores estimados da semivariância é explicada pelos modelos, evidenciando que o semivariograma atende aos critérios necessários para a interpolação espacial (Oliveira et al., 2021), ou seja indica a precisão do ajuste da curva

estimada, com valores próximos a 1 representando uma melhor correlação. De forma geral, os atributos químicos e a SM variaram entre 0,0 e 0,96. Os melhores resultados de R^2 coincidem com ajustes adequados nos coeficientes de regressão (CRVC), “b” próximos de 1 e “a” próximos de 0

(Tabelas 7, 8 e 9). Kamimura et al. (2013), Matias et al. (2015) e Oliveira Filho et al. (2015) destacam que a associação positiva entre CRVC e R^2 reforça a confiabilidade dos modelos de semivariograma ajustados para as variáveis, confirmando a variabilidade e a adequação do modelo testado.

Tabela 9. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas atributos químicos e susceptibilidade magnética em duas profundidades, na densidade amostral 30 x 30 m na região de Barreiras do Piauí.

Variáveis	Modelo	Co	C ₀ +C ₁	GDE	Alcance	R ²	CRVC	
							b	A
Profundidade de 0,0-0,20 m								
pH	Gaussiano	0,0239	0,2988	8,00	35,85	0,8	1,95	-4,49
K	Esférico	0,000001	0,000528	0,19	16,60	0,55	0,04	0,03
Ca	Linear	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP
Mg	Gaussiano	0,00001	0,01342	0,07	15,58	0,75	0,09	0,36
SB	Gaussiano	0,00001	0,01432	0,07	16,28	0,8	0,29	0,34
CTC T	Esférico	0,122	1,351	9,03	12,80	0,25	-2,13	8,36
CTC t	Gaussiano	0,0001	0,1072	0,09	23,03	0,84	-0,25	1,38
V	Esférico	2	43,54	4,59	11,20	0,24	-0,62	26,85
Al	Gaussiano	0,0001	0,085	0,12	19,39	0,89	-2,52	2,22
m	Exponencial	30,6	168,8	18,13	16,50	0,21	-0,78	102,08
P	Esférico	0,183	1,274	14,36	44,80	0,89	0,9	0,15
MO	Gaussiano	0,0001	0,0497	0,20	18,70	0,69	0,93	0,06
SM	Gaussiano	0,0001	0,0812	0,12	17,14	0,41	1,2	0
Profundidade de 0,20-0,40 m								
pH	Esférico	0,076	0,5	15,20	49,40	0,85	0,74	1,34
K	Exponencial	0,00003	0,000304	9,87	27,00	0,56	-0,03	0,02
Ca	Linear	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP	EPP
Mg	Esférico	0,00001	0,01042	0,10	11,70	0,28	0,09	0,27
SB	Esférico	0,00004	0,010008	0,40	11,20	0,15	0,39	0,2
CTC T	Exponencial	0,058	0,846	6,86	10,20	0,09	0,34	0,77
CTC t	Gaussiano	0,0123	0,0566	21,73	21,65	0,9	0,24	0,53
V	Gaussiano	1	585,4	0,17	15,93	0,62	0	31,58
Al	Exponencial	0,0075	0,0465	16,13	11,10	0,22	-0,29	0,52
m	Esférico	7,8	206,9	3,77	13,10	0,33	-1,3	123,24
P	Gaussiano	0,001	1,535	0,07	32,04	0,88	1,52	-0,56
MO	Exponencial	0,00059	0,01768	3,34	36,00	0,63	1,16	-0,04
SM	Gaussiano	0,0001	0,1972	0,05	18,01	0,44	0,42	-0,05

C₀= efeito pepita; EPP- Efeito Pepita Puro, C₀+C₁= patamar; GDE= grau de dependência espacial; R²= coeficiente de determinação do modelo; CRVC = coeficiente de regressão da validação cruzada; b = coeficiente angular; a = intercepto.

Fonte: Autores (2024).

Com os ajustes dos semivariogramas, foi possível gerar mapas de krigagem (Figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7), que abrangem as duas profundidades e as três densidades. Esses mapas permitem identificar

zonas específicas para o manejo da fertilidade do solo, facilitando a aplicação de insumos em doses variadas e promovendo a homogeneização da fertilidade, essencial para a agricultura de precisão.

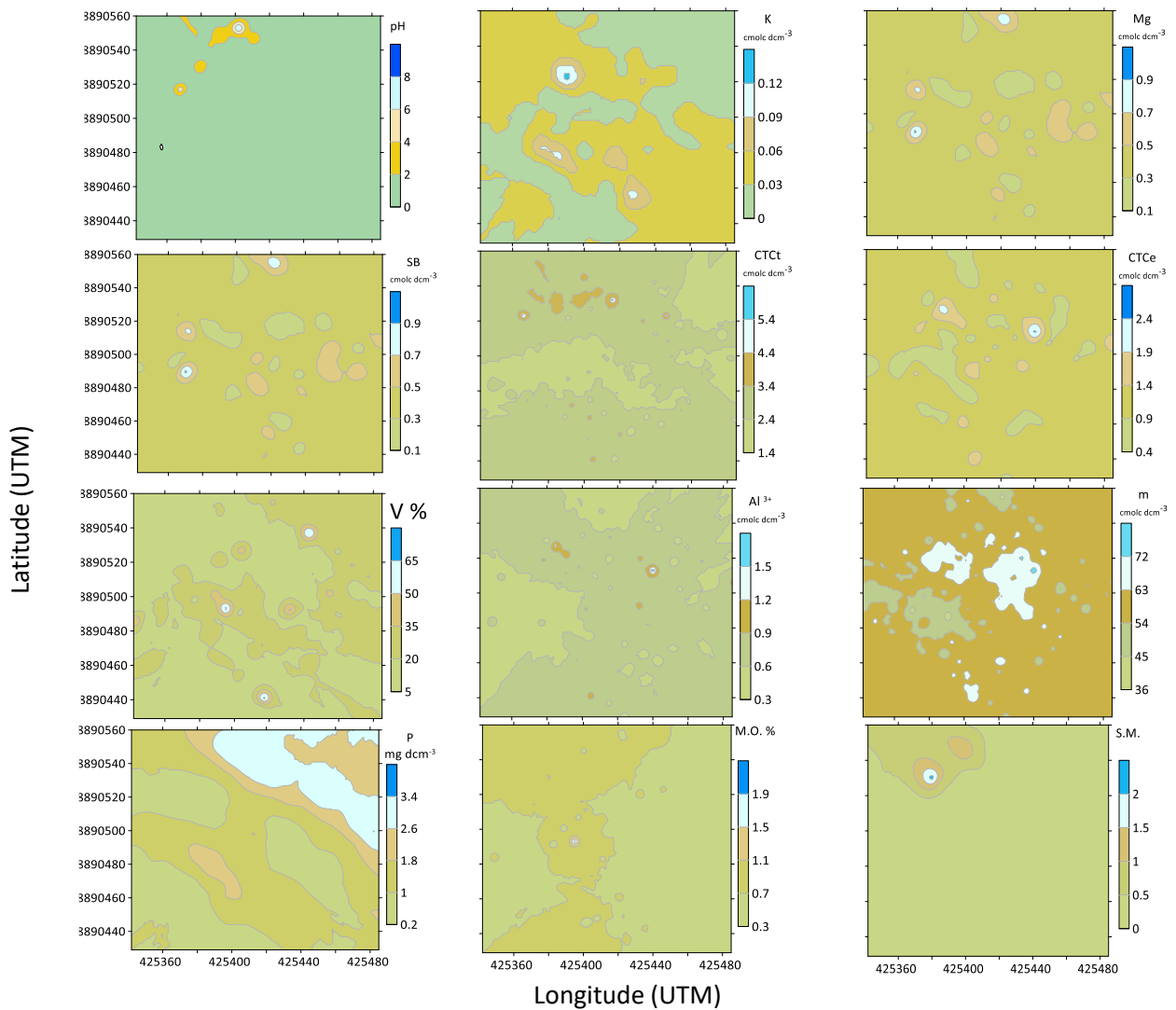
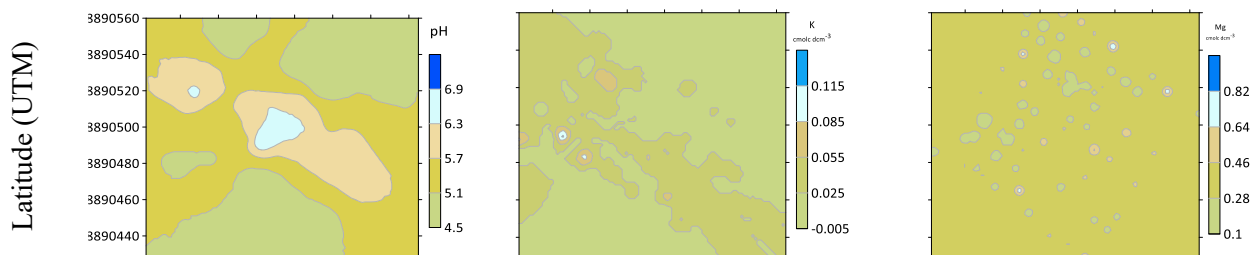


Figura 2. Atributos químicos e susceptibilidade magnética na densidade amostral 10 x 10 m na profundidade de 0,0-0,20 m na região de Barreiras do Piauí.
Fonte: Autores (2024).

Nos mapas, isolinhas e contornos foram produzidos pela interpolação por krigagem ordinária; linhas fechadas e próximas indicam maior variabilidade, enquanto linhas mais espaçadas indicam menor variabilidade. Pontos

isolados ou "ilhas" revelam valores extremos, representando áreas de alta ou baixa concentração (Figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7). Assim, a krigagem se confirma como uma ferramenta essencial para o manejo preciso dos nutrientes no solo.



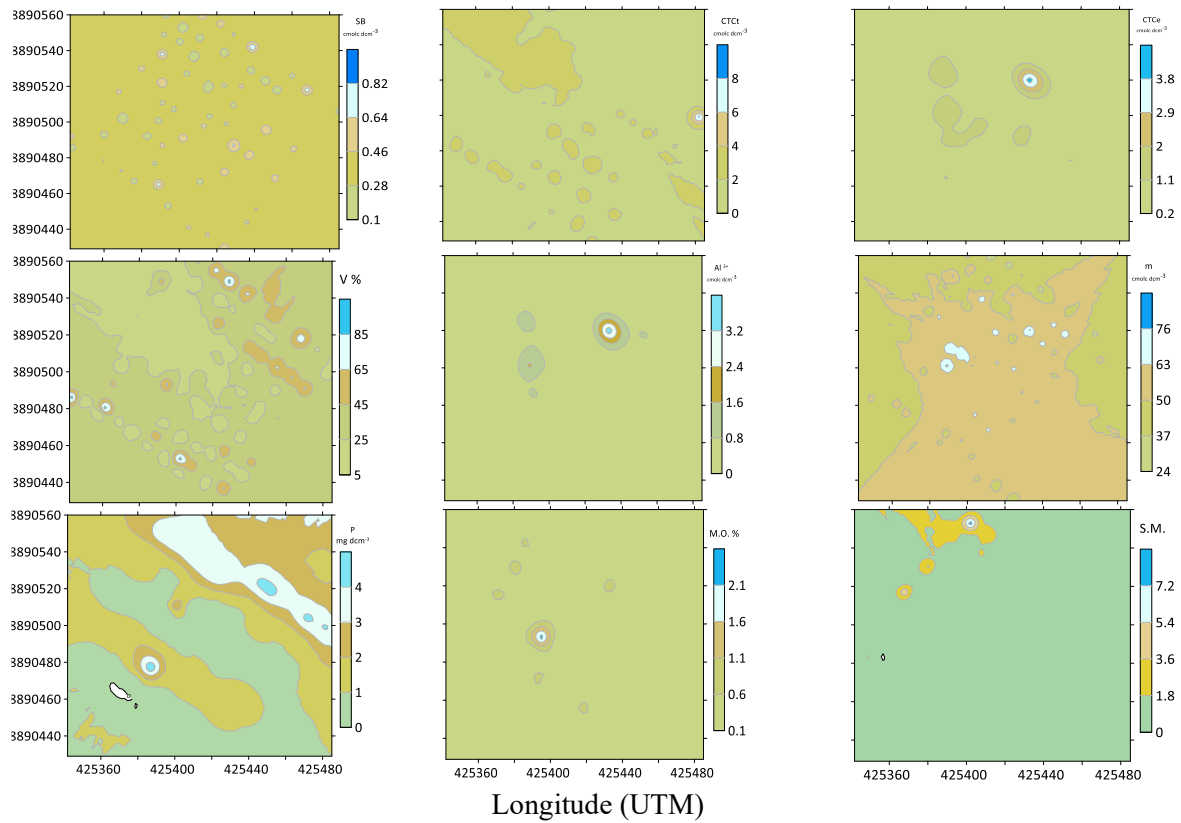
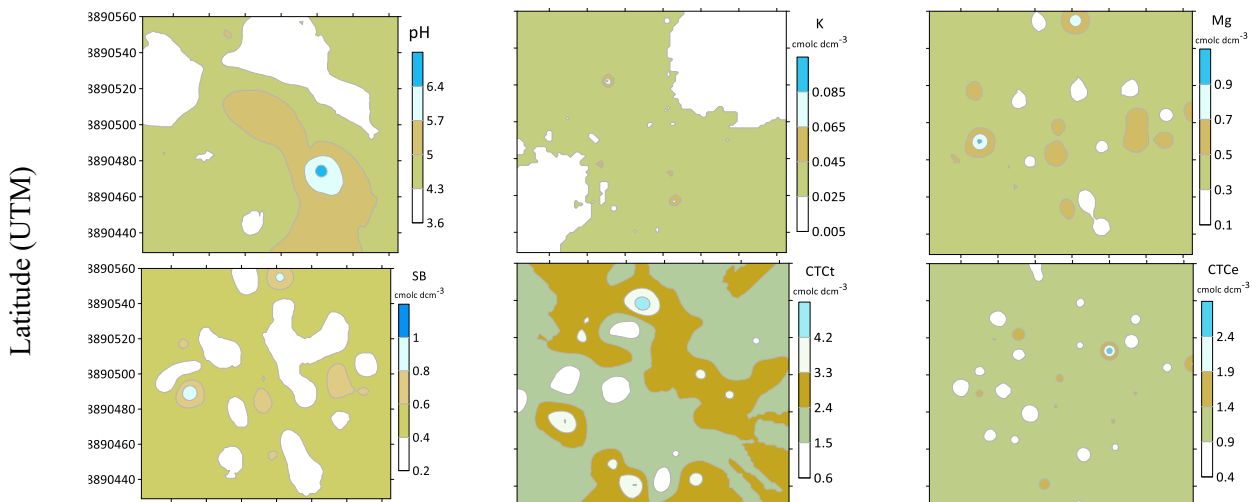


Figura 3. Atributos químicos e susceptibilidade magnética na densidade amostral 10 x 10 m na profundidade de 0,20-0,40m na região de Barreiras do Piauí.
Fonte: Autores (2024).

A confecção dos mapas revelou a presença de zonas de manejo específico, indicando a necessidade de dividir a área para um manejo mais direcionado do solo. A maior vantagem da agricultura de precisão em relação à convencional é o custo reduzido, já que os insumos são aplicados

de maneira precisa, conforme as necessidades específicas da cultura, evitando o desperdício de fertilizantes. Contudo, seu uso ainda é restrito a agricultores com maior poder aquisitivo ou acesso a tecnologias avançadas, devido ao alto volume de amostras necessário para o mapeamento preciso.



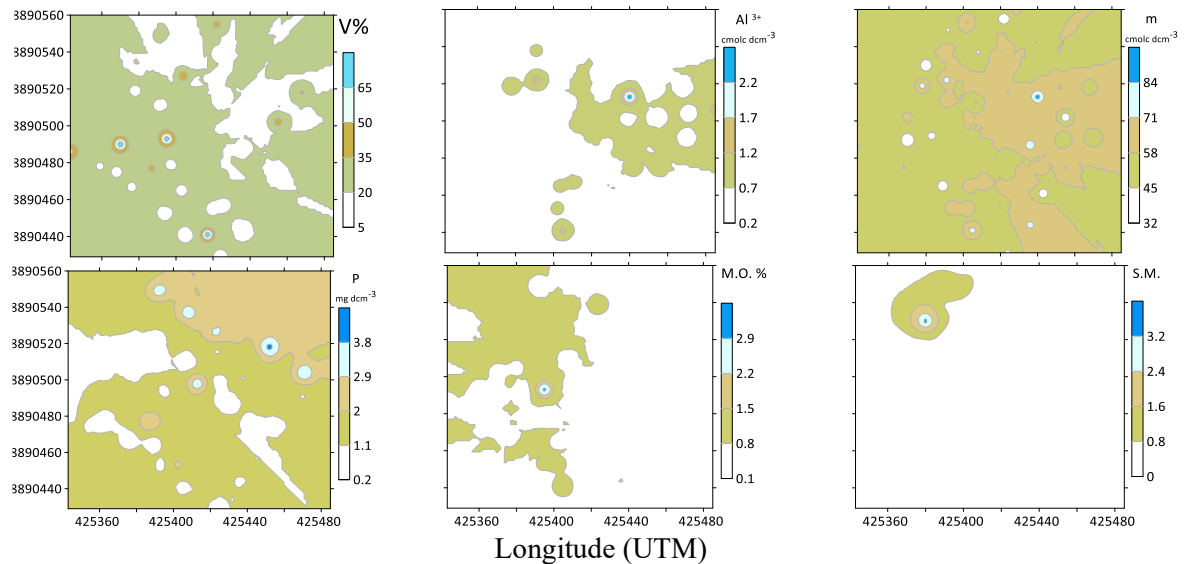
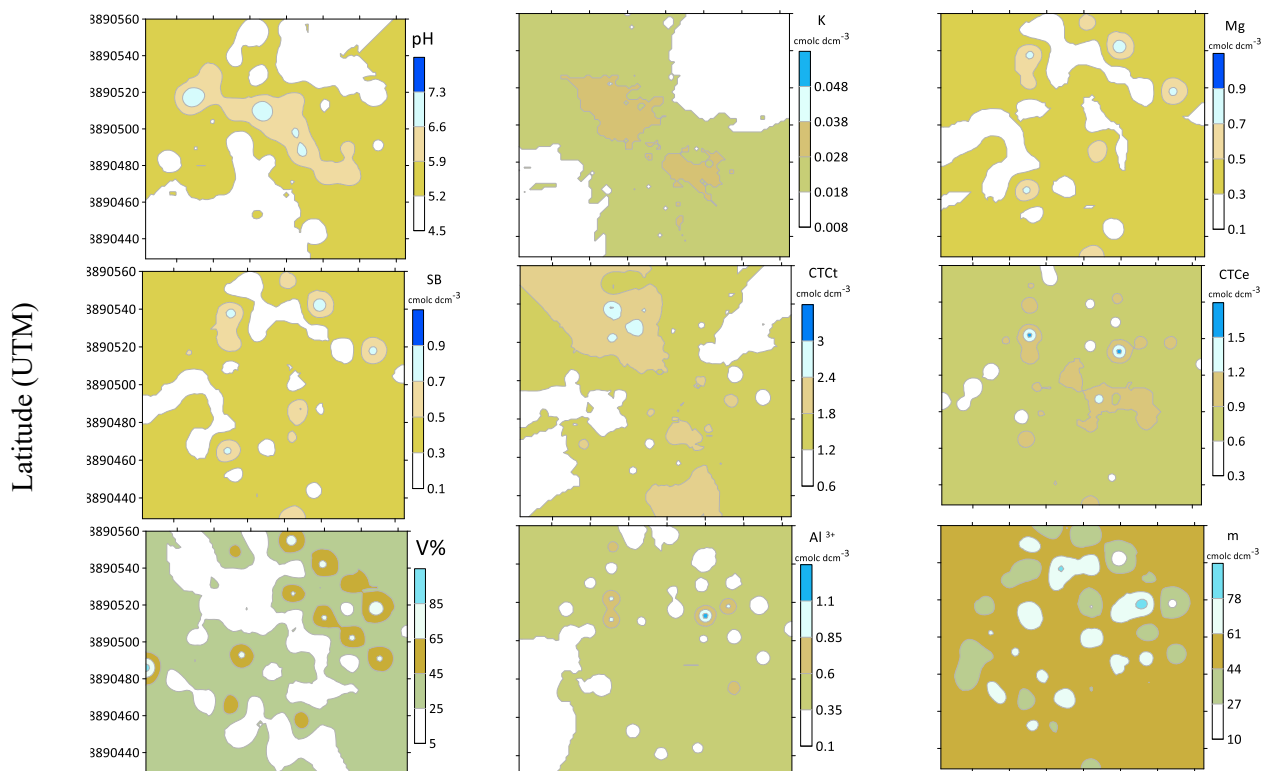


Figura 4. Atributos químicos e susceptibilidade magnética na densidade amostral 20 x 20 m na profundidade de 0,0-0,20m na região de Barreiras do Piauí.

Fonte: Autores (2024).

O número de amostras afeta significativamente a precisão dos mapas de variabilidade em vários campos, incluindo mapeamento do solo e avaliação de riscos. Pesquisas indicam que amostras maiores geralmente aumentam a precisão do mapeamento (Sun et al., 2022), embora essa relação possa ser influenciada por outros fatores como aleatoriedade da amostragem e métodos de modelagem.

Nos mapas de atributos químicos e susceptibilidade magnética (SM) do solo, observa-se que, em todas as densidades amostrais e profundidades analisadas, os maiores valores foram obtidos na profundidade de 0,0-0,20 m. Isso pode ser atribuído ao fato de que essa profundidade tem maior impacto direto das práticas de manejo do solo.



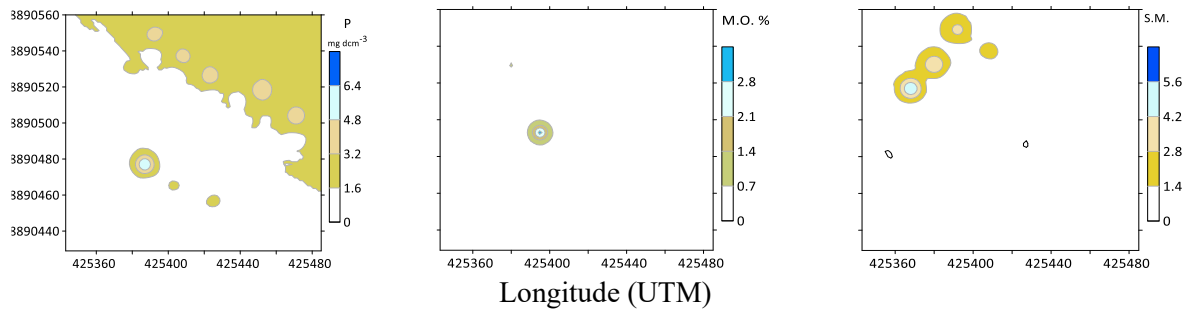


Figura 5. Atributos químicos e susceptibilidade magnética na densidade amostral 20 x 20 m na profundidade de 0,20-0,40m na região de Barreiras do Piauí.

Fonte: Autores (2024).

A Figura 5, apresenta dados que foram representados por mapas temáticos gerados por interpolação por krigagem ordinária, destacando a distribuição espacial desses atributos. Isso corre devido a maior precisão das informações são adquiridas quando se utiliza a interpolação por krigagem (Monteiro et al., 2024; Matos et al.,

2024), pois estima valores para locais não estimados sem tendência e com variância mínima, proporcionando uma estimativa mais precisa do atributo de interesse (Monteiro et al., 2024; Matos et al., 2024). Os mapas utilizam contornos (isolinhas) para ilustrar gradientes dos atributos químicos e da susceptibilidade magnética do solo.

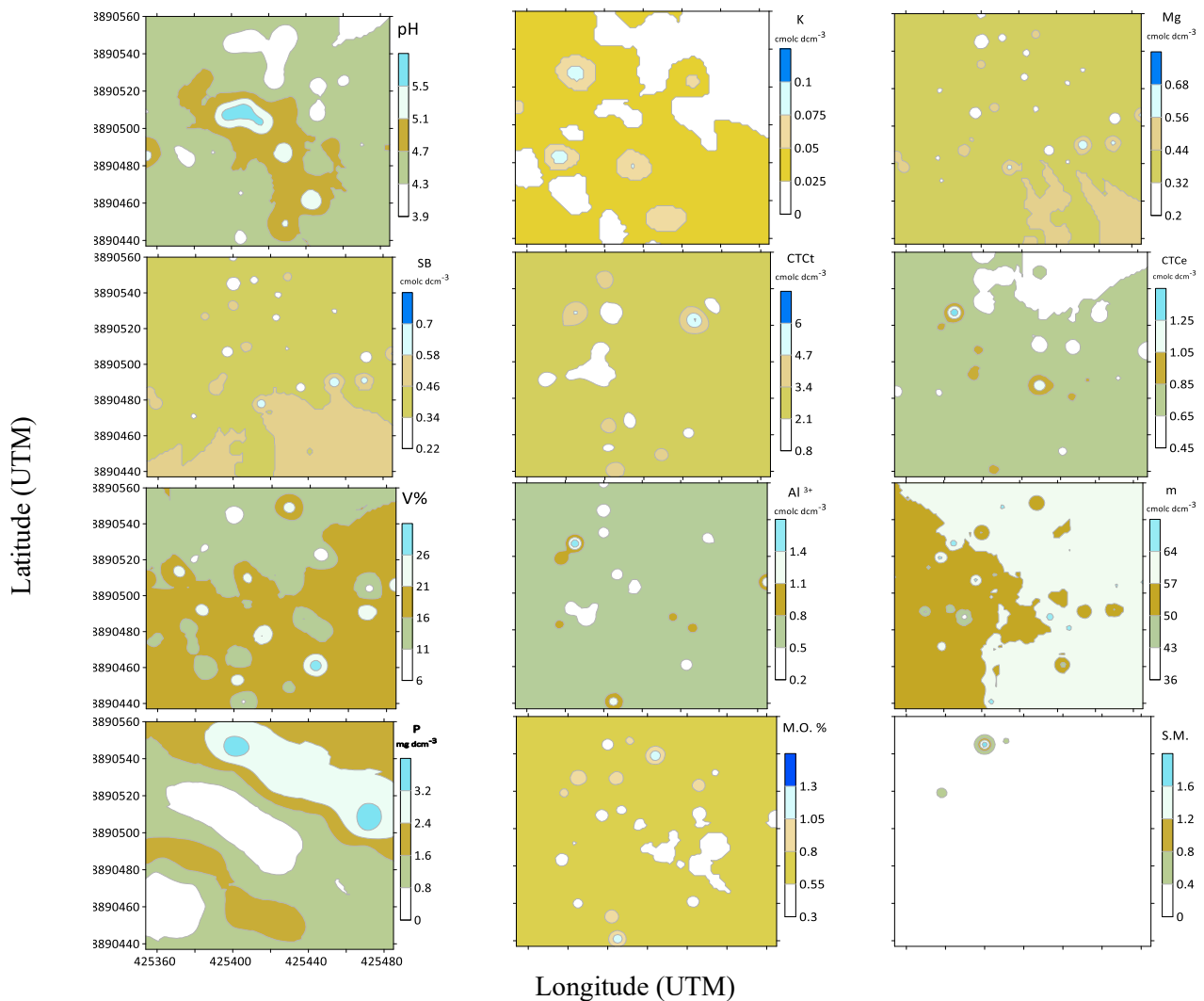


Figura 6. Atributos químicos e susceptibilidade magnética na densidade amostral 30 x 30 m na profundidade de 0,0-0,20m na região de Barreiras do Piauí.

Fonte: Autores (2024).

A análise visual dos mapas (Figuras 6 e 7), permite identificar zonas com diferentes características do solo, fundamental para o manejo agrícola.

A relação entre as concentrações de nutrientes no solo e a susceptibilidade magnética são complexa, pois ambos os fatores influenciam a fertilidade do solo e as práticas de manejo. Áreas com baixas concentrações de nutrientes geralmente necessitam de estratégias específicas de fertilização (Ma et al., 2023), enquanto a alta

susceptibilidade magnética pode indicar maior presença de matéria orgânica, o que afeta os processos de redução de ferro. Essa interação pode interferir a transformação da magnetita em hematita, afetando as propriedades magnéticas do solo (Matos et al., 2023). Assim, O manejo adequado dos nutrientes, considerando as propriedades magnéticas e a disponibilidade de nutrientes, é essencial para a fertilidade sustentável do solo.

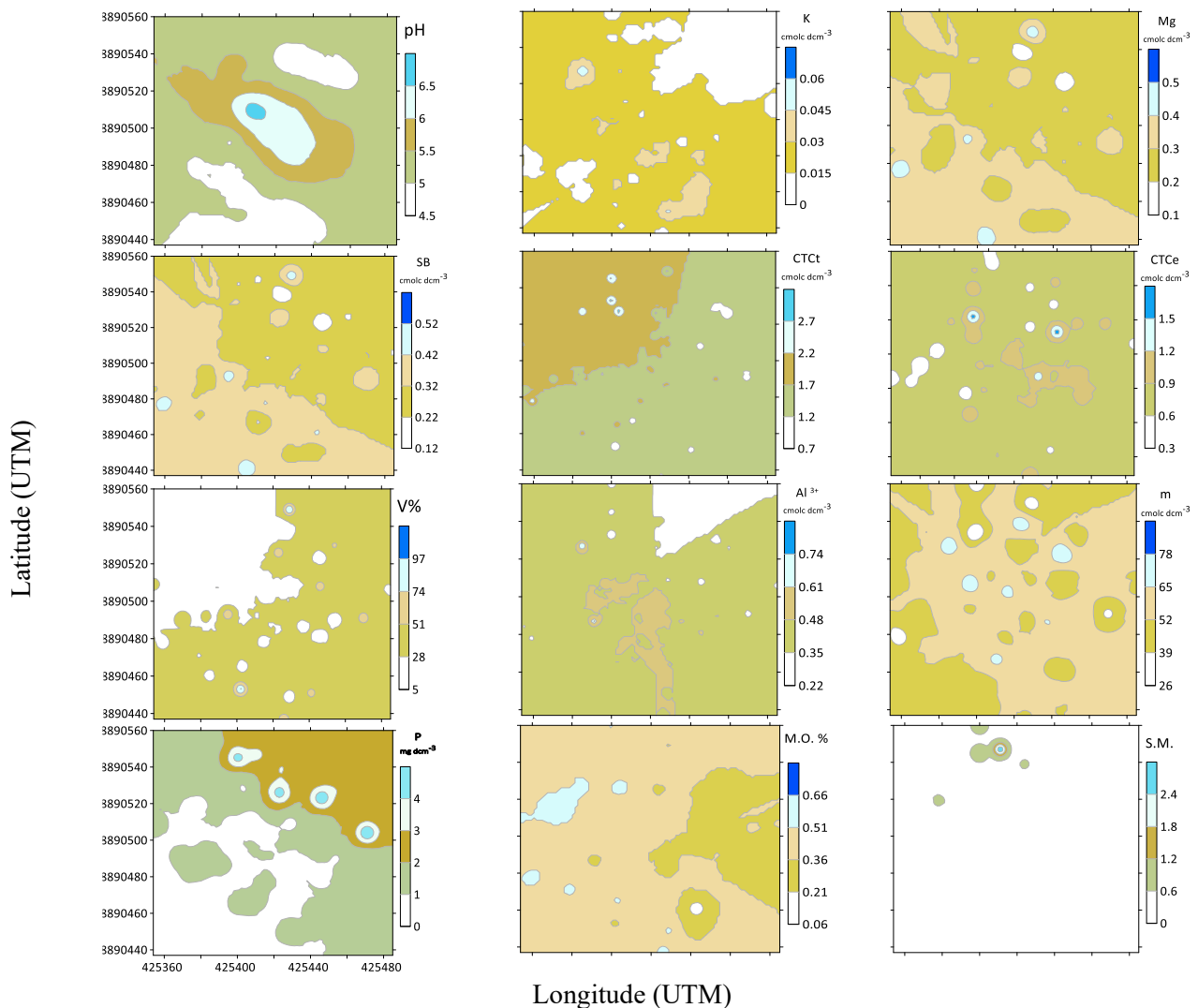


Figura 7. Atributos químicos e susceptibilidade magnética na densidade amostral 30 x 30 m na profundidade de 0,20-0,40 m na região de Barreiras do Piauí.

Fonte: Autores (2024).

A Figura 8, mostra a formação de dois grupos bem distintos, separando as profundidades e destacando as diferenças nos parâmetros químicos do solo entre as profundidades de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m. Dentro de cada grupo, observa-se uma maior similaridade entre os parâmetros obtidos nas malhas de 10 x 10 m e 30 x 30 m, o que também é evidenciado na matriz de

distância construída para cada profundidade separadamente (Figura 8B e 8C).

O ajuste para cada um dos agrupamentos (Figura 8), foi verificado pelo coeficiente de correlação cofenética onde observou-se: A - Para as três malhas e duas profundidades (0,9610); B - Para as malhas de 10 x 10 m, 20 x 20 m e 30 x 30 m na profundidade de 0,0 - 0,20 m (0,9995); C -

Para as malhas de 10 x 10m, 20 x 20m e 30 x 30m na profundidade de 0,20–0,40 m (0,9763). Os coeficientes altos observados em todos os

agrupamentos indicam confiabilidade entre a matriz de dissimilaridade e a representação gráfica obtida (Sokal & Rohlf, 1962).

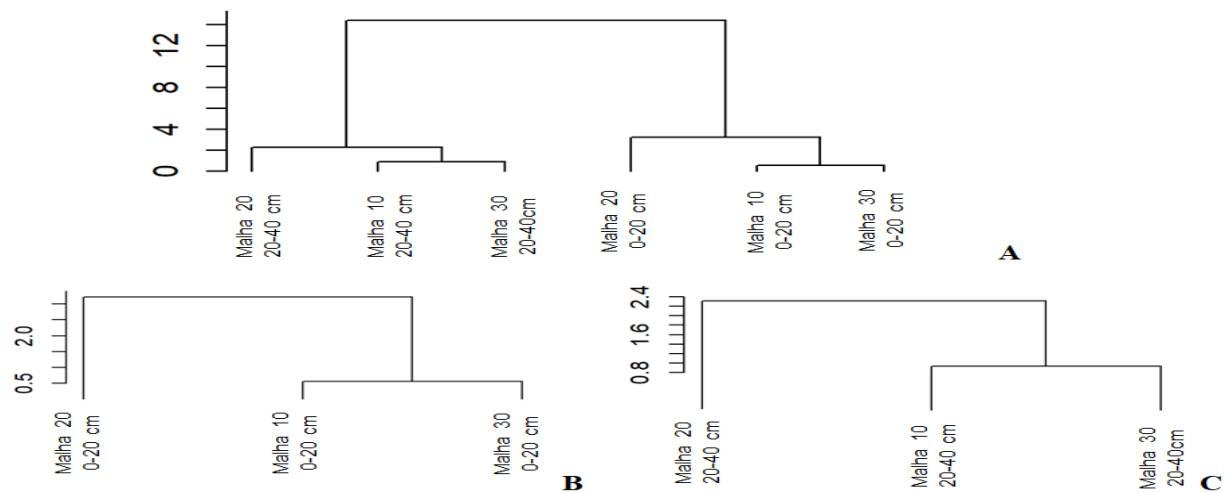


Figura 8. Dendrograma obtido pelo método de agrupamento UPGMA para os atributos químicos e susceptibilidade magnética obtidos em diferentes amostragens e profundidades. A - Considerando todas as profundidades e amostragens. B - Considerando a profundidade de 0,0-0,20 m. C - Considerando a profundidade de 0,20-0,40 m. Fonte: Autores (2024).

Essa relação de similaridade também foi observada ao utilizar a metodologia de Tocher (Tabela 10). Tratamentos dentro do mesmo grupo mostraram-se mais similares entre si do que aqueles pertencentes a grupos distintos. Avaliando todas as amostragens e profundidades, verifica-se que as amostragens na profundidade de 0,20–0,40 m são semelhantes e compõe o grupo II. No grupo I, as malhas 10 x 10 m e 30 x 30 m são similares e diferem da malha 20 x 20 m que compões o grupo II. Nota-se também que os parâmetros obtidos nas

malhas de 10 x 10 m e 30 x 30 m tendem a se agrupar para ambas as profundidades, reforçando essa tendência de similaridade. Estes resultados indicam que uma amostragem eficiente para os parâmetros químicos observados, pode ser realizada utilizando uma malha 30 x 30 m semelhante a malha 10 x 10 m. Reduzindo os custos e o tempo para descrição da diversidade química dos solos.

Tabela 10. Agrupamento de Tocher para caracteres químicos do solo obtidos em diferentes densidades amostral e profundidades.

Grupos	Todos	0,0–0,20 m	0,20-0,40 m
I	Malha 10 (0,0-0,20 m)	Malha 10 (0,0-0,20 m)	Malha 10 (0,20-0,40 m)
	Malha 30 (0,0-0,20 m)	Malha 30 (0,0-0,20 m)	Malha 30 (0,20-0,40 m)
II	Malha 10 (0,20-0,40 m)	Malha 20 (0,0-0,20 m)	Malha 20 (0,0-0,20 m)
	Malha 30 (0,20-0,40 m)		
	Malha 20 (0,20-0,40 m)		
III	Malha 20 (0,0-0,20 m)		
Coefficiente de correlação cofenética	0,9872	0,9995	0,9763

Fonte: Autores (2024).

Os dois primeiros componentes principais explicaram 98,2% da variação encontrada entre as densidades amostrais (profundidades e amostragens), para as características químicas avaliadas, o que tornou possível a redução do

conjunto de dados iniciais em poucos CP sem perda significativa de informação. A partir da dispersão dos *scores* das densidades amostrais e com base nos dois primeiros componentes (Figura 9), foi possível observar a distinção entre as

profundidades nos quadrantes direito (0,0–0,20 m) e quadrante esquerdo (0,20–0,40 m). Na profundidade 0,0–0,20 m foi observado maiores teores de Mg, SB, CTC T, CTC t, Al, MO, K, S, P. A profundidade 0,20–0,40 m é caracterizada pela maior SM, pH e V%.

As malhas 10 x 10m e 30 x 30 na profundidade 0,0–0,20 m estão próximas no *biplot*, assemelhando-se em relação aos constituintes químicos do solo, principalmente em relação aos

teores de MO, K, P, Al, SB. Inversamente correlacionado a SM. Indica que solos com maiores teores desses nutrientes tem menos SM (vetores opostos). O vetor SM, é o que apresenta maior poder de discriminação no CP 2. Dada a dispersão no *biplot*, pode-se perceber que a malha 20 x 20m na profundidade 0,20–0,40 m diferencia-se mais da malha 30 x 30 m, que está mais próxima da malha 10 x 10 m, reforçando os agrupamentos observados na Figura 8 e Tabela 10.

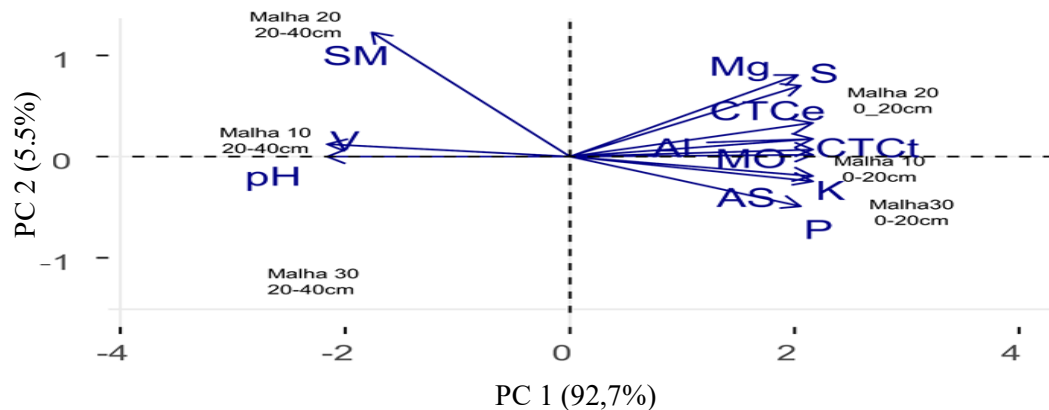


Figura 9. Dispersão dos scores obtidos em diferentes densidades amostral e profundidade para os atributos químicos do solo em relação aos dois primeiros componentes principais.

Fonte: Autores (2024).

Conclusões

A densidade amostral 30 x 30 m é a mais indicada por apresentar variabilidade definida e com o menor número de amostras.

A correlação entre os atributos e susceptibilidade magnética foi insignificante.

Os mapas indicaram área com menor e maior concentração dos nutrientes, permitindo o manejo de acordo com as necessidades individuais.

A análise multivariada constatou que as malhas 10 x 10 m e 30 x 30 m agrupam de forma semelhante nos atributos químicos para estudos de variabilidade espacial. Reforçando ainda mais a utilização da densidade amostral 30 x 30 m.

Agradecimentos

A Universidade Estadual do Piauí – UESPI. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí – FAPEPI e a Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado -SEDET.

Referências

- Agegnehu, G., Amede, T., Desta, G., Erkossa, T., Legesse, G., Gashaw, T., Rooyen, A. V., Harawa, R., Degefu, T., Mekonnen, K., Schulz, S. (2023). Improving fertilizer response of crop yield through liming and targeting to landscape positions in tropical agricultural soils. *Heliyon* 9,e17421.<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17421>
- Ayoubi, S., Jabbari, M., Khademi, H. (2018). Multiple linear modeling between soil properties, magnetic susceptibility and heavy metals in various land uses. *Modeling Earth Systems and Environment* 4, 579-589. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0442-0>
- Barros, B. A. A., Matias, S.S.R., Nogueira, M. S., Lins, R. C., Oliveira, F. F., Tavares Filho, G. S. (2022). Spatialization of chemical attributes, penetration resistance and magnetic susceptibility of the soil in a Cerrado área. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 17, e2186.<https://doi.org/10.5039/agraria.v17i4a2186>

- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil science society of America journal* 58, 1501-1511. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- Cardoso, K. D. V., Amorim, J. D. (2024). Matopiba: A fronteira agrícola sob o olhar de estudantes da educação básica. *Revista Eixo* 13, 4 -19. <https://doi.org/10.19123/REixo.v13n2.1>
- Figueiredo Filho, D. B., Silva Júnior, J. A. (2009). Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje* 18, 115-146.
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L., BLACK, W., 2005. *Análise multivariada de dados*. Porto Alegre: Bookman, 593 p.
- Jalane, O. I., Mafalacusser, J. M., da Siva, E. V., Mabjaia, A. S. A. (2023). Geoestatística e SIG como Técnica de Mapeamentos das Propriedades Químicas do Solo. *RAC: Revista Angolana de Ciências* 5, e050208. <https://doi.org/10.54580/R0502.08>
- Kamimura, K. M., Santos, G. R. D., Oliveira, M. S. D., Dias Junior, M. D. S., Guimarães, P. T. G. (2013). Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo, sob lavoura cafeeira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37, 877-888. <https://doi.org/10.1590/S010006832013000400006>
- Kruglov, O., Menshov, O., Horoshkova, L., Kruhlov, B., 2023. Magnetic susceptibility of inclined soils and its relationship with some agronomic indicators. *Plant & Soil Science* 14, 39-50. <https://doi.org/10.31548/plant1.2023.39>
- Lemos Filho, L. C. A., de Oliveira, E. L., de Faria, M. A., de Bastos Andrade, L. A. (2008). Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). *Revista ciência agrônômica* 39, 193-202.
- Ma, G., Cheng, S., He, W., Dong, Y., Qi, S., Tu, N., Tao, W. (2023). Effects of organic and inorganic fertilizers on soil nutrient conditions in rice fields with varying soil fertility. *Land* 12, 1026. <https://doi.org/10.3390/land12051026>
- Matias, S. S. R., Baptistel, A. C., Nobrega, J. C. A., Andrade, F. R., da Silva, J. B. L. (2015). Variabilidade espacial dos atributos do solo em duas áreas de manejo convencional no Cerrado piauiense. *Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences* 58, 217-227. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.1687>
- Matos, A. P. D., Matias, S. S. R., Nunes, R. K. L., Moraes, E. M., Tavares Filho, G. S. (2023). Soil management of limed areas cultivated with banana identified by magnetic susceptibility. *Revista Ceres* 70, 17-24. <https://doi.org/10.1590/0034737X202370040004>
- Matos, A. P., Matias, S. S. R., Landim, J. S. P., Nunes, T. P. M. (2024). Variabilidade espacial dos micronutrientes, granulometria e susceptibilidade magnética do solo em área de bananeira com e sem incorporação de calcário. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.17, n.05, p.3700-3714. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.5.p3700-3714>
- Minitab, 2000. Release Making Data analysis Easier: version 13.1. CD Rom
- Monteiro, H. O., Matias, S. S. R., Vogado, R. F., Nogueira, M. S., Silva, D. N., Landim, J. S. P. (2024). Espacialização dos atributos do solo e suscetibilidade magnética em ambiente de inundação sazonal no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.17, n.4, p.2795-2807. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.4.p2795-2807>
- Moreira, E. V., Tavares Filho, G. S., de Oliveira, F. F., Júnior, F. A. P., de Sousa Araújo, C. A., Matias, S. S. R. (2020). Espacialidade dos atributos químicos de águas subterrâneas do município de Granito, PE. *Research, Society and Development* 9, e10091210779-e10091210779. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i12.10779>
- Oliveira Filho, F. X. D., Miranda, N. D. O., Medeiros, J. F. D., Silva, P. C. D., Mesquita, F. O., Costa, T. K. (2015). Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19, p.186-193. <https://doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v19n2p186-193>
- Oliveira, B. A., Campos, L. P., Matias, S. S. R., Silva, T. S. D., Gualberto, A. V. S. (2021). Spatiality of soil chemical attributes in a banana

- cultivation area in west Bahia. *Revista Caatinga*, 34, p.177-188. <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n118rc>
- Pereira, P., Bogunovic, I., Inacio, M., Zhao, W., Barcelo, D. (2023). Agriculture intensification impacts on soil and water ecosystem services. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp.EGU-1423). <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1423>
- R Core Team R. (2022). *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Robertson, G.P. GS⁺. (2008). *Geostatistics for the environmental sciences* (version 9 for windows). Gamma Design Software. 179p.
- Rousse, S., Llubes, M., Ghorbel, M., Soubrand, M., Joussein, E., Munoz, M. (2023). Multi-devices field magnetic susceptibility: '3D' spatialization of metallic contamination in soils and reverse correlation in carbonated context (Jebel Ressay, Tunisia). *Environmental Earth Sciences* 82, 457. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11104-w>
- Siqueira, D. S., Marques Jr, J., Matias, S. S. R., Barrón, V., Torrent, J., Baffa, O., Oliveira, L. D. (2010). Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. *Soil Use and Management*, 26, p.425-431. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00294.x>
- Sneath, P. H., Sokal, R. R. (1973). Numerical taxonomy: the principles and practice of numerical classification. San Francisco: W. H. Freeman; 573p.
- Sohrabian, B. (2021). Geostatistical prediction through convex combination of Archimedean copulas. *Spatial Statistics* 41, 100488. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2020.100488>
- Sokal, R. R., Rohlf, F. J. (1962). The comparison of dendrograms by objective methods. *Taxon* 11, 30-40p. <https://doi.org/10.2307/1217208>
- Souza, Z. M. D., Souza, G. S. D., Marques Júnior, J., Pereira, G. T. (2014). Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. *Ciência Rural*, 44, 261-268p. <https://doi.org/10.1590/S010384782014000200011>
- Sun, X. L., Lai, Y. Q., Ding, X., Wu, Y. J., Wang, H. L., Wu, C. (2022). Variability of soil mapping accuracy with sample sizes, modelling methods and landform types in a regional case study. *Catena* 213, 106217. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106217>
- Surfer for windows. Realese 7.0. (1999). *Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers*. User's guide. New York:Golden software, 619p.
- Taghdis, S., Farpoor, M. H., Mahmoodabadi, M., Fekri, M. (2021). Monitoring magnetic susceptibility and spatial distribution of soil attributes in different land uses: a case study in an arid and semi-arid region, southern Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 14, 970. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07303-z>
- Teixeira, P. C. Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 573p.
- Vogado, R. F., Souza, H. A., Matias, S. S.R., Gualberto, A. V. S., da Cunha, J. R., Leite, L. F. C. (2020). Spatial variability of carbon and nitrogen stocks in integrated management systems and pasture in a cerrado region. *Research, Society and Development* 9, e67291110220. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i11.10220>
- Warrick, A. W., Nielsen, D. R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, cap. 2, p. 319-344.
- Zhou, Y., Zhang, Z., Rao, J., Chen, B., 2022. Predicting and mapping soil magnetic susceptibility in an agro-pastoral transitional zone: Influencing factors and implications. *Soil and Tillage Research* 219, 105352. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105352>