



## Fertilidade do solo de área degradada em processo de recuperação através de modelagem em SIG

### *Soil fertility in degraded areas in the process of recovery through GIS modeling*

Ezequiel Sóstenes Bezerra Farias<sup>1</sup>, José Dantas Neto<sup>1</sup>, Daniel Duarte Pereira<sup>2</sup>, Márden Souza Chaves<sup>3</sup>, Sérgio Murilo Santos de Araújo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, Brasil

<sup>3</sup> Escola Cidadã Integral Técnica Pedro Bezerra Filho, Paraíba, Brasil

Contato: [sergiomurilosa.ufcg@gmail.com](mailto:sergiomurilosa.ufcg@gmail.com)

#### Palavras-Chave

atributos químicos  
atributos físicos fertilidade natural  
distribuição espacial

#### RESUMO

Objetivou-se por este trabalho estimar e mapear a fertilidade dos solos de área semiárida em processo de recuperação através de modelo paramétrico simplificado de fertilidade natural do solo utilizando técnicas de geoprocessamento. Utilizou-se dos dados dos atributos químicos e físicos dos solos da área de estudo onde foram elaborados e classificados os respectivos mapas dos atributos, e o de fertilidade superficial foi estimado por modelagem através do QGIS®. No tratamento estatístico foi realizada a análise descritiva dos dados e o teste de normalidade utilizando o software RStudio®. O uso das técnicas do geoprocessamento e da interpolação demonstraram serem uma ferramenta eficiente e rápida onde apresentou resultados satisfatórios no uso da modelagem por B-Spline multinível no mapeamento do índice de fertilidade natural dos solos. Os testes de normalidade apresentaram-se semelhantes entre si e a correlação entre a maioria das variáveis apresentaram descendentes. O uso da geoestatística demonstrou a variabilidade espacial dos dados, em que os valores da média e da mediana ficaram próximos, indicando que estes dados seguiam uma distribuição simétrica. O baixo teor de P, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup> em cmolc kg<sup>-1</sup>, influenciaram na baixa fertilidade dos solos. O baixo teor de matéria orgânica (MO), a alta Acidez Potencial (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>) e a CTC total influenciaram na classificação da fertilidade natural dos solos como Muito Baixa e Baixa. Recomenda-se práticas de controle da erosão e o aumento da matéria orgânica destes solos por técnicas de conservação.

#### Keyword

chemical attributes  
physical attributes  
natural fertility  
spatial distribution

#### ABSTRACT

The objective of this work was to estimate and map the fertility of soils in semi-arid areas undergoing recovery through a simplified parametric fertility index model natural soil using geoprocessing techniques. Data on the chemical and physical attributes of soils in the study area were used, where the respective attribute maps were prepared and classified, and surface fertility was estimated by modeling using algebraic language using QGIS®. In the statistical treatment, descriptive analysis of the data and normality test were carried out using the RStudio® software. The use of geoprocessing and interpolation techniques proved to be an efficient and fast tool that presented satisfactory results in the use of multilevel B-Spline modeling in mapping the natural fertility index of soils. The normality tests were similar to each other and the correlation between most variables showed descending values. The use of geostatistics demonstrated the spatial variability of the data, in which the mean and median values were close, indicating that these data followed a symmetrical distribution. The low content of P, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> and K<sup>+</sup> in cmolc kg<sup>-1</sup> influenced the low fertility of the soils. The low content of organic matter (OM), high Potential Acidity (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>) and total CEC influenced the classification of the natural fertility of the soils as Very Low and Low. Erosion control practices and the increase of organic matter in these soils through conservation techniques are recommended.

#### Informações do artigo

Recebido: 09 de setembro, 2024

Aceito: 13 de abril, 2025

Publicado: 30 de abril, 2025

## Introdução

O aumento da intensidade do uso do solo e a redução da cobertura vegetal nativa do Semiárido Brasileiro têm levado à degradação dos recursos naturais, e em especial a redução da fertilidade do solo (MENEZES et al., 2002). A degradação do solo é definida como um processo que reduz e/ou elimina a capacidade atual ou potencial do solo para produzir bens ou serviços tornando-se, assim, uma ameaça aos ciclos hidrológicos e biogeoquímicos, à biodiversidade e à produtividade vegetal primária (MARCHETTI et al., 2012).

Os mecanismos associados à degradação dos solos podem ser evidenciados por meio de atributos físicos, tais como o declínio na agregação do solo, com consequente aumento da erosão e compactação do solo, atributos químicos, tais como a acidificação, salinização e esgotamento da fertilidade do solo e frações químicas da matéria orgânica e atributos biológicos no que tange à diminuição do aporte de carbono e da atividade e diversidade microbiana (MOEBIUS-CLUNE et al., 2011). A fertilidade dos solos está relacionada com a disponibilidade de elementos químicos e com a sua capacidade de fornecer nutrientes às plantas, podendo ser natural ou associada à aplicação externa. A fertilidade combina uma série de propriedades dos solos, como as propriedades biológicas, químicas e físicas. A fertilidade também é uma propriedade gerenciável do solo e seu manejo é de extrema importância para a otimização da nutrição de culturas, tanto de curto quanto de longo prazo, a fim de se atingir uma produção agrícola sustentável (BRUINSMA, 2003).

Souza et al. (2006) ressaltam que, as alterações ocasionadas pelo relevo podem alterar a dinâmica hídrica nos solos de uma área, condicionando uma distribuição diferenciada de suas propriedades. Desta forma, a avaliação destes atributos auxilia no estudo do comportamento do solo em áreas degradadas e em recuperação. Dentre estes atributos pode-se destacar a textura, a qual possui interferência direta nas demais propriedades físicas do solo, como na estrutura, distribuição de tamanhos de poros, compactação e adensamento, selamento superficial, escoamento superficial, drenagem e processo de infiltração (OLIVEIRA et al., 2013). A infiltração de água no solo pode ser considerada como um indicador da qualidade física por integrar fatores que diretamente afetam o desenvolvimento das plantas (JOSÉ et al., 2012).

Para uma adequada caracterização das propriedades do solo é importante considerar sua variabilidade espacial (VIEIRA, 2000). De acordo com Lagacherie (2008), a variabilidade espacial e temporal dos nutrientes dos solos pode ser identificada e modelada por meio de métodos geoestatísticos ou de mapeamento digital de solos. De acordo com Brandão (2001), modelos matemáticos, aritméticos e lógicos, buscando representar propriedades e processos do meio físico natural, têm sido implementados nos SIG, com o objetivo de facilitar o seu estudo e compreensão, para que se possa atuar sobre o meio ambiente de forma mais responsável e cooperativa. Contudo, as propriedades naturais da superfície terrestre são espacialmente contínuas, sendo restritivo descrevê-las através de simples funções matemáticas. Modelos inferenciais para este objetivo vêm sendo propostos. A Geoestatística é um desses modelos e sua base conceitual está fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas, formalizada por Matheron (1971).

Dentre os procedimentos geoestatísticos, se destaca como a técnica do algoritmo B-spline multinível (MBS) para interpolação espacial de dados dispersos (LEE et al., 1997). O algoritmo faz uso de uma hierarquia grosseira à fina de redes de controle para gerar uma sequência de funções B-spline bicúbicas, cuja soma se aproxima da função de interpolação desejada em que, grandes ganhos de desempenho são obtidos usando o

refinamento do B-spline para reduzir a soma dessas funções em uma função B-spline equivalente.

O algoritmo B-spline multinível foi utilizada por diversos autores e áreas como por Lee et al. (2005), por Polizelli Júnior (2008), Osorio et al. (2011), Jiang e Zhang (2013), por Fanti (2016), por Moon e Ko (2018), Lyche et al. (2018), por Sabino e Macedo (2019), por Noël et al. (2020), por Cano (2022), por Kaya et al. (2021), e no mapeamento dos atributos químicos dos solos por Francisco et al. (2024).

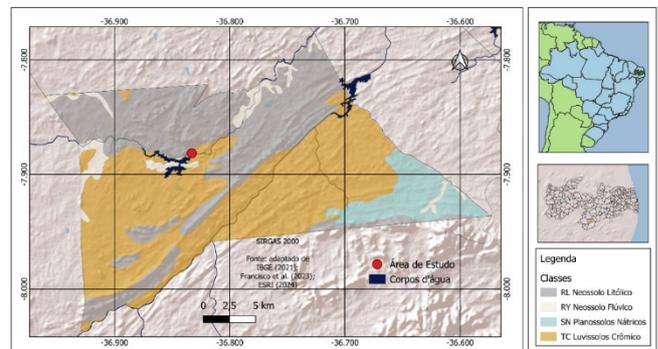
Quanto ao mapeamento da variabilidade espacial de atributos dos solos, diversas pesquisas foram elaboradas, como por Souza et al. (2006), Brandão (2010), Santos et al. (2012), Campos et al. (2012), Marchetti et al. (2012), Silva et al. (2014), Leite et al. (2015), Lima et al. (2015), Francisco et al. (2022; 2023; 2024).

Portanto, este trabalho objetiva estimar e mapear a fertilidade dos solos de área semiárida em recuperação através de modelagem, utilizando índice de fertilidade e técnicas de geoprocessamento.

## Material e métodos

A área de estudo localiza-se no município de Camalaú-PB, encontra-se inserido nos domínios da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, região do Alto Paraíba, localizada nas coordenadas geográficas de 7°52'52''S e 36°49'57''W (Figura 1). Conforme Francisco (2010), a área de estudo encontra-se inserido na Região de Cariris de Princesa – corresponde, no terço médio do Estado, as cabeceiras do rio Paraíba. São áreas mais elevadas (>550m), ao longo da divisa com o Estado de Pernambuco.

Figura 1. Solos e localização da área de estudo.



Fonte: adaptado de IBGE (2021); Francisco et al. (2023); ESRI (2024).

De acordo com a classificação de Köppen o clima da área de estudo é considerado do tipo Bsh - Semiárido quente, precipitação predominantemente, abaixo de 600 mm.ano<sup>-1</sup>, e temperatura mais baixa, devido ao efeito da altitude (400 a 700 m). As chuvas da região sofrem influência das massas Atlânticas de sudeste e do norte (FRANCISCO, 2010).

De acordo com Sousa et al. (2007), a vegetação representativa da área de estudo é do tipo caatinga hiperxerófila com as espécies mais encontradas sendo o marmeleiro (*Croton sonderianus* Muell. Arg.), jurema preta (*Mimosa tenuiflora* Willd. Poiret.), pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart.), e catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul). Outras espécies nativas da região estão presentes com poucos exemplares, como o arçico (*Anadenanthera columbrina* Vell. Brenan) e a aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão). Já os cactos são bastante diversificados.

Os solos (Figura 1), de acordo com EMBRAPA (2018), Campos e Queiroz (2006) e Francisco et al. (2023), identificados na área são, os Luvisolos Crômicos órtico típico em que são

constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural com argila de atividade alta e alta saturação de bases, imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A; e os Neossolos flúvicos Ta eutróficos solódicos em que são jovens com pouco desenvolvimento dos perfis devido a diversas causas. São solos derivados de sedimentos aluviais, com horizonte A assente sobre horizonte C constituído de camadas estratificadas, sem relação pedogenética entre si.

A área de estudo, denominada Sítio Viegas, apresenta 0,0254 km<sup>2</sup> (2,54 ha), com histórico de uso de extrativismo vegetal, caprinocultura, bovinocultura e cultivo de olerícolas. Apresentam curvas de nível com cordões de contorno de pedras com valas de 0,25 m de largura e 0,25 m de profundidade em fileiras duplas entre as curvas de nível, distando 1,50 m. A área ao Norte é composta por agave híbrido (*Agave* sp), umbuzeiros (*Spondias tuberosa* Anarcadiaceae) e quixabeiras (*Sideroxylon obtusifolium* Sapotaceae), na área central palma de espinho (*Opuntia dillenii*), mandacarus (*Cereus jamacaru* Cactaceae), xique-xiques (*Pilosocereus gounellei*) Cactaceae, e na área ao Sul é composta por algarobal (*Prosopis* sp), umbuzeiros (*Spondias tuberosa*) Anarcadiaceae, e por quixabeiras (*Sideroxylon obtusifolium*) Sapotaceae.

Na metodologia deste trabalho, com o objetivo de elaborar as análises físicas e químicas dos solos, foram coletadas e georreferenciadas 13 amostras, conforme metodologia da EMBRAPA (DONAGEMA et al., 2011). Após, as amostras de solos para análise física foram enviadas para o Laboratório de Solos e Água (LASAG), e as amostras para a análise química ao Laboratório de Química e Fertilidade do Solo (LASOL), ambos da Universidade Federal de Campina Grande, campus Sumé.

Em seguida foi criada uma planilha no Excel<sup>®</sup> onde utilizou-se dos dados dos atributos químicos obtidos de Potencial

Hidrogeniônico - pH (adimensional), Fósforo disponível - P (g kg<sup>-1</sup>), Potássio - K<sup>2+</sup> (g kg<sup>-1</sup>), Cálcio - Ca<sup>2+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>), Magnésio - Mg<sup>2+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>), Sódio - Na<sup>2+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>), Alumínio Al<sup>3+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>), Hidrogênio H<sup>+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>), Soma de Base - SB (cmolc kg<sup>-1</sup>), Saturação por Alumínio - m (%), Saturação de Base - V (%), e Matéria Orgânica - MO (g kg<sup>-1</sup>).

Utilizando a metodologia adaptada de Francisco et al. (2023), em que, a partir dos dados obtidos, foram estimados a Capacidade de Troca de Cátions efetiva - CTC efetiva (cmolc kg<sup>-1</sup>), CTC Total (cmolc kg<sup>-1</sup>), Porcentagem de sódio trocável - PST (%) (Equações 1, 2 e 3).

$$CTC\ efetiva = SB + Al^{3+} \tag{Eq.1}$$

$$CTC\ Total = SB + (H^+ + Al^{3+}) \tag{Eq.2}$$

$$PST = Na^{2+} / (CTC\ Total) * 100 \tag{Eq.3}$$

Em que: CTC efetiva – capacidade de troca de cátions efetiva (cmolc kg<sup>-1</sup>); CTC Total – capacidade de troca de cátions total (cmolc kg<sup>-1</sup>); SB (Na<sup>2+</sup>, K<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) – soma de bases trocáveis (cmolc kg<sup>-1</sup>); Al<sup>3+</sup> – concentração de alumínio trocável no solo (cmolc kg<sup>-1</sup>); H<sup>+</sup> - hidrogênio (cmolc kg<sup>-1</sup>); SB – Saturação por Bases (%).

Utilizando-se o software QGIS<sup>®</sup> 3.38 foi delimitada a área de estudo na escala de 1:1.500. Em seguida, os valores de classificação obtido para os pontos foram geoespacializados utilizando-se a interpolação B-Spline Multinível (MBS) através do plugin SAGA<sup>®</sup> 9.3.1. Em seguida as imagens *raster* foram classificadas conforme a Tabela 1. Após, com o objetivo de realizar o cálculo das áreas, foi utilizado o *plugin r.report* do GRASS<sup>®</sup> 8.3.2.

Tabela 1. Parâmetros de classificação das variáveis da fertilidade dos solos

Variável/Atributo	Qualidade (Peso)				
	Muito Baixa (5)	Baixa (4)	Média (3)	Alta (2)	Muito Alta (1)
pH em Água	< 4,5 e > 7	4,5 - 4,8 e 6,7 - 7	4,8 - 5,1 e 6,4 - 6,7	5,1 - 5,4 e 6,1 - 6,4	5,4 - 6,1
P (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 45	> 45
Ca <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 0,4	0,4 - 1,2	1,2 - 2,4	2,4 - 4	> 4
Mg <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 0,15	0,15 - 0,45	0,45 - 0,9	0,9 - 1,5	> 1,5
Al <sup>3+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	> 2	1 - 2	0,5 - 1	0,2 - 0,5	< 0,2
K <sup>+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 0,15	0,15 - 0,4	0,4 - 0,7	0,7 - 1,2	> 1,2
SB (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 0,6	0,6 - 1,8	1,8 - 3,6	3,6 - 6	> 6
Ac. Pot. (H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup> ) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	> 9	5 - 9	2,5 - 5	1 - 2,5	< 1
CTC (pH 7,0) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 1,6	1,6 - 4,3	4,3 - 8,6	8,6 - 15	> 15
CTC (efetiva) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	< 0,8	0,8 - 2,3	2,3 - 4,6	4,6 - 8	> 8
V - Sat. Base (%)	< 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	> 80
m - Saturação por Al (%)	> 75	50 - 75	30 - 50	15 - 30	< 15
PST (%)	> 30	20 - 30	10 - 20	7 - 10	< 7
MOS (g kg <sup>-1</sup> )	< 0,7	0,7 - 2	2 - 4	4 - 7	> 7

Fonte: Adaptado de Francisco et al. (2024).

A classificação da fertilidade natural dos solos foi estimada para a camada superficial do solo por modelo paramétrico simplificado denominado Índice de Fertilidade Natural do Solo adaptado de Francisco et al. (2024), utilizando linguagem algébrica através da calculadora *raster* do QGIS<sup>®</sup> (Equação 4). Este modelo considera que variáveis/atributos têm como pesos os valores de 1 a 5, e a resultante classe 1 indica qualidade Muita Alta, classe 2 denota qualidade Alta, classe 3 infere classe Média, classe 4 denota classe Baixa, e a classe 5 infere qualidade Muito Baixa.

$$IFNS = CA / NA \tag{Eq.4}$$

Onde: IFNS = Índice de Fertilidade Natural do Solo; CA = somatória das classes de atributos: pH, P, Ca, Mg, Al, K, SB, H+Al, CTC Total, CTC efetiva, V, m, PST e MOS; NA = número de atributos.

No tratamento estatístico foi realizada a análise descritiva dos dados e o teste de normalidade utilizando o software RStudio<sup>®</sup> 2024. Para verificar se as amostras procediam de uma determinada distribuição de probabilidade, foram usados os testes de hipóteses não paramétricos de Shapiro-Wilk (1965), Anderson-Darling (1954) e Lilliefors (1967). Buscou-se identificar uma correlação entre as variáveis utilizando o método de Pearson (1895).

## Resultados e discussão

Na Tabela 2, dos resultados da análise física dos solos, observa-se a textura dos solos amostrado onde apresenta-se em sua maioria classificado como Franco arenoso, estes localizados ao Norte da área de estudo sob os Luvisolos com maior altitude, e ao Sul classificam-se como Arenoso e Areia franca, devido

estarem localizados próximo ao leito do riacho em áreas mais planas sob o Neossolo Flúvico.

Tabela 2. Análise física dos solos

Amostra/Ponto	Granulometria (g.kg <sup>-1</sup> )		Classificação Textural
	Areia	Silte	
		16	
A1.1	652	2	Franco arenoso
		18	
A1.2	631	2	Franco arenoso
		16	
A1.3	631	2	Franco argilo-arenoso
		16	
A1.4	652	2	Franco arenoso
		14	
A1.5	672	1	Franco arenoso
		16	
A2.1	692	2	Franco arenoso
		14	
A2.2	692	1	Franco arenoso
		16	
A2.3	652	2	Franco arenoso
		18	
A2.4	652	2	Franco arenoso
		14	
A3.1	732	1	Franco arenoso
		10	
A3.2	813	1	Areia franca
A3.3	914	20	Arenoso
A3.4	894	40	Arenoso

Fonte: Autores (2024)

Tabela 3. Dados estatísticos das variáveis

Atributo/Variável	Mín	Média	Mediana	Max	Desv. Pad	Alcance	Curtose	Q1	Q3
pH	6,01	6,20	6,15	6,60	0,18	0,59	-0,13	6,10	6,27
P	1,53	15,08	15,83	33,21	9,65	31,68	-1,23	6,94	21,83
Ca <sup>2+</sup>	0,10	0,72	0,64	1,80	0,48	1,70	-0,41	0,50	1,05
Mg <sup>2+</sup>	0,20	0,41	0,40	0,50	0,10	0,3	-0,77	0,40	0,50
Al <sup>3+</sup>	0,30	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00	0,00	0,30	0,30
K <sup>+</sup>	0,20	0,38	0,28	0,96	0,24	0,76	0,50	0,24	0,41
Na <sup>+</sup>	0,26	0,37	0,35	0,57	0,09	0,31	-0,63	0,30	0,43
SB	0,83	1,53	1,57	2,40	0,53	1,57	-1,55	1,11	1,91
Acidez Potencial	1,20	1,38	1,30	1,60	0,15	0,40	-1,74	1,30	1,50
CTC efetiva	1,13	1,83	1,87	2,70	0,53	1,57	-1,55	1,41	2,21
CTC Total	2,03	2,96	3,07	3,76	0,60	1,73	-1,53	2,48	3,30
V	40,37	51,12	51,61	64,88	8,44	24,49	-1,61	43,66	58,47
m	11,11	17,79	16,04	26,64	5,39	15,53	-1,54	13,57	21,28
PST	7,88	13,17	11,40	21,22	4,43	13,34	-1,36	9,59	16,06
MOS	1,50	1,50	1,50	1,50	0,00	0,00	0,00	1,50	1,50
IFNS	1,50	1,65	1,64	1,71	0,07	0,21	-0,72	1,64	1,71

Fonte: Autores (2024)

Observa-se na Figura 2 que, pelos dados estatísticos, as menores variações de amplitude se apresentam nas variáveis P, Na<sup>+</sup>, SB, CTC efetiva e V. Com relação à variabilidade entre as

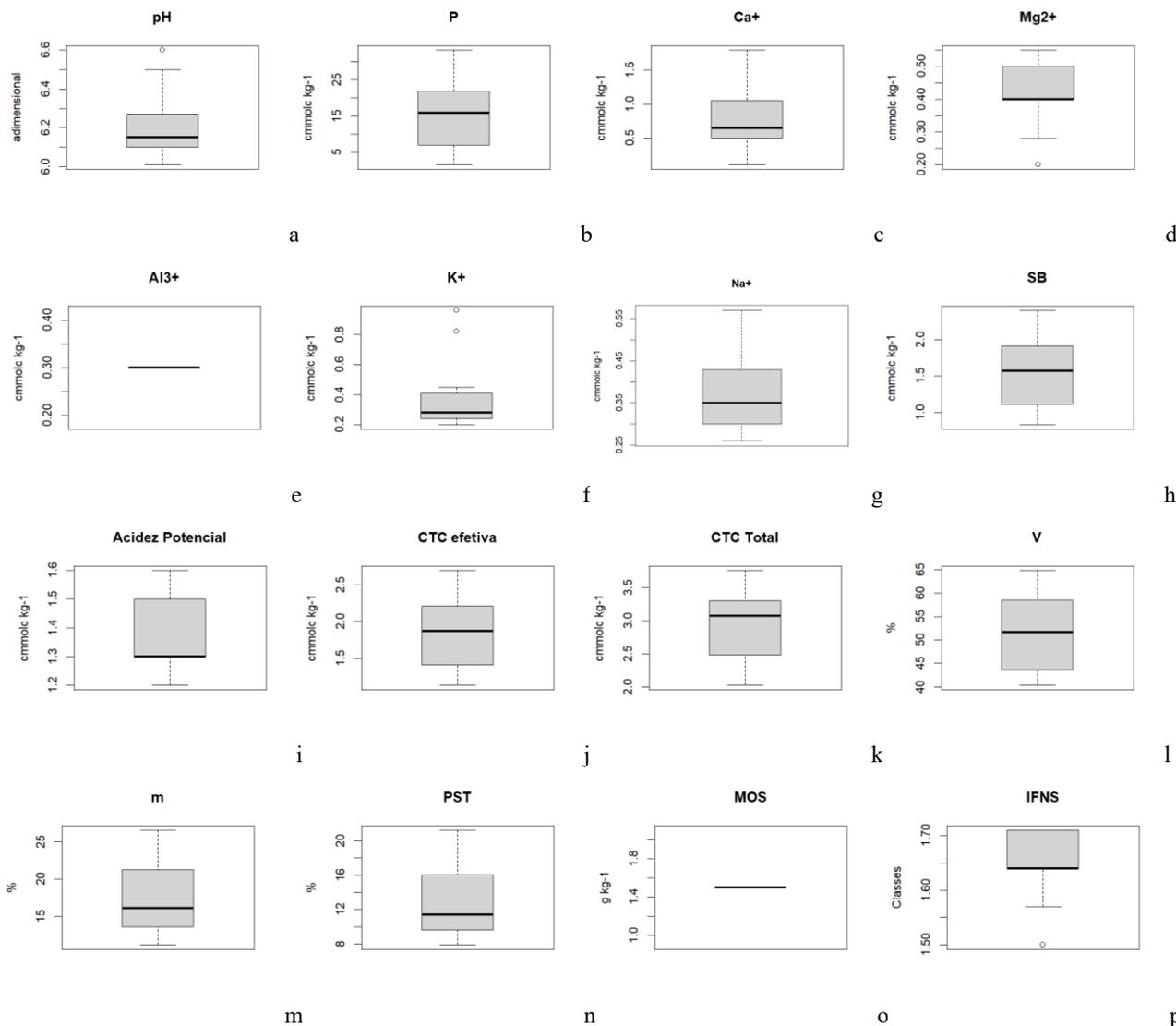
Nos dados estatísticos dos dados amostrados de fertilidade dos solos demonstrados na Tabela 3, pode-se observar que, entre os atributos Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, a maior média apresenta-se no Ca<sup>2+</sup> de 0,72 cmolc kg<sup>-1</sup>, seguido pelo maior desvio padrão entre estas. A variável P apresenta o maior desvio padrão entre todas as variáveis de 9,65. Entre os atributos V, m e PST, o atributo V – Sat. Base (%) apresenta o maior desvio padrão de 8,44, seguida do atributo m (Saturação por Al<sup>3+</sup>) e do PST. O maior alcance na distribuição ocorre no atributo P. O atributo K<sup>+</sup> apresenta a maior curtose positiva entre as demais. Os atributos Al<sup>3+</sup> e MOS não apresentam variabilidade dos dados na distribuição, portanto sem valores de alcance e curtose.

Observa-se ainda que os valores da média e da mediana para os atributos estão próximos, indicando que estes dados seguem uma distribuição simétrica. De acordo com Cambardella et al. (1994), os valores da média sendo próximos daqueles da mediana é um indicativo de que as medidas de tendência central são dominadas por valores típicos na distribuição.

Os valores de curtose ocorrem entre -1,74 a 0,50. Campos et al. (2012) afirmam que, os coeficientes de assimetria e curtose indicam se a distribuição dos dados de uma variável está próxima à distribuição normal (coeficientes iguais à zero). Apesar da normalidade dos dados não ser uma exigência da geoestatística, o importante é que a distribuição não se apresente muito alongada.

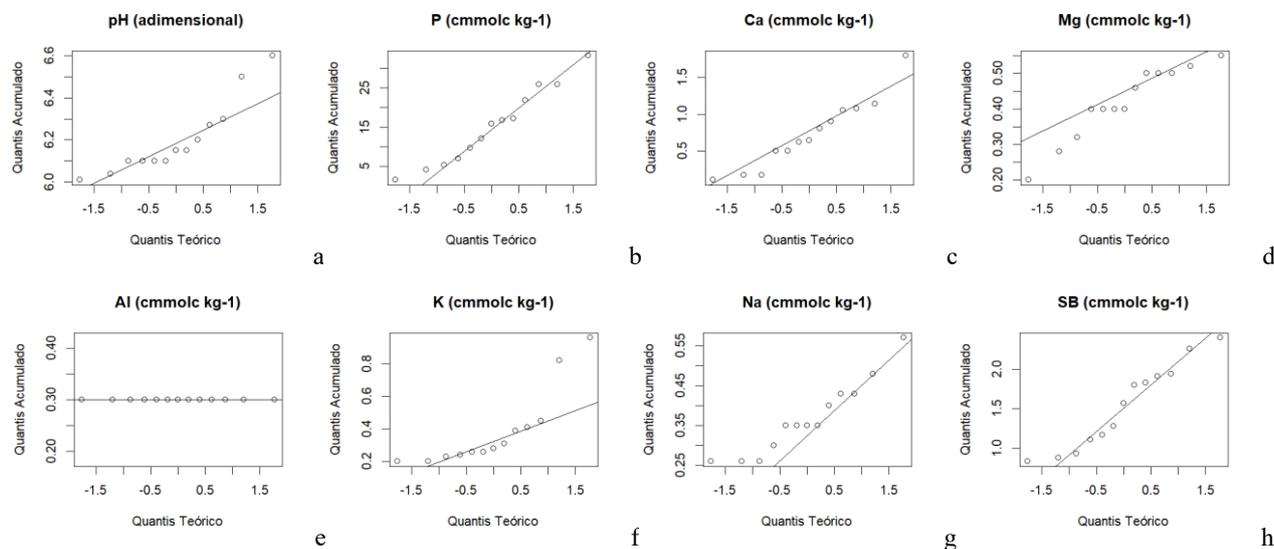
observadas por meio das caixas interquartílicas do gráfico boxplot para cada atributo, verifica-se que as variáveis Acidez Potencial (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>) e o IFNS apresentam maior variabilidade.

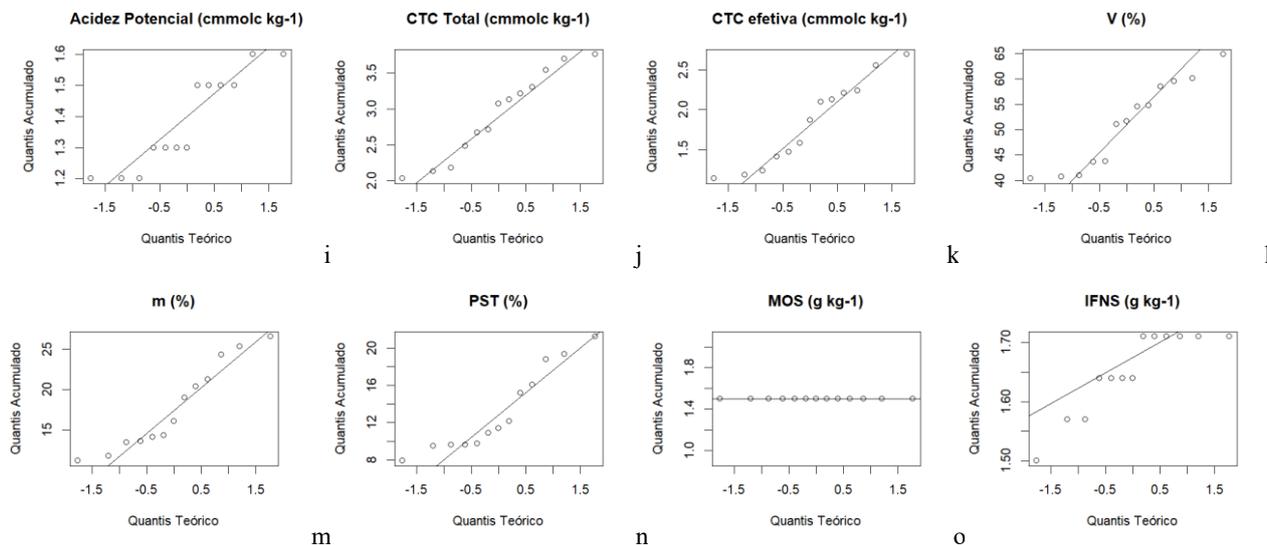
Figura 2. Boxplot das variáveis das amostras. (a) pH do solo (adimensional); (b) P (cmolc kg<sup>-1</sup>); (c) Ca<sup>2+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (d) Mg<sup>2+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (e) Al<sup>3+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (f) K<sup>+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (g) Na<sup>+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (h) SB (cmolc kg<sup>-1</sup>); (i) Ac. Pot. (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (j) CTC (pH 7,0) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (k) CTC (efetiva) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (l) V – Sat. Base (%); (m) m - Saturação por Al (%); (n); PST (%); (o) MOS (g kg<sup>-1</sup>); (p) IFSN (adimensional).



Nos boxplots dos quantis teórico e acumulado (Figura 3), observa-se uma distribuição normal na maioria das variáveis excluindo as variáveis Al<sup>3+</sup> e a MOS que seguem comportamento de distribuição não normal.

Figura 3. Boxplot das variáveis: (a) pH do solo (adimensional); (b) P (cmolc kg<sup>-1</sup>); (c) Ca<sup>2+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (d) Mg<sup>2+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (e) Al<sup>3+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (f) K<sup>+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (g) Na<sup>+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (h) SB (cmolc kg<sup>-1</sup>); (i) Ac. Pot. (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (j) CTC (pH 7,0) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (k) CTC (efetiva) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (l) V – Sat. Base (%); (m) m - Saturação por Al (%); (n); PST (%); (o) MOS (g kg<sup>-1</sup>); (p) IFSN (adimensional).





Na Tabela 4, nos resultados dos testes de normalidade de Anderson-Darling, Lilliefors e Shapiro-Wilk, apresentam-se semelhantes entre si, o que leva a aceitar a hipótese de normalidade nos dados. Os dados de  $Al^{3+}$  e MOS por terem

valores idênticos entre si no resultado da amostragem não apresentam variação e não são identificados nos testes de normalidade.

Tabela 4. Testes de normalidade

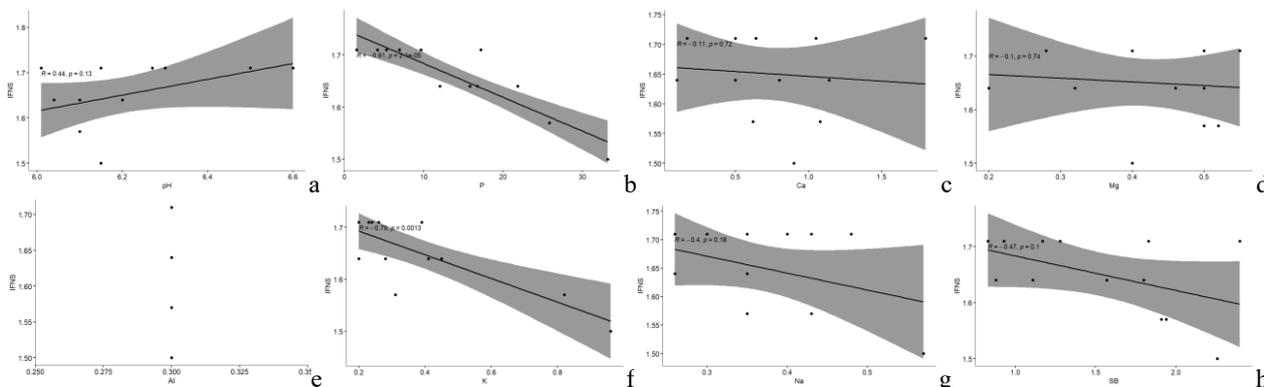
Atributo/Variável	Anderson-Darling		Lilliefors		Shapiro-Wilk	
	<i>A</i>	<i>p-valor</i>	<i>D</i>	<i>p-valor</i>	<i>W</i>	<i>p-valor</i>
pH	0,86283	0,01895	0,23058	0,05716	0,84423	0,02401
P	0,21614	0,80270	0,10824	0,94580	0,96084	0,76650
Ca <sup>2+</sup>	0,28025	0,58210	0,11684	0,89770	0,94112	0,47160
Mg <sup>2+</sup>	0,46954	0,20530	0,20102	0,16060	0,91964	0,24810
Al <sup>3+</sup>	-	-	-	-	-	-
K <sup>+</sup>	1,40070	0,00073	0,23965	0,03972	0,73991	0,00144
Na <sup>+</sup>	0,39446	0,32100	0,19437	0,19700	0,92098	0,25860
SB	0,35451	0,40420	0,15433	0,54100	0,93082	0,34930
Acidez Potencial	0,81864	0,02479	0,24970	0,02598	0,85519	0,03331
CTC efetiva	0,35451	0,40420	0,14037	0,68960	0,93082	0,34930
CTC Total	0,27950	0,58440	0,15433	0,54100	0,93866	0,43980
V	0,44554	0,23730	0,19130	0,21590	0,91415	0,20900
m	0,47508	0,19850	0,20386	0,14700	0,90930	0,17940
PST	0,66521	0,06303	0,20687	0,13360	0,88404	0,08090
MOS	-	-	-	-	-	-
IFNS	0,99416	0,00853	0,26588	0,01251	0,81632	0,01072

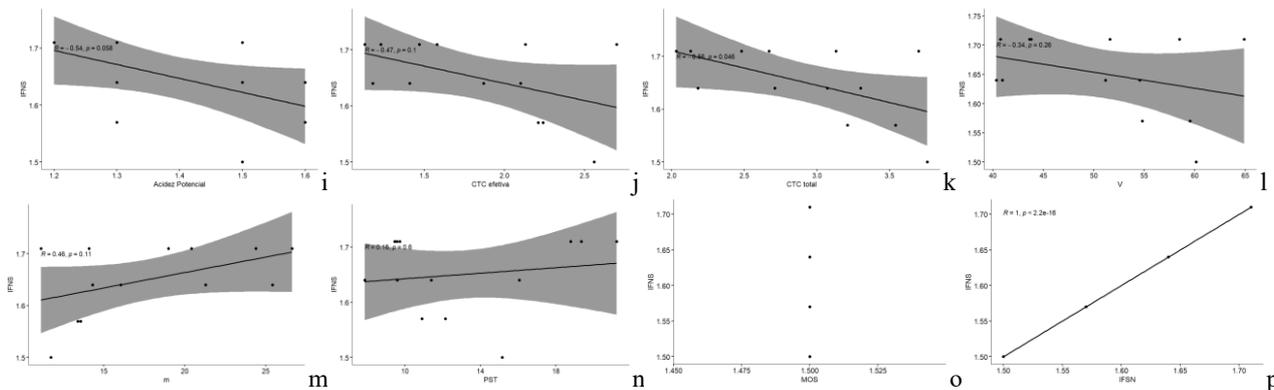
Fonte: autor (2024)

Os resultados demonstram tendência à menor distorção e maior normalidade, na qual a maioria dos atributos apresenta distribuição normal pelos testes. Valores similares foram encontrados por Campos et al. (2013) e por Lima et al. (2015), estudando a variabilidade espacial de atributos físicos do solo.

Na Figura 4 pode-se observar os resultados da correlação não paramétrica entre as variáveis deste trabalho elaborada pelo método de Person, em que somente o pH, PST e m apresentam correlação ascendente, com *p-valor* 0,3; 0,6 e 0,11, respectivamente. As demais correlações apresentam-se descendentes.

Figura 4. Correlação das variáveis.





Observa-se pela Tabela 5 e pelas Figuras 5 e 6, a distribuição espacial dos atributos dos solos. Na distribuição espacial do pH do solo (Figura 5a), observa-se que se distribui em 100% das terras na classe de frequência Alta; a variável P

(Figura 5b) ocorre em 50,74% das terras e apresenta-se na frequência Baixa, seguida da frequência Média (26,97%), Muito Baixa (20,95%), e Alta (1,34%).

Tabela 5. Distribuição espacial das variáveis

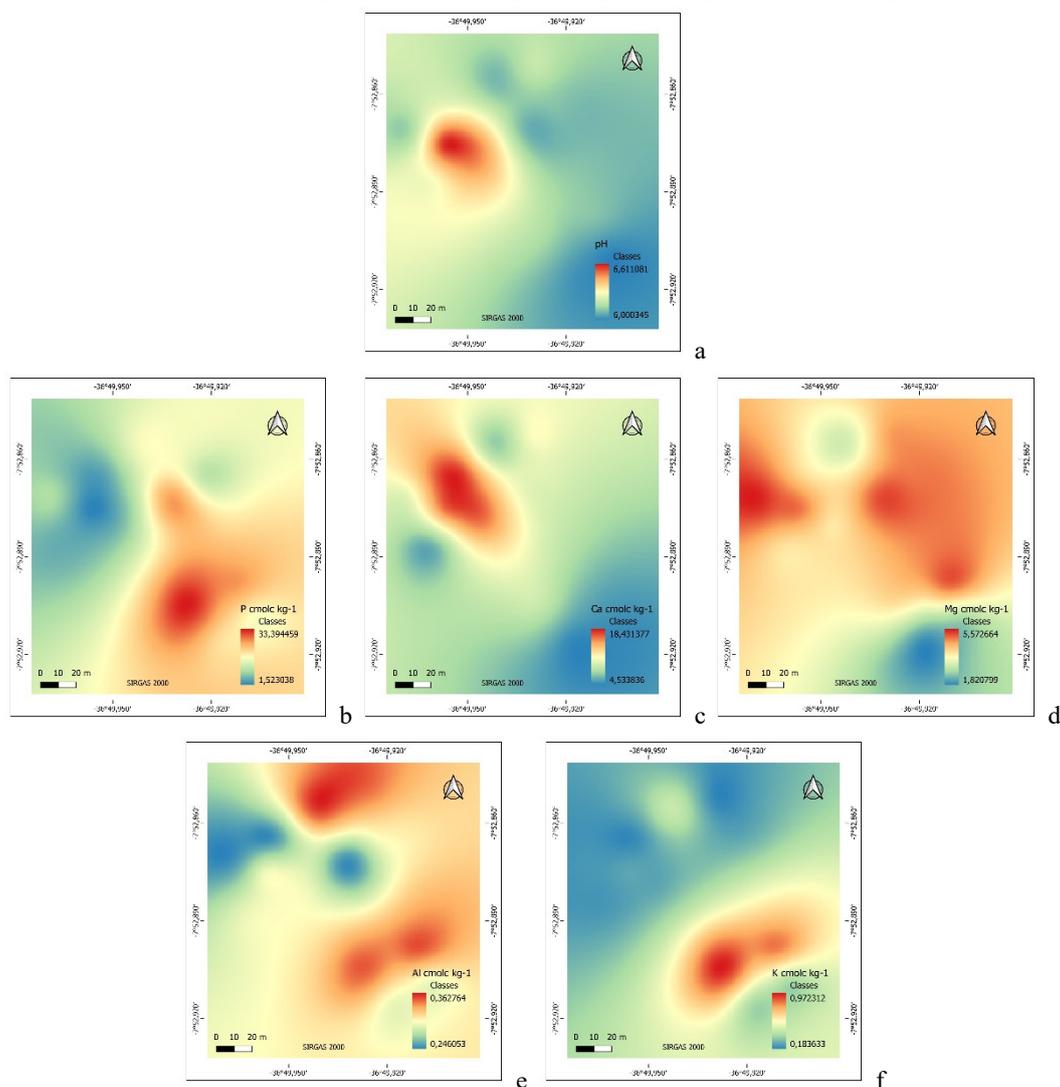
Variável/ Atributo	Classe de Frequência									
	Muito Baixa (5)		Baixa (4)		Média (3)		Alta (2)		Muito Alta (1)	
	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%
pH em Água	-	-	-	-	-	-	0,0254	100,00	-	-
P (cmolc kg <sup>-1</sup> )	0,0053	20,95	0,0129	50,74	0,0069	26,97	0,0003	1,34	-	-
Ca <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	-	-	0,0214	84,30	0,0040	15,70	-	-	-	-
Mg <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	-	-	0,0160	62,96	0,0094	37,04	-	-	-	-
Al <sup>3+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	-	-	0,0254	100,00	-	-
K <sup>+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	-	-	0,0133	52,30	0,0121	47,70	-	-	-	-
SB (cmolc kg <sup>-1</sup> )	-	-	0,0230	90,52	0,0024	9,48	-	-	-	-
Ac. Pot. (H+Al) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	-	-	0,0254	100,00	-	-
CTC (pH 7,0) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	0,0002	0,60	0,0123	48,53	0,0129	50,87
CTC (efetiva) (cmolc kg <sup>-1</sup> )	0,0009	3,47	0,0244	96,03	0,0001	0,50	-	-	-	-
V – Sat. Base (%)	0,0254	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-
m - Saturação por Al (%)	-	-	-	-	-	-	0,0201	78,96	0,0053	21,04
PST (%)	-	-	0,0006	2,20	0,0205	80,73	0,0043	17,06	-	-
MOS (g kg <sup>-1</sup> )	-	-	0,0254	100,00	-	-	-	-	-	-
<b>IFNS</b>	-	-	-	-	-	-	<b>0,0254</b>	<b>100,00</b>	-	-

Fonte: autor (2024)

A variável Ca<sup>2+</sup> (Figura 5c) se distribui em 80,30% da área na frequência de classe Baixa seguida da classe Média contemplando 15,70% das terras. Quanto ao Mg<sup>2+</sup> (Figura 5d), em sua maioria, se apresenta em 62,96% das terras na classe de frequência Baixa, seguida pela classe de frequência Média em

37,04% da área de estudo. Observa-se que o Al<sup>3+</sup> (Figura 5e) se distribui em 100% da área na frequência Alta. A variável K<sup>+</sup> (Figura 5f), se apresenta na classe de frequência Baixa em 52,30%, seguida pela classe de frequência Média em 47,70% da área de estudo.

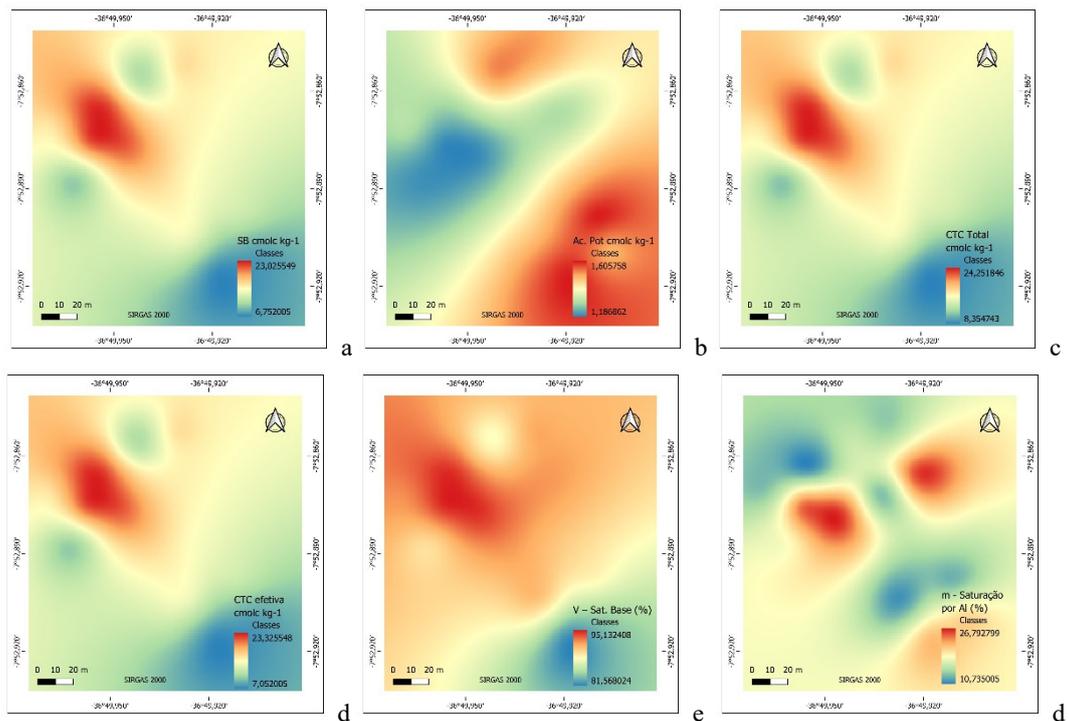
Figura 5. (a) pH do solo (adimensional); (b) P (cmolc kg<sup>-1</sup>); (c) Ca<sup>2+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (d) Mg<sup>2+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (e) Al<sup>3+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>); (f) K<sup>+</sup> (cmolc kg<sup>-1</sup>).



Através das Figuras 6a e 6b observa-se a distribuição espacial dos atributos onde observa-se que a SB se distribui em 90,52% na frequência Baixa seguida da classe Média em 9,48%; a Acidez Potencial, em sua totalidade na classe de frequência Alta. Observa-se que, a CTC Total (Figuras 6c) se distribui em 50,87% das terras na frequência Muito Alta, a classe de frequência Alta contempla 18,53% da área, e a classe de frequência Média somente em 0,60% da área mapeada.

Em relação à CTC efetiva, em sua maioria, se apresenta na classe de frequência Baixa em 90,63% das terras da área de estudo; seguida pelas classes de frequência Muito Baixa e Média em 3,47% e 0,50%, respectivamente. Observa-se que a Saturação de Base – V (%) (Figura 6e) se distribui em sua totalidade na frequência Muito Baixa. Em relação à Saturação por Al - m (%), predomina na maior parte da área de estudo 78,96% na classe de frequência Alta, seguida da frequência Muito Alta em 21,04% das terras.

Figura 6. (a) SB (cmolc kg<sup>-1</sup>); (b) Ac. Pot. (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (c) CTC (pH 7,0) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (d) CTC (efetiva) (cmolc kg<sup>-1</sup>); (e) V – Sat. Base (%); (f) m – Saturação por Al (%).



Em relação ao atributo PST e espacialização, verifica-se na Figura 7a que, se distribui em sua maioria em 80,73% na frequência Média, seguida da classe de frequência Alta em 17,06% e pela Baixa em 2,20% da área. A MOS (Figura 7b) apresenta a totalidade na frequência Baixa.

Pela Figura 8, representativa da distribuição espacial da fertilidade natural da camada superficial dos solos, verifica-se que apresenta maior representatividade na classe de frequência Muito Baixa seguida da classe Baixa.

Figura 7. (a) PST (%); (b) MOS (g kg<sup>-1</sup>).

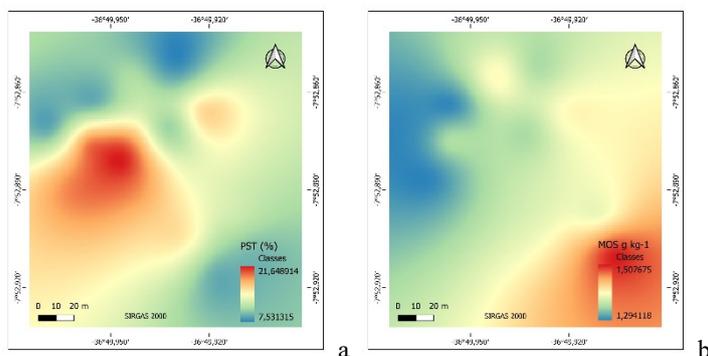
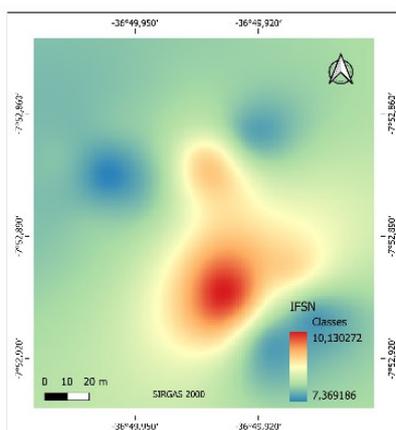


Figura 8. Fertilidade natural da camada superficial dos solos.



Silva (2013), para os Luvisolos da região de São João do Cariri-PB próxima a área de estudo deste trabalho, obteve a classificação textural como franco arenosa. Resultado similar a esta pesquisa.

Saraiva (2017), obteve em área degradada sob solo da região semiárida em Parazinho-RN, valores de areia, argila e silte em  $\text{g kg}^{-1}$  entre 700 a 810; 80 a 120; 100 a 110, respectivamente. Valores similares a este estudo somente quanto a areia, diferindo quanto ao silte e argila. Em Gilbués no Piauí, região semiárida, mas sob Argissolo Vermelho Amarelo, Leite et al. (2015) obtiveram valores de areia inferiores a este trabalho em  $\text{g kg}^{-1}$  entre 519,50 e 614,40 e de silte e argila mais elevados de 389,50 e 91,00, respectivamente. Silva (2013) sob os Luvisolos de região semiárida observou valores de areia, argila e silte em  $\text{g kg}^{-1}$  entre 593 a 724; 62 a 120; 214 a 257, respectivamente. Quando comparado com este trabalho, os valores obtidos quanto ao silte, são mais elevados.

Batista (2015), avaliando os Neossolos Regolíticos; Luvisolos Háplicos e Planossolos Nátricos da região semiárida paraibana observou predominância da fração areia nas três classes de solo, enquanto que a fração argila obteve os mais baixos teores.

Silva et al. (2023), em região próxima a área de estudo deste trabalho, avaliando o pH do solo em São João do Cariri, obtiveram valores que variou de acidez fraca a levemente alcalino, resultado similar a este estudo com acidez fraca (6,01 a 6,6) que conforme Giongo e Cunha (2022) apresenta-se dentro da faixa ótima para o desenvolvimento de diversas culturas. Valores de pH, próximo à neutralidade estão relacionados ao baixo grau de desenvolvimento pedogenético frequentemente observados em solos de regiões semiáridas (CORRÊA et al., 2003). De acordo com Portugal et al. (2010), os maiores valores de pH contribuem para diminuição nos teores de acidez potencial ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ) e acidez trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ); que são considerados tóxicos às plantas.

Os teores de fósforo obtidos por Batista (2015), foram classificados como muito baixo para as classes de solos, o que reflete uma condição geral dos solos tropicais que apresentam baixos teores de P. No entanto, o Luvisolo, os teores foram classificados como médio de acordo com o levantamento feito por Menezes et al. (2005). Resultado similar a este trabalho.

Quanto ao  $\text{Na}^+$ , Silva et al. (2023) observaram valores semelhantes, variando de 0,01 a 0,04  $\text{cmolc kg}^{-1}$ , em que não apresentaram caráter solódico ou sódico, de acordo com a classificação de Ribeiro et al. (1999). Resultado este similar a este estudo.

Silva et al. (2023), ainda afirmam que, os elevados teores de  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$  podem ser atribuídos à condição natural dos solos da região, tendo em vista que, é uma característica típica da região semiárida apresentar altos teores de bases trocáveis. Em Luvisolos, Silva (2013) observou que a SB das amostras em sua maioria apresentou valores superiores a 6  $\text{cmolc dm}^{-3}$ , indicando níveis muito bons de acordo com a classificação proposta por Ribeiro et al. (1999). Valores similares a este trabalho.

Batista (2015), observou que no Luvisolo os teores de  $\text{K}^+$  apresentaram teor de 0,22  $\text{cmolc kg}^{-1}$ . Teores obtidos neste trabalho como valores mínimos, sendo atingido até 0,96  $\text{cmolc kg}^{-1}$ , sendo considerado superior.

Silva (2013), em relação ao teor de  $\text{Al}^{+3}$ , obteve valores que variaram de 0,07 a 0,55  $\text{cmolc kg}^{-1}$ , sendo considerado um teor baixo, segundo Ribeiro et al. (1999). De acordo com Alvarez et al. (1995), o teor de  $\text{Al}^{+3}$  na solução do solo depende do pH do solo, da saturação por alumínio, do

teor de matéria orgânica e da presença de outros íons na solução do solo. Conforme Silva et al. (2004), os níveis de alumínio podem comprometer o crescimento vegetal, afetando o crescimento radicular e influenciando, de diversas formas, na absorção e disponibilidade de nutrientes sendo, por isso, um dos fatores que mais limitam o desenvolvimento das plantas.

A capacidade de troca de cátions expressa à quantidade de cátions que pode ser retida em um determinado solo, indicando assim a sua densidade. Parte dessa carga é permanente e a outra é covalente ou dependente do pH (SILVA, 2013). Quanto ao nível de CTC efetiva e potencial, Silva (2013) obteve maiores valores na área sob vegetação nativa e degradada, o autor afirma que o fato se deve provavelmente aos elevados teores de  $\text{K}^+$  e argila obtidos nas respectivas áreas. Resultado mais elevado comparado a este trabalho. De acordo com Canellas et al. (2000), a capacidade de troca de cátions é influenciada pelo conteúdo de carbono orgânico do solo, principalmente nos horizontes superficiais.

Para Malavolta (2006), de modo geral, a fertilidade química dos solos aumenta com o valor de saturação por bases (V), a qual serve para classificação dos mesmos. Silva (2013) obteve valores acima de 84,36%. No entanto, este trabalho apresenta valores máximos de 64,48%. Ribeiro et al. (1999) relata que, saturação por bases (V) acima de 50% é considerada elevada. Sendo a saturação por bases um excelente indicativo das condições gerais da fertilidade do solo, de acordo com Tomé Júnior (1997).

A área avaliada nesse trabalho apresenta valores baixos de MO (matéria orgânica), podendo ser considerada como degradada. Resultado similar ao de Silva et al. (2023). Os teores de matéria orgânica em áreas degradadas geralmente são baixos, devido principalmente à falta de cobertura vegetal (RIBEIRO et al., 1999). A perda de matéria orgânica em solos semiáridos se dá pela queima de resíduos vegetais, perdas contínuas durante o cultivo, remoção da madeira, aumento de erosão e, decomposição da MOS pela ação da temperatura e elevação da atividade biológica (SANTOS et al., 2021). Silva (2013) observou que, em área degradada, valores baixos entre 1,77 a 1,99  $\text{g kg}^{-1}$ , que de acordo com Ribeiro et al. (1999), onde a concentração de matéria orgânica pode estar relacionada a pontos de solo sem cobertura vegetal, possivelmente lixiviados durante a estação chuvosa. Os teores de matéria orgânica em áreas degradadas geralmente são baixos, devido principalmente à falta de cobertura vegetal.

Batista (2015), concluíram que os Neossolos Regolíticos; Luvisolos Háplicos e Planossolos Nátricos apresentaram uma baixa fertilidade natural. Resultado similar a este trabalho quanto a área dos Luvisolos.

Com a distribuição espacial dos atributos do solo em mapas pode facilitar a tomada de decisão identificando as diferenças dos atributos e/ou adotando práticas conservacionistas como, terraços, cordões de isolamento e outras técnicas. Concordando com Santos et al. (2012) e Lima et al. (2015).

## Conclusão

O uso das técnicas do geoprocessamento e da interpolação demonstraram ser uma ferramenta eficiente e rápida onde apresentou resultados satisfatórios no uso da modelagem por B-Spline multinível no mapeamento do índice de fertilidade natural dos solos.

Os testes de normalidade apresentaram-se semelhantes entre si e a correlação entre a maioria das variáveis apresentaram descendentes.

O uso da geoestatística demonstrou a variabilidade espacial dos dados, em que os valores da média e da mediana ficaram próximos, indicando que estes dados seguiam uma distribuição simétrica.

O baixo teor de P, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup> em cmolc kg<sup>-1</sup>, influenciaram na baixa fertilidade dos solos.

O baixo teor de matéria orgânica (MO), a alta Acidez Potencial (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>) e a CTC total influenciaram na classificação da fertilidade natural dos solos como Muito Baixa e Baixa.

Recomenda-se práticas de controle da erosão e o aumento da matéria orgânica destes solos por técnicas de conservação.

## Referências

- ALVAREZ, R.; DIAZ, R. A.; BARBERO, N.; SANTANATOGLIA, O. J.; BLOTTA, L. Soil organic carbon, microbial biomass and CO<sub>2</sub>-C production from three tillage systems. *Soil and Tillage Research*, v. 33, p. 17-28, 1995. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)00432-E](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)00432-E)
- ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A test of goodness of t. *Journal of American Statistical Association*, v. 49, p. 765-769, 1954. <https://doi.org/10.1080/01621459.1954.10501232>
- BATISTA, F. R. **Fertilidade de diferentes classes de solos sob um gradiente climático da região semiárida**. Monografia (Engenharia Agrônoma). Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2015.
- BRANDÃO, W. Utilização de métodos geoestatísticos de krigeagem ordinária e krigeagem por indicação na interpolação de dados geoquímicos de solos: uma comparação. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 10, 2001, Foz do Iguaçu. Anais...Foz do Iguaçu, 2001.
- BRUINSMA, J. (Ed.). **World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective**. London: Earthscan Publications, 2003. 432p. Disponível em: <https://www.fao.org/3/y4252e/y4252e.pdf>. Acesso em: 10 de junho de 2024.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A. DE; SANTOS, L. A. C. DOS; AQUINO, R. E. DE; SOARES, M. D. R. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. *Revista Agro@mbiente On-line*, v.6, n.1, p.9-16, 2012. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v6i1.689>
- CAMPOS, M. C. C.; QUEIROZ, S. B. Reclassificação dos perfis descritos no Levantamento Exploratório - Reconhecimento de solos do Estado da Paraíba. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v. 6, n. 1, 2006.
- CANELLAS, L. P.; BERNER, P. G.; SILVA, S. G.; SILVA, M. B.; SANTOS, G. A. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma toposequência no Estado do Rio de Janeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 25, n. 1, p. 133-143, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X200000100016>
- CANO, É. V. **Métodos de interpolação da batimetria adquirida por veículo de superfície não tripulado**. 53f. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais, Geoprocessamento Aplicado). Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2022.
- CORREA, M. M.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; RUIZ, H. A.; BASTOS, R. S. Atributos físicos, químicos e mineralógicos da região das várzeas de Sousa-PB. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 2, p. 311-324, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200011>
- DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. de; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/990374/1/ManualdeMtodosdeAnilisedeSolo.pdf>. Acesso em: junho de 2023.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Santos et al. 5ª. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 359p.
- ESRI. **Mapa Topográfico Mundial**. Disponível em: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=30e5fe3149c34df1ba922e6f5bbf808f>. Acesso em: julho de 2024.
- FANTI, C. E. **Reconstrução de superfícies tridimensionais utilizando B-splines com peso associado à redução do número de pontos de controle**. 125f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2016.
- FRANCISCO, P. R. M. **Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas**. 122f. Dissertação (Mestrado). Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2010.
- FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D.; OLIVEIRA, F. P. DE; RIBEIRO, G. DO N.; SILVA, V. F.; SILVINO, G. DA S. Atualização do mapa de solos do Estado da Paraíba utilizando geotecnologias. *Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology*, v. 9, n. 2, p. 20-28, 2023.
- FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D.; OLIVEIRA, F. P. DE; RIBEIRO, G. DO N.; SILVA, V. F.; RODRIGUES, R. C. M. Estimativa da capacidade de troca catiônica e variabilidade espacial dos atributos químicos da camada superficial dos solos do Estado da Paraíba. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v. 23, n. 2, p. 51-65, 2023.
- FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D.; OLIVEIRA, F. P. DE; SILVA, V. F.; RODRIGUES, R. C. M. Índice de fertilidade natural da camada superficial dos solos do Estado da Paraíba modelado através de geotecnologias. *Revista GeoUECE*, v. 13, n. 24, e2024001, 2024. <https://doi.org/10.59040/GEOUECE.2317-028X.v13.n24.e202401>
- FRANCISCO, P. R. M.; SILVA, V. F.; SANTOS, D.; RIBEIRO, G. DO N.; AYRES, G. D. J. Mapping of restrictive factors of land in the hydrographic basin of the middle section of the Paraíba River. *Revista Agroambiental*, v. 14, e20221694, 2022. <https://doi.org/10.18406/2316-1817v14n120221694>
- GIONGO, V.; CUNHA, T. J. F. **Sistema de produção de melão: manejo do solo**. Petrolina: Embrapa. 2022. Disponível em: [http://www.cpatia.embrapa.br:8080/sistema\\_producao/spmelao/manejo\\_do\\_solo.html](http://www.cpatia.embrapa.br:8080/sistema_producao/spmelao/manejo_do_solo.html). Acesso em: 12 julho 2024.
- GRASS-GIS. **Geographic Resource Analysis Support System**. 2024. Disponível em: <http://grass.osgeo.org>.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malhas Territoriais**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 10 de abril de 2024.
- JIANG, Y.; ZHANG, N. Applications of scattered interpolation with multilevel B-splines to magnetic anomaly data. *Near Surface Geophysics*, v. 11, n. 5, p. 579-585, 2013. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013016>
- JOSÉ, J. V.; REZENDE, R.; MARQUES, P. A. A.; GONÇALVES, A. C. A.; SOUZA, R. S. Variabilidade espacial de variáveis físico-hídricas de dois Latossolos da região noroeste do estado do Paraná. *Irriga*, v. 17, n. 2, p. 208-219, 2012. <https://doi.org/10.15809/irriga.2012v17n2p208>

- KAYA, H.; HARDY, D. J.; SKEEL, R. D. Multilevel summation for periodic electrostatics using B-splines. *Journal Chemical Physics*, v. 154, n. 14, e4105, 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0040925>
- LAGACHERIE, P. **Digital soil mapping: a state of the art**. In: HERTMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. *Digital soil mapping with limited data*. Ed. Springer, 2008. p.3-14. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8592-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8592-5_1)
- LEE, S.; WOLBERG, G.; SHIN, S. Scattered data interpolation with multilevel bsplines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 3, n. 3, p. 228-244, 1997. <https://doi.org/10.1109/2945.620490>
- LEITE, L. F. C.; FERREIRA, J. DA S.; VELOSO, M. E. DA C.; MOUSINHO, F. E. P.; ROCHA JUNIOR, A. F. Variabilidade espacial das frações da matéria orgânica do solo em área degradada sob recuperação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 4, p. 394-401, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p394-401>
- LILLIEFORS, H. W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*, v. 62, n. 318, p. 399-402, 1967. <https://doi.org/10.1080/01621459.1967.10482916>
- LIMA, F. V. DE; SILVINO, G. DA S.; MELO, R. S. DE S.; LIRA, E. C.; RIBEIRO, T. DE S. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. *Revista Caatinga*, v. 28, n. 4, p. 53-63, 2015. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n406rc>
- LUCENA, R. L.; PACHECO, C. O Cariri paraibano: aspectos geomorfológicos, climáticos e de vegetação, In: *Encuentro de Geografos de America Latina*, 12, 2009, Montevideu. Anais...Montevideu, 2009.
- LYCHE, T.; MANNI, C.; SPELEERS, H. **Foundations of Spline Theory: B-Splines, Spline Approximation, and Hierarchical Refinement**. In: LYCHE, T.; MANNI, C.; SPELEERS, H. (eds) *Splines and PDEs: From Approximation Theory to Numerical Linear Algebra*. Mathematics, v.2219. Springer, Cham, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94911-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94911-6_1)
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 638p, 2006.
- MARCHETTI, A.; PICCINI, C.; R. FRANCAVIGLIA, R.; MABIT, L. Spatial Distribution of Soil Organic Matter Using Geostatistics: A key indicator to assess soil degradation status in central Italy. *Pedosphere*, v. 22, p. 230-242, 2012. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60010-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60010-1)
- MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Le Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique de Fontainebleau. Paris, 1971. 211p.
- MENEZES, R. S. C.; GARRIDO, M. da S.; PEREZ, M. A. M. Fertilidade dos solos no semiárido. In: *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 30, 2005, Recife. Palestras...Recife: UFPE/SBCS, 2005.
- MENEZES, R. S. C.; SALCEDO, I. H.; ELLIOTT, E. T. Microclimate and nutrient dynamics in a silvopastoral system of semiarid northeastern Brazil. *Agrofor. Syst.*, v. 56, p. 27-38, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1021172530939>
- MOEBIUS-CLUNE, B. N.; ELSEVIERB, I. H.; CRAWFORDC, B. A.; TRAUMANN, N. M.; SCHINDELBECKA, R. R.; ESA, H. M. VAN. Moving authentic soil research into high school classrooms: Student engagement and learning. *Natural Sciences Education*, v. 40, p. 102-113, 2011. <https://doi.org/10.4195/jnrise.2010.0019k>
- MOON, S.; KO, K. A point projection approach for improving the accuracy of the multilevel B-spline approximation. *Journal of Computational Design and Engineering*, v. 5, p. 173-179, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.10.004>
- NOËL, L.; SCHMIDT, M.; MESSE, C.; EVANS, J. A.; MAUTE, K. Adaptive level set topology optimization using hierarchical B-splines. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 62, p. 1669-1699, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02584-6>
- OLIVEIRA, D. P. DE; FERREIRA, T. O.; ROMERO, R. E.; FARIAS, P. R. S.; COSTA, M. C. G. Microrrelevo e a distribuição de frações granulométricas em Cambissolos de origem calcária. *Revista Ciência Agronômica*, v. 44, n. 4, p. 676-684, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000400003>
- OSORIO, D. S. Á.; LEÓN, J. C. M.; CONTRERAS, A. C. Bathymetric digital models generated by interpolation methods IDW, Kriging, Shepard and B-Spline in the archipelago of Rosario islands. *Revista Geomática*, v. 5, p. 3-14, 2011.
- PEARSON, K. Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, v. 58, p. 240-242, 1895. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>
- POLIZELLI JÚNIOR, V. **Métodos implícitos para reconstrução de superfícies a partir de nuvens de pontos**. 132f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional). Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.
- PORTUGAL, A. F.; JUNCKSH, I.; SCHAEFER, C. E. R. G.; NEVES, J. C. L. Estabilidade de agregados em Argissolo sob diferentes usos, comparado com mata. *Revista Ceres*, v. 57, n. 4, p. 545-553, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000400018>
- PRADO, R. B.; BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; POLIDORO, J. C.; DART, R. O.; NAUMOV, A. **Mapping potassium availability from limited soil profile data in Brazil**. In: HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. (Ed.). *Digital soil mapping with limited data*. Wageningen: Springer, 2008. p.91-101. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8592-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8592-5_8)
- QGIS. Development Team. **QGIS Geographic Information System**. 2024. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>.
- R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2024.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. 360p.
- SABINO, S. M. L.; MACEDO, D. R. Relação entre dados pluviométricos primários e modelos geoestatísticos interpolados em escala global. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 19, 2019, Santos. Anais...Santos, 2019.
- SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B. G. DE; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANDRADE, T. DA S.; FONTES JÚNIOR, R. V. DE P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 8, p. 828-835, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000800003>
- SANTOS, U. J.; SAMPAIO, S. B. E. V.; ANDRADE, E. M. Nitrogen stocks in soil classes under different land uses in the Brazilian semiarid region. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 21, n. 1, p. 1621-1630, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00466-4>
- SARAIVA, S. A. M. **Recuperação de área degradada com o cultivo da palma forrageira (*Opuntia stricta haw*) adubada com biossólido**. 75f. Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Natal, 2017.
- SHAPIRO, A. S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- SILVA, D. R. DA. **Qualidade do solo em diferentes condições de uso no semiárido paraibano**. 55f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2013.

SILVA, D. R. DA; OLIVEIRA, F. P. DE; SILVA, P. L. F. DA; MARTINS, A. F. Qualidade do solo sob diferentes condições de uso no semiárido paraibano. **Revista Valore**, v.8, n. ed. esp., p.25-36, 2023. <https://doi.org/10.22408/rev802023114525-36>

SILVA, J. M. C. T. M.; FONSECA, M. T. **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. Ministério do Meio Ambiente. Universidade Federal de Pernambuco. Brasília, 2004.

SILVA, N. F. DA; CUNHA, F. N.; OLIVEIRA, R. C. DE; CABRAL FILHO, F. R.; TEIXEIRA, M. B.; CARVALHO, J. J. Características físico-hídricas de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 8, n. 5, p. 375-390, 2014. <https://doi.org/10.7127/rbai.v8n500245>

SOUZA, Z. M. DE; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Small relief shape variations influence spatial variability of soils chemical attributes. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 2, p. 161-168, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000200008>

TOMÉ JÚNIOR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247p.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: NOVAIS, R. F.; ALVARES, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). *Tópicos em Ciência do Solo*. v.1. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. cap.6. p.1-54.