



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



A variabilidade granulométrica determina a distribuição de carbono orgânico e atributos físicos do solo em semeadura direta¹

Diandra Pinto Della Flora¹, Jorge Wilson Cortez², Michely Tomazi³, Felipe Cardoso Serpa⁴, Dario Alexandre Schwambach⁵

¹ Dra. em Agronomia, Timac Agro, CEP 79800-000, Dourados, Mato Grosso do Sul. (55) 99606-0999. diandradellaflora@gmail.com (autor correspondente). ² Dra. em Agronomia, Universidade Federal da Grande Dourados, Rodovia Dourados/Itahum, Km 12 – Unidade II, Caixa Postal 364, CEP 79804970, Dourados, Mato Grosso do Sul. (67) 3410-2432. jorgecortez@ufgd.edu.br. ³ Dra. Pesquisadora, Embrapa Agropecuária Oeste, Rodovia BR 163, Km 253, Zona Rural, CEP 79804-970, Dourados, Mato Grosso do Sul. (67) 99647-3454. michely.tomazi@embrapa.br. ⁴ M. Sc. em Zootecnia, Universidade Federal da Grande Dourados, Rodovia Dourados/Itahum, Km 12 – Unidade II, Caixa Postal 364, CEP 79804970, Dourados, Mato Grosso do Sul. (55) 99676-6785. felipe.c.serpa@gmail.com. ⁵ M.Sc. em Engenharia Agrícola, Universidade Federal da Grande Dourados, Rodovia Dourados/Itahum, Km 12 – Unidade II, Caixa Postal 364, CEP 79804970, Dourados, Mato Grosso do Sul. (67) 99963-4584. dario_schwambach@yahoo.com.

Artigo recebido em 25/02/2024 e aceito em 28/01/2025

RESUMO

A granulometria do solo, que representa a distribuição quantitativa das partículas sólidas minerais, controla a maioria dos processos físicos, químicos e biológicos nos solos, e apresenta alta heterogeneidade espacial. Dessa forma, objetivou-se avaliar a variabilidade espacial da granulometria, dos atributos físicos e carbono orgânico do solo, em área de semeadura direta. O trabalho foi realizado em fazenda comercial, localizada em Ponta Porã/MS, cultivada sob semeadura direta. Os dados foram coletados por meio de grade amostral, com 73 pontos, sendo uma amostra a cada 1,7 ha. Foram avaliados os atributos de solo areia, argila, silte, areia fracionada, macro e microagregação, diâmetro médio ponderado, índice de estabilidade de agregados e carbono orgânico. Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva e geoestatística, e os mapas de variabilidade elaborados por meio do interpolador krigagem. A variabilidade granulométrica interferiu na distribuição de macro e microagregados, diâmetro médio ponderado, índice de estabilidade de agregados e carbono orgânico do solo. O sistema de semeadura direta foi eficiente na manutenção da estrutura do solo, porém, não assegurou índices adequados de carbono orgânico.

Palavras-chave: textura, agregação, índice de estabilidade de agregados, geoestatística, fracionamento da areia.

The granulometric variability determines the distribution of organic carbon and physical attributes of the soil in no-tillage

ABSTRACT

Soil granulometry, which represents the quantitative distribution of solid mineral particles, controls most physical, chemical and biological processes in soils, and presents high spatial heterogeneity. Thus, the objective was to evaluate the variability of granulometry in the distribution of physical attributes and soil organic carbon, in no-tillage. The work was carried out on a commercial farm, located in Ponta Porã / MS, cultivated under direct seeding. Data were collected using a sampling grid, with 73 points, with one sample every 1.7 ha. Soil attributes sand, clay, silt, fractionated sand, macro and microaggregation, weighted average diameter, aggregate stability index and organic carbon were evaluated. Data were analyzed using descriptive and geostatistical statistics, and variability maps were prepared using the kriging interpolator. The granulometric variability interfered in the distribution of macro and microaggregates, weighted average diameter, aggregate stability index and soil organic carbon. The no-till system was efficient in maintaining the soil structure; however, it did not ensure adequate levels of organic carbon.

Keywords: texture, aggregation, aggregate stability index, geostatistics, sand fractionation.

¹ Extraído da tese de Doutorado da primeira autora como bolsista CAPES.

Introdução

A granulometria do solo representa a distribuição quantitativa das partículas sólidas minerais relacionadas ao tamanho, sendo considerada uma das características físicas mais estáveis (Parahyba et al., 2019). A textura do solo, característica que controla a maioria dos processos físicos, químicos e biológicos nos solos, apresenta alta heterogeneidade espacial (Liu et al., 2020).

A estrutura do solo, quando alterada negativamente, pode afetar atributos como densidade, porosidade, distribuição do diâmetro dos poros, armazenamento e disponibilidade de água para as plantas, dinâmica da água na superfície e no perfil do solo e esgotamento da estrutura do solo, resultando no processo de compactação do solo, ou seja, na consolidação física das partículas do solo contra uma força aplicada (Ghosh et al., 2020; Oliveira et al., 2021; Mantovanelli et al., 2022).

Na produtividade agrícola, além dos cuidados com a fertilidade, deve-se buscar adequadas condições físicas ao solo durante o desenvolvimento das culturas (Cortez et al., 2018). A qualidade física do solo é vital para identificar práticas de manejo para uso sustentável da terra e avaliar a extensão da sua degradação (Crespo et al., 2021). As mudanças na qualidade do solo podem ser identificadas por meio de seus atributos físicos (Torres et al., 2022).

A estrutura do solo é definida pela disposição das unidades, conhecidas como agregados, podendo ser denominados micro e macroagregados, dependendo do seu tamanho (Okolo et al., 2020). Fatores como teor de argila, silte e areia, mineralização, agentes de ligação, substâncias e exudatos orgânicos, teor de matéria orgânica, carbono orgânico, são condicionantes da formação de agregados.

A variabilidade espacial dos atributos físicos do solo tem sido foco de diversos estudos (Awal et al. 2019; Gelain et al., 2021). Um importante indicador da qualidade do solo é sua variabilidade espacial (George et al., 2021), resultado direto dos fatores de formação do solo como clima, organismos vivos e material de origem.

Estes e outros estudos voltados para o monitoramento da qualidade do solo por meio da análise dos atributos físicos são essenciais para a definição de sistemas agrícolas sustentáveis. De acordo com Cortez et al. (2018), o grande desafio

da sustentabilidade nos sistemas de produção está na quantidade e qualidade dos resíduos culturais provenientes da semeadura direta.

A adoção do sistema plantio direto traz inúmeros benefícios na manutenção da qualidade do solo como melhorias na macroporosidade e estabilidade de agregados (Velooso et al., 2019), aumento na concentração de carbono orgânico, melhorias na estrutura física do solo (Kumar et al. 2019).

Assim, se faz necessário de um entendimento mais amplo em relação a multifuncionalidade dos sistemas de cultivo, sendo fundamental a elaboração de planos alternativos de gestão inteligentes, que permitam planejamento e intervenções especializadas e localizadas, considerando as particularidades existentes em cada área. Para isso, é necessário conhecer a variabilidade espacial dos atributos do solo para a tomada de decisão quanto ao manejo a ser adotado.

Portanto, objetivou-se avaliar a variabilidade espacial da granulometria, dos atributos físicos e do carbono orgânico do solo, em área comercial no sistema de semeadura direta.

Material e métodos

Localização e Caracterização da Área Experimental

O trabalho foi realizado em uma fazenda comercial, localizada no município de Ponta Porã – MS, cultivada no sistema de sequeiro e adota a semeadura direta a mais de 30 anos. O local situa-se em na latitude de 22°22' S, longitude de 55°10' W e altitude média de 440 m (Figura 1).

O clima é do tipo quente e temperado do tipo Cfa tendo 21.3°C de temperatura média e 1352 mm de pluviosidade média anual (Ritter et al., 2021).

O solo da área é um Latossolo Vermelho distrófico, com relevo suavemente ondulado (Santos et al., 2018).

A área avaliada possui 120,6 hectares, cultivados com o predomínio do sistema de sucessão soja e milho safrinha, em semeadura direta a mais de 30 anos.

Os insumos utilizados estão descritos na Tabela 1. O uso de herbicida, inseticida e fungicida foram utilizados conforme recomendação técnica.

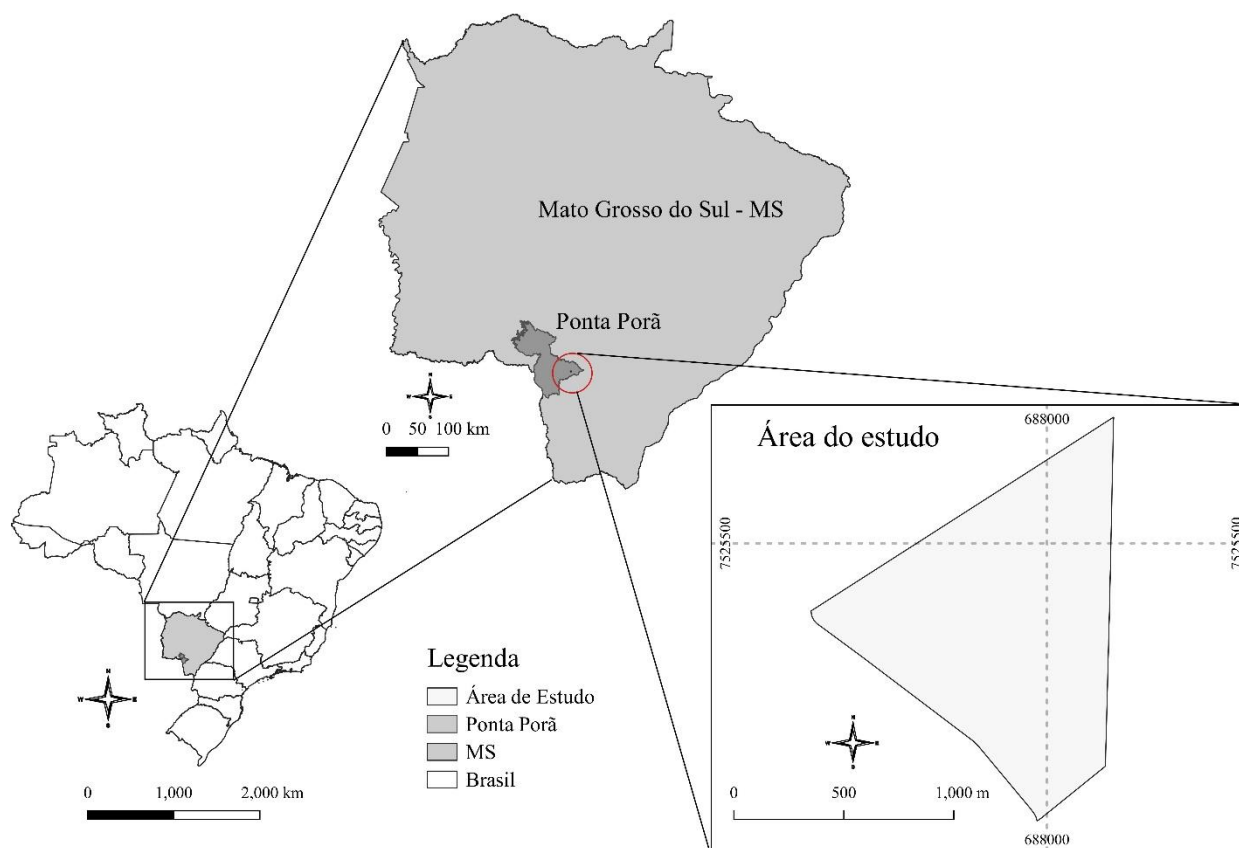


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo deste trabalho, Ponta Porã-MS.

Tabela 1. Histórico de culturas e de aplicação de fertilizantes e corretivos na área de estudo.

Ano agrícola	Safr	Cultura	Correção/Adubação		
			Fonte	Quantidade (kg/ha)	Modo de aplicação
2017/18	Outono	Milho 2ª safra	NPK ¹ 16-16-16	160	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	300	Linha
2018/19	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	160	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	297	Linha
2019/20	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	260	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	300	Linha
2020/21	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	260	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	320	Linha
2021/22	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	260	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	310	Linha

¹Nitrogênio-Fósforo-Potássio.

Amostragem do solo

Para a espacialização das coletas de atributos físicos do solo na área foi gerado grade amostral (Figura 2), em que 60 pontos foram alocados de forma regular com um ponto a cada 2,0 ha (143,61 x 143,61 m) somados 13 pontos

amostrais (o equivalente a aproximadamente 20% dos pontos da grade amostral original), alocados de forma aleatória conforme a variabilidade espacial da produtividade observada nos mapas de colheita de milho e soja para os anos de 2018 e 2019. Portanto, a grade amostral adotada possuiu 73

pontos amostrais na densidade de 01 amostra a cada 1,7 hectares.

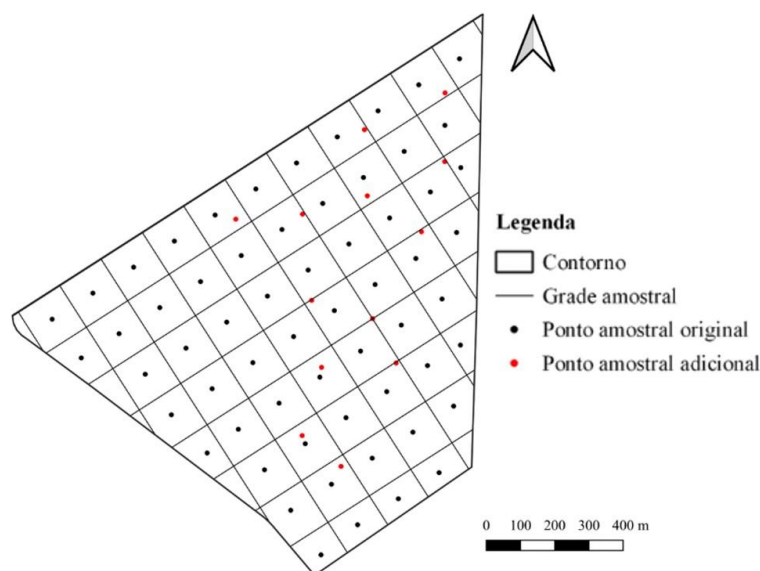


Figura 2. Grade amostral com ponto regular (ponto amostral original) e adicional (ponto amostral adicional) para a coleta de amostras de solo, Ponta Porã-MS.

Para determinação dos atributos de solo, foram coletadas cinco subamostras por ponto amostral, na camada de 0,00 - 0,20 m. Todos os atributos foram analisados por meio da metodologia proposta por Teixeira et al. (2017).

Após determinar a quantidade da fração total de areia (Teixeira et al., 2017) com peneira de malha 0,053 mm, esse material passou manualmente em peneiras com malhas diversas sendo classificado em (Santos et al., 2013): areia muito grossa (2,0 - 1,0 mm), areia grossa (1,0 - 0,5 mm), areia média (0,5 - 0,25 mm), areia fina (0,25 - 0,105 mm) e areia muito fina (0,105 - 0,053 mm).

Análise dos dados

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística exploratória (estatística descritiva), obtendo-se medidas de posição (mínimo, média e máximo) e de dispersão (desvio padrão, coeficientes de variação (CV%), assimetria e de curtose). Com base nos valores de assimetria (C_s) obtidos, visando caracterizar quanto e como a distribuição de frequências se afasta da simetria, foram classificados como: $C_s = 0$ distribuições simétricas, $C_s > 0$ distribuições assimétricas à direita e $C_s < 0$ distribuições assimétricas à esquerda. Os valores de curtose (C_k), que expressam a dispersão (achatamento) da distribuição em relação a um padrão, geralmente utilizada a curva normal, foram classificados em: $C_k = 0$ distribuição mesocúrtica,

$C_k < 0$ distribuição platicúrtica e $C_k > 0$ distribuição leptocúrtica.

A dispersão relativa dos dados, fornecida pelos valores de coeficiente de variação (CV%), serão classificadas como baixa quando CV for inferior a 10% (alta precisão), média quando o CV estiver entre 10% e 20% (boa precisão), alta de 20% a 30% (baixa precisão) e muito alta com CV maior que 30% (baixíssima precisão) (Pimentel-Gomes, 2009).

A hipótese de normalidade foi testada pelo teste de Shapiro e Wilk (W , $p < 0,05$), sendo considerados como distribuição normal os dados que obtiveram p -valor $> 0,05$.

A análise geostatística foi realizada utilizando semivariogramas experimentais sendo os ajustes realizados por meio de modelos teóricos. A determinação dos modelos foi ajustada com base no melhor coeficiente de determinação (r^2) e avaliados pela técnica de validação cruzada, por meio do melhor coeficiente angular e menor erro quadrático médio (RMSE). Do ajuste de um modelo matemático aos dados, foram definidos os seguintes parâmetros: efeito pepita (C_0), contribuição (C_1), patamar ($C_0 + C_1$) e alcance (a). O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado por meio da equação: $IDE = [C_0 / (C_0 + C_1)] * 100$. Com base nos IDE, foi classificado o grau de dependência espacial (GDE) como: forte, para $IDE \leq 25\%$; moderado, para IDE entre 25 e 75%; e fraco, para $IDE > 75\%$ (Cambardella et al., 1994 citado por Othmani et al. 2023).

A espacialização foi procedida por meio da interpolação por Krigagem para a construção dos mapas temáticos dos atributos estudados. Tanto a análise geoestatística como a espacialização por

meio da krigagem foi utilizando o complemento Smart-Map (Pereira et al., 2022) do software de plataforma livre o QGIS (Qgis, 2022).

Resultados e discussão

Quando avaliado a média das frações granulométricas, não foi possível observar domínio entre as frações argila e areia. As frações texturais são estáveis, apresentando pouca modificação ao longo do tempo (Tabela 2), classificado como alto

(para teor de argila) e muito alto (para teores de areia e silte) (Tabela 2), que reflete a variação espacial da área.

Pela análise textural (Figura 3), considerando a classificação de Santos et al. (2018), o solo da área de estudo é considerado argiloso.

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos físicos do solo na camada de 0,00 - 0,20 m, da área em estudo.

Atributo	Mínimo	Média	Máximo	Dp ¹	CV ²	Cs ³	Ck ⁴	W ⁵
Areia (g kg ⁻¹)	253,19	457,48	754,74	141,08	30,84	0,2579	-1,0529	0,979*
Silte (g kg ⁻¹)	27,06	114,23	173,28	36,48	31,93	-0,4605	-0,6805	0,983*
Argila (g kg ⁻¹)	218,20	428,29	606,22	107,50	25,10	-0,1135	-1,0608	0,986 ^{ns}
MG (g kg ⁻¹) ⁶	0,00	0,98	5,25	1,15	118,01	1,8837	3,9793	0,930*
G (g kg ⁻¹) ⁷	7,25	19,68	37,50	6,83	34,68	0,2906	-0,3940	0,993 ^{ns}
M (g kg ⁻¹) ⁸	55,50	120,05	248,00	42,97	35,79	0,8930	0,2031	0,963*
F (g kg ⁻¹) ⁹	100,75	249,86	463,75	96,65	38,68	0,2263	-0,9941	0,983 ^{ns}
MF (g kg ⁻¹) ¹⁰	21,75	67,32	106,75	16,30	24,21	-0,2766	0,5012	0,991 ^{ns}
DMPs (mm) ¹¹	3,13	4,30	4,99	0,36	8,43	-0,5758	0,8336	0,985 ^{ns}
DMPu (mm) ¹²	1,95	3,60	4,39	0,51	14,23	-1,2660	1,7900	0,952*
Macro (%) ¹³	82,32	90,47	96,28	3,42	3,79	-0,6077	-0,3525	0,979*
Micro (%) ¹⁴	3,72	9,53	17,68	3,42	35,93	0,6077	-0,3525	0,979*
IEA (%) ¹⁵	49,51	83,51	92,38	7,90	9,46	-2,1564	5,5096	0,881*
CO (g kg ⁻¹) ¹⁶	8,04	12,95	18,10	2,25	17,36	0,0856	-0,6845	0,994 ^{ns}

¹DP: Desvio padrão; ²CV%: Coeficiente de variação; ³Cs: Coeficiente de assimetria; ⁴Ck: Coeficiente de curtose; ⁵Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde (*) significativo em níveis de $p < 0,05$ e (^{ns}) não significativo. Quando significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada. Fracionamento da areia - ⁶MG: muito grossa; ⁷G: grossa; ⁸M: média; ⁹F: fina; ¹⁰MF: muito fina. ¹¹DMPs: diâmetro médio ponderado seco; ¹²DMPu: diâmetro médio ponderado úmido; ¹³Macro: macroagregados; ¹⁴Micro: microagregados; ¹⁵IEA: índice de estabilidade de agregados; ¹⁶CO: carbono orgânico.

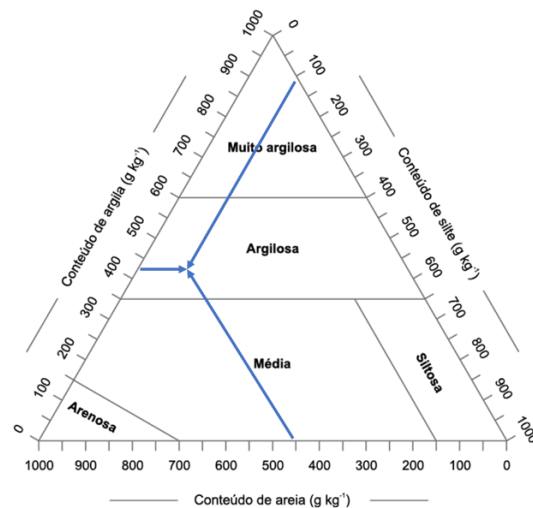


Figura 3. Classificação da textura do solo conforme Santos et al. (2018).

Quanto à distribuição granulométrica das partículas da fração areia, observou-se predominância de areia fina e média (Tabela 2), que juntas somam 83,8% da areia total, seguidos da fração muito fina ($67,32 \text{ g kg}^{-1}$), grossa ($19,68 \text{ g kg}^{-1}$) e muito grossa ($0,98 \text{ g kg}^{-1}$).

A partir do fracionamento da areia total (AT), pode-se ainda verificar se há predominância pronunciada de uma fração em relação a outra, por meio da relação entre AG/AF e AT/AF. Pode-se considerar que o solo da área desse estudo possui alta capacidade de ajustes de suas partículas granulométricas, visto que apresentou relações AG/AF de 0,44 e AT/AF de 1,44.

O DMP, estimativa da quantidade relativa de solo em cada classe de agregados, apresentou média variando de 3,60 a 4,30 mm (úmido e seco, respectivamente) (Tabela 2). Quanto maior a porcentagem de agregados retidos nas peneiras com maiores malhas, maior será o valor de DMP (Fachin e Thomaz, 2020). O valor limite para DMP, proposto por Tisdall e Oades (1982), é de 0,5 mm, sendo que DMP muito próximos a esse valor são considerados pouco resistentes ao esboroamento e à dispersão de seus agregados.

Os agregados foram classificados como macroagregados ($> 0,25 \text{ mm}$) e microagregados ($< 0,25 \text{ mm}$) (Oliveira et al., 2019). Foi possível observar domínio da fração de macroagregados (90,47 %) sobre microagregados (9,53%) (Tabela 2).

O IEA, diferentemente do DMP, não considera a distribuição por classe de agregados. Segundo Singh et al. (2019) a estabilidade agregada de um solo reflete sua resistência estrutural contra forças destrutivas (mecânicas ou físico-químicas). O IEA (Tabela 2) foi de 83,51 %, indicativo de melhor estrutura espacial.

O teor médio de carbono ($12,95 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 2) foi classificado como baixo ($< 13,90 \text{ g kg}^{-1}$) (Sousa e Lobato, 2004), chegando a adequado em algumas áreas com teores acima de 17,40, atingindo máxima em $18,10 \text{ g kg}^{-1}$. De acordo com Wulannityas et al. (2021) o carbono orgânico é a chave para manter a qualidade e a saúde do solo.

Os índices de assimetria e curtose (Tabela 2) foram próximos de zero para a maioria dos atributos, com exceção do MG e IEA que se afastaram acentuadamente de zero. Nesse contexto, apenas os atributos argila, frações de areia G, F e MF, DMPs e CO ajustaram-se à distribuição normal determinada pelo teste Shapiro-Wilk. Apesar da condição de normalidade na distribuição dos dados não ser uma exigência para a análise geoestatística (Magano et al., 2023), estes não

podem apresentar assimetria muito acentuada (Lopes et al., 2020), pois a distribuição de dados pode comprometer a krigagem.

Os dados do coeficiente de variação (CV) conforme Pimentel Gomes (2009) indicam valores muito alto para o IEA, F, Micro, M, G, Silte e Areia (Tabela 2). Apenas os atributos Macro, DMPs e IEA apresentaram valores de $CV < 10 \%$, indicando valores baixos de variabilidade.

Os modelos que mais se ajustaram aos parâmetros do semivariograma (Tabela 3) foram o esférico e o exponencial, com exceção do DMPs e IEA que se ajustaram aos modelos gaussiano e linear com patamar, sucessivamente. Para os atributos de solo, os modelos teóricos esférico e exponencial são os que mais comumente se ajustam (Lopes et al., 2020).

No ajuste do modelo matemático dos semivariogramas experimentais foi observado, durante os critérios de seleção, sendo considerado na técnica da validação cruzada o maior coeficiente angular (a) e menor erro quadrático médio (RMSE). Sendo que os atributos apresentaram coeficiente angular da validação cruzada (a) acima de 0,62 (Tabela 3), indicando que os semivariogramas apresentam ajustes adequados, capazes de captar as estruturas de variação espacial do meio amostral. Quanto mais próximos de 1 os valores da validação cruzada, maior a confiabilidade e maior a eficiência do modelo apresentado (Wang et al., 2023).

Os valores de efeito pepita (Tabela 3) foram próximos a zero para quase todos os atributos, exceto fração de areia MF (85,02) e IEA (48,61), o que refletiu no grau de dependência espacial classificado como moderado e fraco para estes atributos, respectivamente. O DMPs, apesar de apresentar efeito pepita próximo a zero (0,11), resultou em modelo de dependência espacial fraco devido ao baixo valor do patamar (0,14). Os demais atributos apresentaram forte GDE, segundo os critérios propostos por Cambardella et al., (1994) citado por Othmani et al. (2023).

Variáveis que apresentam forte dependência espacial estão relacionadas a propriedades intrínsecas do solo (fatores de formação), enquanto dependência espacial moderada deve-se à homogeneização do solo e dependência espacial fraca às propriedades extrínsecas (Cambardella et al., 1994 citado por Othmani et al., 2023).

Os maiores alcances (Tabela 3) foram observados para as frações de areia MF (893,94 m) e MG (789,25 m), demonstrando que estes atributos apresentam menor variabilidade e maior

continuidade espacial, permitindo melhor precisão na estimativa em locais não amostrados. O alcance representa a distância máxima entre dois pontos para que estes estejam correlacionados espacialmente, indicando que pontos localizados numa área de raio igual ou menor ao alcance são mais homogêneos entre si (Lopes et al., 2020). Os

valores de alcance variaram entre 160,41 e 893,94 m, indicando que a distância utilizada para coleta das amostras de solo neste estudo foi adequada para captar a variabilidade espacial dos atributos avaliados.

Tabela 3. Parâmetros para o ajuste dos semivariogramas dos atributos estudados.

Atributo	Modelo	Semivariograma			Validação cruzada		Dependência espacial	
		C ₀ ¹	C ₀ +C ₁ ²	A ³	a ⁴	RMSE ⁵	IDE ⁶	GDE ⁷
Areia (g kg ⁻¹)	Esférico	0,00	21683,93	441,95	1,04	74,14	0,00	Forte
Silte (g kg ⁻¹)	Esférico	0,00	1436,27	359,10	1,03	20,71	0,00	Forte
Argila (g kg ⁻¹)	Esférico	0,00	12668,46	472,05	1,02	57,82	0,00	Forte
MG (g kg ⁻¹) ⁸	Esférico	0,24	1,64	789,25	0,99	0,87	14,80	Forte
G (g kg ⁻¹) ⁹	Exponencial	0,00	48,64	304,55	0,88	5,77	0,00	Forte
M (g kg ⁻¹) ¹⁰	Exponencial	0,00	2059,24	454,80	0,99	30,16	0,00	Forte
F (g kg ⁻¹) ¹¹	Esférico	0,00	10255,02	465,03	1,04	51,25	0,00	Forte
MF (g kg ⁻¹) ¹²	Esférico	85,02	318,95	893,94	0,97	11,81	26,66	Moderado
DMPs (mm) ¹³	Gaussiano	0,11	0,14	249,6	0,62	0,36	78,42	Fraco
DMPu (mm) ¹⁴	Exponencial	0,00	0,27	160,41	0,62	0,49	0,00	Forte
Macro (%) ¹⁵	Esférico	0,06	12,25	346,06	1,00	2,15	0,47	Forte
Micro (%) ¹⁶	Esférico	0,06	12,25	346,06	0,99	2,18	0,47	Forte
IEA (%) ¹⁷	Linear com patamar	48,61	63,07	238,48	0,80	7,27	77,07	Fraco
CO (g kg ⁻¹) ¹⁸	Exponencial	0,01	5,45	446,84	1,00	1,72	0,13	Forte

¹C₀: efeito pepita; ²C₀+C₁: patamar; ³A: alcance (m); ⁴a: coeficiente angular; ⁵RMSE: raiz quadrada do erro médio; ⁶IDE: índice de dependência espacial; ⁷GDE: grau de dependência espacial. Fracionamento da areia - ⁸MG: muito grossa; ⁹G: grossa; ¹⁰M: média; ¹¹F: fina; ¹²MF: muito fina. ¹³DMPs: diâmetro médio ponderado seco; ¹⁴DMPu: diâmetro médio ponderado úmido; ¹⁵Macro: macroagregados; ¹⁶Micro: microagregados; ¹⁷IEA: índice de estabilidade de agregados; ¹⁸CO: carbono orgânico.

Nos mapas de variabilidade dos teores de areia, silte e argila (Figura 4), os valores médios de cada atributo foi agrupado em cinco classes de cores, o que permitiu verificar a variabilidade granulométrica ao longo da área. O comportamento dos teores de argila e silte foram contrários aos da fração areia. Segundo Liu et al. (2020), a textura do solo frequentemente apresenta alta heterogeneidade espacial, sendo uma importante propriedade que controla a maioria dos processos físicos, químicos e biológicos. Apesar da sua alta variabilidade, a granulometria do solo é uma das características físicas mais estáveis (Parahyba et al. 2019), apresentando pouca ou nenhuma alteração ao longo do tempo.

Pelas espacializações de areia e argila verifica-se que a região sudoeste/noroeste da área apresenta a maior concentração de argila e menor de areia (Figura 4A e B). Essa região também

indica as maiores concentrações de silte na área (Figura 4C).

Como citado anteriormente, na classificação de Santos et al. (2018), os dados médios indicam um solo argiloso. Mas ao observar as espacializações os valores de argila oscilam desde regiões, muito argilosas (>60% de argila), argilosas (35 a 60% de argila) e média (>35% de argila).

Assim, os dados médios podem levar a interpretações equivocadas de manejo, sendo de extrema relevância o mapeamento da área com grades amostrais regulares para permitir captar a variabilidade da granulometria na área.

Shwambach et al. (2021) estudando nessa mesma área a relação da produtividade e textura do solo para gerar zonas de manejo, afirmaram que em áreas com teor de argila discrepantes podem ser feitas zonas de manejo a partir desse atributo

isolado, ou seja, apenas utilizando o componente argila.

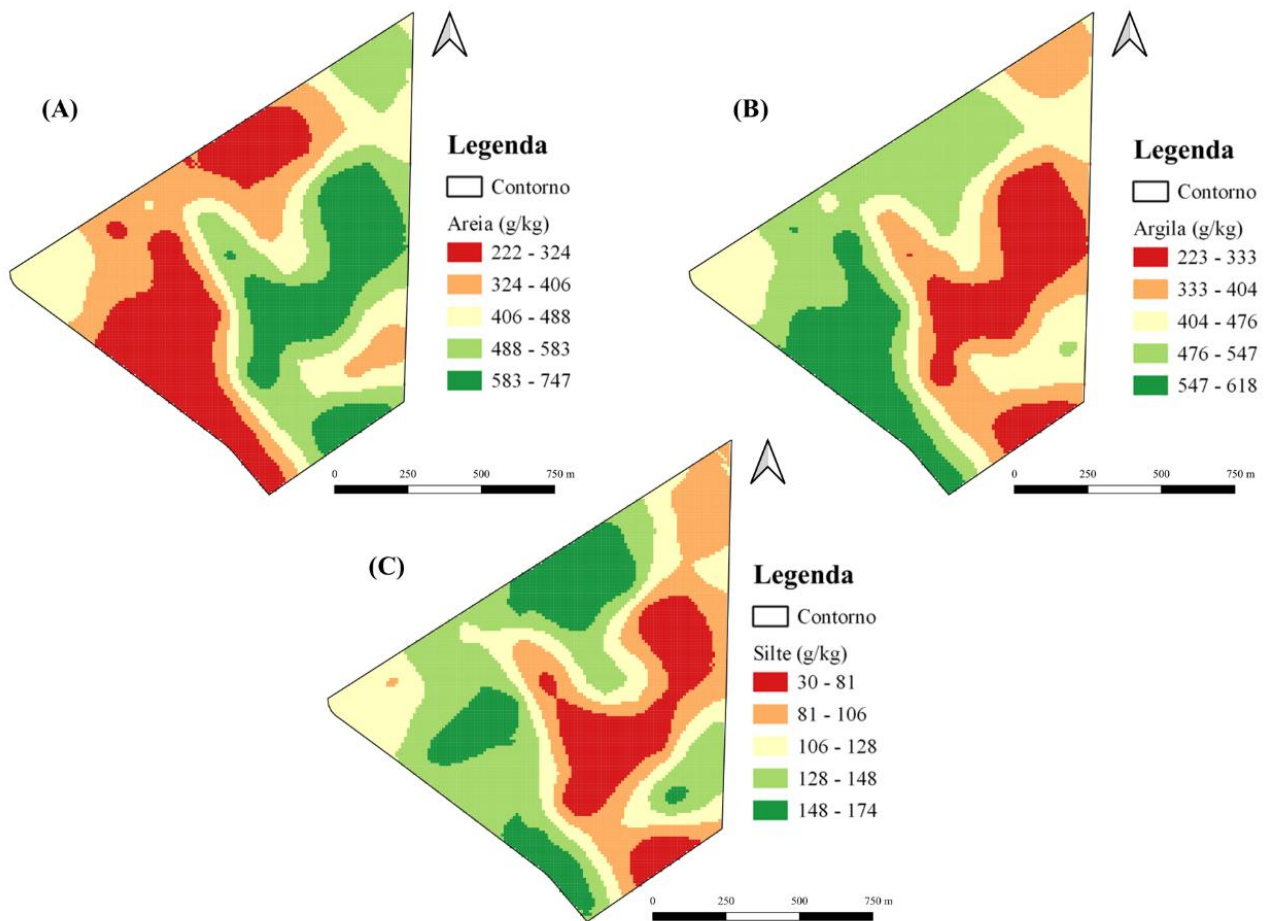


Figura 4. Mapas de variabilidade espacial dos teores de areia total (A), argila (B) e silte (C) do solo.

A distribuição espacial do fracionamento da areia (Figura 5) permitiu verificar a elevada concentração das frações média e fina, seguidas da fração muito fina, principalmente nas regiões com maior concentração de areia total (Figura 4).

Os altos valores de areia média e fina promovem distribuição capilar de poros de menor diâmetro, capazes de permitir maior retenção e

armazenamento de água entre as partículas, e menor perda por percolação (Parahyba et al. 2019).

Assim, se faz necessário o fracionamento da areia em diversas classes de tamanho permite conhecer melhor a textura do solo, compreender melhor seu comportamento e permitir diferenciá-los frente ao seu uso e manejo.

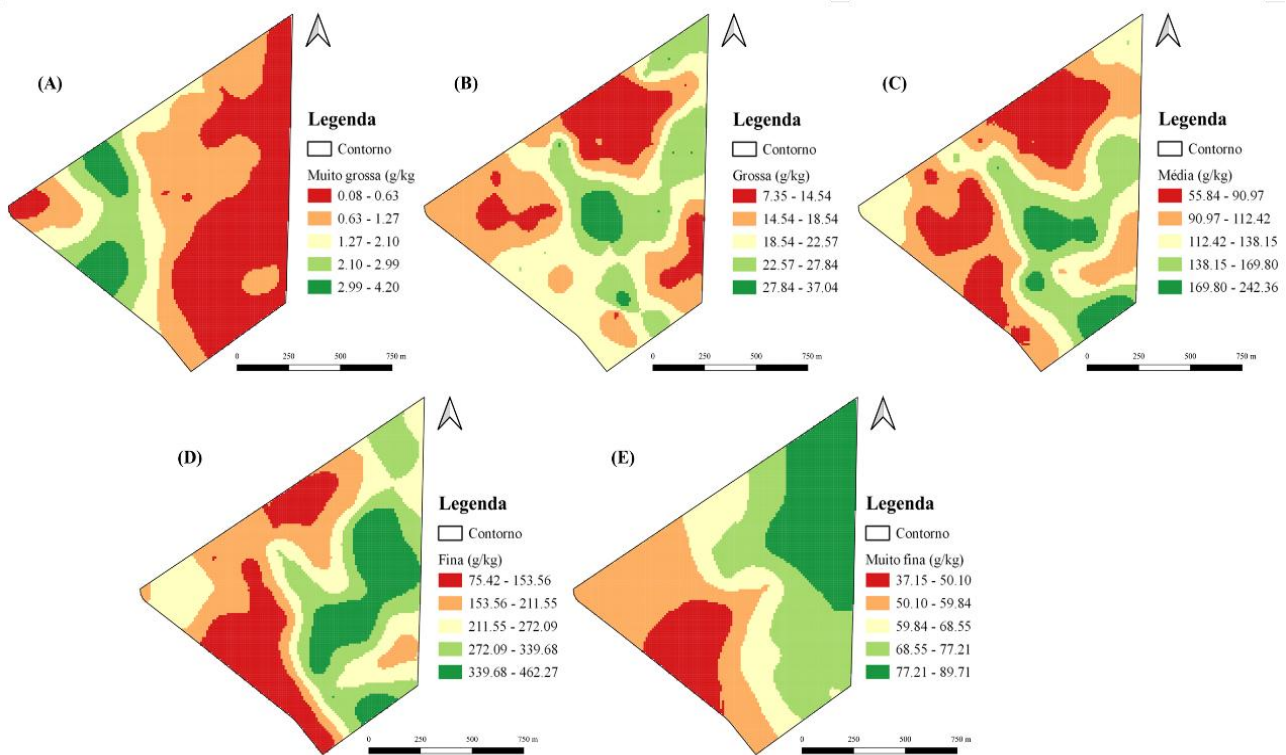


Figura 5. Mapas de variabilidade espacial do fracionamento da areia em muito grossa (A), grossa (B), média (C), fina (D) e muito fina.

Os mapas de variabilidade dos atributos do solo apresentados na Figura 6, apresentam elevada similaridade desses atributos com a variabilidade granulométrica da área.

O DMP, estimativa da quantidade relativa de solo em cada classe de agregados, apresentou variação entre 4,14 e 4,88 mm em via seca (Figura 6A), e entre 2,03 e 4,35 mm em via úmida (Figura 6A). Conforme já discutido anteriormente, solos com DMP acima de 0,5 mm são considerados relativamente resistentes ao esboroamento e à dispersão dos agregados. As regiões com concentração de maior DMP, de maneira geral, correspondem às regiões com maior concentração dos teores de argila e silte (Figuras 4B e 4C).

A alta concentração de macroagregados (Figura 5C), corresponde às regiões com maior concentração dos teores de argila (Figura 4B), enquanto os microagregados (Figura 6D) correspondem às regiões com maior concentração dos teores de areia (Figura 4A).

A formação do microagregados ocorre primeiramente, pela combinação de partículas do solo com íons metálicos, que servirão como blocos para a formação dos macroagregados, colados por raízes e hifas que, por serem agentes ligantes temporários, se decompõe novamente em microagregados quando o solo sofre perturbações (Ran et al., 2020). A estabilidade dos agregados é uma medida da resistência do solo contra forças destrutivas (Singh et al., 2019).

O índice de estabilidade de agregados (IEA) (Figura 6E) apresentou teores abaixo de 85% nas regiões de maior concentração de areia (Figura 4A), o que pode estar associado ao baixo teor de carbono (menos de 14%) (Figura 6F) nestas mesmas áreas. Como consequência, regiões com menor concentração de argila não formam agregados, sendo mais suscetível a erosão.

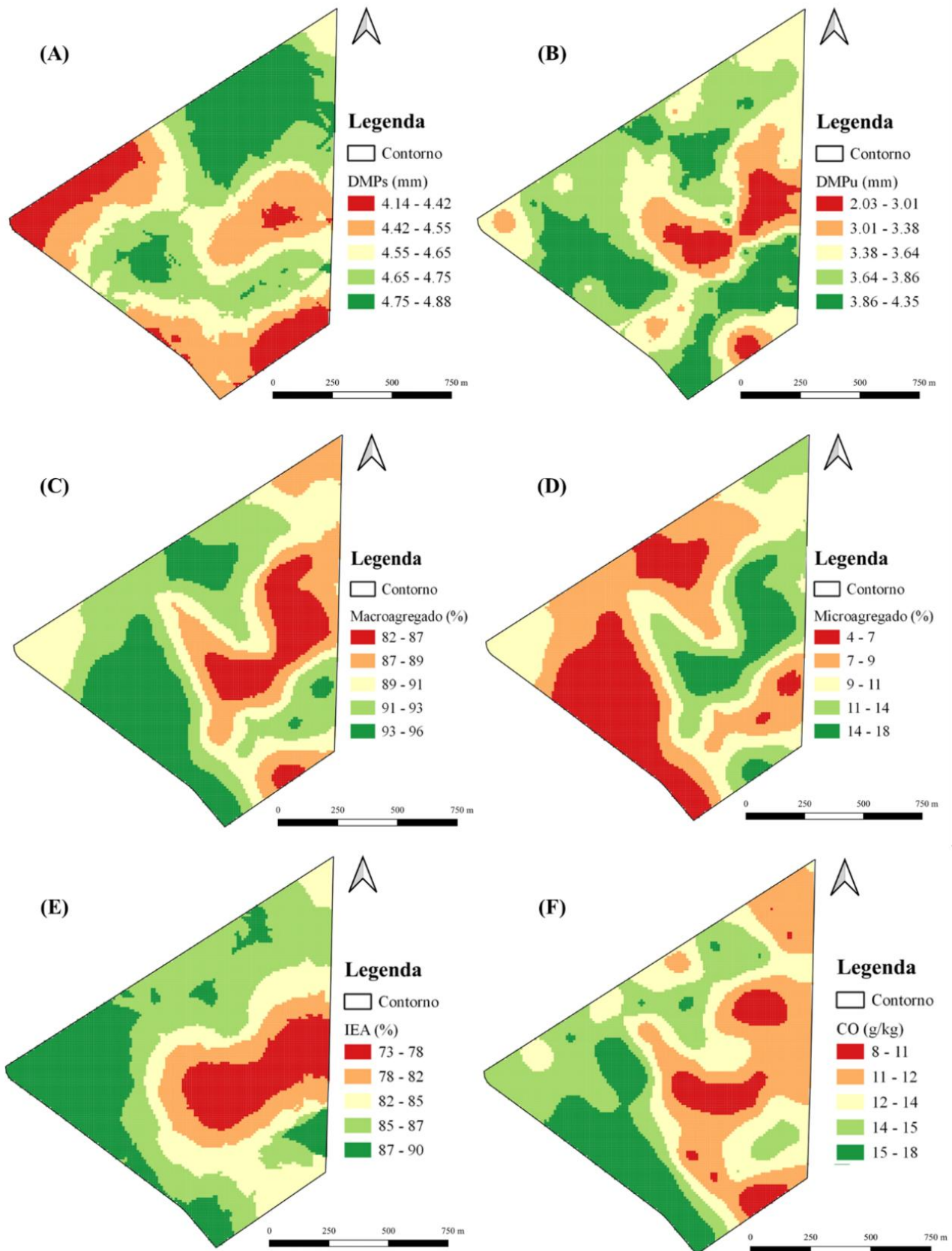


Figura 6. Mapas de variabilidade espacial dos atributos diâmetro médio ponderado seco (A), diâmetro médio ponderado úmido (B), macroagregados (C), microagregados (D), IEA - índice de estabilidade dos agregados (E) e carbono orgânico (F).

As alterações e distribuição espacial da estabilidade do agregado pode afetar a proteção do carbono do solo e afetar a produtividade. Como citado por Kumar et al., (2019) os parâmetros estruturais e os de carbono do solo são correlacionados a produtividade de grãos de arroz, exceto carbono microagregado.

Regiões com predominância de teores de carbono acima de 14% (Figura 6F), correspondem àquelas com IEA maiores que 95% (Figura 6E), devido o carbono orgânico ter efeito na ligação do solo, aumentando a estabilidade dos agregados, e consequentemente, reduzindo sua erosão (Singh et al., 2019; Ajayi et al., 2021).

Apesar dos valores de IEA observados na área de estudo (Figura 6E) serem elevados (acima de 70%), o teor de carbono foi considerado baixo ($< 13,90 \text{ g kg}^{-1}$) para mais de 50% da área, principalmente às regiões correspondentes a teores de argila abaixo de 475 g kg^{-1} . Isso mostra que o sistema de semeadura direta tem sido eficiente na manutenção da estrutura do solo, porém, não tem assegurado índices adequados de carbono, que podem ser incrementados com a adoção de práticas de manejo como a rotação de culturas, transformando o manejo da área em sistema plantio direto. Fato este que pode ser explicado pela sucessão de soja e milho em áreas de produção e a falta de uma verdadeira rotação de culturas, que é o pressuposto do sistema plantio direto.

De acordo com Cortez et al. (2018), o grande desafio da sustentabilidade nos sistemas de produção está na quantidade e qualidade dos resíduos culturais provenientes da semeadura direta. Que consequentemente irão ajudar a melhorar o teor de carbono no solo ao longo do tempo.

A distribuição espacial dos atributos do solo estudados mostrou-se uma ferramenta que pode ser utilizada para o monitoramento do comportamento da granulometria, dos atributos físicos e do carbono. Arelado a isso, é essencial o acompanhamento e avaliações da qualidade estrutural das áreas produtivas, possibilitando a orientação de práticas de uso e manejo sustentável dos sistemas de produção agrícola.

Portanto, se faz necessário um entendimento mais amplo em relação a multifuncionalidade dos sistemas de cultivo, sendo fundamental a elaboração de planos alternativos de gestão inteligentes, que permitam planejamento e intervenções especializadas e localizadas, considerando as particularidades existentes em cada área.

Conclusões

A variabilidade granulométrica interfere na distribuição de macro e microagregados, diâmetro médio ponderado, índice de estabilidade de agregados e carbono orgânico do solo.

O sistema de semeadura direta é eficiente na manutenção da estrutura do solo, porém, não assegura índices adequados de carbono orgânico.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES pela concessão de bolsa de Doutorado para a primeira autora. Aos proprietários e colaboradores da fazenda Dominó, pela disponibilidade e apoio para que este estudo aconteces.

Referências

- Ajayi, A. E., Tassinari, D., Araujo Junior, C. F., Faloye, O. T., Abayomi, F., Dias Junior, M. S., Curi, N. 2021. Long-term no tillage management impact on soil hydro-physical properties in coffee cultivation. *Geoderma*, 404, 115306.
- Awal, R., Safeeq, M., Abbas, F., Fares, S., Deb, S.K., Ahmad, A., Fares, A. 2019. Soil Physical Properties Spatial Variability under Long-Term No-Tillage Corn. *Agronomy* 9, 750.
- Crespo, C., Wyngaard, N., Rozas Sainz, H., Studdert, G. A., Barraco, M., Gudelj, V., Barbagelata, P., Barbieri, P. 2021. Effect of intensified cropping sequences on soil physical properties in contrasting environments. *Catena* 207, 105690.
- Cortez, J. W., DA Silva, R. P., Furlani, C. E. A., Arcoverde, S. N. S., Olszewski, N. 2018. Atributos físicos do solo em sistemas de adubação e de manejo de resíduos culturais em plantio direto. *Revista Agrarian* 11(42), 343-351.
- Fachin, P. A., Thomaz, E. L. 2020. A escarificação do solo em sistema de plantio direto afeta a estabilidade de agregados e o teor de matéria orgânica em latossolo vermelho. *Caminhos de Geografia* 21, 18-28.
- Gelain, E., Bottega, E. L., Motomiya, A. V. DE A., DE Oliveira, Z. B. 2021. Variabilidade espacial e correlação dos atributos do solo com produtividade do milho e da soja. *Nativa* 9, 536-543.
- George, T. R., Bhat, J. A., Wani, M. A., Maqbool, M., Ramzan, S., Yadav, R. Mapping of spatial variability of soil texture and macronutrients in Wangath watershed, Ganderbal District of Jammu and Kashmir Using GIS. 2021. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 10, 628-642.

- Ghosh, T., Maity, P. P., Dasm T. K., Krishnan, P., Bhatia, A., Bhattacharya, P., Sharma, D. K. 2020. Variation of porosity, pore size distribution and soil physical properties under conservation agriculture. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 90(11), 2051-2058.
- Kumar, N., Nath, C.P., Hazra, K.K., et al. 2019. Impact of zero-till residue management and crop diversification with legumes on soil aggregation and carbon sequestration. *Soil Tillage Research*, 189, 158-167.
- Liu, F., Zhang, G. L., Song, X., Li, D., Zhao, Y., Yang, J., Wu, H., Yang, F. 2020. High-resolution and three-dimensional mapping of soil texture of China. *Geoderma*, 361, 114061.
- Lopes, K. A. L., Pinto Junior, F. F., Aguiar, F. I. S., Sousa, A. E. S., DE Oliveira, I. R., Dantas, J. S. 2020. Diferentes densidades amostrais na caracterização da variabilidade espacial de atributos granulométricos de um Argissolo amarelo distrocoeso típico. *Cultura Agrônômica* 29, 50-60.
- Magano, D. A., Machado, M. R. R., Jerónimo, J. A., Guedes, J. V. C., Doberstein, A. P. S. 2023. Modelagem geostatística aplicada a distribuição espacial de lagartas presentes na cultura da soja: Geostatistic modeling applied to the spatial distribution of caterpillars present in soybean crop. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(1), 20–29.
- Mantovanelli, B. C., Petry, M. T., Martins, J. D., Carlesso, R. 2022. Qualidade física de solos do Brasil e aplicabilidade de métodos para estimativas de retenção de água no solo: A revisão. *Revista Edutec* 03(1), 87-100.
- Oliveira, J. T., Oliveira, R. A., Cunha, F. F., Dos Santos, E. S. 2021. Spatial autocorrelation of physical attributes of an oxisol. *Engenharia Agrícola* 41(2), 255-262.
- Oliveira, M.F., Monroe, P.H.M., Moreira, F.M. 2022. Estoque de agregados sob diferentes usos do solo. *Revista Científica Intelletto* 4(2), 37-42.
- Othmani, O., Khanchoul, K., Boubehziz, S., Bouguerra, H., Benslama, A., Navarro-Pedreño, J. 2023. Spatial variability of soil erodibility at the rhirane catchment using geostatistical analysis. *Soil Syst.* 7, 32.
- Okolo, C. C., Gebresamuel, G., Zenebe, A., Haile, M., Eze, P. N. 2020. Accumulation of organic carbon in various soil aggregate sizes under different land use systems in a semi-arid environment. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 297, 106924.
- Parahyba, R. B. V., DE Araújo, M. S. B., DE Almeida, B. G., Rolim Neto, F. C., Sampaio, E. V. S. B., Caldas, A. M. 2019. Water retention capacity in Arenosols and Ferralsols in a semiarid area in the state of Bahia, Brazil. *Anais da academia Brasileira de Ciências* 91, e20181031.
- Pereira, G. W.; Valente, D. S. M.; Queiroz, D. M. D.; Coelho, A. L. D. F.; Costa, M. M.; Grift, T. 2022. Smart-Map: An Open-Source QGIS Plugin for Digital Mapping Using Machine Learning Techniques and Ordinary Kriging. *Agronomy* 12, 1350.
- Pimentel-Gomes, F. 2009. Curso de estatística experimental. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 451 p.
- Qgis.org, 2022. QGIS Geographic Information System. QGIS Association.
- Ran, Y. WU, S., Zhu, K., Li, W., Liu, Z., Huang, P. 2020. Soil types differentiated their responses of aggregate stability to hydrological stresses at the riparian zones of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Soils and Sediments* 20, 951-962.
- Ritter, W.G., Polido, C.A., Martinez, K.A., Rodrigues, A.T., Conrad, V.A., Faria, R.B. 2021. Avaliação da produtividade em diferentes cultivares de soja *Glycine max* (L.) na região do distrito de Nova Itamarati em Ponta Porã – MS. *Revista Magsul de Agronomia* 1, 1-9.
- Santos, R. D., Lemos, R. C., Santos, H. G., Ker, J. C., Anjos, L. H. C., Shimizu, S. H. 2013. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 6. ed. revista e ampliada. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 100 p.
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araújo, J. C., Oliveira, J. B., Cunha, T. J. F. 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5 ed. Brasília, DF: Embrapa. 356 p.
- Schwambach, D. A., Cortez, J. W., Flora, D. P. D., Henriques, H. J. R., Donaire, L. D. O. 2021. Variability of soybean and corn yield and soil texture in the generation of management zones. *Energia na agricultura*, 36(3), 335–347.
- Singh, A. K., Kumar, S., Kalambukattu, J. G. 2019. Assessing aggregate stability of soils under various land use/land cover in a watershed of Mid-Himalayan Landscape. *Eurasian Journal of Soil Science* 8, 131-143.
- Sousa, D. M. G., Lobato, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2004. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. 416p.
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., Teixeira, W. G. 2017. Manual de métodos de análise de solo. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa. 574 p.

- Tisdall, J. M., Oades, J. M. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33(2), 141-163.
- Torres, J. L. R., Mazetto Júnior, J. C., Silveira, B. S., Loss, A., Dos Santos, G. L., De Assis, R. L., Lemes, E. M., Vieira, D. M. S. 2022. Physical attributes of an irrigated oxisol after Brassicas Crops under no-tillage system. *Agronomy* 12, 1825.
- Veloso, M. G., Cecagno, D., Bayer, C. 2019. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. *Soil and Tillage Research* 190, 139–146.
- Wang, L. 2023. The leave-worst-k-out criterion for cross validation. *Optim Lett* 17, 545–560.
- Wulanningtyas, H. S., Gong, Y., Li, P., Sakagami, N., Nishiwaki, J., Komatsuzaki, M. 2021. A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. *Soil & Tillage Research* 205, 104749.