

Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo¹

Leandro Coutinho Alho², Milton César Costa Campos²,
Douglas Marcelo Pinheiro da Silva², Bruno Campos Mantovanelli², Zigomar Menezes de Souza³

ABSTRACT

Spatial variability of aggregate stability and carbon stock in Cambisol and Argisol

The advancement of agricultural activities without considering the soil structural conditions ceases at the expense of those environments. This study aimed at evaluating the spatial variability of aggregate stability, bulk density, total organic carbon (TOC) and carbon stock in areas of natural grassland and forest, in the region of Humaitá, Amazonas State, Brazil. The soils were sampled at the crossing points of a grid with 70 m x 70 m, at regular intervals of 10 m, at the depths of 0.0-0.05 m, 0.05-0.10 m and 0.10-0.20 m, totaling 64 samples per depth. The results of the geostatistical analysis showed spatial dependence of attributes. The smaller ranges resulted from the constant variations in the relief of the natural grassland area. The mean values for mean weight diameter (MWD) and TOC were respectively around 3.0 mm and 29.0 g kg⁻¹ of the surface layer, similarly to natural grassland and forest areas, confirming the proportional correlation between TOC and MWD. However, the bulk density greater than 1.40 kg dm⁻³ expresses the inefficiency of soil structural functions in the natural grassland area. The carbon stock contents at the different depths were more favored by TOC than by the different densification levels of the soils evaluated.

KEY-WORDS: Soil structure; landscape forms; Amazon Forest.

RESUMO

O avanço de atividades agropecuárias, sem considerar as condições estruturais do solo, finda no detrimento destes ambientes. Este trabalho objetivou avaliar a variabilidade espacial da estabilidade de agregados, densidade do solo, carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono de áreas de campo natural e floresta, na região de Humaitá (AM). Os solos foram amostrados nos pontos de cruzamento de uma malha de 70 m x 70 m, em intervalos regulares de 10 m, às profundidades de 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 m; e 0,10-0,20 m, totalizando 64 amostras por profundidade. Os resultados da análise geoestatística mostraram dependência espacial dos atributos avaliados. Os menores alcances foram decorrentes das constantes variações na forma do relevo da área de campo natural. Os valores médios respectivos do índice de estabilidade diâmetro médio ponderado (DMP) e COT, em torno de 3,0 mm e 29,0 g kg⁻¹ da camada superficial, similares aos das áreas de campo natural e floresta, confirmam a correlação proporcional entre os teores de COT e o DMP. Todavia, os níveis de densidade do solo superiores a 1,40 kg dm⁻³ expressam a ineficiência das funções estruturais do solo da área de campo natural. Os valores de estoque de carbono, nas diferentes profundidades, mostraram-se mais favorecidos pelos teores de COT que em razão dos diferentes níveis de adensamento dos solos estudados.

PALAVRAS-CHAVE: Estrutura do solo; formas da paisagem; Floresta Amazônica.

INTRODUÇÃO

A região de Humaitá localiza-se ao sul do Estado do Amazonas, em meio a florestas e grandes extensões de campos naturais (aproximadamente 3.418 km²) (Braun & Ramos 1959, Vidotto et al. 2007). Entretanto, esta formação campestre não ocorre de forma contínua, ou seja, apresenta várias unidades isoladas e entremeadas por galerias florestais. Nestes ambientes, pequenas variações na topografia

são capazes de promover alterações nos atributos do solo e no nível do lençol freático (Campos et al. 2012), interferindo na fisionomia da vegetação, com a presença de formações herbáceas e espécies com caules retorcidos e porte arbustivo, ao passo que, no ambiente de floresta, observa-se porte arbóreo, com predomínio de palmeiras.

A conversão de áreas naturais em ambientes de produção agropecuária é motivo de preocupação local e regional, especialmente quando não se conhecem,

1. Trabalho recebido em ago./2013 e aceito para publicação em jul./2014 (nº registro: PAT 25693).

2. Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente, Humaitá, AM, Brasil.

E-mails: leandro_alho@yahoo.com, mcesarsolos@gmail.com, douglasmcarcelo@gmail.com, brunomantovanelli21@gmail.com.

3. Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP, Brasil.

E-mail: zigomarms@agr.unicamp.br.

previamente, as condições do solo. Neste sentido, vários trabalhos enfatizam a existência de alterações nos atributos do solo, em decorrência das diversas formas de uso e manejo (Araújo et al. 2007, Silva et al. 2008, Cardoso et al. 2011).

Por outro lado, alguns atributos são mais sensíveis a mudanças que outros, destacando-se, dentre estes, a estabilidade de agregados, densidade do solo, teor de carbono orgânico e estoque de carbono, que são indicadores utilizados para mensurar estas alterações, bem como regular a infiltração, retenção e disponibilidade de água no solo e favorecer as trocas gasosas (Lima et al. 2003, Vasconcelos et al. 2010, Vieira et al. 2011).

Uma das formas mais eficazes de se detectarem mudanças ocorridas nos atributos do solo é a utilização de técnicas geoestatísticas (Souza et al. 2006, Oliveira et al. 2013). A descrição da variabilidade espacial de atributos do solo, por meio de métodos geoestatísticos como a análise da semivariância e da krigagem ordinária, permite estimar, apropriadamente, valores para locais não amostrados, tornando possível direcionar projetos futuros envolvendo amostragem de solos e subsidiar o entendimento dos processos pedogenéticos e da qualidade do solo, além das relações ambientais básicas de planejamento das atividades humanas (Motanari et al. 2005, Lemos Filho et al. 2008).

Avaliando-se a variabilidade espacial de atributos físicos em Cambissolo sob diferentes usos, no sul do Amazonas, Oliveira et al. (2013) observaram características diferentes da dependência espacial, em razão do manejo do solo. Campos et al. (2013), entretanto, observaram variação aleatória nos atributos diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP), em Argissolo Vermelho sob floresta nativa, na região de Manicoré, no sul do Amazonas. Todavia, em meio à diversidade dos ambientes amazônicos, são ainda poucos os estudos que corroboram os conhecimentos a respeito da variabilidade espacial e qualidade física do solo, na região sul do Amazonas.

Dessa forma, objetivou-se, com este estudo, avaliar a variabilidade espacial da estabilidade de agregados, densidade do solo, carbono orgânico e estoque de carbono, em áreas de campo natural e floresta, na região de Humaitá, sul do Estado do Amazonas.

MATERIAL E MÉTODOS

O local do estudo situa-se em área do 54º Batalhão de Infantaria de Selva do Exército Brasileiro

(7°30'24"S e 63°04'56"W). O clima é do tipo Am, tropical chuvoso, segundo a classificação de Köppen, apresentando um período seco de pequena duração, com temperaturas variando entre 25°C e 27°C e precipitação média anual de 2.500 mm, e período chuvoso iniciando-se em outubro e prolongando-se até junho.

Segundo Braun & Ramos (1959), a região apresenta relevo aproximado ao do tipo "tabuleiro", com desníveis muito pequenos e bordos ligeiramente abaulados. Apresenta, ainda, geologia formada por aluviões antigos indiferenciados, referidos ao Holoceno. Os sedimentos desta formação são oriundos de dois ciclos de sedimentação, sendo o primeiro de bancos arenosos inferiores, que representam a sedimentação plúvio-fluvial, e o segundo de sedimentos argilosos superiores, indicando sedimentação lacustre.

Considerando-se que os ambientes mais comuns presentes na região sul do Amazonas são o campo natural e a floresta, foram escolhidas duas áreas contíguas, com presença de campo natural e floresta, nas quais os solos são, respectivamente, Cambissolo Háplico Alítico e Argissolo Vermelho Alítico (Campos et al. 2012).

As amostragens de solo foram realizadas em março e outubro de 2012, respectivamente nas áreas de campo natural e floresta, coletadas em esquema de malha amostral estabelecida em cada ambiente, com dimensões de 70 m x 70 m e espaçamento regular entre os pontos amostrais de 10 m, em três profundidades de amostragem: 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 m; e 0,10-0,20 m, totalizando 64 amostras por profundidade. Cada ponto amostral foi georreferenciado com aparelho de GPS modelo GPSMAP 76CSx e a altitude de cada ponto mensurada com nível de precisão, para a construção do modelo digital de elevação (MDE).

A textura do solo das áreas estudadas foi determinada pelo método da pipeta (Embrapa 1997), com amostras coletadas nos pontos de cruzamento da malha, à profundidade de 0,0-0,20 m, sendo os resultados apresentados na Tabela 1.

A determinação da estabilidade de agregados foi realizada utilizando-se o método de peneiramento úmido. Em cada ponto amostral, foram retirados blocos de solo com estrutura preservada, os quais foram secos ao ar e passados em peneiras de 9,52 mm e 4,76 mm. Os agregados retidos na peneira de 4,76 mm foram empregados na análise da estabilidade de agregados via úmida, a qual foi realizada colocando-se as amostras sobre um jogo de peneiras com malhas de 2,0 mm; 1,0 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,105 mm;

Tabela 1. Textura do solo das áreas de campo natural e floresta (Humaitá, AM, 2012).

| Campo natural | | | Floresta | | |
|--------------------|-------|--------|----------|-------|--------|
| Areia | Silte | Argila | Areia | Silte | Argila |
| g kg ⁻¹ | | | | | |
| 240,7 | 579,3 | 180,0 | 291,3 | 527,6 | 181,1 |

e 0,063 mm e submetendo-as a oscilações verticais, durante 15 minutos, em frequência de 32 oscilações por minutos. Todos estes procedimentos foram realizados conforme Embrapa (1997). Foi adotado, como índice de estabilidade, o diâmetro médio ponderado (DMP), cujo cálculo foi feito segundo Kemper & Rosenau (1986).

A densidade do solo (Ds) foi determinada em amostras com estrutura preservada, em cilindro volumétrico com 5,57 cm de diâmetro e 4,1 cm de altura, e secas em estufa a 105-110°C, por 48 horas (Embrapa 1997).

O carbono orgânico total foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yomans & Bremner (1988). O estoque de carbono (Est C) foi determinado pela expressão proposta por Veldkamp (1994): Est C = (CO x Ds x e)/10, em que Est C = estoque de carbono orgânico (Mg ha⁻¹); COT = teor de carbono orgânico total (g kg⁻¹); Ds = densidade do solo (kg dm⁻³); e = espessura da camada (cm).

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, sendo determinados a média, valores máximos e mínimos, coeficientes de assimetria e curtose e coeficiente de variação (CV). Para a caracterização da variabilidade espacial, foi utilizada a análise geoestatística (Isaaks & Srivastava 1989). O semivariograma foi estimado pela seguinte equação:

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

sendo $\gamma(h)$ = valor da semivariância para uma distância h ; $N(h)$ = número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; $Z(x_i)$ = valor do atributo Z na posição x_i ; $Z(x_i + h)$ = valor do atributo Z , separado por uma distância h da posição x_i .

Os semivariogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância, presença de patamar claramente definido (Burrough & McDonnel 2000), melhor coeficiente do teste de validação cruzada (VC) “cross-validation” e maior coeficiente de determinação R^2 , no qual os valores variam de 0 a 1, sendo os

mais próximos de 1 aqueles que caracterizam o modelo como mais eficiente para expressar o fenômeno estudado. Após o ajuste dos modelos matemáticos permissíveis, foi feita a interpolação dos dados, por meio da krigagem. A análise geoestatística foi realizada no *software* GS⁺ e os mapas de krigagem no *software* Surfer versão 8.00.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, são apresentados os resultados da estatística descritiva. Os valores da média e mediana são semelhantes para todas as variáveis, em todas as profundidades, indicando distribuição simétrica dos dados, confirmados pelos valores de assimetria e curtose próximos de zero, com exceção apenas do DMP, na área de campo natural, e Ds, na área de floresta, ambos à profundidade de 0,05-0,10 m.

Os resultados do teste de normalidade gerados pelo teste Kolmogorov-Smirnov demonstraram normalidade para todas as variáveis, exceto para o DMP em todas as profundidades da área de campo natural e à profundidade de 0,05-0,10 m da área de floresta, para o Est C da área de campo natural à profundidade de 0,05-0,10 m e, ainda, para o COT e Est C à profundidade de 0,0-0,05 m da área de floresta (Tabela 2).

A condição de normalidade na distribuição dos dados não é uma exigência na análise geoestatística, uma vez que, referindo-se a dados obtidos da natureza, uma distribuição normal é apenas aproximada. Todavia, é desejável que a distribuição dos dados não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer a análise, principalmente as estimativas da krigagem, as quais são baseadas em valores médios (Isaaks & Srivastava 1989). Desta forma, as informações geradas pela análise exploratória permitem afirmar que as variáveis apresentam distribuição suficientemente simétrica para o emprego das análises geoestatísticas.

Os atributos apresentaram dependência espacial, ajustando-se, predominantemente, aos modelos exponencial e esférico, com valores de VC e R^2 acima

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos físico-químicos do solo avaliados nas diferentes profundidades das áreas de estudo (Humaitá, AM, 2012).

| Estatística descritiva | Campo natural | | | | Floresta | | | |
|------------------------|---------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| | DMP mm | Ds kg dm ⁻³ | COT g kg ⁻¹ | Est C Mg ha ⁻¹ | DMP mm | Ds kg dm ⁻³ | COT g kg ⁻¹ | Est C Mg ha ⁻¹ |
| 0,0-0,05 m | | | | | | | | |
| Média | 3,13 | 1,37 | 29,65 | 20,28 | 3,11 | 1,15 | 29,94 | 20,51 |
| Mediana | 3,17 | 1,37 | 29,68 | 20,17 | 3,13 | 1,15 | 29,84 | 20,62 |
| Máximo | 3,31 | 1,51 | 35,14 | 24,33 | 3,34 | 1,32 | 35,10 | 25,90 |
| Mínimo | 2,74 | 1,21 | 24,48 | 17,25 | 2,73 | 0,97 | 25,17 | 17,11 |
| CV(%) | 4,32 | 5,64 | 6,73 | 6,84 | 3,99 | 6,43 | 5,25 | 8,16 |
| Assimetria | -0,99 | -0,12 | -0,11 | 0,03 | -0,74 | -0,13 | 0,58 | 0,49 |
| Curtose | 0,37 | -0,87 | 0,92 | 0,13 | 0,56 | 0,09 | 3,32 | 0,48 |
| d | 0,16 | 0,05* | 0,07* | 0,07* | 0,07* | 0,07* | 0,12 | 0,12 |
| 0,05-0,10 m | | | | | | | | |
| Média | 3,15 | 1,49 | 26,51 | 19,78 | 2,90 | 1,20 | 25,90 | 19,32 |
| Mediana | 3,17 | 1,49 | 26,65 | 19,35 | 2,97 | 1,21 | 25,87 | 19,34 |
| Máximo | 3,30 | 1,63 | 30,87 | 24,00 | 3,30 | 1,34 | 30,11 | 24,30 |
| Mínimo | 2,80 | 1,28 | 21,99 | 16,50 | 2,15 | 0,90 | 21,35 | 15,48 |
| CV(%) | 3,03 | 5,07 | 7,69 | 9,35 | 8,80 | 7,97 | 7,64 | 9,04 |
| Assimetria | -1,10 | -0,21 | 0,06 | 0,48 | -0,81 | -1,10 | 0,03 | 0,20 |
| Curtose | 1,83 | -0,30 | -0,71 | -0,28 | 0,14 | 1,40 | -0,25 | -0,10 |
| d | 0,12 | 0,07* | 0,08* | 0,11 | 0,16 | 0,09* | 0,06* | 0,05* |
| 0,10-0,20 m | | | | | | | | |
| Média | 2,89 | 1,53 | 23,44 | 17,97 | 2,49 | 1,26 | 23,94 | 18,38 |
| Mediana | 2,94 | 1,54 | 23,18 | 17,86 | 2,44 | 1,27 | 23,80 | 18,60 |
| Máximo | 3,29 | 1,72 | 28,58 | 21,65 | 3,21 | 1,44 | 27,62 | 21,50 |
| Mínimo | 2,10 | 1,35 | 20,10 | 14,87 | 1,59 | 0,99 | 21,11 | 15,39 |
| CV(%) | 9,56 | 5,86 | 7,63 | 7,79 | 16,68 | 7,77 | 5,67 | 7,92 |
| Assimetria | -0,87 | -0,20 | 0,66 | 0,31 | -0,10 | -0,46 | 0,49 | -0,25 |
| Curtose | 0,18 | -0,61 | 0,39 | 0,22 | -0,84 | 0,29 | 0,33 | -0,45 |
| d | 0,13 | 0,06* | 0,08* | 0,08* | 0,09* | 0,06* | 0,07* | 0,08* |

DMP: diâmetro médio ponderado; Ds: densidade do solo; COT: carbono orgânico total; Est C: estoque de carbono; CV: coeficiente de variação; d: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov; * significativo a 5%.

de 0,60 e 0,70, respectivamente. Todavia, à profundidade de 0,05-0,10 m da área de campo natural, o DMP e a Ds apresentaram efeito pepita puro (EPP), ou seja, variação espacial aleatória (Tabela 3).

A análise da relação $[C_0/(C_0 + C_1)]$ foi expressa de acordo com classificação proposta por Carbardella et al. (1994), cujos atributos se mostram nos limites do grau de dependência espacial (GDE) (dependência moderada a forte), com os maiores GDE encontrados para o COT às profundidades de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m (47% e 48%, respectivamente) da área de campo natural (Tabela 3).

O alcance é um parâmetro da geoestatística que tem servido de subsídio em planejamentos amostrais, uma vez que os valores de alcance implicam, de modo geral, em maior ou menor densidade amostral (Souza et al. 2006, Lemos Filho et al. 2008, Vieira et al. 2011). Os menores valores de alcance foram

observados na área de campo natural, para o DMP e a Ds às profundidades de 0,0-0,05 e 0,10-0,20 m, nos intervalos de 22 m a 29 m, indicando que estes atributos apresentam distribuição dos valores de dependência espacial menos prolongada, ao longo da área de estudo.

O Est C apresentou valores de alcance em torno de 30 m, para as diferentes profundidades, enquanto, às profundidades de 0,0-0,05 m e 0,05-0,10 m, foi observado o maior alcance para o COT, com iguais valores de 46 m, ambos para a área de campo natural. Na área de floresta, os valores de alcance foram, em média, superiores a 30 m, todavia, os menores alcances foram encontrados para todos os atributos à profundidade de 0,05-0,10 m, com exceção da Ds, que apresentou alcance de 41 m. À profundidade de 0,10-0,20 m, os atributos apresentaram alcances semelhantes de 33 m, movidos, provavelmente, pela

Tabela 3. Modelos e parâmetros geoestatísticos dos atributos físico-químicos do solo, nas diferentes profundidades das áreas de estudo (Humaitá, AM, 2012).

| Parâmetros geoestatísticos | Campo natural | | | | Floresta | | | |
|----------------------------|---------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| | DMP mm | Ds kg dm ⁻³ | COT g kg ⁻¹ | Est C Mg ha ⁻¹ | DMP mm | Ds kg dm ⁻³ | COT g kg ⁻¹ | Est C Mg ha ⁻¹ |
| 0,0-0,05 m | | | | | | | | |
| Modelo | Exp | Exp | Esf | Exp | Esf | Exp | Esf | Exp |
| Efeito pepita | 0,003 | 0,0009 | 1,62 | 0,20 | 0,005 | 0,00036 | 1,1 | 0,29 |
| Patamar | 0,014 | 0,0054 | 3,43 | 1,49 | 0,012 | 0,00468 | 2,7 | 2,65 |
| Alcance (m) | 29 | 22 | 46 | 30 | 40 | 36 | 47 | 21 |
| R ² | 0,95 | 0,97 | 0,98 | 0,92 | 0,99 | 0,98 | 0,92 | 0,98 |
| GDE (%) | 21,4 | 16,7 | 47 | 13,4 | 41,7 | 7,7 | 41 | 11 |
| VC | 0,74 | 0,60 | 0,78 | 0,67 | 0,95 | 0,71 | 0,99 | 0,84 |
| 0,05-0,10 m | | | | | | | | |
| Modelo | Lin | Lin | Esf | Exp | Exp | Exp | Exp | Esf |
| Efeito pepita | - | - | 2,17 | 0,16 | 0,01 | 0,0012 | 0,46 | 0,51 |
| Patamar | - | - | 4,54 | 1,56 | 0,07 | 0,0081 | 3,87 | 2,93 |
| Alcance (m) | - | - | 46 | 26 | 27 | 41 | 24 | 20 |
| R ² | - | - | 0,91 | 0,91 | 0,98 | 0,99 | 0,78 | 0,71 |
| GDE (%) | EPP | EPP | 48 | 10 | 14,3 | 14,8 | 12 | 17 |
| VC | - | - | 0,99 | 0,79 | 0,67 | 0,91 | 0,75 | 0,96 |
| 0,10-0,20 m | | | | | | | | |
| Modelo | Exp | Exp | Esf | Esf | Esf | Esf | Exp | Esf |
| Efeito pepita | 0,01 | 0,0011 | 0,83 | 1,26 | 0,06 | 0,0028 | 0,25 | 0,78 |
| Patamar | 0,07 | 0,007 | 3,04 | 3,55 | 0,15 | 0,0074 | 1,74 | 1,78 |
| Alcance (m) | 22 | 25 | 24 | 33 | 33 | 33 | 33 | 32 |
| R ² | 0,91 | 0,94 | 0,99 | 0,94 | 0,96 | 0,98 | 0,98 | 0,94 |
| GDE (%) | 14,3 | 15,7 | 27 | 35 | 40,0 | 37,8 | 14 | 44 |
| VC | 0,72 | 0,70 | 0,67 | 0,63 | 0,99 | 0,84 | 0,67 | 0,96 |

DMP: diâmetro médio ponderado; Ds: densidade do solo; COT: carbono orgânico total; Est C: estoque de carbono; Esf: esférico; Exp: exponencial; Lin: linear; R²: coeficiente de correlação; GDE: grau de dependência espacial; VC: validação cruzada.

menor passividade de alterações, em razão dos fatores pedogenéticos desta profundidade (Tabela 3).

De modo geral, os menores e maiores alcances encontrados, respectivamente nas áreas de campo natural e floresta, podem ser atribuídos às constantes variações nas formas do relevo da área de campo natural (Campos et al. 2012), com mudanças repentinas de formas côncavas e convexas, ao longo da paisagem, enquanto, na área de floresta, a forma do relevo tende a ser linear, como mostram os mapas de krigagem (Figuras 1 e 2). Resultados semelhantes foram obtidos por Souza et al. (2006) e Montanari et al. (2005), que observaram, nas áreas com formas côncavas e convexas, alcances menores, quando comparados aos alcances das áreas com formato linear.

Os mapas da distribuição espacial dos atributos são apresentados em quatro intervalos regulares de valores específicos para cada atributo, o que permite maior compreensão da distribuição, principalmente dos atributos que apresentam pequenos intervalos dos

valores máximo e mínimo. Para o DMP, os mapas das diferentes áreas apresentaram valores superiores a 2,0 mm, independentemente da profundidade avaliada (Figuras 1 e 2).

Os valores médios do DMP da área de campo natural permaneceram praticamente constantes, nas duas primeiras profundidades, todavia, a menor agregação foi verificada à profundidade de 0,0-0,05 m (Tabela 2). De acordo com Campos (2009), queimas anuais ocorrem nas áreas de campos naturais, no período de estiagem. Isto pode explicar o menor DMP na camada superficial do solo. Redin et al. (2011) citaram que as principais alterações que podem ocorrer com a queima são evidenciadas pela diminuição do volume de macroporos e do diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis e pelo aumento da densidade do solo, à profundidade de 0,0-0,05 m.

Na área de floresta, a estabilidade de agregados foi menor, quanto maior a profundidade avaliada. Estes resultados corroboram Vasconcelos et al. (2010)

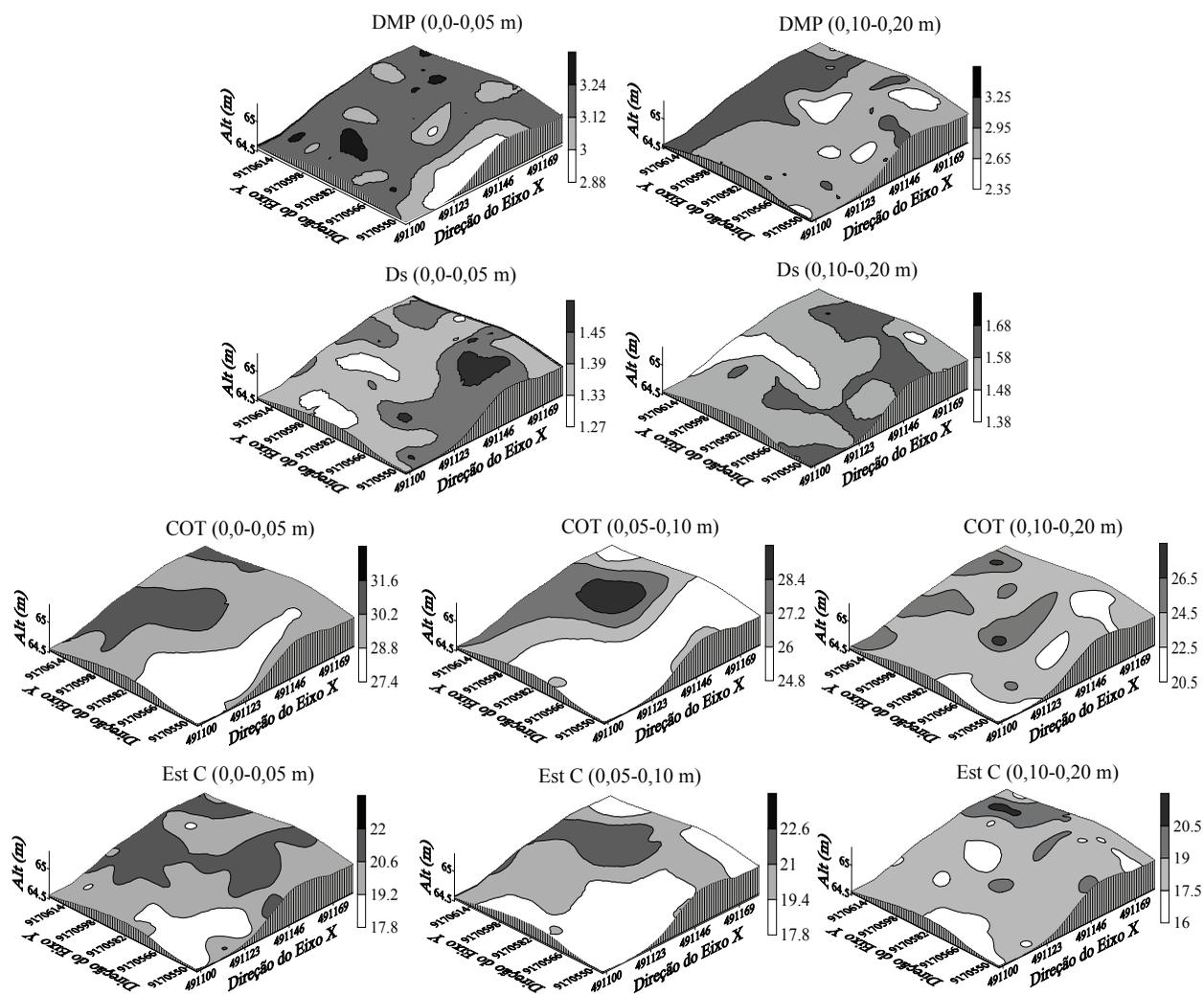


Figura 1. Mapas de krigagem dos atributos diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP), densidade do solo (Ds), carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono do solo (Est C) da área de campo natural, em diferentes profundidades (Humaitá, AM, 2012).

e Wendling et al. (2012), que observaram decréscimo da agregação do solo com o aumento da profundidade, em solo sob mata nativa.

Verificou-se, nos mapas, a correlação do DMP com os teores de COT, observando-se que os teores médios do COT das duas áreas são aproximados (Tabela 2), mesmo em profundidade (Figuras 1 e 2). Nos mapas das áreas de campo natural e floresta, observou-se que, nas regiões onde se concentram os menores teores de COT, ocorre a menor estabilidade de agregados, reafirmando a importância da matéria orgânica na agregação do solo (Silva et al. 2008, Vieira et al. 2011, Tirloni et al. 2012).

A área de campo natural apresentou valores médios de Ds que variaram de $1,37 \text{ kg dm}^{-3}$ a $1,53 \text{ kg dm}^{-3}$,

com o aumento da profundidade estudada (Tabela 2). Arshad et al. (1996) preconizaram que valores de Ds acima de $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$ podem causar restrições ao crescimento radicular das plantas. Para Araújo et al. (2007) e Cardoso et al. (2011), a Ds é um atributo que varia com o tempo, por processos naturais de adensamento e/ou práticas de manejo, em supressão da porosidade do solo, principalmente da macroporosidade.

De acordo com a classificação de Campos et al. (2012), o Cambissolo da área de campo natural apresenta composição textural variando de média a franco-siltosa e estrutura granular em blocos subangulares, à profundidade de 0,0-0,30 m. Estas características configuram a provável causa do elevado adensamento deste solo. A este respeito, Reichert et

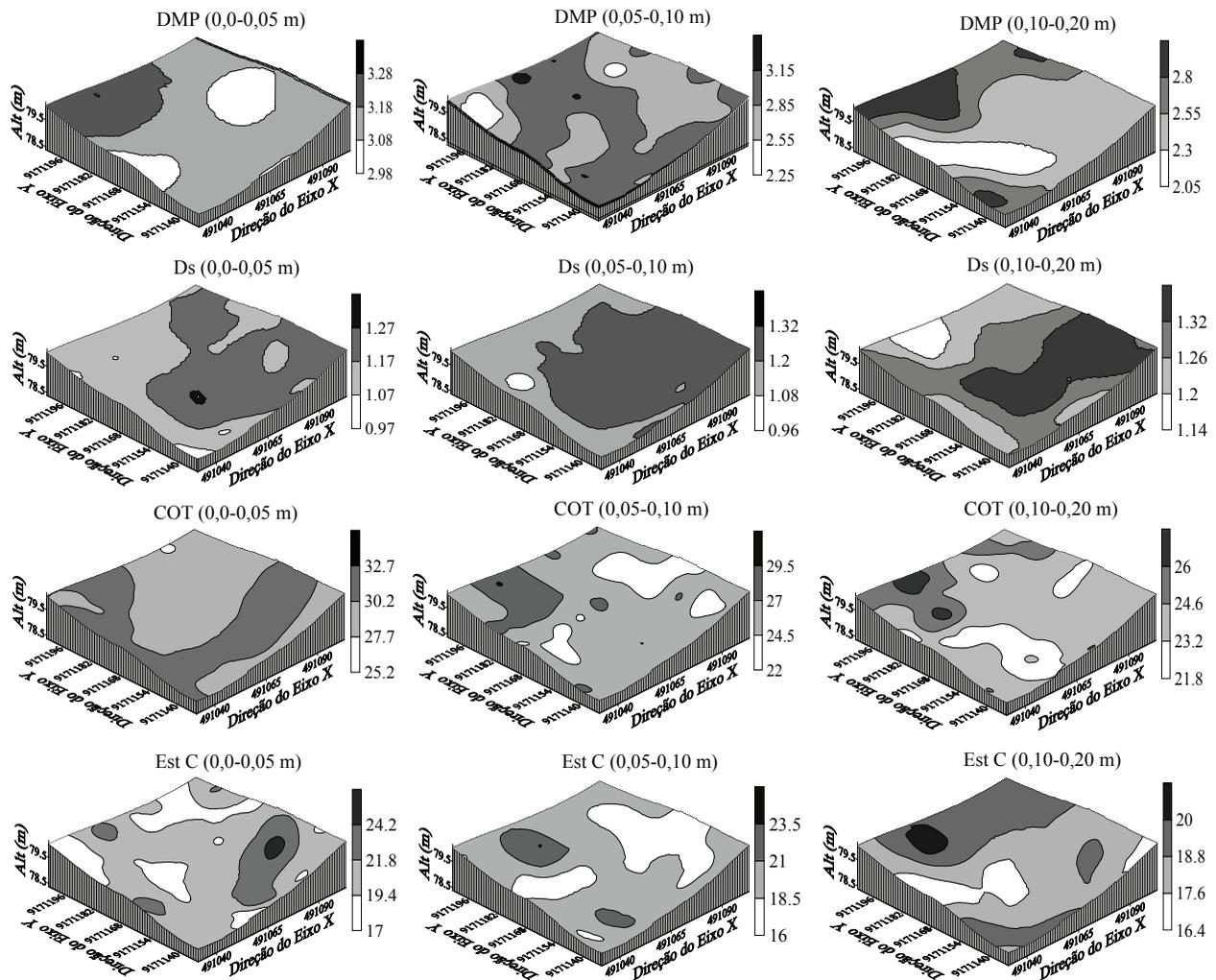


Figura 2. Mapas de krigagem dos atributos diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP), densidade do solo (Ds), carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono do solo (Est C) da área de floresta, em diferentes profundidades (Humaitá, AM, 2012).

al. (2007) e Ferreira (2010) comentaram que o solo pode torna-se adensado, como consequência da sua composição textural, regime de umidade e gênese, ressaltando que, nas camadas subsuperficiais, o adensamento pode dever-se ao empacotamento dos sedimentos granulares, parcialmente cimentados, cujos solos com estruturas do tipo em blocos, ou similares, tendem a ser os mais adensados.

Na área de floresta, a Ds apresentou valores médios de $1,20 \text{ kg dm}^{-3}$, à profundidade de 0,0-0,05 m, a $1,26 \text{ kg dm}^{-3}$, à profundidade de 0,10-0,20 m (Tabela 2). É comum, segundo Ferreira (2010), encontrar valores elevados de Ds nas camadas superficiais de Argissolo, devido ao teor de areia na composição textural deste solo. Todavia, o teor de areia do Argissolo da área de floresta da ordem de

$291,3 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 1) não corrobora esta afirmação. Provavelmente, o aporte cumulativo de material orgânico, em solos de floresta, esteja influenciando os resultados de Ds deste solo (Silva et al. 2008, Cardoso et al. 2011).

Com relação aos mapas de krigagem, a Ds das camadas subsuperficiais é verificada nas regiões mais elevadas do relevo, concordando com os resultados obtidos por Lemos Filho et al. (2008) e Campos et al. (2013). Entretanto, o oposto é observado à profundidade de 0,0-0,05 m. Este comportamento, segundo Lemos Filho et al. (2008), é resultante do carregamento de sedimentos, pela ação do escoamento superficial, das partes altas para as partes baixa da área.

Comparativamente, os teores de Est C do Cambissolo e Argissolo das áreas de campo natural

e floresta foram semelhantes. Em profundidade, os valores médios variaram de 20,28 Mg ha⁻¹ a 17,97 Mg ha⁻¹, no solo de campo natural, e de 20,51 Mg ha⁻¹ a 18,38 Mg ha⁻¹, no solo de floresta (Tabela 2). Resultados superiores foram obtidos por Chaves & Farias (2008), da ordem de 33,82 Mg ha⁻¹, à profundidade de 0,0-0,30 m, em Argissolo cultivado com cana-de-açúcar, e de 27,20 Mg ha⁻¹, por Novaes Filho et al. (2007), em Argissolo sob floresta, no Estado do Mato Grosso, os quais afirmam que o maior Est C, nas primeiras camadas do solo, é esperado, pois sofrem maior influência da matéria orgânica depositada pela floresta.

Os mapas de krigagem possibilitaram analisar a variabilidade espacial nas diferentes profundidades, concordando com os resultados obtidos por Novaes Filho et al. (2007) e Chaves & Farias (2008). À profundidade de 0,05-0,10 m da área de campo natural, a Ds apresentou variação espacial aleatória (EPP) e, como consequência, a distribuição espacial do Est C assemelhou-se ao COT, que, por sua vez, apresentou dependência espacial (Figura 1). Nas demais profundidades, tanto na área de campo natural como de floresta, os valores semelhantes de COT e de Est C demonstraram que, em níveis distintos de Ds, o conteúdo de COT foi determinante para os resultados de Est C encontrados nas diferentes áreas (Figuras 1 e 2).

CONCLUSÕES

1. Os atributos do solo apresentaram dependência espacial, no entanto, com maior variabilidade na área de campo natural, como consequência das constantes variações no formato do relevo, enquanto a constância dos valores dos atributos avaliados ao longo do terreno exprime o formato linear do relevo e da estabilidade do ambiente de floresta.
2. A estabilidade de agregados do solo, o carbono orgânico e o estoque de carbono do solo apresentaram similaridade entre os ambientes estudados, todavia, o maior adensamento do solo implicou em ineficiência das funções estruturais do solo da área de campo natural.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1099-1108, 2007.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141.

BRAUN, E. H. G.; RAMOS, J. R. A. Estudo agroecológico dos campos Puciari-Humaitá (Estado do Amazonas e Território Federal de Rondônia). *Revista Brasileira de Geografia*. Rio de Janeiro, v. 21, n. 4, p. 443-497, 1959.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. *Principles of geographical information systems*. Oxford: Oxford University Press, 2000.

CAMPOS, M. C. C. *Pedogeomorfologia aplicada a ambientes amazônicos do médio Rio Madeira*. 2009. 242 f. Tese (Doutorado em Ciências Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, 2009.

CAMPOS, M. C. C. et al. Toposequência de solos na transição campos naturais-floresta na região de Humaitá, Amazonas. *Acta Amazônica*, Manaus, v. 42, n. 3, p. 387-398, 2012.

CAMPOS, M. C. C. et al. Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Argissolo Vermelho sob floresta. *Comunicata Scientiae*, Teresina, v. 4, n. 2, p. 168-178, 2013.

CARDOSO, E. L. et al. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no pantanal sul-mato-grossense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 613-622, 2011.

CHAVES, L. H. A.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos tabuleiros costeiros da Paraíba: solo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v. 3, n. 1, p. 20-25, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPQ, 1997.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: VAN LIER, J. (Ed.). *Física do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 1-283.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An introduction to applied geostatistics*. Oxford: Oxford University Press, 1989.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 425-441.

LEMOS FILHO, L. C. A. et al. Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada

- com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 39, n. 2, p. 193-202, 2008.
- LIMA, C. L. R. et al. Estabilidade de agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 199-205, 2003.
- MONTANARI, R. et al. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 40, n. 1, p. 69-77, 2005.
- NOVAES FILHO, J. P. et al. Distribuição espacial de carbono em solo sob floresta primária na Amazônia meridional. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 83-92, 2007.
- OLIVEIRA, I. A. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1103-1112, 2013.
- REDIN, M. et al. Impactos da queima sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 381-392, 2011.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: NOVAIS, R. F. de et al. (Eds.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49-134.
- SILVA, R. F. et al. Atributos físicos e teor de matéria orgânica na camada superficial de um Argissolo Vermelho cultivado com mandioca sob diferentes manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2435-2441, 2008.
- SOUZA, Z. M. et al. Otimização amostral de atributos de latossolos considerando aspectos solo-relevo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 829-836, 2006.
- TIRLONI, C. et al. Physical properties and particle-size fractions of soil organic matter in crop-livestock integration. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1299-1309, 2012.
- VASCONCELOS, R. F. B. et al. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 309-316, 2010.
- VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, n. 1, p. 175-180, 1994.
- VIDOTTO, E. et al. Dinâmica do ecótono floresta-campo no sul do Estado do Amazonas no Holoceno, através de estudos isotópicos e fitossociológicos. *Acta Amazonica*, Manaus, v. 37, n. 3, p. 1-24, 2007.
- VIEIRA, S. R. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. *Bragantia*, Campinas, v. 70, n. 1, p. 185-195, 2011.
- WENDLING, B. et al. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do Cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 28, n. 1, p. 256-265, 2012.
- YOEMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, Philadelphia, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.