

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA TROPICAL**

**ATRIBUTOS DO SOLO E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> EM ÁREA DE TERRA  
PRETA ARQUEOLÓGICA SOB CULTIVO DE CACAU NO  
MUNICÍPIO DE APUÍ, AM**

**DOUGLAS MARCELO PINHEIRO DA SILVA**

**MANAUS  
2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA TROPICAL**

**DOUGLAS MARCELO PINHEIRO DA SILVA**

**ATRIBUTOS DO SOLO E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> EM UMA ÁREA DE  
TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA SOB CULTIVO DE CACAU NO  
MUNICÍPIO DE APUÍ, AM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Agronomia Tropical, área de concentração Produção Vegetal.

**Orientador: Prof. Dr. Milton César Costa Campos**

**MANAUS  
2013**

Silva, Douglas Marcelo Pinheiro da

S586a Atributos do solo e emissão de CO<sup>2</sup> em área de terra preta arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM / Douglas Marcelo Pinheiro da Silva. – Manaus, 2013.

77f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia Tropical) – Universidade Federal do Amazonas.

Orientador: Prof. Dr. Milton César Costa Campos

1. Terra preta arqueológica 2. Atmosfera do solo 3. Cacau cultivo I. Campos, Milton César Costa (Orient.) II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

CDU 2007 631.417.1(811.3) (043.3)

**DOUGLAS MARCELO PINHEIRO DA SILVA**

**ATRIBUTOS DO SOLO E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> EM UMA ÁREA DE  
TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA SOB CULTIVO DE CACAU NO  
MUNICÍPIO DE APUÍ, AM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Agronomia Tropical, área de concentração Produção Vegetal.

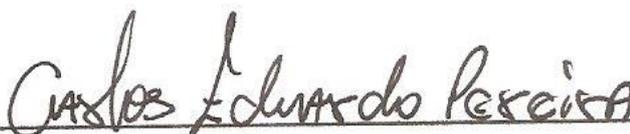
APROVADA: 22 de novembro de 2013

**BANCA EXAMINADORA**



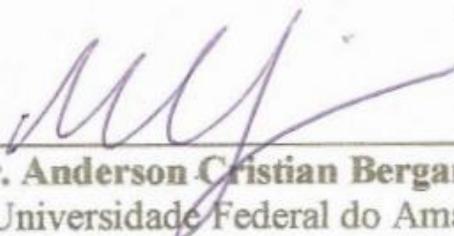
---

**Prof. Dr. Milton César Costa Campos, Presidente**  
Universidade Federal do Amazonas



---

**Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, Membro**  
Universidade Federal do Amazonas



---

**Prof. Dr. Anderson Cristian Bergamin, Membro**  
Universidade Federal do Amazonas

## **DEDICO**

A minha noiva Maria da Conceição Jacob de Oliveira.

## **OFEREÇO**

A minha família, especialmente ao meu pai Danilo Pinheiro e Minha mãe Rita Bressan da Silva e meus irmãos Diogo e Rodrigo.

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS!

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical (PPGATR) pela oportunidade de realizar esse mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsa de estudo.

Ao Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente (IEAA/UFAM) e a Faculdade de Ciências Agrárias (FCA/UFAM) que disponibilizou toda sua estrutura que viabilizaram a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Milton César Costa Campos, por todo o ensinamento, pela orientação, apoio, confiança e amizade.

À banca examinadora da defesa desse trabalho, integrada pelos professores Anderson Cristian Bergamin e Carlos Eduardo Pereira pelas considerações, discussão e sugestões.

Aos demais professores do PPGATR pela dedicação a transmissão do conhecimento.

Agradeço de maneira especial a toda equipe do Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas do IEAA.

A todos os colegas da pós-graduação, pela companhia e convívio, pelo compartilhar do conhecimento e, principalmente, pelos momentos de descontração.

A todos os meus amigos e colegas dentro e fora da Universidade.

## RESUMO

As Terras Pretas Arqueológicas podem ser encontradas sob diversos tipos de solos, mas sua origem ainda não está bem esclarecida. Estes solos se caracterizam por sua elevada fertilidade, atribuída às propriedades físico-químicas da matéria orgânica, possui horizontes bem drenados, com textura variando de franca arenosa a franca siltosa e baixos valores de densidade do solo, condições de aeração, porosidade e condutividade hidráulica adequada para promover a infiltração de água e favorecer as trocas gasosas. Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar os atributos do solo e emissão de CO<sub>2</sub> em uma área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM. Foi realizado o mapeamento de uma área de 42 x 88 m de TPA cultivada com cacau. Em espaçamentos de 6 x 8 m foram demarcados os pontos amostrais, sendo efetuadas as coletas de solo nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Foi determinado a textura, a resistência do solo à penetração, densidade do solo, umidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total do solo, estabilidade de agregados, carbono orgânico total (COT), emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade. Os atributos físicos da Terra Preta Arqueológica apresentam dependência espacial forte, com exceção da resistência do solo a penetração na profundidade de 0,20-0,30 e volume total de poros nas profundidades de 0,10-0,20 e 20-0,30 que apresentaram moderada dependência. Os mapas de krigagem das variáveis indicam que a variação espacial da emissão de CO<sub>2</sub> está influenciado principalmente pela umidade e densidade dos solo.

**Palavras-chave:** Geoestatística, Krigagem, Solo antrópico

## ABSTRACT

The Soil Anthropic *Terra Preta* can be found in many types of soils, but its origin is still a little bit unknown. These soils are characterized by high fertility that it is attributed to the physicochemical properties of organic matter, they have well-drained horizons, with texture ranging from sandy frank to silty frank and they have low values of bulk density, aeration conditions, porosity and hydraulic conductivity appropriate to promote water infiltration and facilitate gas exchange. So, this work has aimed to analyze the soil properties and CO<sub>2</sub> emission in an area of soil anthropic *Terra Preta* under cocoa cultivation in Apuí City - AM. It made the mapping of an area of 42 x 88 m TPA cultivated with cocoa. It was marked sampling points in spacing of 6 x 8 m, being made the collection of soil at depths of 0.0-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20 and 0.20 - 0.30 m. It was determined texture, soil penetration resistance, bulk density, moisture, macroporosity, microporosity, total porosity of the soil, aggregate stability, total organic carbon (TOC), CO<sub>2</sub> emission, soil temperature and humidity. The physical attributes of Soil Anthropic *Terra Preta* present strong spatial dependence, with the exception of soil resistance to penetration depth of 0.20-0.30 and porosity total volume at depths of 20 to 0.30 and 0.10-0.20 that had moderate dependence. The kriging maps of variables indicate that the spatial variation of CO<sub>2</sub> emission is mainly influenced by the moisture and density of soil.

**Keywords:** Geostatistics, Kriging, Soil anthropic.

**INDICE DE TABELAS**

Tabela 1. Estatística descritiva da textura do solo em diferentes profundidades de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM. ....	36
Tabela 2. Modelos e parâmetros estimados Estatística descritiva da textura do solo em diferentes profundidades de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.....	38
Tabela 3. Estatística descritiva dos atributos físicos do solo em diferentes profundidades em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM. ....	41
Tabela 4. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas dos atributos físicos do solo em diferentes profundidades em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.....	45
Tabela 5. Estatística descritiva do diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP), densidade (Ds), carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono (Est C) do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.....	62
Tabela 6. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas do diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP), densidade (Ds), carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono (Est C) do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.....	65
Tabela 7. Estatística descritiva da emissão de CO <sub>2</sub> , temperatura e umidade do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.....	71
Tabela 8. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas da emissão de CO <sub>2</sub> , temperatura e umidade do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.....	73

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapas de krigagem das frações texturais do solo nas profundidades de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m.....	39
Figura 2. Mapas de krigagem das frações texturais do solo nas profundidades de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.....	40
Figura 3. Mapas de krigagem do atributo físico do solo, volume total de poros (VTP), nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30. ....	47
Figura 4. Mapas de krigagem dos atributos físicos do solo, resistência do solo a penetração (RP) e densidade do solo (Ds) nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30.....	48
Figura 5. Mapas de krigagem dos atributos físicos do solo, macroporosidade (Macro) nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30, umidade volumétrica profundidades de 0,00-0,05 e 0,20-0,30 e microporosidade na profundidade de 0,20-0,30 m.....	49
Figura 6. Mapas de krigagem dos atributos físicos do solo, diâmetro médio geométrico (DMG) nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30, 0,00-0,05 e carbono orgânico (COT) total nas profundidades de 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30, 0,10. ....	69
Figura 7. Mapas de krigagem do atributos físico do solo, diâmetro médio ponderado (DMP) nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30. ....	69
Figura 8. Mapas de krigagem dos atributos físicos do solo, densidade do solo (Ds) profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30; e estoque de carbono nas profundidades de 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30.....	70
Figura 9. Mapas de krigagem do Fluxo de CO <sub>2</sub> (F CO <sub>2</sub> ), Temperatura do solo (T solo), Umidade do solo (U solo).....	74

## SUMARIO

CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	11
1. INTRODUÇÃO GERAL .....	11
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	12
2.1. Características gerais da região de Apuí.....	12
2.2. Características gerais das Terras Pretas Arqueológicas.....	14
2.3. Geoestatística .....	16
2.4. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo .....	21
3. REFERÊNCIA .....	23
VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE TERRA PRETA ARQUEOLOGICA SOB CULTIVO DE CACAU NO MUNICIPIO DE APUÍ, AM.....	29
RESUMO .....	29
ABSTRACT .....	30
1. INTRODUÇÃO.....	31
2. MATERIAL E METODOS.....	32
2.1. Caracterização da área .....	32
2.2. Metodologia de campo.....	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	35
4. CONCLUSÕES .....	50
5. REFERÊNCIAS .....	50
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA EMISSÃO CO <sub>2</sub> E ATRIBUTOS DO SOLO EM ÁREA DE TERRA PRETA ARQUEOLOGICA SOB CULTIVO DE CACAU NO MUNICIPIO DE APUÍ, AM .....	54
RESUMO .....	54
ABSTRACT .....	55
1. INTRODUÇÃO.....	56
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	57
2.1 Caracterização da área .....	57
2.2. Metodologia de Campo.....	58
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	61
4. CONCLUSÃO.....	74
5. REFERÊNCIAS .....	75

## CONSIDERAÇÕES GERAIS

### 1. INTRODUÇÃO GERAL

As Terras Pretas Arqueológicas (TPAs) são solos oriundos de atividades humanas e ocorrem em sítios ou assentamentos cuja origem ainda não é bem esclarecida, estes ambientes caracterizam-se por sua alta fertilidade natural, resultante da prolongada ocupação humana, que se manifesta pela presença de fragmentos de artefatos cerâmicos e material lítico, assim como, restos de fauna e flora, e devido a coloração escura da camada superficial, esses solos são conhecidos por designações, tais como, Terra Preta de Índio (TPI), Terra Preta Antropogênica ou Terra Preta Arqueológica (TPA), além de uma variante menos divulgada, a Terra Mulata (KAMPF & KERN, 2005).

A origem das TPAs ainda é motivo de controvérsias entre pesquisadores, mas a hipótese mais aceita é que seu aparecimento se deve à atividade humana (SMITH, 1980), provavelmente de populações pré-colombianas. Embora aceita, esta afirmativa gera uma série de dúvidas, entre as quais o questionamento da formação intencional ou como mera consequência da ocupação humana (KERN et al., 2003, NEVES et al., 2003), ou seja, originaram-se por antropogênese associada à pedogênese.

A elevada fertilidade das TPAs é atribuída às propriedades físico-químicas da matéria orgânica, principalmente pela contribuição significativa do carbono pirogênico, formado por oxidação incompleta de materiais orgânicos (DERENNE & LARGEAU, 2001) que exibem alta resistência à oxidação termal, química e até à foto-oxidação (SKJEMSTAD et al., 1996).

Quanto aos atributos físicos, as TPAs tem horizontes bem drenados, com textura variando de franca arenosa a franca siltosa e baixos valores de densidade do solo (SANTOS et al., 2013), apresentando condições de aeração, porosidade e condutividade hidráulica adequada para promover a infiltração de água e favorecer as trocas gasosas (NEVES JÚNIOR, 2008).

Os horizontes das TPAs apresentam cores úmidas variando de bruno-acinzentado muito escuro a preto, enquanto os horizontes subsuperficiais, apresentam cores amareladas ou avermelhadas, marcando uma nítida diferenciação entre o horizonte A escuro (antropogênico) e os horizonte diagnóstico subsuperficial (CAMPOS et al., 2011).

Para Neves et al. (2007) a quantificação das alterações nos atributos do solo, pode fornecer subsídios importantes para a definição de sistemas racionais de manejo, contribuindo assim para tornar o solo menos suscetível à perda da capacidade produtiva. Portanto, a utilização da geoestatística permite detectar a existência da variabilidade espacial dos atributos estudados, constituindo importante ferramenta na análise e descrição detalhada da variabilidade dos atributos do solo (CARVALHO et al., 2002; VIEIRA et al., 2011).

Estudos têm demonstrado que a variabilidade espacial de atributos do solo não ocorre ao acaso (CAMPOS et al., 2007; GUEDES FILHO et al., 2010) e a geoestatística possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os atributos do solo e emissão de CO<sub>2</sub> em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Características gerais da região de Apuí**

O município de Apuí ocupa uma área de 54.240 km<sup>2</sup> ao sudeste do estado do Amazonas fazendo limites com os Estado do Mato Grosso e Pará, e os municípios de Novo Aripuanã, Borba e Maués, AM (BRASIL, 1978). O município de Apuí, AM apresenta clima tropical com expressiva variabilidade, principalmente no tocante à distribuição espacial e temporal de chuvas, cuja zona climática, segundo a classificação de Köppen, pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso), caracterizada pelo tipo Am (chuvas do tipo monção), com período seco de

pequena duração e pluviosidade limitada pelas isoietas de 2.200 e 2.800 mm. Apresenta temperaturas médias anuais variando entre 25° e 27° C e umidade relativa do ar variando entre 85 e 90% (BRASIL, 1978).

A grande quantidade de chuvas corrobora para o perfeito desenvolvimento da vegetação, que é constituída por floresta tropical, composta em boa parte por árvores de grande porte e próximas umas das outras. De acordo com Veloso et al. (1991) essa vegetação característica da região compreende as seguintes tipologias:

a) Floresta Tropical Densa Aluvial, constituída por vegetação de rápido crescimento, em geral de casca lisa, tronco cônico, por vezes com a forma característica de botija e raízes tabulares que ocorre ao longo dos cursos de água;

b) Floresta Tropical Densa de Terras Baixas, formação que em geral ocupa as planícies costeiras, apresenta uma florística bastante típica, esta formação ocorre nos terrenos quaternários situados em geral pouco acima do nível do mar;

c) Floresta Tropical Densa Submontana, localiza-se em áreas dissecadas do relevo montanhoso e dos planaltos, com solos medianamente profundos que são ocupados por uma formação florestal de fanerófitos com altura aproximadamente uniforme e integrada por plântulas de regeneração natural, com a presença de palmeiras de pequeno porte e lianas herbáceas em maior quantidade.

Quanto a geologia, a área de estudo está inserida na Bacia do Alto Tapajós, porção sul do Cráton Amazônico, que recobre o limite entre as províncias geocronológicas Tapajós – Parima e Rondônia – Juruena, cujo arcabouço e compartimentações litológica e faciológica ainda permanecem pouco estudados em relação à estratigrafia paleozóica da Bacia do Amazonas (a nordeste) e sub-bacias que integram a Bacia do Solimões (a noroeste) (REIS 2006).

Efetando o levantamento geológico no município de Apuí, Reis (2006) encontrou nas proximidades da região de estudo a Formação Beneficente, que agrupa rochas sedimentares

clásticas que estão em descontinuidade sobre as rochas vulcânicas Colíder a sul e sudoeste do município de Apuí, a Formação Juma que reuni um espesso pacote sedimentar representado por siltitos e arenitos finos acinzentados e a Formação Prainha que trata-se de uma sucessão sedimentar clástica sobrejacente à fácies pelítica, formada por arenitos arcoseanos avermelhados, granulação fina à média com níveis conglomeráticos, intercalações de siltitos e argilitos maciços, bem como arenitos puros a feldspáticos.

De acordo com o IBGE (2000), na região de Apuí são encontrados principalmente: a) Latossolos: que são solos minerais profundos e muito intemperizados, cuja característica diagnóstica é a presença de um horizonte B latossólico, isto é, um horizonte subsuperficial, com pelo menos 50 cm de espessura, que possui elevado grau de intemperismo e b) Argissolos: que tem profundidade variável, sua drenagem pode variar de muito boa a imperfeitamente drenado. Morfologicamente, apresentam cores com tonalidades amareladas ou avermelhadas, mas também podem ser brunados ou acinzentados e são solos de elevada pobreza química natural e com ausência de reservas de nutrientes minerais.

## **2.2. Características gerais das Terras Pretas Arqueológicas**

As Terras Pretas Arqueológicas (TPAs) podem ter sua formação associada com atividades relacionadas ao preparo e processamento de alimentos; e resíduos das moradias e atividades humanas (NEVES et al., 2003). Para Glaser (2007) as TPAs se originaram, provavelmente, do carvão, resíduos de alimentos e restos de material arqueológico. Lima et al. (2002) acrescentaram ainda à sua origem, atividades domésticas e agrícolas que geraram grande quantidades de material orgânico decomposto, em parte na forma de carvão, como resíduo de fogueiras domésticas e de queimadas para uso agrícola do solo.

Na paisagem, as TPAs são encontradas geralmente próximas aos cursos de água, ocupando várzeas, elevações marginais adjacentes, com extensão variando de um a centenas de

hectares, ao longo de rios e interflúvios. Estes locais são bem drenados, localizados em áreas com posição topográfica que permite boa visualização espacial e acesso aos recursos de diferentes ambientes (KÄMPF & KERN, 2005). A esse respeito, German (2003) afirmou que as TPAs estão localizadas em pontos estratégicos e que comumente apresentam duas características marcantes: 1) possibilidade de acesso aos recursos de diferentes ambientes e; 2) controle das vias de acesso e visibilidade para defesa.

Estas áreas de TPAs apresentam elevada fertilidade quando comparados com os solos adjacentes, com teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  elevados (CAMPOS et al., 2011; SANTOS et al., 2013), contudo, com variação dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  entre as áreas de TPAs, o que pode ser reflexo da variação do tempo e da densidade da ocupação humana nestas áreas (SANTOS et al., 2011). Quanto aos teores de fósforo, os horizontes antropogênicos apresentam elevada disponibilidade deste nutriente (SILVA et al., 2011), devido a incorporação de resíduos orgânicos ricos em fósforo pelas populações pré-colombianas (LIMA et al., 2002).

A ação antrópica advinda da ocupação pré-colombiana ocasionou um incremento de matéria orgânica no solo através do acúmulo de material orgânico (KERN & KÄMPF, 1989), e a sua manutenção no solo por meio, possivelmente, das características químicas e da resistência do material à decomposição microbiana, pois, esta matéria orgânica é formada por substâncias húmicas mais estáveis, de difícil degradação, e como consequência ocorre a melhoria na qualidade da matéria orgânica do solo (MOREIRA, 2007). De acordo com Pabst (1991), a matéria orgânica das TPAs pode ser seis vezes mais estável que a de solos não antrópicos.

As características físicas das TPAs podem variar dentro de cada sítio e entre sítios, dependendo do padrão das comunidades pré-históricas ocupantes (SANTOS et al., 2011). Campos et al. (2011) caracterizando e classificando de TPAs na Região do Médio Rio Madeira observaram que a classe textural dos horizontes antropogênicos pode variar entre franco-

arenosa, franca e franco-argilo-arenosa com dominância da fração areia, em particular da areia grossa no horizonte antrópico, além de verificar nítida variação da textura em função da posição de ocorrência das TPAs no relevo.

As TPAs geralmente apresentam menor densidade do solo em comparação aos solos adjacentes, como mostra o estudo realizado por Neves Júnior (2008) em solos com horizontes antrópicos. O autor constatou baixos valores de densidade do solo nos horizontes antrópicos e aumento da densidade com a profundidade, fato que se deve a ocorrência da diminuição do volume de poros em função dos baixos valores de carbono orgânico nos horizontes não antropogênicos.

O teor de carbono orgânico está relacionado com a estrutura de agregados dos solos, como ressaltou Campos et al. (2011) relataram que os horizontes antropogênicos possuem estrutura com agregados granulares com grau de desenvolvimento forte, de tamanhos variando de pequeno a muito pequeno e de acordo com Cunha et al. (2007) este fato é atribuído à ação do carbono pirogênico que tem papel importante na formação e estabilização dos agregados.

Segundo Kern et al. (2003) as TPAs em Latossolos e Argissolos são mais comuns, estendendo-se através de grandes áreas. Neves Júnior (2008) encontrou TPA em Argissolo e Latossolo na região de Iranduba, Amazonas. Por sua vez, Campos et al. (2011) caracterizaram quatro perfis de TPA em Argissolo localizados em posições distintas da paisagem no sul do Amazonas, e nesta mesma paisagem Santos et al. (2013) caracterizaram perfis de TPA em Cambissolo, Argissolo e Neossolo.

### **2.3. Geoestatística**

A ferramenta geoestatística se diferencia de outros métodos estatísticos, basicamente, na forma de avaliar os dados, ou seja, enquanto outros métodos, como a estatística clássica, as coordenadas geográficas dos pontos amostrados são desprezadas, a geoestatística se utiliza

dessas informações para se conhecer a estrutura da variação (BERNER et al., 2007). A utilização da geoestatística permite analisar os dados de experimentos, com possibilidade de obter informações encobertas pela estatística clássica (RIBEIRO et al., 2006).

O estudo da variabilidade espacial por meio da geoestatística possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (CAMPOS et al., 2013). Contudo, a análise geoestatística permite detectar a existência da variabilidade e distribuição espacial das medidas estudadas constituindo importante ferramenta na análise e descrição detalhada da variabilidade dos atributos do solo (VIEIRA, 2000; CARVALHO et al., 2002).

Vieira & Dechen (2010) relataram que a geoestatística é uma ferramenta adequada e fundamental para a análise de atributos variáveis no espaço, que apresentam algum grau de organização ou continuidade detectáveis por medidas de dependência espacial. Contudo, uma vez conhecido o modelo da dependência espacial é possível mapear a área estudada e quando um determinado atributo do solo varia de um local para outro, com algum grau de organização ou continuidade expresso por meio da dependência espacial, a estatística clássica deve ser aliada a geoestatística (CAMPOS et al., 2007).

Vieira (1997) e Silva et al. (2004), relataram a importância da incorporação do conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo ao processo de produção agrícola, pois esta variabilidade influencia de forma decisiva o manejo a ser adotado nas áreas cultivadas.

Com as novas técnicas em geoprocessamento, a aplicação da geoestatística em mapeamento digital de solos traz enorme contribuição para o conhecimento da variabilidade dos atributos do solo no campo (NOVAES FILHO et al., 2007). Sendo que, o interesse da análise geoestatística não se limita à obtenção de um modelo de semivariograma e seus parâmetros, desejando-se também prever valores em pontos não amostrados, sobretudo de

atributos que sofrem influência do manejo. O interesse pode concentrar-se em um ou mais pontos específicos da área ou na obtenção de uma malha de pontos interpolados, de modo a permitir a visualização da dinâmica da variável na região, o que é obtido empregando-se a interpolação por krigagem (GOMES et al., 2007).

A análise da variabilidade espacial é realizada por um conjunto de técnicas e conceitos, como a geoestatística, que considera como fator primordial a localização geográfica e a dependência espacial das variáveis em estudo, que são denominadas variáveis regionalizadas. Conhecendo as coordenadas geográficas do ponto amostrado, podem-se analisar os dados, possibilitando, segundo Vendrusculo (2001) representar a área com maior detalhamento, e isto é obtido por meio da distância entre pontos de amostragem. Portanto, através desta ferramenta se permite conhecer a continuidade de uma variável de interesse em toda uma área de estudo, demonstrando a variação espacial da propriedade por meio de mapas de variabilidade. Pois uma das grandes aplicações da geoestatística é a possibilidade de construção de mapas temáticos que permitam analisar a variável em estudo (LEMOS FILHO et al., 2008).

Souza et al. (2004) ressaltaram que a análise da dependência espacial é baseada na suposição de que medições separadas por distâncias pequenas são mais semelhantes umas às outras, que aquelas separadas por distâncias maiores. Assim, a partir do ajuste de funções teóricas a modelos de semivariogramas experimentais é possível verificar a existência de dependência espacial (VIEIRA et al., 1983).

Vários estudos tem destacado que a análise geoestatística não se limita apenas na obtenção de um modelo de semivariograma e seus parâmetros, desejando-se também prever valores em locais não amostrados da área de estudo (BERNER et al., 2007; GOMES et al., 2007, LEÃO & PERFECT, 2010), desta forma a krigagem é uma técnica usada na geoestatística com o objetivo de estimar valores para locais onde os mesmos não foram medidos a partir de valores adjacentes interdependente (VIEIRA, 2000).

Utilizando as técnicas da krigagem e expressando as informações por meio de mapas em conjunto com o Modelo Digital de Elevação (MDE), Souza et al. (2004) concluíram que a identificação de compartimentos da paisagem na área de estudo são eficientes na compreensão das causas da variabilidade espacial de atributos do solo, assim, as pequenas variações na forma do relevo condicionam variabilidade espacial diferenciada na paisagem. Segundo Sousa Júnior & Demattê (2008) o MDE é uma ferramenta útil no mapeamento de solos e sua distribuição em relação a paisagem, e vem se destacando em pesquisas sobre mapeamento tornando-o mais acurado.

Para Silva Junior et al. (2012) uma boa maneira de investigar a variabilidade espacial de atributos do solo é a aplicação de técnicas computacionais que consideram os aspectos geográficos da obtenção dos dados, como por exemplo, o MDE e as técnicas geoestatísticas, pois, o MDE é uma representação digital da superfície que permite uma rápida e útil análise de uma área de interesse, tal como entender variáveis ligadas à altitude, e quando associado aos mapas de variabilidade, este modelo pode configurar-se como uma importante ferramenta para visualização e entendimento das relações de causa e consequência da distribuição espacial dos atributos do solo.

Em trabalhos realizado por Campos et al. (2007); Souza et al. (2008) e Lima et al. (2009) utilizando-se de MDE e técnicas geoestatística para relacionar os atributos do solo com as formas do terreno, constataram que alguns resultados só puderam ser explicados com a avaliação conjunta dos dois métodos. Outros autores como Sanchez et al. (2005) e Silva et al. (2010), ressaltaram que em áreas aparentemente homogêneas sob única classe de solo, com o uso de modelos de paisagem e as técnicas geoestatística, determinou-se dependência espacial de atributos do solo com variações quantitativas suficientes para interferir na produtividade das culturas.

Segundo Vieira (2000) a análise geoestatística se apoia no cálculo do semivariograma, um gráfico que descreve a existência ou não da dependência espacial. Portanto, o semivariograma é o principal método geoestatístico para se detectar a variabilidade espacial, sendo que o método geoestatístico é composto por uma análise de semivariograma e krigagem, que é usado para analisar tanto a dependência espacial como para interpolar atributos (VIEIRA et al., 1983). O procedimento permite determinar se um atributo apresenta padrão espacial e conhecendo o modelo da dependência espacial é feito o mapeamento da área estudada. Assim a análise geoestatística permite detectar a existência da variabilidade e distribuição espacial das medidas estudadas, constituindo importante ferramenta na análise e descrição da variabilidade das propriedades do solo (VIEIRA, 2000; CARVALHO et al., 2002).

Portanto, a análise geoestatística se inicia com a verificação da existência da dependência espacial, determinando-se a semivariância, a qual é definida como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados pelo vetor distância  $h$  (VIEIRA, 1997) em que o semivariograma é por definição:

$$Y(h) = (1/2) E ((Z(X_i) - Z(X_i + h))^2)$$

e pode ser estimado pela seguinte equação:

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

Onde  $N(h)$  é o número de pares de valores medidos,  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$ , separados pela distância  $h$ , se a variável for escalar e  $Z$  representa os valores medidos para os atributos do solo. O gráfico de  $\hat{\gamma}^*(h)$  versus os valores correspondentes de  $h$ , chama-se semivariograma (SOUZA et al., 2001). Após o ajuste do semivariograma, são estimados os coeficientes de: a) **alcance (a)**: distância, dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente; indica que amostras localizadas a distâncias menores que o alcance são correlacionadas umas com as outras. Sendo que o alcance é dependente do tamanho da área amostrada e da escala de observação, sendo tanto maior quanto maior for o intervalo entre medidas (TRANGMAR et al., 1985). b)

**patamar ( $C_1$ ):** valor do semivariograma a partir do qual a semivariância torna-se constante e acima do qual considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras. c) **Efeito Pepita ( $C_0$ ):** valor da semivariância para distâncias ( $h$ ) igual a zero e que representa a contribuição da variação ao acaso.

Contudo, o ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes, em que todos os cálculos da geoestatística dependem do modelo do semivariograma para cada distância especificada e, do ajuste do modelo matemático aos dados do gráfico, ou seja, a uma função, define os parâmetros do semivariograma. Em estudos voltados para ciência do solo os modelos mais utilizados são: a) modelo linear; b) modelo esférico; c) modelo exponencial e d) modelo gaussiano (VIEIRA, 2000).

#### **2.4. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo**

A variabilidade espacial das propriedades do solo ocorre naturalmente devido a fatores pedogênicos diversos, e esta variabilidade pode ser causada ainda pelo uso e manejo dos solos e, como consequência, as propriedades do solo podem exibir variabilidade espacial em macro, meso e microescalas (PANOSSO et al., 2008) e pode ser demonstrada por resultados dos levantamentos e análises, bem como pelas diferenças encontradas nas produções das plantas (SILVA et al., 2010).

Em trabalhos realizados por Abreu et al. (2003) e Grego & Vieira (2005) observou-se que além da variabilidade natural do solo, as práticas agrícolas de manejo são fontes adicionais de variação e incrementam a variabilidade do solo.

Para Vieira & Klein (2007), dentre os componentes do manejo, o preparo do solo é o que mais influi em seu comportamento físico, visto que atua diretamente em sua estrutura, causando modificações na porosidade e densidade, que afetam a retenção de água e a resistência do solo a penetração. Consequentemente, a geoestatística tem sido aplicada no estudo da distribuição

espacial das propriedades físicas do solo (SOUZA et al., 2001; SOUZA et al., 2004; GREGO & VIEIRA, 2005).

O solo, segundo Oliveira et al. (2000), apresenta como característica marcante a sua heterogeneidade e na paisagem natural ocorre ampla variação das propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, tanto na posição horizontal como na vertical, resultante dos processos pedogenéticos. O conhecimento dessa variação é importante no levantamento, na sua classificação, na avaliação de sua fertilidade e, principalmente, para o desenvolvimento de esquemas de amostragem mais adequados.

Sobre este assunto, Campos et al. (2012) afirmaram que variações no formato do relevo apresentam relação direta com a variação dos solos. Para Souza et al. (2004), a posição na paisagem e a declividade do solo cria um padrão complexo de transporte de água e solutos promovendo modificações no perfil do solo. Abreu et al. (2003) comentaram que por ser um corpo tridimensional formado pela ação de vários fatores e processos, o solo tem uma variação de suas características ao longo da paisagem.

A variabilidade espacial de atributos do solo tem sido tema de estudos recorrentes no âmbito da ciência do solo, principalmente, no que tange a relação solo-paisagem (PANOSSO et al., 2006; CAMPOS et al., 2007; SANCHEZ et al., 2009; LEÃO & PERFECT, 2010). A esse respeito, Berner et al. (2007) afirmaram que é bastante imprecisa a análise de atributos do solo sem se considerar a influência espacial, ou seja, a posição relativa do terreno, mesmo que seja análises de correlação entre atributos. Portanto, o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo, por meio da krigagem ordinária, permitem estimar, apropriadamente, os valores de atributos em áreas não amostradas, além de direcionar projetos futuros com pesquisas de amostragens de solo (VIEIRA, 2000).

Trabalhos como os de Souza et al. (1999) e Mercante et al. (2003), apresentaram variáveis regionalizadas de propriedades do solo com estruturas de dependência espacial. Segundo Ortiz

(2002), o estudo e a análise estrutural do fenômeno por meio da geoestatística também devem considerar que a estrutura da variabilidade espacial está relacionada com a estrutura natural do fenômeno. Por outro lado, considerando que os fatores e processos de formação do solo interagem de modo diferente, tanto no espaço como no tempo, a natureza da variabilidade identificada pelos estudos georreferenciados das propriedades do solo depende largamente da escala de observação, da propriedade em questão e da metodologia utilizada (MACHADO et al., 2006).

A variabilidade espacial para os atributos físicos e químicos e sua relação com a estabilidade de agregados é influenciada pelo histórico de manejo das áreas de estudo (VEIRA et al., 2011). Com relação à variabilidade espacial da estabilidade de agregados, Carvalho et al. (2004) descreveram que a distribuição espacial dos agregados não é ao acaso, mas resultante de diferentes processos naturais de formação e manutenção dos agregados.

Em uma área cultivada existem, além da variabilidade natural, fontes adicionais de heterogeneidade no solo, devido ao manejo adotado (CAMARGO et al., 2010). Tais variações influenciam o acúmulo de material orgânico, o movimento de água no solo, a compactação e a erosão hídrica (NOVAES FILHO et al., 2007). Sendo que, áreas pedologicamente similares podem apresentar variabilidade distinta em seus atributos quando submetidas a diferentes práticas de manejo (CORÁ et al., 2004).

### 3. REFERÊNCIA

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; DALVAN, V.R.S. REINERT, J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria - RS, v.33, p.275-282, 2003.

BERNER, P. G. M.; VIEIRA, S. R.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C.U. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa – MG, v.31, p. 837-844. 2007.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Projeto Radam Brasil, folha SB. 21, Tapajós. Rio de Janeiro, 1978. 561 p.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hillslope curvatures. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa – MG, v. 34, p.617-630, 2010.

CAMPOS, M. C. C.; FERRAZ, F. B.; FREITAS, E. V. S.; SOUZA, Z. M. Dependência espacial de atributos físicos e hídricos de um Espodosolo da zona da Mata de Pernambuco. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, João Pessoa – PB, v. 7, p. 84-91, 2007.

CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; SANTOS, L. A. C.; AQUINO, R. E.; SORES, M. D. R. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. *Revista Agroambiente*, Boa Vista – RR, v. 6, p. 09-16, 2012.

CAMPOS, M. C. C.; SORES, M. D. R.; SANTOS, L. A. C.; OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C. Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Argissolo Vermelho sob floresta. *Comunicata Scientiae*, Bom Jesus – PI, v. 4, p.168-178, 2013.

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; SOUZA, R. V. C. C.; ALMEIDA, M. C. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. *Bragantia*, Campinas - SP, v. 70, p.598-609, 2011.

CARVALHO, J. R. P.; DECHEN, S.C.F.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial da agregação do solo avaliada pela geometria fractal e geoestatística. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa-MG. v.28, p.1-9, 2004.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P.M.; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília – GO, v.37, p.1151-1159, 2002.

CORÁ, J. E.; ARAÚJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de Agricultura de Precisão na cultura da Cana-de-Açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG. v. 28, p. 1013-1022, 2004.

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; CANELLAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. O.; TROMPOWSKY, P. M.; SANTOS, G. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte a antrópico da Amazônia (Terra Preta). *Acta Amazônica*, Manaus – AM, v. 37 p. 91-98, 2007.

DERENNE, S.; LARGEAU, C. A review of some important families of refractory macromolecules: Composition, origin, and fate in soils and sediments. *Soil Science*, Baltimore, v.166, p.883-884, 2001.

GERMAN, L.A. Historical contingencies in the coevolution of environment and livelihood: contributions to the debate on Amazonian Black Earth. *Geoderma*, Amsterdam, v.111, p.307–331, 2003.

GLASER, B. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions the Royal Society*. v.362, p.187–196, 2007.

GOMES, N.M.; FARIA, M.A.; SILVA, A.M.; MELLO, C.R.; VIOLA, M.R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande - PB, v.11, p.427-435, 2007.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG. v. 29, p.169-177, 2005.

GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S. R.; CHIBA, M. K.; GREGO, C. R. Geostatistical analysis of crop yield maps in a long term no tillage system. *Bragantia*, Campinas - SP, v. 69, p. 9-18, 2010.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Recursos Naturais: Geologia, Geomorfologia, Solos, Hidrografia e Vegetação, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2000.

KÄMPF, N.; KERN, D.C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M.; SILVA, A.P.; CARDOSO, E.J. (Org.). *Tópicos em Ciência do solo*. 1 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005, 5: 277-320.

KERN, D. C.; D' AQUINO, G.; RODRIGUES, T. E.; FRAZÃO, F. J. L.; SOMBROEK, W.; NEVES, E. G.; MYERS, T.P. Distribution of antropogenic dark earths. In: LEHMANN, J.; KERN, D.C.; WOODS, W.; GLASER, B. (Org.). *Amazonian dark Earths: Origin, Properties, Management*. 1 ed. Norwell: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, v.1, p.51-76. 2003.

KERN, D. C.; KÄMPF, N. O efeito de antigos assentamentos indígenas na formação de solos com terra preta arqueológicas na região de Oriximiná – PA, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG. v. 13 p. 219-225, 1989.

LEÃO, T.P.; PERFECT, E. Modeling water movement in horizontal columns using fractal theory. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG. v. 34, p. 1463-1468, 2010.

LEMOS FILHO, L. C. A.; OLIVEIRA, E. L.; FARIA, M. A.; LUIZ, A. B. A. Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). *Revista Ciência Agrônoma*, Fortaleza-CE v. 39, p. 193-202, 2008.

LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E. R.; MELLO, J. W. V.; GILKES, R.J.; KER, J.C. Pedogenesis and pre-Columbian land use of “Terra PretaAnthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. *Geoderma*. Amsterdam, v. 110, p.1–17, 2002.

LIMA, J.S.S.; SATTLER, M.A.; XAVIER, A.C.; OLIVEIRA, R.B.; PASSOS, R.R.; OLIVEIRA, P.C. Variabilidade espacial da textura de um Argissolo Vermelho Amarelo sob cultivo de pastagem e vegetação nativa. *Ciência Rural*, Santa Maria - RS, v. 39, p. 2634-2637, 2009.

MACHADO, R. V.; BECEGATO, V. A.; NETO, S. L. R.; FIGUEIREDO, O. A. R. Variabilidade espacial de algumas propriedades físicas em três solos para duas profundidades. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, Lages-SC, v.5, p. 44-52, 2006.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M. A.; Souza, E. G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa – MG, v. 27, p. 1149-1159, 2003.

MOREIRA, A., Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos Antropogênicos da Amazônia Ocidental. *Bragantia*, Campinas – SP, v.66, n.2, p.307-315, 2007.

NEVES JUNIOR, A. F. Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta do Índio) na Amazônia Ocidental. 2008. 93f. Tese (Doutorado)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; CARDOSO, E. L.; MACEDO, R. L. G.; FERREIRA, M. M.; SOUZA, F. S. de. Atributos indicadores da qualidade do solo em sistema agrossilvopastoril no noroeste do Estado de Minas Gerais. *Scientia Forestalis*, Piracicaba - SP, v.74, p.45-53, 2007.

NEVES, E.G.; PETERSON, J.B; BARTONE, R.N; SILVA, C.A. Historical and socio-cultural origins of Amazonian dark earths. In: LEHMAN, J.; KERN, D.C.; GLASER, B.; WOODS, W.I. *Amazonian dark earths; origin, properties and management*, 1 Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 29-50.

NOVAES FILHO, J. P.; COUTO, E. G.; OLIVEIRA, V. A.; JOHNSON, M. S.; LEHMANN, J.; RIHA, S. S. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia meridional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG, v.31, p.91-100, 2007.

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F. 2000. Fertilidade do solo no sistema de plantio direto. In: ALVAREZ V., V.H; SCHEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Eds). *Tópicos em ciências do solo*. Vol. 2. Publicação da Sociedade Brasileira de Ciências do solo, Viçosa, Minas Gerais. p. 393-486.

ORTIZ, G.C. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo. 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba - SP, 2002.

PABST, E. Critérios de distinção entre Terra Preta e Latossolo na região de Belterra e os seus significados para discussão pedogenética. *Boletim do Museu Paranaense Emilio Goeldi, Série Antropol.*, v.7, p. 5-19, 1991.

PANOSSO, A. R., PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; LA SCALA JÚNIOR, N. Variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal - SP, v.28, p.227-236, 2008.

PANOSSO, A. R.; CAMARA, F. T.; LOPES, A.; PEREIRA, G.T.; LA SCALA JR, N. Emissão de CO<sub>2</sub> em um Latossolo após preparo convencional e reduzido em períodos seco e chuvoso. *Científica*, Jaboticabal-SP, v. 34, p. 257-262, 2006.

REIS, N. J. Projeto Rochas Carbonáticas de Apuí, AM – Serviço Geológico do Brasil (CPRM), p. 69, 2006.

RIBEIRO, A. Í.; LONGO, R. M.; TEIXEIRA FILHO, A.; WANDERLEY, J. M. Diagnóstico de uma área compactada por atividade minerária, na floresta amazônica, empregando métodos geoestatísticos à variável resistência mecânica à penetração do solo, *Acta Amazônica*, Manaus - AM, v. 36, p. 83-90, 2006.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande - PB, v. 9, p. 489-495, 2005.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. *Bragantia*, Campinas – SP, v. 68, p. 1095-1103, 2009.

SANTOS, L. A. C.; CAMPOS, M. C. C., AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C., SILVA, D. M. P.; MARQUES JUNIOR, J.; FRANÇA, A. B. C. Caracterização de terras pretas arqueológicas no Sul do Estado do Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG, v. 37, p. 825-836, 2013.

SANTOS, L. A. C.; CAMPOS, M. C. C.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. M. P.; MENDONÇA JÚNIOR, A. F. Caracterização física de seis sítios de terras pretas arqueológicas na região de Apuí-AM. *Revista Verde*, Mossoró – RN, v.6, p. 167-174, 2011.

SILVA JUNIOR, J. F.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. B.; PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T. Simulação geoestatística na caracterização espacial de óxidos de ferro em diferentes pedoformas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG, v. 36, p. 1690-1703, 2012.

SILVA, F. W. R., LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G., MOTTA, M. B.; SANTANA, R. M. Caracterização química e mineralogia de solos Antrópicos (terras pretas de índio) na Amazônia central. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG, v.35, p. 673-681, 2011.

SILVA, J.J.N.; MONTENEGRO, A.A.A.; SILVA, Ê.F.F.; FONTES JÚNIOR, R.V.P.; SILVA, A.P.N. Variabilidade espacial de parâmetros de crescimento da mamoneira e de atributos físico-químicos em Neossolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande - PB, v.14, p. 921–931, 2010.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria – RS, v.34, p. 399-406, 2004.

SKJEMSTAD, J. O; CLARKE, P.; TAYLON, J.A.; OADES, J.M.; MCCLURE, S.G. The chemistry and nature of protected carbon in soil. *Australian Journal of Soil Research*, Collingwood, v. 34, p. 251-271, 1996.

SMITH, N. J. H. Anthrosol and human carrying capacity in Amazonia. In: *Annals of the association of American Geographers*, 70. Anais Durham, 1980. p. 553-566.

SOUZA JÚNIOR, J. G. A.; DEMATTÊ, J. A. M. Modelo digital de elevação na caracterização de solos desenvolvidos de basalto e material arenítico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG, v.32, p.449-456, 2008.

SOUZA, E. R.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, T. E. M.; ANDRADE, T. S.; PEDROSA, E. R. Variabilidade espacial das frações granulométricas e da salinidade em um Neossolo Flúvico do semi-árido. *Ciência Rural*, Santa Maria - RS, v. 38, p. 698-704, 2008.

SOUZA, J. R.; QUEIROZ, J. E.; GHEYI, H. R. Variabilidade espacial de características físico-hídricas e de água disponível em um solo Aluvial no Semi-árido Paraibano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande - PB, v.3, p.140-144, 1999.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J. PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande - PB, v.8, p.51-58, 2004.

SOUZA, Z. M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L.; CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG, v. 25, p. 699-707, 2001.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, New York, v.38, p.45-93, 1985.

VELOSO, H. P.; FILHO, A. L. R. R.; LIMA, J. C. A. Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 124 p. 1991.

VENDRUSCULO, L. G. Desenvolvimento de um sistema computacional para análise geoestatística. 2001. 87 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de Campinas, Campinas - SP, 2001.

VIEIRA, M. L. & KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG, v. 31, p. 1271-1280, 2007.

VIEIRA, S. R.; DECHEN, S.C.F.; SIQUEIRA, G.M.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. *Bragantia*, Campinas – SP, v. 70, p.185-195, 2011.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Oakland, v.51, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-53.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas, SP. *Bragantia*, Campinas – SP, v. 56, p. 181-190, 1997.

VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F. Spatial variability studies in São Paulo, Brazil along the last twenty five years. *Bragantia*, Campinas – SP, v.69, p.53-66, 2010.

## **VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE TERRA PRETA ARQUEOLOGICA SOB CULTIVO DE CACAU NO MUNICIPIO DE APUÍ, AM**

### **RESUMO**

A região Amazônica apresenta uma diversidade de classes de solos, podendo ser encontrada pequenas faixas de solo com horizonte antrópico, as quais apresentam altas concentrações de nutrientes, matéria orgânica, fragmentos cerâmicos, material lítico e propriedades físicas satisfatórias para o desenvolvimento dos vegetais. Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar a variabilidade espacial dos atributos físicos de Terra Preta Arqueológica (TPA) sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM. Foi realizado o mapeamento de uma área de 42 x 88 m de TPA cultivada com cacau. Em espaçamentos de 6 x 8 m foram demarcados os pontos amostrais, sendo efetuadas as coletas de solo nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Foram determinados a textura, a resistência do solo à penetração, densidade do solo, umidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo. De modo geral, os atributos físicos da TPA apresentaram dependência espacial forte, com exceção da resistência do solo a penetração na profundidade de 0,20-0,30 e volume total de poros nas profundidades de 0,10-0,20 e 20-0,30 m que apresentaram moderada dependência. As frações texturais de areia, silte e argila em todas as profundidades apresentaram dependência espacial de forte a moderada.

**Palavras-chave:** Solo antrópico, Densidade do solo, Textura.

## ABSTRACT

The Amazon region has a diversity of soil types, where it can find small groups of anthropic soil horizon, which have high concentrations of nutrients, organic matter, ceramic fragments, and lithic material and favorable physical properties for the development of plants. This work has aimed to study the spatial variability of the physical attributes of soil anthropic *Terra Preta* (SATP) under cocoa cultivation in Apuí City AM. It made the mapping of an area of 42 x 88 m TPA cultivated with cocoa. It was marked sampling points in spacing of 6 x 8 m, being made the collection of soil at depths of 0.0-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20 and 0.20 - 0.30 m. It was determined texture, soil penetration resistance, bulk density, moisture, macroporosity, microporosity, total porosity of the soil. In general, the physical attributes of SATP presented strong spatial dependence, with the exception of soil resistance to penetration depth of 0.20-0.30 and porosity total volume at depths of 20 to 0.30 and 0.10-0.20 that had moderate dependence. The textural fractions of sand, silt and clay at all depths presented spatial dependence from strong to moderate.

**Keywords:** Soil anthropic; Bulk Density; Soil Texture.

## 1. INTRODUÇÃO

A Amazônia é formada por vários ambientes, em sua maioria constituída por solos pobres, contrastando com áreas de Terras Pretas Arqueológicas (TPAs) cuja a formação é atribuída a ação antrópica. Estas áreas de TPAs são caracterizadas por apresentarem um horizonte A antrópico de cor escura com alto teor de matéria orgânica e atributos químicos e físico-químicos que proporcionam melhor desenvolvimento das plantas comparados aos solos não antropogênicos, conferindo maior fertilidade as TPAs (CAMPOS et al., 2012).

Apesar de muitos aspectos referente a origem desses solos ainda não estarem bem elucidados, a principal hipótese firma-se que a formação foi no período pré-colombiano (KERN & KÄMPF, 1989), e mesmo com o avanço das pesquisas, muitas questões permanecem sem respostas em relação as TPAs, entre elas destaca-se a capacidade de manutenção dos altos teores dos nutrientes, quando estas são submetidas ao uso contínuo.

Quanto aos atributos físicos as TPAs apresentam textura variando entre franca, franco-arenosa, franco-siltosa e franco-argilosa (LIMA et al., 2002; SANTOS et al., 2013), densidade do solo menor que nos horizontes antropogênicos (NEVES JÚNIOR 2008; CAMPOS et al., 2012; SANTOS et al., 2013) e porosidade total mais elevada em relação aos horizontes subsuperficiais devido aos elevados teores de matéria orgânica e à intensa atividade biológica (CAMPOS et al., 2011).

Por outro lado, a resistência do solo à penetração (RP) é considerada a propriedade mais adequada para expressar o grau de compactação do solo, conseqüentemente, a facilidade de penetração das raízes (SILVEIRA et al., 2010). Por isso, a RP é influenciada pelas condições do manejo dado ao solo, podendo este atributo apresentar relação espacial com a umidade do solo (CAMPOS et al., 2012). Segundo Sampaio et al. (2010) nota-se a tendência de aumento da correlação entre a umidade do solo e os teores de carbono orgânico do solo e microporosidade à medida que o solo se torna mais seco. Para Bertol et al. (2004), alterações

no solo são mais pronunciadas nos sistemas convencionais de preparo do solo, as quais se manifestam, em geral, na densidade do solo e no volume e distribuição de tamanho dos poros, influenciando a infiltração da água, erosão hídrica e desenvolvimento das plantas.

A variabilidade espacial dos atributos do solo ocorre em diferentes níveis, estando relacionada a fatores pedogenéticos ou efeitos de técnicas de manejo e uso (CORRÊA et al., 2009). Sendo a geoestatística uma ferramenta que possibilita o seu estudo (CAVALCANTE et al., 2011), devido apresentar-se como ferramenta eficiente nos estudos dos atributos físicos do solo (CAMPOS et al., 2007).

Os atributos físicos do solo podem apresentar variabilidade espacial diferente, mas havendo relações entre os mesmos (CAMPOS et al. 2013). Portanto, entre pontos relativamente próximos em área de mesma unidade taxonômica, muitas vezes de forma significativa, os atributos físicos do solo quase sempre apresentam dependência espacial (CARVALHO et al., 2003; SOUZA et al., 2004; CAMPOS et al., 2007).

O objetivo neste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial de atributos físicos de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau na região de Apuí, AM.

## **2. MATERIAL E METODOS**

### **2.1. Caracterização da área**

A área de estudo localiza-se no município de Apuí, AM, as margens da BR-230, sob as coordenadas geográficas 07° 12' 05" S e 59° 39' 35" W. Segundo a classificação de Köppen a região de estudo pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade está limitada pelas isoietas de 2.250 e 2.750 mm, com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25° e 27° C e a umidade relativa entre 85 e 90%.

A geologia da região apresenta arenitos da formação Beneficiente, recoberto por pacote argiloso do terciário (REIS, 2006). Em relação aos solos presentes no município, ocorre predominância das classes: Argissolos e Latossolos, sendo que o solo da área de estudo foi classificado como argissolo, e predomina a vegetação primária formada por Floresta Tropical Densa, constituída por árvores adensadas (SDS, 2004).

## **2.2. Metodologia de campo**

Foi utilizada uma área de TPA, cujo local vem sendo cultivado à quatorze anos, onde, nos primeiros seis anos foram cultivados de culturas anuais (arroz, milho, feijão e melancia) com posterior implantação da cultura do cacau que permanece até o momento do presente estudo que ocorreu em dezembro de 2012. Neste local foi delimitada uma malha de 48 x 88 m. Para coleta utilizou-se espaçamentos regulares de 6 X 8 m totalizando 88 pontos amostrais. Cada ponto amostral foi georreferenciado com GPS Garmin EX. Nesses pontos foram abertas trincheiras de 0,50 x 0,50 x 0,40 m e nestas coletadas amostras de solos com estrutura preservada nas profundidades: 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

A análise textural foi realizada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de alta rotação por 15 minutos, seguindo metodologia proposta pela Embrapa (1997). A fração argila foi separada por sedimentação, a areia por tamisação e o silte foi calculado por diferença.

As amostras com estrutura preservada coletadas em cilindros metálicos foram levadas ao laboratório para as determinações da macroporosidade, microporosidade, densidade do solo e porosidade total, seguindo metodologia proposta pela Embrapa (1997). No laboratório, as amostras foram preparadas, em seguida foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja plástica até atingir cerca de 2/3 da altura dos cilindros.

Conforme Embrapa (1997), após a saturação as amostras foram pesadas e levadas à mesa de tensão para determinação da microporosidade do solo, em seguida foi medida a resistência do solo à penetração (RP), utilizando um penetrógrafo eletrônico modelo MA-933, marca Marconi, equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30°, receptor e interface acoplado a um microcomputador, para registro das leituras por meio de um software próprio do equipamento.

Com a determinação da RP, as amostras foram levadas à estufa a 105-110 °C por 48 h para se determinar a umidade volumétrica, densidade do solo e porosidade total pelo método do anel volumétrico e a macroporosidade foi determinada pela diferença entre porosidade total e microporosidade (EMBRAPA, 1997).

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, sendo determinados a média, valores máximos e mínimos, coeficientes de assimetria e curtose, coeficiente de variação (CV) e distribuição de frequências dos dados. Esta análise foi realizada no software estatístico Minitab 14 (MINITAB, 2000).

Para a caracterização da variabilidade espacial, foi utilizada a análise geoestatística (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Sob a teoria da hipótese intrínseca, onde o semivariograma experimental é estimado pela Equação:

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

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  $x_i$ .

O ajuste de um modelo matemático (exponencial, esférico, linear ou gaussiano), aos valores calculados de  $\hat{\gamma}(h)$  foram definidos com base nos coeficientes do modelo teórico para o semivariograma: o efeito pepita ( $C_0$ ); o patamar ( $C_0 + C_1$ ) e o Alcance ( $a$ ).

Na análise da razão de dependência espacial (proporção em percentagem do ( $C_0$ ) em relação ao ( $C_0+C_1$ )) das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), onde valores de  $[(C_0/(C_0+C_1))]$  menores que 25% são considerados dependência espacial forte, valores de  $[(C_0/(C_0+C_1))]$  entre 25 e 75% indicam dependência espacial moderada e valores de  $[(C_0/(C_0+C_1))]$  maiores que 75% dependência espacial fraca.

Na determinação da existência ou não da dependência espacial, utilizou-se a modelagem dos semivariogramas por meio do programa GS<sup>+</sup> (ROBERTSON, 1998). Tendo como base para a escolha do melhor ajuste do semivariograma respectivamente, o maior valor do coeficiente determinação ( $R^2$ ) e validação cruzada. Após o ajuste dos modelos matemáticos permissíveis foi realizado à interpolação dos dados por meio da krigagem e em seguida a confecção dos mapas de isolinhas foram geradas no software Surfer versão 8.00.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes a análise descritiva para textura do solo nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m são apresentados na Tabela 1. O resultado do teste de normalidade aponta distribuição normal para os teores de areia, silte e argila, contudo, a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, é conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as estimativas da krigagem, as quais são baseadas nos valores médios (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Avaliando à textura, observa-se que a fração silte é dominante nas profundidades amostradas (Tabela 1), conforme já relatado por Santos et al. (2013). Segundo Resende et al. (1999) a fração silte é indicadora do grau de intemperização do solo ou do potencial deste em

conter minerais primários facilmente intemperizáveis, isto é, de sua reserva em nutrientes. Para a fração argila observou-se crescente aumento em profundidade, tal fato se deve a característica argilosa dos Argissolos da região de estudo, corroborando com estudo realizado por Campos et al. (2011).

Tabela 1. Estatística descritiva da textura do solo em diferentes profundidades de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Estatística descritiva	g kg <sup>-1</sup>					
	0,0-0,05 m			0,05-0,10 m		
	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila	Areia
Média	572,8	204,6	221,1	534,0	265,4	195,2
Mediana	577,0	205,5	217,5	544,5	265,0	192,0
Máximo	654,0	343,0	350,0	600,0	415,0	299,0
Mínimo	465,0	104,0	115,0	424,0	167,0	111,0
<sup>1</sup> DP	32,0	44,1	49,6	34,5	53,4	38,7
Variância	1024,5	1941,3	2458,2	1192,1	2850,0	1499,6
<sup>2</sup> CV%	5,6	21,4	22,4	6,4	20,1	19,8
Assimetria	-0,54	-0,03	0,37	-0,17	0,56	0,38
Curtose	1,18	0,10	-0,30	0,82	0,40	-0,05
<sup>3</sup> d	0,09 <sup>ns</sup>	0,08*	0,10 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,07*	0,07*
	0,10-0,20 m			0,20-0,30 m		
Média	537,9	274,2	188,0	511,6	303,2	185,2
Mediana	536,5	275,5	181,0	516,5	301,0	182,5
Máximo	655,0	374,0	286,0	648,0	457,0	276,0
Mínimo	432,0	176,0	113,0	400,0	173,0	116,0
<sup>1</sup> DP	37,6	47,97	36,10	48,6	65,3	32,0
Variância	1413,8	2300,9	1302,4	2359,3	4269,2	1025,9
<sup>2</sup> CV%	7,0	17,5	19,2	9,5	21,5	17,3
Assimetria	0,46	-0,05	0,57	0,17	0,09	0,56
Curtose	1,26	-0,81	0,05	0,43	-0,46	0,11
<sup>3</sup> d	0,07*	0,06*	0,09 <sup>ns</sup>	0,08*	0,05*	0,06*

<sup>1</sup>DP: desvio padrão; <sup>2</sup>CV: coeficiente de variação; <sup>3</sup>d: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov; \*significativo a 5 % de probabilidade; ns: não significativo a 5 % de probabilidade.

Os valores das medidas de tendência central (média e mediana) são semelhantes para todas as variáveis texturais, o que indica que a distribuição é simétrica para os teores de silte, argila e areia, o que pode ser confirmado pelos valores de assimetria e curtose próximos de zero, corroborando assim com Eguchi et al. (2002), avaliando a variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG.

De acordo com Diggle & Ribeiro (2007), os coeficientes de assimetria e curtose são mais sensíveis a valores extremos do que a média, mediana e o desvio padrão, uma vez que um único

valor pode influenciar fortemente o coeficiente de assimetria e curtose, pois os desvios entre cada valor e a média são elevados à terceira potência.

De modo geral, os constituintes texturais apresentaram de baixo a médio coeficiente de variação (CV), dos quais o silte apresentou os menores valores de CV nas profundidades analisadas. Em contra partida, a areia e argila, independentemente da profundidade, alcançaram CV médios (Tabela 1). Esses resultados segundo o critério de classificação estabelecido por Warrick e Nielsen (1980) para CV, que classificaram como baixa variabilidade  $CV < 12\%$ , média variabilidade CV entre 12 e 60% e alta variabilidade  $CV > 60\%$ . Resultados semelhantes foram encontrados por Lima et al. (2009) para a fração areia e argila de um Argissolo Vermelho Amarelo de uma área sob pastagem.

Os resultados da análise geoestatística mostraram que todas as variáveis texturais analisadas apresentaram estrutura de dependência espacial (Tabela 2). O ajuste do modelo matemático aos semivariogramas experimentais foi realizado utilizando-se como critérios de seleção dos modelos a técnica da validação cruzada (VC) “cross-validation” que fornece o coeficiente de regressão ( $R^2$ ) e mostra como resultado uma reta que passa entre as observações reais e estimadas (WOJCIECHOWSKI et al., 2009), no qual os valores da VC variam de 0 a 1, sendo os valores mais próximos de 1 o mais eficiente modelo para representar o fenômeno estudado (RIBEIRO JUNIOR, 1995). E também, como segundo critério de escolha do melhor modelo experimental adotou-se o coeficiente de determinação  $R^2$  mais próximo de 1. Os resultados da validação cruzada foram satisfatórios para os constituintes granulométricos em todas as profundidades aos quais apresentaram VC superiores a 0,7.

Segundo Trangmar et al. (1985) a escala de estudo tem grande influência sobre os ajustes dos modelos de semivariogramas em atributos do solo. Os modelos utilizados para o ajuste dos semivariogramas obtidos com os dados dos atributos texturais foram o esférico e exponencial, esses resultados assemelham-se a outros estudos que apontam os modelos esférico e

exponencial como os que melhor se ajustam as frações texturais do solo (CHIG et al., 2008; SILVA et al., 2010).

Tabela 2. Modelos e parâmetros estimados Estatística descritiva da textura do solo em diferentes profundidades de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Parâmetros Geoestatísticos	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila	Areia
	0,00-0,05 m			0,05-0,10 m		
Modelo	Esf	Exp	Esf	Exp	Exp	Exp
Efeito Pepita	256	256	519	91	484	104
Patamar	937	1942	2235	910	2245	1091
Alcance (m)	23	26	30	31	51	54
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,95	0,84	0,97	0,94	0,99	0,96
<sup>2</sup> GDE (%)	27	13	23	10	21,6	9,5
<sup>3</sup> VC%	0,87	0,95	0,85	0,91	0,96	0,90
	0,10-0,20 m			0,20-0,30 m		
Modelo	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp
Efeito Pepita	148	138	67	449	356	129
Patamar	1539	1735	1081	1880	3392	863
Alcance (m)	26	54	35	21	29	54
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,95	0,94	0,96	0,96	0,98	0,94
<sup>2</sup> GDE (%)	10	8	6	24	11	15
<sup>3</sup> VC%	0,78	0,94	0,94	0,76	0,89	0,91

Esf.: Esferico; Exp.: Exponencial; <sup>1</sup>R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; <sup>2</sup>GDE%: grau de dependência espacial e; <sup>3</sup>VC: validação cruzada.

O valor do alcance nos semivariogramas têm uma importância considerável na determinação do limite da dependência espacial, o que pode ser também um indicativo do intervalo entre unidades de mapeamento de solos (WEBSTER, 2000). As variáveis texturais estudadas apresentaram diferentes alcances de dependência espacial (Tabela 1), sendo que os menores valores de alcance foram encontrados para o silte nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,20-0,30 m, respectivamente (23 e 21 m).

A análise do grau de dependência espacial (GDE) proposto por Cambardella et al. (1994), que avalia em termos proporcionais o efeito pepita sobre o patamar ( $C_0/(C_0+C_1).100$ ), em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um GDE  $\leq 25\%$  do patamar; dependência espacial moderada, quando o GDE está entre 25 e 75%, e dependência fraca, quando o GDE  $\acute{e} > 75\%$  do patamar.

Verificou-se que apenas o silte na profundidade de 0,0-0,05 m apresentou GDE moderada, enquanto nas demais profundidades, o silte, areia e argila apresentaram GDE forte. Cambardella et al. (1994), afirmaram que as variáveis que apresentam forte dependência espacial são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, como os fatores de formação do solo (material de origem, relevo, clima, organismos e tempo), em contrapartida os demais atributos apresentaram moderada dependência espacial. Os mapas de krigagem em conjunto com o MDE possibilitaram verificar a dinâmica dos atributos do solo na área de estudo deste trabalho (Figura 1 e 2).

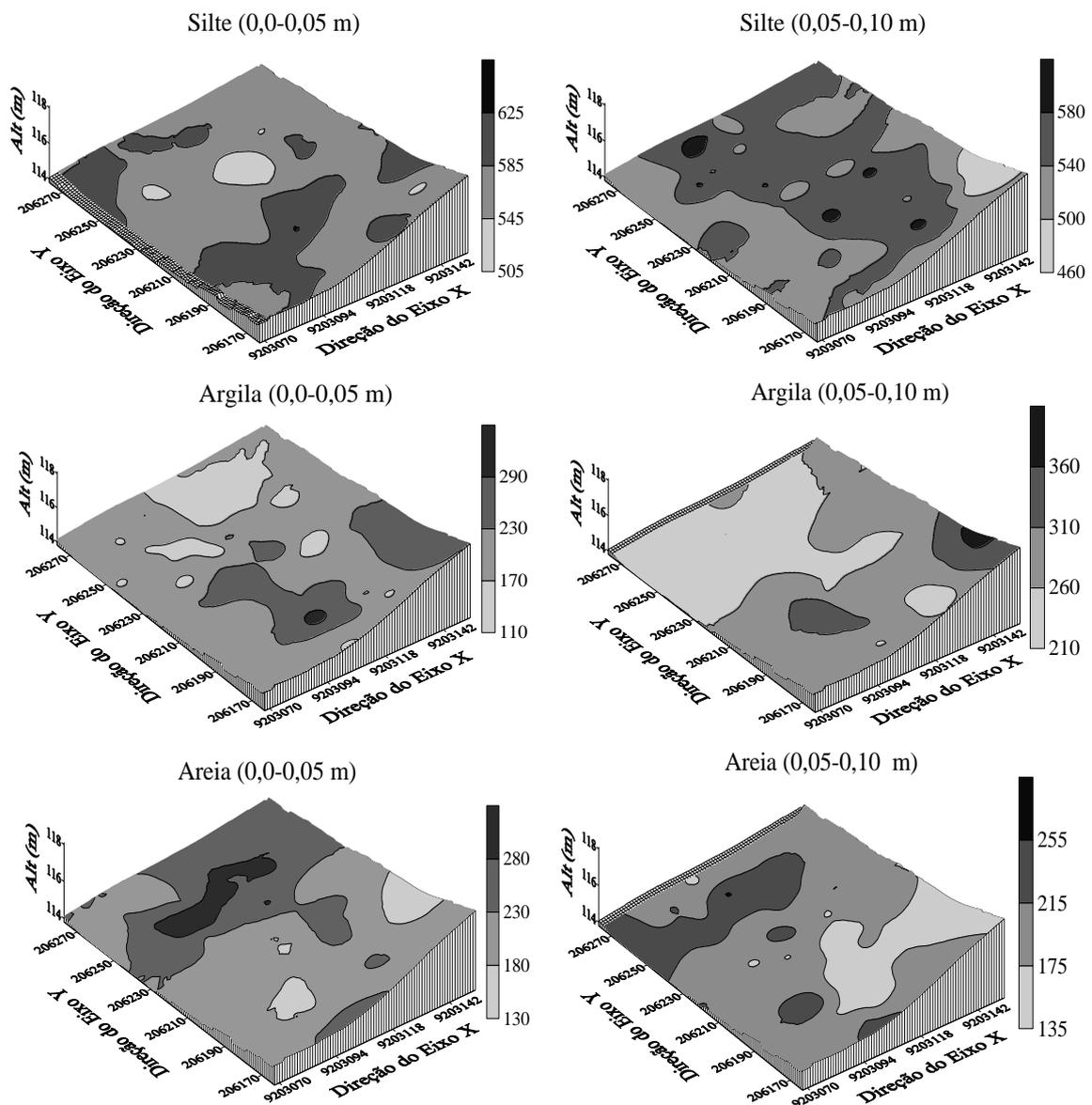


Figura 1. Mapas de krigagem das frações texturais do solo nas profundidades de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m.

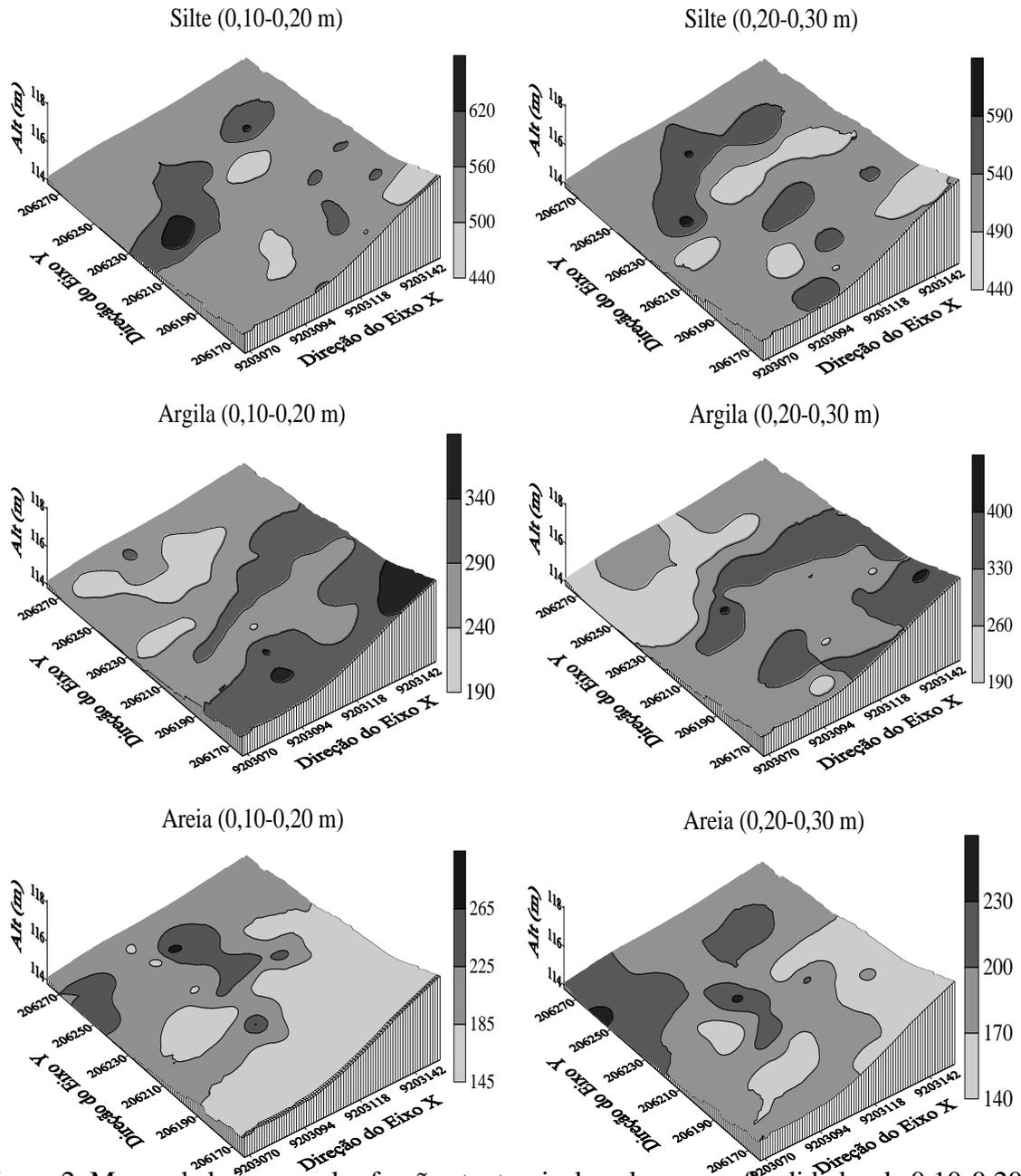


Figura 2. Mapas de krigagem das frações texturais do solo nas profundidades de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da estatística descritiva para os atributos físico do solo. Os valores da média e mediana estão próximos para todos os atributos avaliados, mostrando distribuição simétrica dos dados. Os coeficientes de assimetria e curtose estão próximos de zero para as variáveis RP e macroporosidade (MAP) em todas as profundidades.

Tabela 3. Estatística descritiva dos atributos físicos do solo em diferentes profundidades em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Estatística Descritiva	RSP	Ds	Us (vol)	MaP	MiP	VTP
	Mpa	Mg m <sup>-3</sup>	----- % -----			
0,0-0,05 m						
Média	1,13	0,90	49,01	19,96	49,05	69,00
Mediana	1,12	0,89	48,89	19,44	49,18	68,54
Máximo	1,99	1,15	59,47	32,78	59,47	85,05
Mínimo	0,45	0,69	33,58	10,20	33,58	56,94
<sup>1</sup> DP	0,37	0,11	4,39	5,64	4,40	4,77
Variância	0,14	0,01	19,28	31,79	19,33	22,75
<sup>2</sup> CV%	32,63	11,76	8,96	28,24	8,96	6,91
Assimetria	0,34	0,45	-0,72	0,38	-0,74	0,16
Curtose	-0,48	0,16	1,53	-0,54	1,54	0,91
<sup>3</sup> d	0,08*	0,09ns	0,09ns	0,07*	0,09ns	0,08*
0,05-0,10 m						
Média	1,22	0,95	46,76	19,41	46,76	66,17
Mediana	1,11	0,95	47,01	18,78	47,01	65,48
Máximo	1,79	1,18	59,13	34,12	59,13	80,98
Mínimo	0,35	0,73	29,22	10,23	29,22	47,30
<sup>1</sup> DP	0,34	0,09	4,83	5,30	4,82	4,36
Variância	0,11	0,01	23,40	28,10	23,28	19,00
<sup>2</sup> CV%	30,00	9,34	10,35	27,32	10,32	6,59
Assimetria	-0,12	0,22	-0,30	0,65	-0,30	-0,23
Curtose	-0,54	0,44	1,32	0,18	1,36	4,18
<sup>3</sup> d	0,07*	0,07*	0,06*	0,07*	0,07*	0,10ns
0,10-0,20 m						
Média	0,89	0,95	43,36	22,38	43,37	65,75
Mediana	0,84	0,94	42,72	22,41	42,72	66,42
Máximo	1,89	1,25	53,21	34,13	53,21	76,03
Mínimo	0,25	0,73	29,71	10,63	29,71	53,05
<sup>1</sup> DP	0,34	0,10	3,83	5,25	3,83	4,31
Variância	0,14	0,01	14,70	27,54	14,71	18,59
<sup>2</sup> CV%	41,62	10,62	8,84	23,45	8,84	6,56
Assimetria	0,52	0,62	-0,04	-0,29	-0,04	-0,69
Curtose	-0,48	0,32	1,18	-0,33	1,18	0,70
<sup>3</sup> d	0,07*	0,11ns	0,09ns	0,07*	0,08*	0,08*
0,20-0,30 m						
Média	0,91	0,98	41,92	21,65	41,98	63,63
Mediana	0,85	0,97	41,73	21,36	41,73	63,95
Máximo	1,82	1,27	53,62	31,98	53,62	73,36
Mínimo	0,23	0,26	33,78	10,27	33,78	52,88
<sup>1</sup> DP	0,36	0,13	3,63	4,79	3,60	4,11
Variância	0,13	0,02	13,23	22,96	12,98	16,92
<sup>2</sup> CV%	38,96	13,46	8,68	22,13	8,58	6,46
Assimetria	0,42	-1,48	0,39	-0,03	0,37	-0,21
Curtose	-0,34	9,26	0,63	-0,26	0,73	-0,04
<sup>3</sup> d	0,08*	0,10ns	0,05*	0,05*	0,05*	0,07*

RP: resistência do solo à penetração; Ds: densidade do solo; Us (vol.): umidade volumétrica do solo; MaP: macroporosidade do solo; MiP: microporosidade do solo; VTP: volume total de poros; <sup>1</sup>DP: desvio padrão; <sup>2</sup>CV: coeficiente de variação; <sup>3</sup>d: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov; \*significativo a 5 % de probabilidade; ns: não significativo.

Verificou-se para densidade do solo ( $D_s$ ) valores respectivos de assimetria e curtose de 1,48 e 9,26 na profundidade de 0,20-0,30 m e curtose de 1,53, 1,32 e 1,18 % para a umidade do solo ( $U_s$ ) nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente. A microporosidade ( $Mip$ ) apresentou valores de curtose da ordem de 1,54, 1,36, 1,18 respectivamente nas mesmas camadas citadas para a  $U_s$ , enquanto que o volume total de poros ( $VTP$ ) apresentou curtose de 4,18 na profundidade de 0,05-0,10 m. Para Sanchez et al. (2009) os valores de assimetria e curtose menores que 1 demonstram tendência a normalidade.

Os resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov (Tabela 3), indicaram normalidade para os dados para RSP em todas as profundidades,  $D_s$  nas profundidades de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,20-0,30 m,  $U_s$  nas profundidades de 0,0-0,05 e 0,10-0,20 m,  $VTP$  na profundidade de 0,05-0,10 m e para a  $MiP$  em todas as profundidades. Segundo Isaaks & Srivastava (1989) mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência do efeito proporcional em que a média e a variância dos dados não sejam constantes na área de estudo.

De acordo com os limites da classificação do coeficiente de variação ( $CV$ ) propostos por Warrick & Nielsen (1980), as variáveis  $D_s$ ,  $Mip$ ,  $VTP$  e  $U_s$  em todas as profundidades, exceto  $D_s$  na camada de 0,20-0,30m mostrou baixa variabilidade dos dados ( $CV < 12\%$ ) (Tabela 3), esses resultados são semelhantes aos encontrados por Lima et al. (2009), avaliando a variabilidade espacial dos atributos físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob pastagem e vegetação secundária em regeneração natural. As demais variáveis,  $MaP$ ,  $RP$  e  $D_s$  na profundidade de 0,20-0,30 m apresentaram moderada variabilidade dos dados ( $CV$  entre 12 e 60%).

A adoção de classes de  $CV$  como complemento aos estudos de avaliação da variabilidade espacial do solo é bastante comum. Apesar deste parâmetro permitir comparar a variabilidade entre amostras com unidades diferentes, o seu emprego não deve ser generalizado, devendo-se apreciar esses resultados segundo as finalidades a que se destina o trabalho. Entretanto, o

entendimento da dependência espacial desses atributos deve ser feito com o auxílio das técnicas geoestatística, a qual associadas aos atributos da paisagem, oferecem subsídios para transferência de tecnologia (SOUZA, 2004).

Analisando os valores médios dos atributos físico do solo constatou-se que a área de TPA apresentou Ds de 0,90; 0,95, 0,95 e 0,98  $\text{Mg m}^{-3}$ , respectivamente às profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Tabela 3). A Ds apresentou valores considerados baixos nas profundidades amostradas, mesmo quando ocorre mudança em profundidade os valores permaneceram estáveis com pouca variação, corroborando com trabalho realizado por Campos et al. (2011) caracterizando e classificando TPAs na Região do Médio Rio Madeira, Amazonas.

Estes menores valores de Ds, são devido ao grande aporte de matéria orgânica encontrado nestas áreas de TPAs, como já relatados, por Steinbeisset et al. (2009), quando afirmaram que a menor densidade do solo nestas áreas deve-se aos elevados teores de carbono orgânico e de intensa atividade biológica (fauna e raízes), que constrói canais, cavidades e galerias. Menores valores de Ds em solos antrópicos foram obtidos por Neves Junior (2008) e por Kern & Kämpf (1989), que atribuíram tais valores aos elevados teores de matéria orgânica desses solos.

A RP é um parâmetro que avalia a capacidade do solo de resistir à penetração mecânica, a qual faz inferência à penetração de raízes e tem estreita relação com alguns atributos do solo, como Ds, textura e umidade do solo. Os valores de RP variou de 0,89 à 1,22 MPa nas profundidades estudadas, variação está que se deve ao alto volume de cerâmica nas TPA estudada.

Áreas de TPAs devido à permanência e continuidade dos poros, atividade biológica mais ativa e maior estabilidade dos agregados, apresentam menores valores de RP, condizendo assim com os baixos valores de Ds encontrados. Considerando-se o valor limitante de RP de 2,0 MPa, verificou-se que, a área amostrada não apresentou valores de RP acima deste, demonstrando a boa qualidade física desse solo.

Os valores médios do VTP estão acima do limite proposto por Brady & Weil (2008) de 50%, considerado satisfatório para o crescimento adequado das plantas (Tabela 3). Para a macroporosidade foram observados valores superiores à 10%, apresentado valores entre 19,41% e 22,38% nas profundidades amostradas, sendo estes valores considerados adequados a difusão de oxigênio, demonstrando que se garante, então, uma boa aeração para o desenvolvimento de raízes, corroborando com estudos realizados por Barros et al. (2012) estudando a caracterização física de Terra Preta de Índio.

De acordo com a distribuição do tamanho de poros, houve predomínio do volume de microporos na área estudada, representando cerca de 49; 47; 43 e 42% nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m respectivamente. A diminuição dos microporos associados à aumento da profundidade pode ser indicativo da ação da matéria orgânica dos solos de TPA, responsável pelo aumento dos microporos, por reduzir os espaços ocupados pelos poros maiores.

Na Tabela 4 são apresentados modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas que melhor descreveram a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo. Os resultados da validação cruzada (VC) foram superiores a 0,71 para todas as variáveis físico, o que assegura bom desempenho da interpolação pela krigagem. Esses resultados são corroborados com os coeficientes de determinação  $R^2$  acima 0,60 significando que os semivariogramas estão bem ajustados.

Os resultados da análise geoestatística mostram que quase todos os atributos analisados apresentaram estrutura de dependência espacial. Para tais variáveis com estrutura de dependência, ajustaram-se preferencialmente os modelos esférico e exponencial, concordando com vários outros resultados que indicam que são os modelos que mais se ajustam a esses atributos do solo (SOUZA et al., 2004; LÓPEZ et al., 2008).

Tabela 4. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas dos atributos físicos do solo em diferentes profundidades em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Parâmetros	RP	Ds	Us (vol)	MaP	MiP	VTP
Geoestatísticos	Mpa	Mg m <sup>-3</sup>	----- % -----			
0,0-0,05 m						
Modelo	Exp	Exp	Exp	Exp	Lin	Exp
Efeito Pepita	0,015	0,00091	2,80	2,60	-	1,50
Patamar	0,121	0,0089	17,74	27,80	-	16,0
Alcance (m)	20	22	20	24	-	21
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,90	0,83	0,91	0,94	-	0,80
<sup>2</sup> GDE (%)	12	10	16	9	-	9
<sup>3</sup> VC%	0,89	0,81	0,70	0,74	-	0,71
0,05-0,10 m						
Modelo	Exp	Exp	Lin	Exp	Lin	Esf
Efeito Pepita	0,02	0,00082	-	3,0	-	3,2
Patamar	0,09	0,00062	-	20,5	-	14,9
Alcance (m)	34	30	-	24	-	20
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,97	0,89	-	0,84	-	0,96
<sup>2</sup> GDE (%)	22	13	-	15	-	22
<sup>3</sup> VC%	0,75	0,80	-	0,63	-	0,60
0,10-0,20 m						
Modelo	Exp	Exp	Lin	Exp	Lin	Esf
Efeito Pepita	0,012	0,00087	-	6,3	-	5,3
Patamar	0,110	0,00083	-	20,5	-	13,8
Alcance (m)	24	28	-	30	-	27
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,90	0,97	-	0,86	-	0,95
<sup>2</sup> GDE (%)	11	10	-	31	-	38
<sup>3</sup> VC%	0,87	0,75	-	0,61	-	0,70
0,20-0,30 m						
Modelo	Esf	Exp	Exp	Exp	Exp	Esf
Efeito Pepita	0,044	0,0015	1,72	1,56	1,1	5,0
Patamar	0,110	0,0096	13,30	22,44	11,4	16,2
Alcance (m)	26	20	22	22	20	21
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,90	0,95	0,84	0,62	0,93	0,92
<sup>2</sup> GDE (%)	40	16	13	7	10	31
<sup>3</sup> VC%	0,89	0,71	0,62	0,62	0,73	0,93

RP: resistência do solo a penetração; Ds: densidade do solo; Us (vol): umidade volumétrica do solo; MaP: macroporosidade; MiP: microporosidade; VTP: volume total de poros; Esf: Esférico; Exp: Exponencial; Lin: Linear; <sup>1</sup>EPP: efeito pepita puro; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; GDE%: grau de dependência espacial e; VC: validação-cruzada.

Os atributos que não apresentaram estrutura de dependência espacial, foram a MiP e Umidade, respectivamente nas profundidade de 0,0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m para a microporosidade e 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m para a umidade, conferindo a esses a condição de

efeito pepita puro (EPP), significando que as amostras são independentes para distâncias maiores que a menor distância entre as amostras utilizadas nesse estudo.

O efeito pepita representa a variância não explicada ou ao acaso, frequentemente causada por erros de medição ou variações dos atributos que não podem ser detectadas na escala de amostragem (TRANGMAR et al., 1985). De acordo com a análise do GDE proposto por Cambardella et al. (1994) todas as variáveis apresentaram forte dependência espacial, com exceções a MaP na profundidade de 0,10-0,20 m, RP na profundidade de 0,20-0,30 m e o VTP nas profundidade de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Tabela 4).

Os maiores valores de alcance (a) foram obtidos pela MaP na profundidade 0,10-0,20 m e RP na profundidade de 0,05-0,10, m respectivamente com valores de 30 e 34 m, os demais atributos apresentaram alcance entre 20 a 28 m. Relativamente as variáveis físico em estudo apresentaram valores baixos de alcance, evidenciando a baixa continuidade estrutural destes solos.

Com relação aos valores de  $R^2$  para os semivariogramas na área de estudo, estes apresentaram valores da ordem de 0,62 a 0,97 para os atributos físicos. Conforme a classificação dada por Azevedo (2004), esses resultados mostram, em geral, ajustes dos semivariogramas que possibilitam a obtenção dos mapas da distribuição espacial dos atributos de forma confiável.

Conhecido o semivariograma das variáveis e constatada a dependência espacial entre as amostras, foi possível interpolar valores em qualquer posição no campo de estudo por meio da krigagem, e, partindo-se dessas estimativas, foram construídos os mapas de isolinhas para cada uma delas. Souza et al. (2004) encontraram dependência espacial de atributos físicos e hídricos do solo aos elementos do relevo (pedoforma). Contudo, essa maior variabilidade espacial não permite fazer inferências a respeito das possíveis correlações entre os atributos do solo.

Cruzando as informações dos semivariogramas e os mapas de krigagem (Figura 3 a 5), observa-se que a área apresenta um relevo com forma linear e declividade homogênea apresentando variabilidade menor para as variáveis em estudo, tais informações equiparam-se ao estudo realizado por Souza et al. (2004).

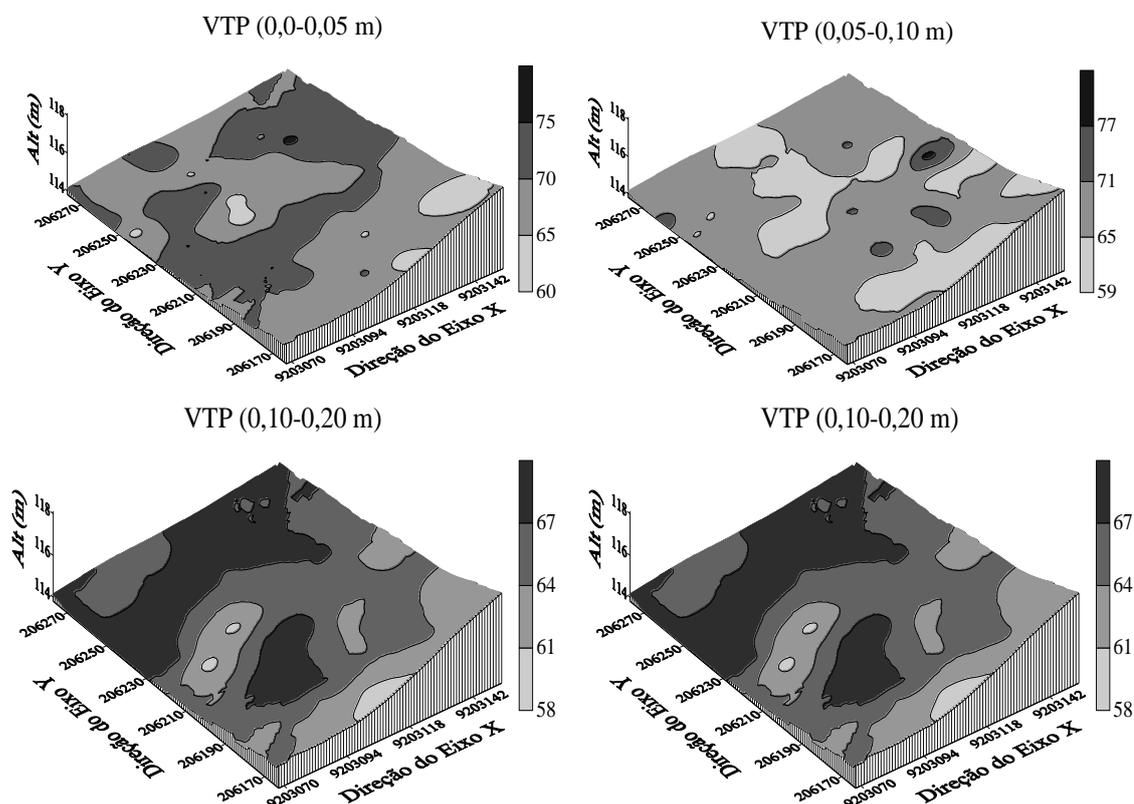


Figura 3. Mapas de krigagem do atributo físico do solo, volume total de poros (VTP), nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30.

Marques Júnior & Lepsch (2000), afirmam que a posição topográfica dos solos na paisagem, é um dos principais fatores condicionantes da variabilidade espacial dos solos. Todavia, a partir dos mapas de krigagem observa-se que quando a  $D_s$  aumenta em profundidade, a  $MaP$  reduz relativamente suas proporções. A  $RP$ , por sua vez, foi menor em regiões do mapa de menor  $D_s$ , concordando com diversos autores que afirmam que a  $RP$  é proporcional a  $D_s$  (BERGAMIN et al., 2010; IORI et al., 2012). Por outro lado, atribui-se há  $U_s$  o fator principal da menor  $RP$ , pois os altos índices de  $U_s$  as profundidades amostradas, praticamente restringem a ocorrência de valores elevados de  $RP$ .

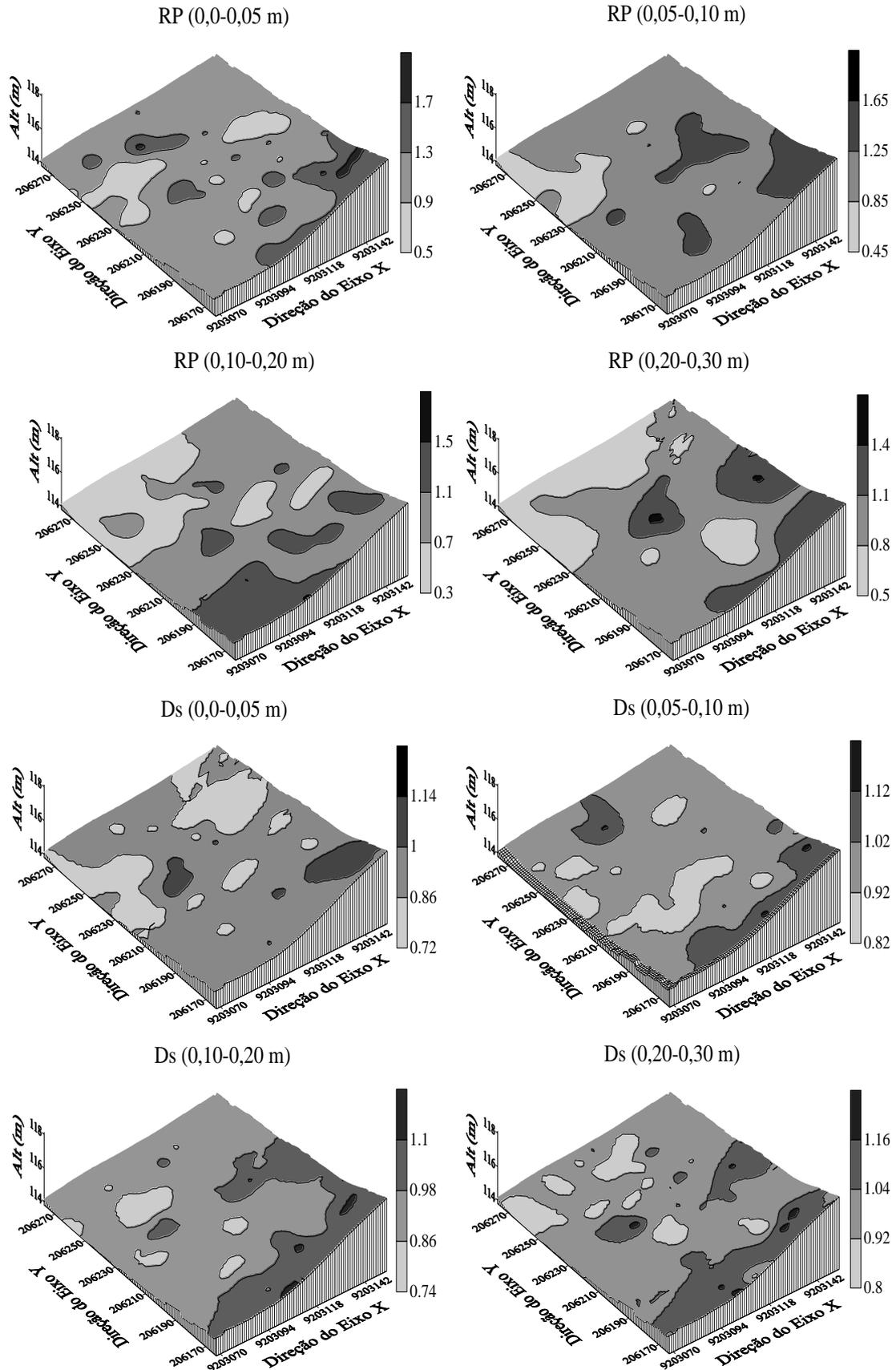


Figura 4. Mapas de krigagem dos atributos físicos do solo, resistência do solo a penetração (RP) e densidade do solo (Ds) nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30.

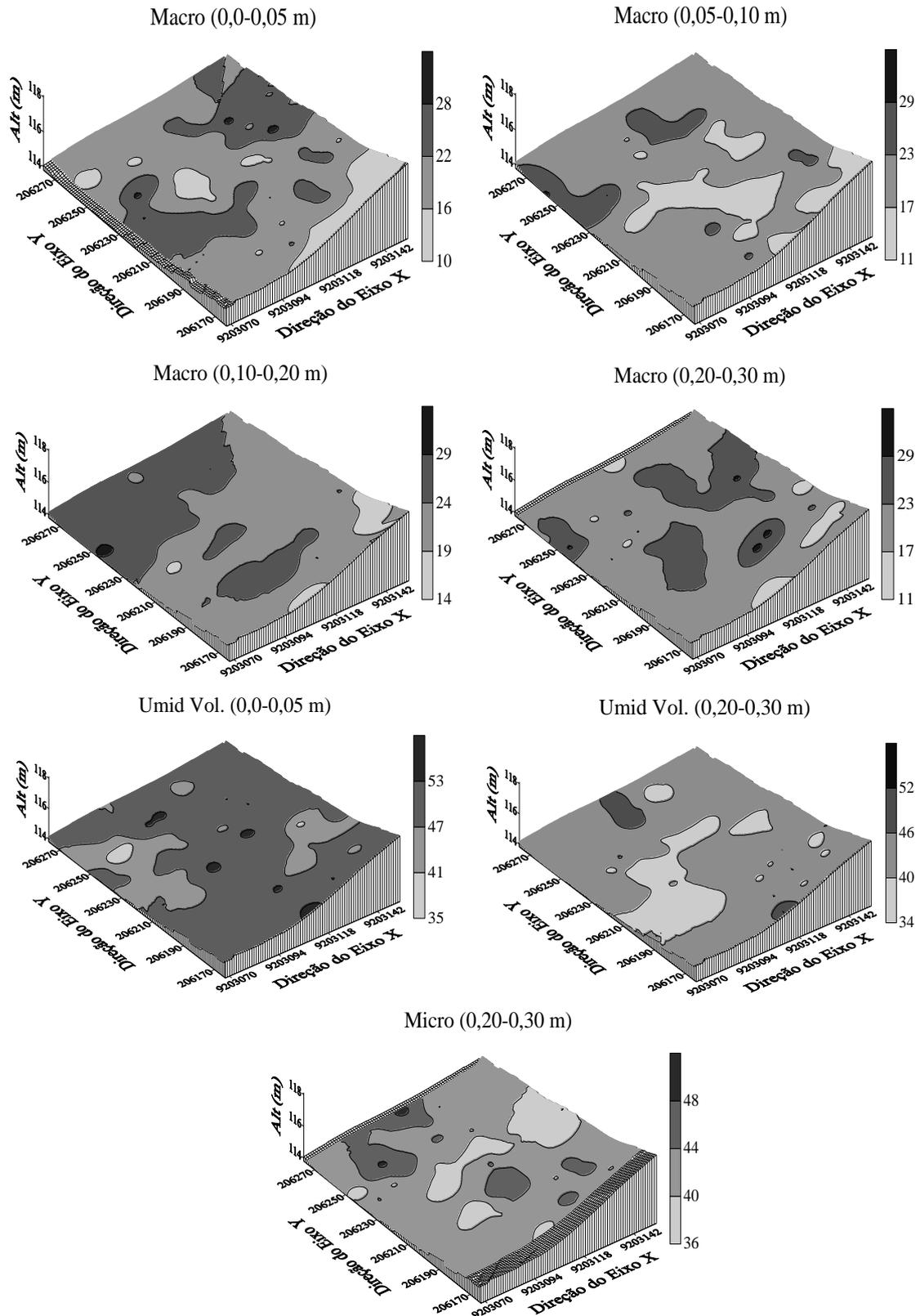


Figura 5. Mapas de krigagem dos atributos físicos do solo, macroporosidade (Macro) nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30, umidade volumétrica profundidades de 0,00-0,05 e 0,20-0,30 e microporosidade na profundidade de 0,20-0,30 m.

#### 4. CONCLUSÕES

Os atributos físicos da Terra Preta Arqueológica apresenta dependência espacial forte, com exceção da resistência do solo a penetração na profundidade de 0,20-0,30 m e volume total de poros nas profundidades de 0,10-0,20 e 20-0,30 m que apresentaram moderada dependência;

As frações texturais areia, silte e argila apresentaram dependência espacial forte, com exceção da fração silte na profundidade de 0,00-0,05 m que apresenta dependência espacial moderada.

Os atributos físicos do solo apresentaram valores de alcance variando entre 20 e 54 m.

#### 5. REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, E. C. Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no Estado de Mato Grosso. 2004. 132 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2004.
- BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V.; CANELLAS, L. P.; KERN, D. C. Fracionamento químico da matéria orgânica e caracterização física de Terra Preta de Índio. *Revista Ciências Agrárias*, Belém, v. 55, p. 44-51, 2012.
- BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um latossolo vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa, MG, v.34, p.681-691, 2010.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa – MG, v. 28, p.155-163, 2004.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *The Nature and Properties of Soils*. 14 ed. Pearson-Prentice Hall: Upper Saddle River, 2008. 990 p.
- 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 Sci. Soc. Am. J.*, v. 58, p.1501-1511, 1994.
- CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; SANTOS, L. A. C.; AQUINO, R. E.; SORES, M. D. R. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. *Revista Agr@ambiente*, Boa Vista - RR v. 6, p. 09-16, 2012.

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; SOUZA, R. V. C. C.; ALMEIDA, M. C. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. *Bragantia*, Campinas - SP, v. 70, p.598-609, 2011.

CAMPOS, M. C. C.; SORES, M. D. R.; SANTOS, L. A. C.; OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C. Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Argissolo Vermelho sob floresta. *Comunicata Scientiae*, v. 4, p.168-178, 2013.

CAMPOS, M. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; SIQUEIRA, D. S. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, CE, v. 38, p. 149-157, 2007.

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

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, Campina Grande - PB, v.15, p.237–243, 2011.

CHIG, L. A.; COUTO, E.G.; NOVAES FILHO, J. P.; RODRIGUES, L. C. M.; JOHNSON, M. S.; WEBER O. L. S. Distribuição espacial da granulometria, cor e carbono orgânico do solo ao longo de um transecto em microbacias na Amazônia meridional. *Acta Amazônica*, Manaus – AM, v. 38, p. 715-722, 2008.

CORRÊA, A. N.; TAVARES, M. H. F.; URIBE-OPAZO, M. A. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e seus efeitos sobre a produtividade do trigo. *Ciências Agrárias*, Londrina - PR, v. 30, p. 81-94, 2009.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO, J. R. *Model-based geostatistics*. New York: Springer, 2007. 228p.

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, Campina Grande - PB, v. 6, p. 242-246, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

IORI, P.; DIAS JÚNIOR, M. S.; SILVA, R. B. Resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em diversos usos do solo em áreas de preservação permanente. *Bioscience. Jornal*, Uberlândia – SP, v.28, p.185-195, 2012.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

KERN, D. C.; KÄMPF, N. O efeito de antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná, Pará. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa – MG, v. 13, p. 219-225, 1989.

LIMA, H.N.; SCHAEFER, C.E.R.; MELLO, J.W.V.; GILKES, R.J. & KER, J.C. Pedogenesis and pre-Columbian land use of "Terra Preta Anthrosols" ("Indian black earth") of Western Amazonia. *Geoderma*, Amsterdam, v. 110, p.1-17, 2002. .

LIMA, J. S. S.; SATTTLER, M. A.; XAVIER, A.C.; OLIVEIRA, R. B.; PASSOS, R. R.; OLIVEIRA, P. C. Variabilidade espacial da textura de um Argissolo Vermelho Amarelo sob cultivo de pastagem e vegetação nativa. *Ciência Rural*, Santa Maria - RS, v.39, 2009.

LÓPEZ, L. R.; SÁNCHEZ, A. R.; TAMAYO, J. H. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal - SP, v.28, p.55-63, 2008.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I.F. Depósitos superficiais neocenoico, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. *Geociências*, São Paulo - SP, v.19, n. 2, p. 265-81, 2000.

MINITAB Release 14.1, Statistical Software. US/Canada. 2000.

NEVES JUNIOR, A. F. Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta do Índio) na Amazônia Ocidental. 2008. 93 f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba - SP. 2008.

REIS, N. J. Projeto Rochas Carbonáticas de Apuí, AM – Serviço Geológico do Brasil (CPRM), p. 69, 2006.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. Pedologia: base para distinção de ambientes. Viçosa: NEPUT, 1999. 367 p.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de Parâmetros do solo. 1995. 99f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura - Luiz de Queiroz, Piracicaba - SP, 1995.

ROBERTSON, G.P. GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998.152p.

SAMPAIO, F. M. T.; MOZART M. FERREIRA, MARCELO S. DE OLIVEIRA, ALBERTO C. ALMEIDA, MARCOS R. JOSÉ. variabilidade espacial da umidade de um latossolo vermelho-amarelo sob plantio direto. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal - SP, v.30, p.854-861, 2010.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedofomas. *Bragantia*, Campinas - SP, v.68, p.1095-1103, 2009.

SANTOS, L. A. C.; CAMPOS, M. C. C., AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C., SILVA, D. M. P.; MARQUES JUNIOR, J.; FRANÇA, A. B. C. Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG, v. 37, p. 825-836, 2013.

SDS - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Relatório técnico síntese dos diagnósticos: Área estadual sul de Apuí e Manicoré. Manaus, 2004. 20p.

SILVA, J. J. N.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, Ê. F. F.; FONTES JÚNIOR, R. V. P.; SILVA, A. P. N. Variabilidade espacial de parâmetros de crescimento da mamoneira e de atributos físico-químicos em Neossolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, Campina Grande - PB. v. 14, p. 921-931, 2010.

SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo Distrocoeso no recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG, v. 34, p. 659-667, 2010

SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal - SP, v. 24, p. 309-319, 2004.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J. PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande - PB. v.8, p.51-58, 2004.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, New York, v.38, p.45-93, 1985.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, 1980. cap. 2, p.319-344.

WEBSTER, R. Is soil variation random. *Geoderma*, Amsterdam, v.97, p.149-163, 2000.

WOJCIECHOWSKI, J. C.; SCHUMACHER, M. V.; PIRES, C. A. F.; MADRUGA, P. R. A.; KILCA, R. V.; BRUN, E. J.; SILVA, C. R. S.; VACCARO, S.; RONDON NETO, R. M. Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual. *Ciência Florestal*, Santa Maria - RS, v.19, p. 383-391, 2009.

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA EMISSÃO CO<sub>2</sub> E ATRIBUTOS DO SOLO EM  
ÁREA DE TERRA PRETA ARQUEOLOGICA SOB CULTIVO DE CACAU NO  
MUNICÍPIO DE APUÍ, AM**

**RESUMO**

A matéria orgânica do solo influencia direta e indiretamente todas as características do solo, de modo que a redução do carbono orgânico total está relacionada à degradação física dos solos, sendo que a interferência antrópica sobre os ecossistemas produz mudanças na dinâmica da matéria orgânica do solo. O objetivo neste trabalho foi avaliar a distribuição espacial da emissão CO<sub>2</sub> e suas relações com os atributos do solo em área de Terra Preta Arqueológica (TPA) no município de Apuí, AM. Foi realizado o mapeamento de uma área de TPA onde foi delimitada uma malha de 42 x 88 m. Cada ponto de coleta seguiu espaçamentos de 6 X 8 m, totalizando 88 pontos amostrais. Em cada ponto nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m procedeu-se a coleta das amostras com estrutura preservada do solo, para análise de estabilidade de agregados e carbono orgânico total (COT). A emissão de CO<sub>2</sub> do solo foi registrada com um sistema automatizado portátil de fluxo de CO<sub>2</sub> do solo. A câmara foi colocada sobre colares de PVC previamente inseridos no solo a uma profundidade de três centímetros, vinte e quatro horas antes das medidas, minimizando-se assim os distúrbios mecânicos sobre o mesmo. Os mapas de krigagem das variáveis indicam que a variação espacial da emissão de CO<sub>2</sub> está influenciado principalmente pela macroporosidade, umidade e densidade ds solo. As variáveis temperaturas, umidade apresentaram estrutura de dependência espacial, no entanto, de forma mais errática quando comparado com a estrutura de dependência espacial do fluxo de CO<sub>2</sub>. Os atributos COT e Est C na profundidade de 0,0-0,05 m apresentaram variação espacial aleatória na área de estudo.

**Palavras-chave:** Geoestatística, Krigagem, Agregado

## ABSTRACT

The soil organic matter has direct and indirect influence on all the characteristics of the soil, so that the reduction of total organic carbon is related to physical soil degradation, being that anthropogenic interference on ecosystems produces changes in the dynamics of soil organic matter. This work has aimed to consider the spatial distribution of CO<sub>2</sub> emission and its relationship with the soil characteristics in an area of Soil Anthropic *Terra Preta* (SATP) in Apuí city – AM. It made the mapping of an area of SATP where was delimited a mesh of 42 x 88 m. Each collection point followed spacing of 6 X 8 m, totaling 88 sampling points. At each point in the depths of 0.0-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m, it proceeded to collect samples with preserved structure of soil for analysis of aggregate stability and total organic carbon (TOC). The CO<sub>2</sub> emission of the soil was recorded with a portable automated system soil CO<sub>2</sub> stream. The camera was placed on collars Polyvinyl Chloride (PVC) previously inserted into the ground in a depth of 1.1811 inches, 24 hours before measurements, thus minimizing mechanical disturbances on the same. The kriging maps of variables indicate that the spatial variation of CO<sub>2</sub> emission is mainly influenced by the macroporosity, soil moisture and soil density. The variables temperature, humidity presented spatial dependence structure, however, more erratically when it is compared to the structure of the spatial dependence of the CO<sub>2</sub> stream. TOC attributes and Est C in the depth of 0.0-0.05 m presented aleatory spatial variation in the study area.

**Keywords:** Geostatistics, Kriging, Aggregate

## 1. INTRODUÇÃO

Na região Amazônica ocorrem solos com horizonte A antrópico (Terras Pretas Arqueológicas, TPA), que por meio de ações humanas promoveram modificações nas características físicas e químicas neste horizonte (SILVA et al., 2011). As TPAs localizam-se em antigos assentamentos, contem artefatos culturais, sua coloração é escura e possui um grande depósito estável de matéria orgânica (LIMA et al., 2002).

A matéria orgânica do solo influencia direta e indiretamente nos atributos do solo (VIANA et al., 2011) e o seu estudo em agroecossistemas brasileiros é tema estratégico para que se alcance a sustentabilidade da agricultura em ecossistemas tropicais, e a conservação ambiental mundial (CUNHA et al., 2007), pois, práticas de uso e manejo dos solos, interferem no equilíbrio natural dos ecossistemas e altera os componentes orgânicos tanto em qualidade quanto em quantidade, além das variações em função do tempo e do tipo de uso (MELO & SCHAEFER, 2009).

Um dos atributos físicos do solo influenciado pela matéria orgânica é a agregação do solo que está relacionada com a disponibilidade de água e ar para as raízes, e com a resistência mecânica do solo à penetração (VIEIRA et al., 2010). Além da agregação do solo a matéria orgânica desempenha outras funções vitais ao ciclo da vida que vão desde a atividade de microrganismos e da fauna do solo, até a ação positiva sobre a estabilidade dos agregados do solo, porosidade e densidade, contribuindo para diminuição da compactação do solo (SPERA et al., 2010).

Por outro lado, o manejo do solo e o cultivo podem promover a degradação física, reduzindo a estabilidade de agregados, condutividade hidráulica e aumentando a densidade do solo, resistência do solo à penetração e a perda de carbono orgânico total (HICKMANN et al., 2012) e, conseqüentemente, alterar a evolução de gases para a atmosfera (BERNOUX et al., 2005; CHAVES & FARIAS, 2008).

Considerando que a variabilidade espacial das propriedades do solo ocorre naturalmente devido a fatores pedogênicos diversos e que o CO<sub>2</sub> emitido pelo solo é produzido essencialmente pela respiração das raízes das plantas e pela decomposição da matéria orgânica promovida pela ação dos microrganismos (PANOSSO et al., 2008) portanto, a manutenção e melhoria da qualidade do solo é um fator chave para a estabilidade, sustentabilidade e produtividade de ecossistemas naturais e de agroecossistemas, desta forma, compreendendo e quantificando o impacto dos sistemas de manejo do solo na sua qualidade física torna-se possível o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (SILVA et al., 2008)

Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial da emissão CO<sub>2</sub> e suas relações com os atributos do solo em área de Terra Preta Arqueológica no município de Apuí, AM.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Caracterização da área**

O estudo localizou-se no município de Apuí/AM, que está situado ao longo da rodovia Transamazônica (BR-230), sob as coordenadas geográficas de 7°12'05" S e 59°39'37" W. Segundo a classificação de Köppen o clima da região pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade está limitada pelas isoietas de 2.250 e 2.750 mm, com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25°C e 27°C e a umidade relativa fica entre 85 e 90%.

A geologia da região apresenta arenitos da formação Beneficiente, recoberto por pacote argiloso do terciário. Em relação aos solos presentes no município, ocorre predominância das classes: Argissolos e Latossolos, sendo que o solo da área de estudo foi classificado como

argissolo, e predomina a vegetação primária formada por Floresta Tropical Densa, constituída por árvores adensadas (SDS, 2004).

Foi escolhido uma área de TPA, cujo local vem sendo cultivado à quatorze anos, portanto, nos primeiros seis anos abrigou o cultivos de arroz, milho, feijão e melancia, e posterior foi inserido a cultura do cacau que permanece até o presente estudo.

## **2.2. Metodologia de Campo**

Foi realizado o mapeamento de uma área Terra Preta Arqueológica (TPA) na região de Apuí, AM. Sobre está área foi delimitado uma malha de 42 x 88 m. Para cada ponto de coleta seguiu espaçamentos de 6 X 8 m, totalizando 88 pontos amostrais e em cada ponto amostral nas profundidades 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m procedeu-se a coleta das amostras indeformadas.

Nos pontos de cruzamento das malhas foram coletados blocos de solo com estrutura preservada nas profundidades 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m para determinação da estabilidade dos agregados do solo. A determinação da estabilidade de agregados foi realizada pelo método de peneiramento úmido. O solo foi seco ao ar e passado em peneira de 9,52 e 4,76 mm. Os agregados retidos na peneira de 4,76 mm foram empregados na análise de estabilidade de agregados via úmida, a qual foi realizada colocando as amostras sobre um jogo de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,105 e 0,063 mm. As amostras foram submetidas a oscilações verticais durante 15 minutos, numa frequência de 32 oscilações por minuto. Foi adotado como índice de estabilidade o diâmetro médio geométrico (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP), cujo cálculo foi feito segundo Kemper & Rosenau (1986).

O carbono orgânico total foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yeomans e Bremner (1988). O estoque de carbono (Est C) foi determinado em todas as áreas

estudadas na profundidade de coleta de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, e foi calculado pela expressão (VELDKAMP, 1994):

Est C =  $(CO \times Ds \times e)/10$ , onde:

Est C = estoque de carbono orgânico do solo ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ )

COT = teor de carbono orgânico total ( $g \text{ kg}^{-1}$ )

Ds = densidade do solo ( $kg \text{ dm}^{-3}$ )

e = espessura da camada considerada (cm).

A emissão de  $CO_2$  do solo ( $FCO_2$ ) foi registrada com um sistema automatizado portátil de fluxo de  $CO_2$  do solo LI-COR (LI-8100). Em seu modo de medição o sistema (LI-8100) monitora as mudanças na concentração de  $CO_2$  dentro da câmara por meio de espectroscopia na região do infravermelho (IRGA infrared gas analyzer).

Este sistema possui uma câmara para solos com volume interno de  $854,2 \text{ cm}^3$  com área de contato circular de  $83,7 \text{ cm}^2$ . A câmara foi colocada sobre colares de PVC previamente inseridos no solo a uma profundidade de 3 cm, o qual, evita que ocorram distúrbios causados pela inserção da câmara diretamente no solo, não ocasionando a quebra de sua estrutura porosa e permitir que o gás seja preso em seu interior. Os colares foram inseridos no solo 24 horas antes das medidas, onde a câmara de solo LI-8100 foi acoplada sobre os colares, não proporcionando o contato direto da câmara no solo minimizando-se assim os distúrbios mecânicos sobre o mesmo.

No momento da instalação dos colares nos pontos de coleta dos ambientes em estudo a serrapilheira foi removida, expondo assim a superfície do solo antes da inserção dos colares, após essa etapa os colares foram novamente recobertos com a serrapilheira, com a finalidade de manter as características iniciais do ambiente, para cada avaliação da emissão de  $CO_2$  esse procedimento foi repetido, retirando-se a serrapilheira antes da avaliação e cobrindo novamente o colar após o término da leitura, em cada ponto.

Para a avaliação da emissão de CO<sub>2</sub> a câmara se fecha sobre o colar de PVC, por meio de seu sistema pneumático, dando início ao modo de leitura, com duração de aproximadamente 90 segundos em cada ponto onde a concentração de CO<sub>2</sub> dentro da câmara é tomada a cada 2,5 segundos. De forma generalizada, o fluxo de CO<sub>2</sub> é computado em cada ponto por um ajuste da concentração de CO<sub>2</sub> do ar dentro da câmara em função de uma regressão parabólica no tempo após o fechamento da câmara.

A temperatura do solo (TS) foi monitorada concomitantemente às avaliações de emissão de CO<sub>2</sub> do solo utilizando-se um sensor de temperatura que é parte integrante do sistema LI-8100. Este sensor consiste de uma haste de 20 cm que é inserida no interior do solo, o mais perpendicular possível em relação à superfície, na região próxima ao local onde foram instalados os colares de PVC para a avaliação da emissão de CO<sub>2</sub>.

A umidade do solo (US) em (%) volume, foi registrada utilizando-se um aparelho TDR (Time Domain Reflectometry) - Campbell® Hydrosent<sup>M</sup> Campbell Scientific - Austrália, constituído por uma sonda apresentando duas hastes de 12 cm que foram inseridas no interior do solo o mais perpendicular possível em relação à sua superfície, nos locais próximos aos colares de PVC, esta foi realizada simultaneamente às avaliações da emissão de CO<sub>2</sub> e temperatura do solo em cada um dos pontos dos ambientes em estudo.

Inicialmente os dados foram submetidos à análise estatística descritiva calculando-se a média, mediana, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, máximo, mínimo, coeficiente de assimetria, curtose e a hipótese de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) pelo software estatístico Minitab 14 (MINITAB, 2000).

Para a caracterização da variabilidade espacial, foi utilizada a análise geoestatística (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Sob a teoria da hipótese intrínseca, onde o semivariograma experimental é estimado pela Equação:

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

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  $x_i$ .

O ajuste de um modelo matemático (exponencial, esférico, linear ou gaussiano), aos valores calculados de  $\hat{\gamma}(h)$  foram definidos com base nos coeficientes do modelo teórico para o semivariograma: o efeito pepita ( $C_0$ ); o patamar ( $C_0 + C_1$ ) e o alcance ( $a$ ).

Na análise da razão de dependência espacial (proporção em percentagem do ( $C_0$ ) em relação ao( $C_0+C_1$ )) das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al., (1994), onde valores de [ $(C_0/(C_0+C_1))$ ] menores que 25% são considerados dependência espacial forte, valores de [ $(C_0/(C_0+C_1))$ ] entre 25 e 75 % indicam dependência espacial moderada e valores de [ $(C_0/(C_0+C_1))$ ] maiores que 75% dependência espacial fraca.

Na determinação da existência ou não da dependência espacial, utilizou-se a modelagem dos semivariogramas através do programa GS<sup>+</sup> (ROBERTSON, 1998). Tendo como base para a escolha do melhor ajuste do semivariograma respectivamente, o maior valor do coeficiente determinação ( $r^2$ ) e validação-cruzada. Após o ajuste dos modelos matemáticos permissíveis foi realizado à interpolação dos dados por meio da krigagem e em seguida a confecção dos mapas de isolinhas foram geradas no software Surfer versão 8.00.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes à análise descritiva dos atributos do solo, presentes na Tabela 5, mostraram valores de média e mediana próximos, caracterizando assim uma distribuição simétrica dos dados. Os atributos avaliados apresentam distribuição normal, como constatado pelos valores de média e mediana semelhantes e também assimetria e curtose próximo de zero,

Tabela 5. Estatística descritiva do diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP), densidade (Ds), carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono (Est C) do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Estatística descritiva	DMG	DMP	Ds	COT	Est C
	mm		Mg m <sup>-3</sup>	g kg <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>
0,05-0,10 m					
Média	2,67	3,13	0,90	114,52	52,31
Mediana	2,67	3,14	0,89	114,39	51,33
Máximo	3,90	3,67	1,15	128,44	84,20
Mínimo	1,32	2,43	0,69	96,59	34,76
<sup>1</sup> DP	0,50	0,20	0,11	8,12	8,42
Variância	0,25	0,04	0,01	65,90	70,90
<sup>2</sup> CV%	18,87	6,30	11,76	7,09	16,10
Assimetria	-0,34	-0,64	0,45	-0,08	0,90
Curtose	0,91	1,54	0,16	-0,88	1,93
<sup>3</sup> d	0,09 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,07	0,11 <sup>ns</sup>
0,05-0,10 m					
Média	2,55	3,01	0,95	105,45	54,35
Mediana	2,54	3,05	0,95	104,66	50,63
Máximo	3,92	3,50	1,18	122,65	82,21
Mínimo	1,25	2,43	0,73	97,40	38,52
<sup>1</sup> DP	0,45	0,21	0,09	4,69	11,25
Variância	0,20	0,04	0,01	21,97	126,49
<sup>2</sup> CV%	17,50	7,00	9,34	4,44	20,69
Assimetria	0,02	-0,58	0,22	1,08	1,34
Curtose	0,61	0,27	0,44	1,85	0,81
<sup>3</sup> d	0,05	0,09 <sup>ns</sup>	0,07*	0,10 <sup>ns</sup>	0,18 <sup>ns</sup>
0,10-0,20 m					
Média	2,57	2,50	0,95	101,43	49,01
Mediana	2,63	2,61	0,94	101,41	48,01
Máximo	3,52	3,98	1,25	118,27	71,65
Mínimo	1,28	1,26	0,73	90,15	34,46
<sup>1</sup> DP	0,43	0,50	0,10	6,44	6,03
Variância	0,19	0,25	0,01	41,42	36,44
<sup>2</sup> CV%	16,85	19,96	10,62	6,35	12,32
Assimetria	-0,65	-0,36	0,62	0,72	0,70
Curtose	0,06	0,34	0,32	0,43	1,54
<sup>3</sup> d	0,11 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>
0,20-0,30 m					
Média	2,50	2,53	0,98	107,01	58,32
Mediana	2,57	2,62	0,97	107,48	54,49
Máximo	3,75	3,89	1,27	119,33	99,16
Mínimo	1,15	1,39	0,26	89,99	39,26
<sup>1</sup> DP	0,45	0,46	0,13	6,68	13,47
Variância	0,21	0,21	0,02	44,60	181,43
<sup>2</sup> CV%	18,15	18,22	13,46	6,24	23,10
Assimetria	-0,25	-0,20	-1,48	-0,36	1,17
Curtose	0,23	-0,04	9,26	0,89	0,84
<sup>3</sup> d	0,09 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,18 <sup>ns</sup>

DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado Ds: densidade do solo; COT: carbono orgânico total; Est C: estoque de carbono do solo; <sup>1</sup>DP: desvio padrão; <sup>2</sup>CV: coeficiente de variação; <sup>3</sup>d: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, \*significativo a 5% de probabilidade.

com exceção do estoque de carbono na profundidade de 0,00-0,05 e 0,10-0,20 m, carbono orgânico total na profundidade de 0,05-0,10 m que apresentou valores de curtose acima de 1. Para o estoque de carbono nas profundidades de 0,05-0,10; 0,20-0,30 e 0,05-0,10 m observou-se valores de assimetria acima de 1.

A proximidade dos valores média e mediana assegura uma distribuição simétrica dos dados, isso significa que a dispersão dos valores não apresenta caudas muito alongadas, o que poderia comprometer a análise geoestatística, ocorre somente que os valores de assimetria e curtose são sensíveis a valores extremos de forma que um único valor pode exercer grande influência nos seus resultados (DIGGLE & RIBEIRO JÚNIOR, 2007).

Os resultados do teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) para os atributos apresentado na Tabela 5, apenas a densidade do solo não apresentou normalidade nas profundidades de 0,00-0,05, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. A condição de normalidade não é uma exigência da geoestatística, é conveniente apenas que a média e a variabilidade dos dados não sejam constantes em toda a área de estudo, ou seja, que ocorra a estacionaridade necessária ao uso da geoestatística (VIEIRA, 2000).

Segundo Isaaks & Srivastava (1989), mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do chamado efeito proporcional, que a média e a variabilidade dos dados sejam constantes na área de estudo, o que foi observado, ou seja, ocorrência de estacionaridade necessária ao uso da geoestatística.

De acordo com a classificação do CV proposta por Warrick e Nielsen (1980), que classificaram como baixa variabilidade  $CV < 12\%$ , média variabilidade  $CV$  entre 12 e 60% e alta variabilidade  $CV > 60\%$ , nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m os atributos apresentaram baixa variabilidade, com exceção do DMG e Est C que apresentaram uma média variabilidade. Para Ds e COT na profundidade de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m o COT e Est C

apresentaram baixa variabilidade, nestas duas profundidades as demais variáveis apresentaram média variabilidade.

Para as camadas estudadas, observou-se valores médios de DMP superiores para as duas primeiras profundidades e valores menores nas camadas seguintes, e com valores médios semelhantes de DMG para as quatro profundidades. De acordo com Salton (2008) a estabilidade dos macroagregados está relacionada ao teor de C orgânico no solo. Informações relacionadas à distribuição dos agregados do solo podem ser sintetizadas por meio do cálculo do DMP, que permite comparar diversos sistemas de manejo quanto à organização da estrutura do solo.

Para a variável COT, pode-se observar que os valores médios permanecem próximos em profundidade, e coeficientes de variação com baixa variabilidade. Contudo a matéria orgânica é um dos principais agentes de formação e estabilização de agregados, e a diminuição de seu conteúdo no solo pelo cultivo é uma das maiores causas de deterioração da estrutura do solo (HAYNES & SWIFT, 1990), já que a partir da agregação, indiretamente, são afetadas as demais características físicas como densidade, porosidade, aeração, capacidade de retenção e infiltração de água (BAYER & MIELNICZUK, 1999).

Campos (2009), estudando perfis de TPA na região do médio Rio Madeira, encontrou valores de COT nos horizontes antropogênicos, oscilando entre 43,7 e 80,3 g kg, valores estes abaixo dos encontrados neste trabalho. Os valores de densidade do solo (Ds) tiveram médias semelhantes nas quatro camadas estudadas, tendo um leve aumento em profundidade. Valores semelhantes foram encontrados por Santos et al. (2011).

Quanto aos resultados das análises geoestatísticas para os índices da estabilidade de agregados, Ds, COT e Est C apresentados na Tabela 6, verificou-se dependência espacial para todas as variáveis, com exceção para o COT e Est C na profundidade de 0,0-0,05 m, os quais apresentaram efeito pepita puro (EPP), ou seja, considerando o espaçamento amostral, variação aleatória na área de estudo.

Tabela 6. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas do diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP), densidade (Ds), carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono (Est C) do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Parâmetros	Est C	COT	DMG	DMP	Ds
Geoestatísticos					
0,0-0,05 m					
Modelo	Lin	Lin	Exp	Esf	Exp
Efeito Pepita	-	-	0,041	0,013	0,00091
Patamar	-	-	0,221	0,027	0,0089
Alcance (m)	-	-	35	37	22
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	-	-	0,94	0,99	0,83
<sup>2</sup> GDE (%)	-	-	19	48	10
<sup>3</sup> VC%	-	-	0,70	0,58	0,81
0,05-0,10 m					
Modelo	Esf	Exp	Exp	Exp	Exp
Efeito Pepita	35	2,70	0,018	0,007	0,00082
Patamar	140	22,67	0,135	0,039	0,00062
Alcance (m)	23	26	26	31	30
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,86	0,85	0,94	0,98	0,89
<sup>2</sup> GDE (%)	25	12	13	18	13
<sup>3</sup> VC%	0,89	0,70	0,80	0,78	80
0,10-0,20 m					
Modelo	Exp	Exp	Esf	Esf	Exp
Efeito Pepita	3,0	4,90	0,009	0,047	0,00087
Patamar	28,3	42,85	0,194	0,196	0,00083
Alcance (m)	23	25	43	39	28
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,92	0,90	0,97	0,98	0,97
<sup>2</sup> GDE (%)	11	11	5	24	10
<sup>3</sup> VC%	0,82	0,75	0,99	89	0,75
0,20-0,30 m					
Modelo	Esf	Exp	Esf	Exp	Exp
Efeito Pepita	49,8	4,20	0,017	0,021	0,0015
Patamar	146,6	45,63	0,162	0,204	0,0096
Alcance (m)	27	24	11	34	20
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,95	0,91	0,94	0,99	0,95
<sup>2</sup> GDE (%)	34	9	11	10	16
<sup>3</sup> VC%	0,96	0,85	0,76	0,80	0,71

Est C: estoque de carbono do solo; COT: carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado; Ds: Densidade do solo; Esf.: Esférico; Exp.: Exponencial; Lin: Linear; <sup>1</sup>R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; <sup>2</sup>GDE%: grau de dependência espacial e; <sup>3</sup>VC: validação cruzada.

Os semivariogramas dos atributos que apresentaram dependência espacial ajustaram-se predominantemente aos modelos exponencial e esférico, corroborando com outros estudos que apontam serem os modelos que melhor se ajustam a estes atributos (SOUZA et al., 2004; SOUZA et al., 2009; CAJAZEIRA e ASSIS JUNIOR, 2011).

Visando interpolar valores para locais não medidos, os semivariogramas foram ajustados com base no melhor coeficiente da validação cruzada (VC), uma técnica que consiste da remoção de pontos medidos substituído por outro valor estimado por meio de pontos vizinhos e que mostra como resultado uma reta que passa entre as observações reais e estimadas (WOJCIECHOWSKI et al., 2009), no qual os valores da VC variam de 0 a 1, cuja os valores mais próximos de 1 apontam os mais eficiente modelos para representar o fenômeno estudado (RIBEIRO JÚNIOR, 1995). Dessa forma, os valores de VC foram superiores a 0,70, com exceção apenas do DMP na profundidade de 0,0-0,05 m que apresentou VC de 0,58 (Tabela 6).

O grau de dependência espacial (GDE), classificado de acordo com Cambardella et al. (1994), que avalia em termos proporcionais o efeito pepita sobre o patamar ( $C_0/(C_0+C_1)$ ), no qual o efeito pepita representa a variação não explicada pelo semivariograma, tornando conveniente apresentar baixa proporções, mostraram, de modo geral, forte dependência espacial ( $GDE < 25\%$ ) para os atributos avaliados, todavia, o DMP da profundidade de 0,0-0,05 m e o Est C da profundidade de 0,20-0,30 m mostraram moderada variabilidade (GDE entre 25 e 75%) com 48 e 34%, respectivamente. Os atributos COT e Est C na camada de 0,0-0,05 m apresentaram EPP, isto é, ocorreu variação aleatória dos atributos na área estudada, nesse caso a estatística clássica pode ser usada sem restrições.

O alcance da dependência espacial não apresentou grandes variações em profundidades, todavia, o DMG apresentou as maiores variações com alcance de 35; 26; 43 e 29 m, respectivamente nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Contudo, o alcance da DMP variou de 31 a 39 m, de 20 a 30 m para a  $D_s$ , e de 23 a 27 m para COT, o que pode subsidiar futuros estudos envolvendo amostragem de solos no que se refere a densidade amostral a ser utilizada (VIERA, 2000; MONTANARI et al., 2005; SOUZA et al., 2006).

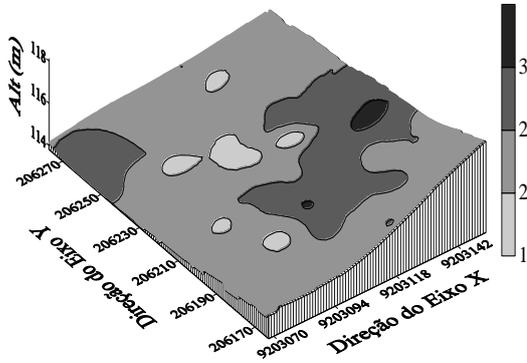
Por meio dos mapas de krigagem em conjunto com o modelo de elevação digital (MDE) o qual configura a forma do relevo, é possível inferir sobre possíveis correlações entre os atributos analisados e desses com os elementos do relevo (LEÃO & PERFECT, 2010). O relevo da área estudada apresenta um perfil linear com declividade de aproximadamente 7%. Na Figura 7 estão apresentados os mapas dos índices da estabilidade de agregados nas diferentes profundidades, no qual o DMP apresentou valores constantes nas profundidades de 0,0-0,10 m e de 0,10-0,30 m, sendo de maior ocorrência de 2,85 a 3,18 mm e 2,1 a 2,8 mm, respectivamente, corroborando com o valor médio para este atributo apresentado na Tabela 03.

O DMG apresentou valores inferiores ao DMP, contudo, a ocorrência dos maiores e menores valores do DMG concordam com a distribuição do DMP na área de estudo, ocorre que o DMG representa uma estimativa do tamanho da classe de agregados de maior ocorrência, ao passo que o DMP é tanto maior quanto maior for a percentagem de agregados retidos nas peneiras com malhas maiores.

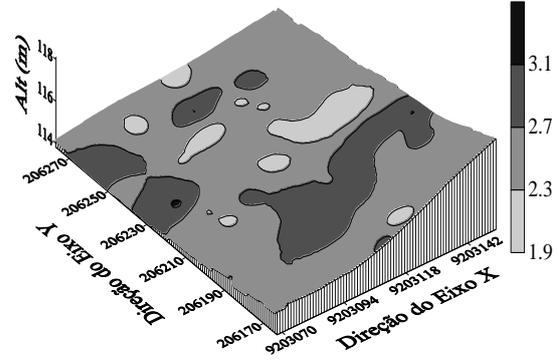
Os mapas de COT mostram que, de modo geral, a área apresenta teores elevados de COT, mesmo com o incremento da profundidade proporcionando uma correlação positiva com os índices de agregação do solo como constatado por diversos autores (SOUZA et al., 2009; COUTINHO et al., 2010; VIEIRA et al., 2011).

O teor de COT encontrado nessa área de TPA corrobora com o verificado por vários estudos que afirmam que as TPAs concentram elevados teores de COT, em relação às áreas adjacentes (GLASER et al., 2000; CUNHA et al., 2007). Todavia, os teores médios de COT não superiores a  $80,4 \text{ g kg}^{-1}$ , encontrados por Campos (2009) em TPAs sob vegetação primária e secundária em regeneração na região sul do Amazonas, e  $51,5 \text{ g kg}^{-1}$ , encontrado por Neves Júnior (2008) em TPA sobre vegetação secundária e cultivo não observaram teores médios acima de  $107 \text{ g kg}^{-1}$  encontrados nesse estudo (Figura 6 a 8).

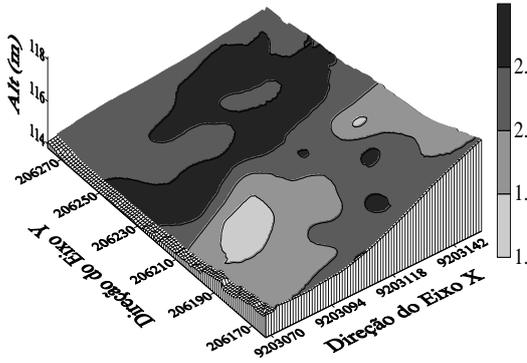
DMG (0,0-0,05 m)



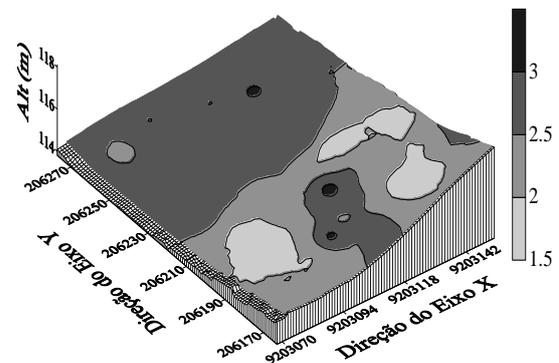
DMG (0,05-0,10 m)



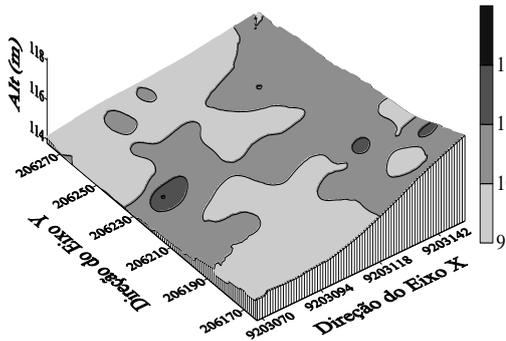
DMG (0,10-0,20 m)



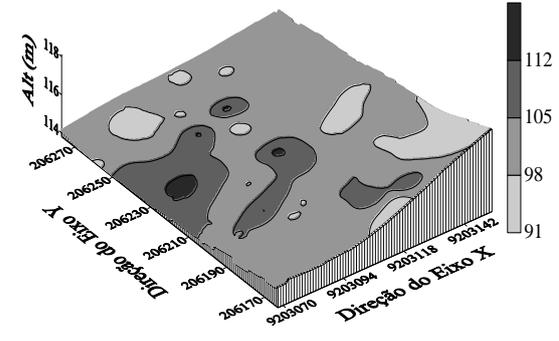
DMG (0,20-0,30 m)



COT (0,05-0,10 m)



COT (0,10-0,20 m)



COT (0,20-0,30 m)

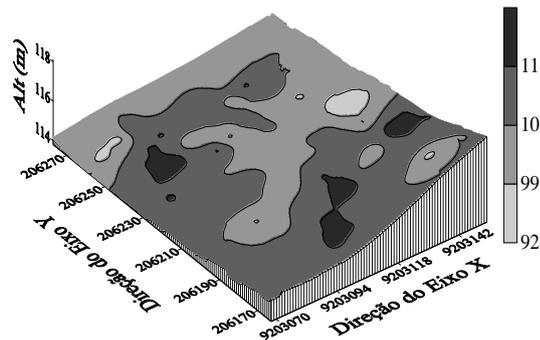


Figura 6. Mapas de krigagem dos atributos físicos do solo, diâmetro médio geométrico (DMG) nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30, 0,00-0,05 e carbono orgânico (COT) total nas profundidades de 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30, 0,10.

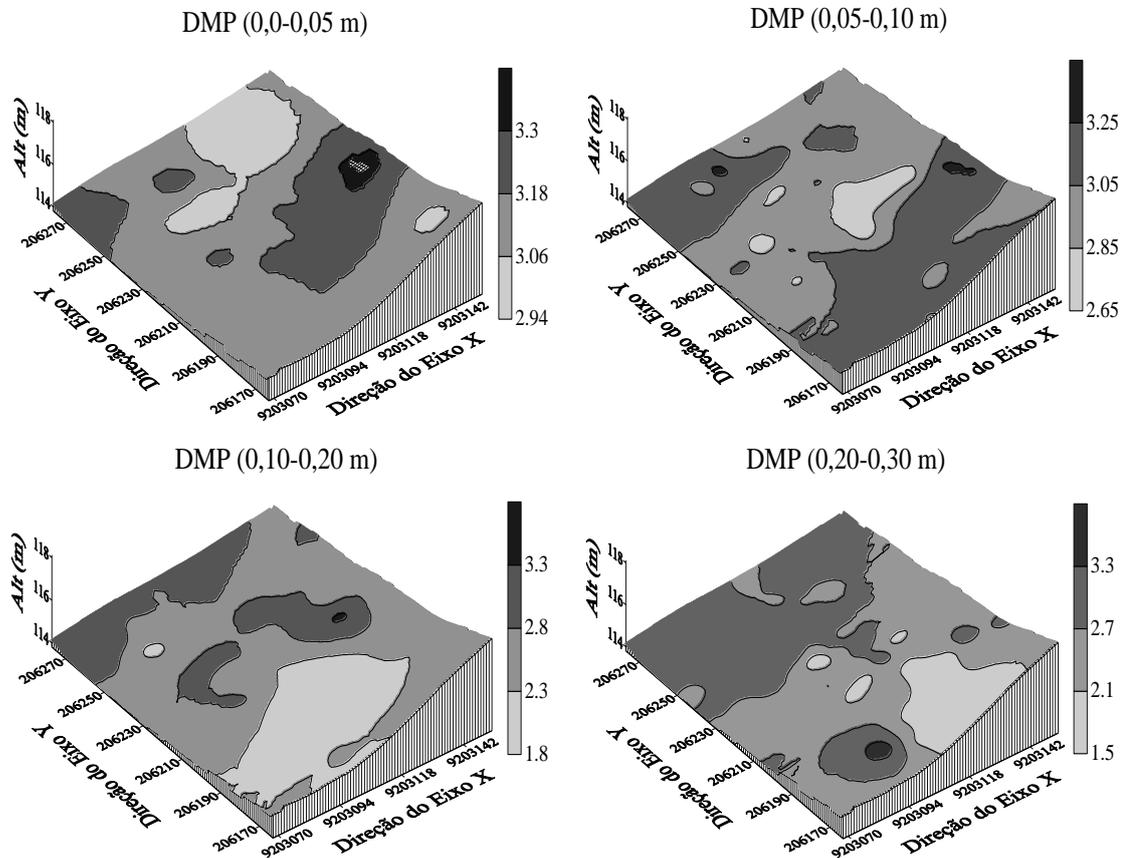


Figura 7. Mapas de krigagem do atributo físico do solo, diâmetro médio ponderado (DMP) nas profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30.

Com relação ao Est C da TPA observa-se valores elevados de Est C em relação a solos sem horizonte A antrópico, como constatados em trabalhos de Costa et al. (2008). Contudo, para TPA, os resultados são esperados devido ao elevado teor de COT, mesmo esses solos apresentando baixos níveis de densidade. Todavia, apesar dos elevados valores de Est C, os mapas não apresentaram interações significativas de distribuição espacial entre esse atributo, fato que, segundo Alho (2013), pode ser atribuído a influência da Ds na estimativa do Est C.

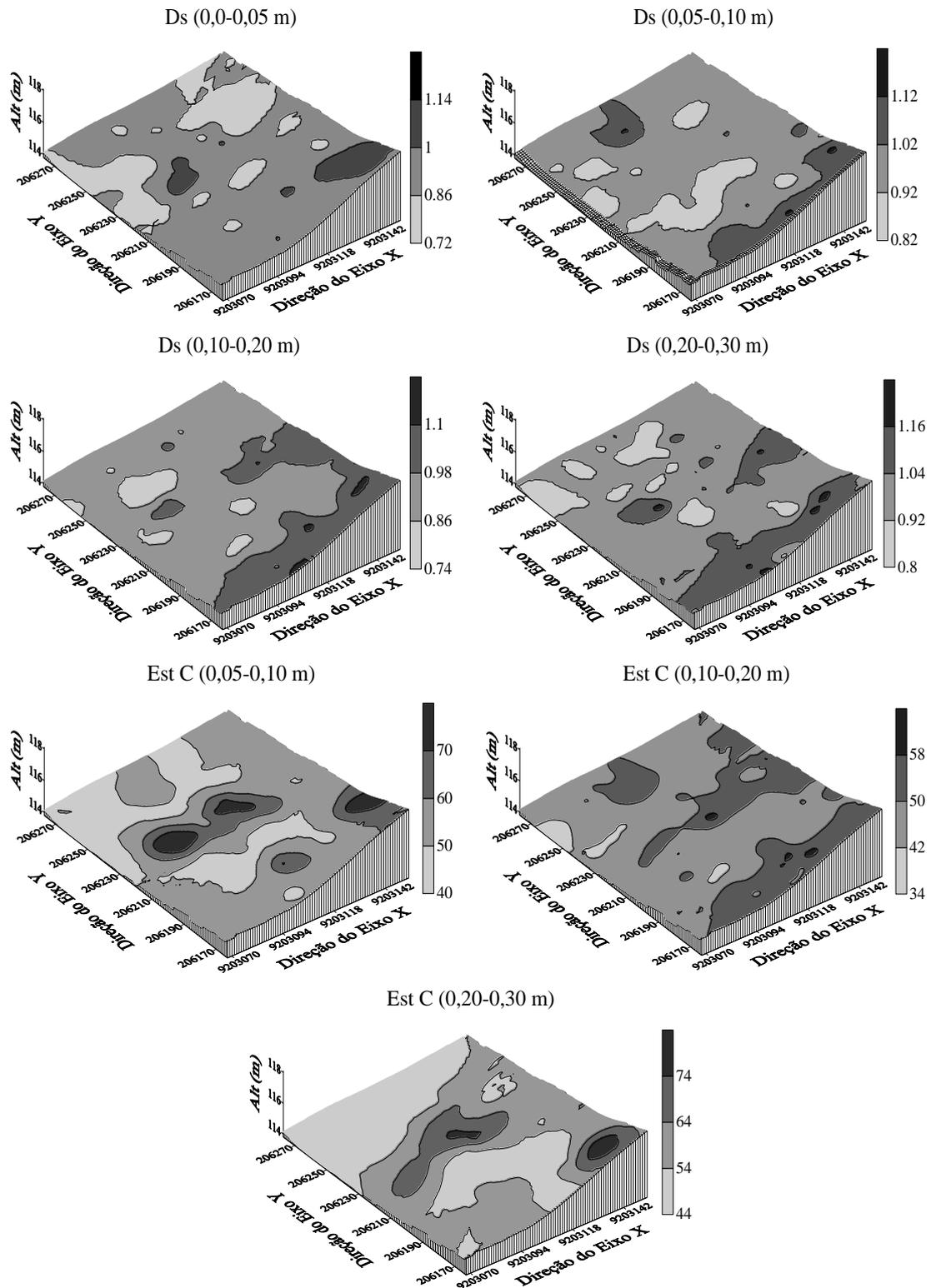


Figura 8. Mapas de krigagem dos atributos físicos do solo, densidade do solo (Ds) profundidades de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30; e estoque de carbono nas profundidades de 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30.

As estatísticas descritivas para a emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo são apresentadas na Tabela 7. As variáveis apresentaram valores de média e mediana próximos indicando distribuição normal. De acordo com os estudos realizados por Gonçalves et al. (2001), as variáveis relacionadas com a geoestatística não precisam apresentarem condições de normalidade no entanto a distribuição dos dados não podem apresentarem caudas muito alongadas, já que desta forma possam comprometer a análise.

Tabela 7. Estatística descritiva da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Estatística descritiva	FCO <sub>2</sub>	T solo	U solo
	μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	°C	%
Média	5,49	26,14	39,21
Mediana	5,13	26,15	39,50
Máximo	15,30	26,62	49,00
Mínimo	1,35	25,68	29,67
<sup>1</sup> DP	2,53	0,22	4,38
Variância	6,43	0,05	19,15
<sup>2</sup> CV%	46,21	0,84	11,16
Assimetria	1,47	0,13	0,09
Curtose	3,52	- 0,57	- 0,50
<sup>3</sup> d	0,10 <sup>ns</sup>	0,07*	0,06*

Fluxo de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>), Temperatura do solo (Tsolo), Umidade do solo (Usolo), <sup>1</sup>DP = Desvio padrão; <sup>2</sup>CV = Coeficiente de variação; <sup>3</sup>d = Teste de Kolmogorov Smirnov a 5% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade.

As médias da emissão de CO<sub>2</sub> foi de 5,49 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. As quantidades médias apresentadas de CO<sub>2</sub> emitidas nesta classe de solo são inferiores comparadas aos estudos de D'Andrea et al (2010) sob variações de curto prazo no fluxo e variação espacial do CO<sub>2</sub> do solo em floresta nativa. O mesmo autor afirma que as variações das emissões de CO<sub>2</sub> em sistemas florestais apresenta-se como um fenômeno de natureza muito complexa visto que não se pode levar em consideração um único atributo do solo ou do ambiente que explique a variação do CO<sub>2</sub> no espaço. Possivelmente estes valores possam estar relacionados com altos valores de carbono presentes no solo assim como as variáveis, temperatura e umidade do solo que possam estar influenciando na atividade microbiana do solo.

Os coeficientes de assimetria e curtose indicam se a distribuição dos dados está próxima à distribuição normal (coeficientes iguais à zero). Como a condição de normalidade não se torna crucial segundo Gonçalves et al. (2001), então a análise geoestatística foi realizada para as variáveis. Os valores de coeficientes de variação foram classificados de acordo com Warrick & Nielsen (1980), mediante a análise dos coeficientes de variação temos que o fluxo de CO<sub>2</sub> apresentou valores maiores que 24% sendo classificados como altos. Schwendenmann et al. (2003) em estudo semelhante em solos de floresta tropical, observaram valores de CV entre 35 e 45%. Em estudo sobre a variabilidade da emissão de gases do efeito estufa, Dasselaar et al. (1998) encontraram um coeficiente de variação de 55% para a emissão de CO<sub>2</sub> em solo vegetado.

A umidade apresentou valores médios de CV estando entre 11,16. Para a umidade do solo SOUZA et al. (2004) e JÚNIOR et al. (2006) observaram valores de coeficientes de variação baixos pelo método gravimétrico. Panosso (2006) também observou valores baixos de CV em estudo sobre variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade em Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar em sistemas de colheita manual com queima e mecanizada. A temperatura do solo apresentou os menores valores de CV, sendo classificados como baixos.

Os parâmetros dos modelos matemáticos dos semivariogramas ajustados para as variáveis emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo são apresentados na Tabela 8. A emissão de CO<sub>2</sub> apresentou dependência espacial com modelo esférico ajustado para esta variável. Estudando a variabilidade da emissão de CO<sub>2</sub> diária por 18 dias numa mesma área, La Scala et al. (2000) encontraram, em sua maioria, modelos esféricos de variabilidade espacial, porém alguns desses dias também apresentaram modelos exponenciais.

A umidade do solo apresentou modelo exponencial, diferindo dos resultado encontrado por Souza et al. (2004), que constataram o modelo esférico como aquele que melhor descreve

a sua variabilidade. A variável temperatura do solo apresentou modelo exponencial, Al-Kayssi (2002) estudou os aspectos de variabilidade espacial da temperatura do solo em casa de vegetação e o modelo esférico foi aquele que melhor descreveu a variabilidade encontrada.

Tabela 8. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM.

Parâmetros	FCO <sub>2</sub>	T solo	U solo
Geoestatísticos			
Modelo	Esf	Exp	Exp
Efeito Pepita	0,194	1,7	0,005
Patamar	0,720	12,9	0,042
Alcance (m)	40	25	27
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,85	0,99	0,97
<sup>2</sup> GDE (%)	27	13	12
<sup>3</sup> VC%	0,88	0,72	0,73

Fluxo de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>), Temperatura do solo (T solo), Umidade do solo (U solo), <sup>1</sup>R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; <sup>2</sup>GDE%: grau de dependência espacial e; <sup>3</sup>VC: validação cruzada.

A partir dos semivariogramas teóricos e os padrões espaciais (mapas) da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo apresentados na Tabela 8 tem-se uma estimativa dos locais não amostrados da área de estudo através do processo de interpolação denominado krigagem (Figura 9). Se compararmos os mapas de krigagem para as variáveis em estudo observamos que os mapas de umidade e temperatura apresentam uma distribuição menos contínua quando comparados com o mapa do fluxo de CO<sub>2</sub>, fato que pode ser explicado devido a diferença dos modelos ajustados que foi exponencial para a umidade e a temperatura e esférico para o fluxo de CO<sub>2</sub>. Isto se justifica por que o modelo exponencial descreve uma função aleatória mais errática em pequenas distâncias, quando compara ao modelo esférico, caracterizando eventos que variam muito em pequena escala, ou seja, mudanças abruptas ocorrem em todas as distâncias (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

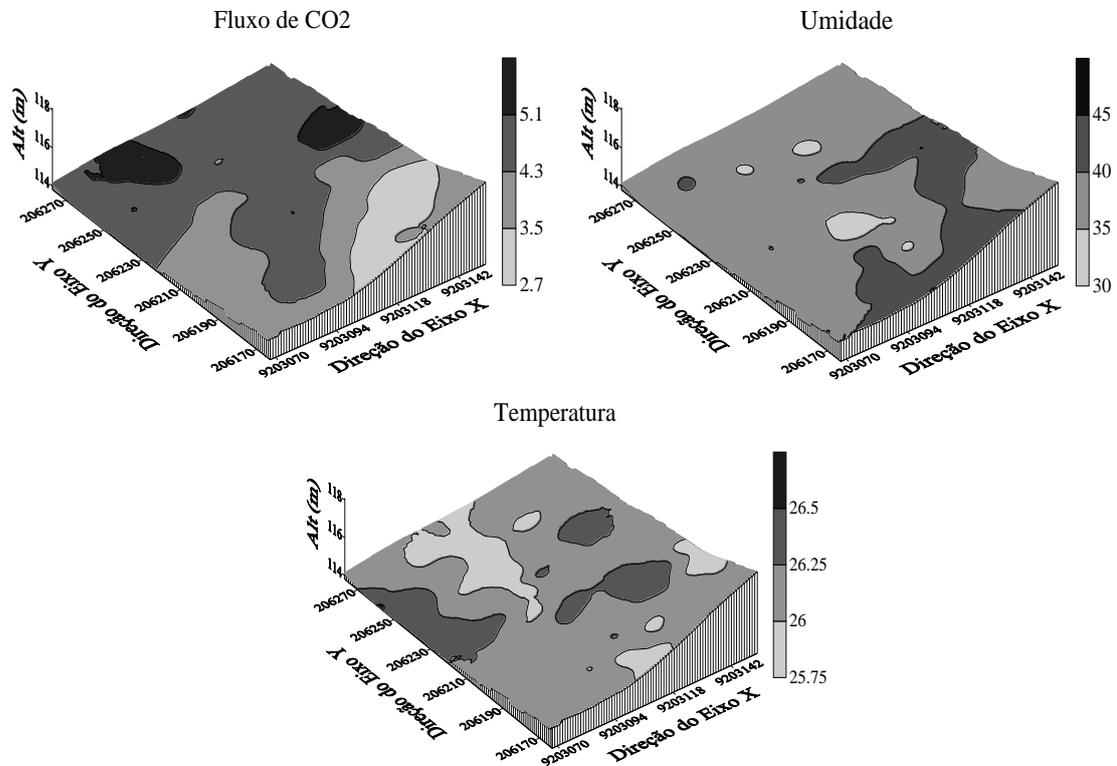


Figura 9. Mapas de krigagem do Fluxo de CO<sub>2</sub> (F CO<sub>2</sub>), Temperatura do solo (T solo), Umidade do solo (U solo).

#### 4. CONCLUSÃO

Os mapas de krigagem das variáveis indicam que a variação espacial da emissão de CO<sub>2</sub> é influenciado principalmente pela macroporosidade, umidade e densidade dos solo.

As variáveis temperatura, umidade apresentaram estrutura de dependência espacial, no entanto, de forma mais errática quando comparado com a estrutura de dependência espacial do fluxo de CO<sub>2</sub>;

Os atributos COT e Est C na profundidade de 0,0-0,05 m apresentaram variação espacial aleatória na área de estudo;

## 5. REFERÊNCIAS

- ALHO, L. C. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em Cambissolo e Argissolo na região de Humaitá, AM. 2013. 99 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.
- AL-KAYSSI, A. W. Spatial variability of soil temperature under greenhouse conditions. *Renewable Energy*, Amsterdam, v. 27, p. 453-462, 2002.
- BAYER, C., MIELNICZUK, J. 1999. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A., CAMARGO, F. A. O. (ed.). *Matéria orgânica do solo: fundamentos e caracterização*. Gênese, Porto Alegre, Brasil. p. 9-26.
- BERNOUX, M.; CERRI, C. C.; VOLKOFF, B.; CARVALHO, M. C. S.; FELLER, C.; CERRI, C. E. P.; ESCHENBRENNER, V.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. Gases do efeito estufa e estoques de carbono nos solos: inventário do Brasil. *Cadernos de Ciência e Tecnologia*, Brasília - GO, v. 22, p. 235-246, 2005.
- CAJAZEIRA, J.; ASSIS JUNIOR, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no estado do Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza – CE, v. 42, p. 258-267, 2011.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEM, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPA, A. E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.47, p.1501-1511, 1994.
- CAMPOS, M.C.C. Pedogeomorfologia aplicada a ambientes amazônicos do médio Rio Madeira. 2009. 242 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal Rural de Pernambuco. Pernambuco, 2009.
- CHAVES, L. H. G.; 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 – PE, v.3, p. 20-25, 2008.
- COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa – MG, v.32, p.323-332, 2008.
- COUTINHO, F. S.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; JUNIOR, D. J. R.; TORRES, J. L. R. Estabilidade de agregados e distribuição do carbono em Latossolo sob sistema plantio direto em Uberaba, Minas Gerais. *Comunicata Scientiae*, Bom Jesus – PI, v. 2, p. 100-105, 2010.
- CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; CANELLAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. O.; TROMPOWSKY, P. M.; SANTOS, G. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte a Antrópico da Amazônia (Terra Preta). *Acta Amazônica*, Manaus – AM, v. 37 p. 91-98, 2007.
- DASSELAAR, A. V. P. V.; CORRÉ, W. J.; PRIEMÉ, A.; KLEMEDTSSON, Å. K.; WESLIEN, P.; STEIN, A.; KLEMEDTSSON, L.; OENEMA, O. Spatial variability of methane, nitrous oxide and carbon dioxide emissions from drained rasil and. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v. 62, p. 810-817, 1998.
- DIGGLE, P.; RIBEIRO Jr. P. J. *Model- based geostatistics*. New York: Spring, 2007.

GLASER, B.; BALASHOV E.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G. & ZECH, W.; Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Organic Geochemistry*. v.31, p. 669-678, 2000.

GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; MATA, J.D.V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. *Acta Scientiarum*, Maringá - PR v. 23, p. 1149-1157, 2001.

HAYNES, R.J., SWIFT, R.S. 1990. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *European Journal of Soil Science*, Oxford, 42, p. 73-83, 1990.

HICKMANN, C.; COSTA, L. M.; SCHAEFER; C. E. G. R.; FERNANDES, R. B. A.; ANDRADE, C. L. T. Atributos físico-hídricos e carbono orgânico de um Argissolo após 23 anos de diferentes manejos. *Revista Caatinga*, Mossoró – RN, v. 25, p. 128-136, 2012.

ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University Press, p.561, 1989.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.) *Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1986. p. 425-442.

LA SCALA JÚNIOR, N.; MARQUES JÚNIOR J.; PEREIRA G.T.; CORÁ J.E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO<sub>2</sub> emissions from a Brazilian bare soil. *Soil Biology & Biochemistry*, Exeter, v.32, p.1.459-62, 2000.

LEÃO, T.P.; PERFECT, E. Modeling water movement in horizontal columns using fractal theory. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG. v. 34, p. 00-00, 2010.

LIMA, H.N.; SCHAEFER, C.E.R.; MELLO, J.W.V.; GILKES, R.J.; KER, J.C. Pedogenesis and pre Columbian and use of Indi an black earth of Western Amazonia. *Geoderma*, Amsterdam, v. 110, p.1–17, 2002.

MELO, V. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Matéria Orgânica em Solos Desenvolvidos de Rochas Máficas no Nordeste de Roraima. *Acta Amazônica*, Manaus – AM, v. 39, p. 53-60, 2009.

MINITAB Release 14.1, Statistical Software. 2000.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana de açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 40, p. 69-77, 2005.

NEVES JUNIOR, A. F. Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) na Amazônia Central. Piracicaba, 2008, 94f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, São Paulo - SP, 2008.

PANOSSO, A. R.; CAMARA, F. T.; LOPES, A.; PEREIRA, G.T.; LA SCALA J. R, N. Emissão de CO<sub>2</sub> em um Latossolo após preparo convencional e reduzido em períodos seco e chuvoso. Científica, Jaboticabal – SP, v. 34, p. 257-262, 2006.

PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JUNIOR, J.; LA SCALA, J. N. Variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. Engenharia Agrícola, Jaboticabal – SP, v. 28, p. 227-236, 2008.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de Parâmetros do solo. 1995. 99f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1995.

ROBERTSON, G.P. GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998.152p.

SALTON, J. C.; JOÃO MIELNICZUK, C. B., MADALENA BOENI, P. C. C.; FABRÍCIO, A. C., MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. Revista Brasileira de Ciencia do Solo, Viçosa – MG, v.3, p. 11-21, 2008.

SANTOS, L. A. C.; CAMPOS, M. C. C.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. M. P.; MENDONÇA JÚNIOR, A. F. Caracterização física de seis sítios de Terras Pretas Arqueológicas na região de Apuí-AM. Revista Verde, Mossoró – RN, v.6, p. 167-174, 2011.

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T. O' BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica, Biogeochemistry, v.64, p. 111- 128, 2003.

SDS - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Relatório técnico síntese dos diagnósticos: Área estadual sul de Apuí e Manicoré. Manaus, 2004. 20p.

SILVA, F. W. R., LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G., MOTTA, M. B.; SANTANA, R. M. Caracterização química e mineralogia de solos Antrópicos (terras pretas de índio) na Amazônia central. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa – MG, v.35, p. 673-681, 2011.

SILVA, R. F.; BORGES, C. D.; GARIB, D. M.; MERCANTE, F. M. 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 – MG, v. 32, p. 2435-2441, 2008.

SOUZA, Z. M.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados de matéria orgânica em solos de relevos diferentes. Pesquisa agropecuária brasileira. Brasília - GO, v.39, p.491-499, 2004.

SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; CAVALCANTE, Í. H. L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. Santa Maria – RS. Ciência Rural, v.36, n.1, p.128-134, 2006.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; SÁENZ, C.M.S. spatial variability of aggregate stability in Latosols under sugarcane. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, Viçosa - MG, v.33, p.245-253, 2009.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Atributos físicos de um Hapludox em função de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP), sob plantio direto. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 32, p. 37-44, 2010.

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa – MG, v. 35, p. 2105-2114, 2011.

VIEIRA, S. R.; DECHEN, S.C.F.; SIQUEIRA, G.M.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. *Bragantia*, Campinas –SP, v. 70, p.185-195, 2011.

VIEIRA, S. R.; GARCIA, M. A. G.; GONZÁLEZ, A. P.; SIQUEIRA, G. M. Variabilidade espacial e temporal do teor de água do solo sob duas formas de uso. *Bragantia*, Campinas, v.69, p.181-190, 2010

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-53.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, 1980. cap. 2, p.319-344.

WELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, p.175-180, 1994.

WOJCIECHOWSKI, J.C.; SCHUMACHER, M.V.; PIRES, C.A.F.; MADRUGA, P. R.A.; KILCA, R.V.; BRUN, E.J.; SILVA, C.R.S.; VACCARO, S.; RONDON NETO, R.M. Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual. *Ciência Florestal*, Santa Maria - RS, v.19, p. 383-391, 2009.

YEOMANS, J.C.; BREMMER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.19, p.1467-1476, 1988.