

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**Atributos do solo e emissão de CO₂ em Terra Preta
Arqueológica preservada e sob cultivo em Novo Aripuanã,
Amazonas, Brasil**

JOSÉ MAURÍCIO DA CUNHA

**PROF. DR. DENILTON CARLOS GAIO
ORIENTADOR
PROF. DR. MILTON CÉSAR COSTA CAMPOS
CO-ORIENTADOR**

**Cuiabá, MT
Julho de 2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**Atributos do solo e emissão de CO₂ em Terra Preta
Arqueológica preservada e sob cultivo em Novo Aripuanã,
Amazonas, Brasil**

JOSÉ MAURÍCIO DA CUNHA

*Tese apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Física
Ambiental da Universidade Federal de
Mato Grosso, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Doutor em
Física Ambiental.*

**PROF. DR. DENILTON CARLOS GAIO
ORIENTADOR
PROF. DR. MILTON CÉSAR COSTA CAMPOS
CO-ORIENTADOR**

**Cuiabá, MT
Julho de 2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

C972a Cunha, José Maurício da.
Atributos do solo e emissão de CO₂ em Terra Preta
Arqueológica preservada e sob cultivo em Novo Aripuanã,
Amazonas, Brasil / José Maurício da Cunha. -- 2016
xviii, 80 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Denilton Carlos Gaio.
Co-orientador: Milton César Costa Campos.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso,
Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física
Ambiental, Cuiabá, 2016.
Inclui bibliografia.

1. solos antrópicos. 2. usos e manejo do solo. 3. atributos físicos
do solo. 4. efluxo de CO₂. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

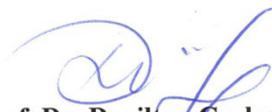
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

FOLHA DE APROVAÇÃO

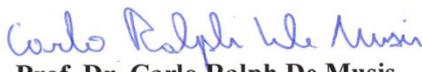
TÍTULO: ATRIBUTOS DO SOLO E EMISSÃO DE CO₂ EM AMBIENTES DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA PRESERVADA E SOB CULTIVO EM NOVO ARIPUANÃ ESTADO DO AMAZONAS - BRASIL

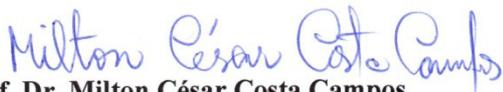
AUTOR: JOSÉ MAURÍCIO DA CUNHA

Tese de Doutorado defendida e aprovada em 28 de julho de 2016, pela comissão julgadora:


Prof. Dr. Denilton Carlos Gaio
Orientador
Instituto de Física - UFMT


Profa. Dra. Luciana Sanches
Examinadora Interna
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e
Tecnologia – UFMT


Prof. Dr. Carlo Ralph De Musis
Examinador Interno
Universidade de Cuiabá - UNIC


Prof. Dr. Milton César Costa Campos
Examinador Externo
Instituto de Educação, Agricultura e
Ambiente/UFAM/Campus de Humaitá


Prof. Dr. Anderson Cristian Bergamin
Examinador Externo
Universidade Federal de Rondônia / Campus de Rolim de Moura

DEDICATÓRIA

A minha amada esposa Livianny Cunha, aos meus queridos filhos Lucas Cunha e Ludmila Cunha, aos meus pais Antônio Campelo e Marileide Vieira e irmãos Tony, Ronaldo, Lídia, Gerônimo e Rafael, pela fé, amor, compreensão, oportunidade, confiança e sacrifícios.

AGRADECIMENTOS

- ❖ Agradeço a Deus pela vida, coragem e inspiração, tornando-se possível todas minhas realizações.
- ❖ Agradeço a FAPEAM pelo apoio e financiamento da pesquisa: Edital 030/2013 – UNIVERSAL AMAZONAS.
- ❖ Agradeço a CAPES pelo apoio e financiamento do Doutorando Institucional DINTER/CAPES - Edital Capes 013/2012.
- ❖ Agradeço aos Reitores e Pró-reitores da Universidade Federal do Amazonas e Universidade Federal de Mato Grosso, por firmar parceria na realização do Doutorado Interinstitucional.
- ❖ Agradeço a Universidade Federal do Amazonas, pelo apoio na realização do Doutorando Institucional e pela minha liberação para capacitação.
- ❖ Ao meu orientador Prof. Dr. Denilton Carlos Gaio, pelos ensinamentos, dedicação e confiança para que esse trabalho fosse realizado, e agradeço ainda mais pela forte amizade.
- ❖ Ao meu co-orientador Prof. Dr. Milton César Costa Campos, pela colaboração e ensinamentos, além de ser um dos co-autores importantes que tornou possível a realização do Doutorado Interinstitucional.
- ❖ Agradeço ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira, pela motivação e dedicação a todos os professores e alunos do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental. Agradeço ainda mais pela colaboração em tornar-se possível a realização do Doutorado Interinstitucional.
- ❖ Agradeço aos membros da banca de qualificação e defesa do doutorado pelas valorosas contribuições para a melhoria da qualidade desse trabalho, nas pessoas de Prof. Dr. Denilton Carlos Caio, Profa. Dra. Luciana Sanches, Prof. Dr. Carlo Ralph De Muisis, Prof. Dr. Milton César Costa Campos e o Prof. Dr. Anderson Cristian Bergamin.
- ❖ Agradeço aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental pela dedicação e ensinamentos nas disciplinas.

- ❖ Agradeço aos professores co-autores em artigos desenvolvidos durante o doutorado, as pessoas de Prof. Dr. Denilton Carlos Gaio, Prof. Dr. José de Souza Nogueira, Prof. Dr. Carlo Ralph De Muis, Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes, Profa Dra. Nadja Gomes Machado, Prof. Dr. Milton César Costa Campos, Prof. Dr. Zigomar de Souza, Prof. Msc. Rodrigo Tartari, Prof. Msc. Marcelo dos Anjos e Prof. Msc. Luiz Carlos da Silva.
- ❖ Agradeço a meus pais e irmão pelo incentivo.
- ❖ Agradeço aos alunos da turma do Doutorado Interinstitucional, companheiros e participantes ativos nessa jornada.
- ❖ Agradeço aos colegas de trabalho, parentes e amigos pelo apoio e torcida.
- ❖ Agradeço aos alunos e pesquisadores do grupo de pesquisa Solos e Ambiente Amazônico, pelo apoio nas atividades de campo e de laboratório, em especial ao Prof. Dr. Milton César Costa Campos, Prof. Msc. Douglas Marcelo Pinheiro da Silva, Prof. Msc. Marcelo Dayron Rodrigues Soares, e aos alunos Alan Lima, Emily Simão, Lucas Silva, Samuel França, Pedro Mota, Wildson Brito, Lucivania Silva, Romária de Almeida, Igor Lourenço, Aparecida Feitosa, Elilson Brito, Felipe Weckner, Selma Viana, Uilson Franciscon, Willian Nascimento, José Carlos Pantoja.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	<i>x</i>
LISTA DE TABELAS	<i>xii</i>
LISTAS DE ABREVIACÕES E SIGLAS	<i>xiv</i>
RESUMO	<i>xvi</i>
ABSTRACT	<i>xviii</i>
1. Introdução	<i>1</i>
2. Revisão Bibliográfica	<i>5</i>
2.1. Atributos do solo	<i>5</i>
2.2. Características Gerais dos Solos no Sul do Amazonas	<i>8</i>
2.3. Atributos do Solo de Terra Preta Arqueológica	<i>10</i>
2.4. Efluxo de CO₂ do Solo	<i>13</i>
2.5. Estatística e Geoestatística Aplicada em Ciência do Solo	<i>14</i>
2.5.1. Geoestatística	<i>15</i>
2.5.2. Estatística univariada e multivariada	<i>19</i>
3. Material e Métodos	<i>23</i>
3.1. Áreas de Estudo	<i>23</i>
3.2. Metodologias de Campo	<i>25</i>
3.3. Metodologias de Laboratório	<i>27</i>
3.4. Tratamentos dos Dados	<i>29</i>
4. Resultados e Discussão	<i>32</i>
4.1. Características físicas e carbono orgânico do solo em diferentes ambientes de Terra Preta Arqueológica	<i>32</i>
4.1.1. Inter-correlações entre os atributos físicos do solo e do carbono orgânico nos diferentes sistemas de uso do solo de TPA	<i>44</i>
4.1.2. Semivariograma dos componentes principais dos atributos do solo de TPA para diferentes ambientes	<i>47</i>
4.2. Efluxo de CO₂, temperatura e umidade do solo em Terra Preta Arqueológica em diferentes ambientes	<i>51</i>
4.2.1. Variabilidade espacial dos atributos efluxo de CO ₂ , temperatura do e umidade do solo	<i>54</i>

5.	<i>Conclusões</i>	61
6.	<i>Referências Bibliográficas</i>	63
	APÊNDICE A – TABELAS DE CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Semivariograma teórico e seus componentes.....	16
Figura 2. Representação de uma grade amostral para as direções usualmente adotadas.....	17
Figura 3. Localizações dos ambientes de Terra Preta Arqueológica sob os respectivos usos em Novo Aripuanã, Amazonas.	23
Figura 4. Representação das malhas amostrais e pontos de coleta nas áreas de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas. A: Floresta; B: feijão guandu; C: pastagem.....	24
Figura 5. Precipitação acumulada para o ano de 2015 registradas na estação Bonamigo da Agência Nacional de Águas no município de Manicoré, no estado do Amazonas, Brasil.	25
Figura 6. Imagem da trincheira de coleta das amostras de solo em Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas.	26
Figura 7. Imagem das medições do efluxo de CO ₂ do solo na área de floresta em Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas, AM.	27
Figura 8. Plano fatorial dos atributos do solo coletadas a uma profundidade de 0,00-0,20 m em áreas de Terra Preta Arqueológica sob diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas. Valores padronizados de tal forma que a média é zero e as distancias entre os escores é medido pelo desvio padrão. FN: floresta; FJ: feijão guandu; PT: pastagem.	46
Figura 9. Parâmetros e modelos dos semivariogramas dos componentes principais dos atributos do solo em áreas de TPA na região de Novo Aripuanã, Amazonas. FN: floresta natural; FJ: feijão guandu; PT: pastagem; CP1: componente principal referente à estabilidade dos agregados; CP2: componente principal relacionado com as características estruturais, textura do solo e carbono orgânico do solo.	47
Figura 10. Distribuição espacial dos componentes principais relacionados à estabilidade dos agregados (CP1) e às características estruturais, textura e carbono orgânico do solo (CP2) em ambientes de Terra Preta Arqueológica na região de Novo Aripuanã, Amazonas.	50

Figura 11. Semivariogramas experimentais e modelos ajustados do efluxo de CO ₂ do solo na camada 0,00-0,10 m nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas. FN: Floresta natural; FJ: Feijão guandu; PT: Pastagem.	56
Figura 12. Semivariogramas experimentais e modelos ajustados para a temperatura do solo na camada 0,00-0,10 m nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas. FN: Floresta natural; FJ: Feijão Guandu; PT: Pastagem.	57
Figura 13. Semivariogramas experimentais e modelos ajustados para a umidade do solo na camada 0,00-0,10 m nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas. FN: Floresta natural; FJ: Feijão Guandu; PT: Pastagem.	58
Figura 14. Mapas de padrão espacial do efluxo de CO ₂ , temperatura do solo e umidade do solo nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Precipitação acumulada referente aos dias de coleta registradas na estação Bonamigo da Agência Nacional de Águas no município de Manicoré, no estado do Amazonas, Brasil.	25
Tabela 2. Coeficiente de correlação de Spearman (n=798) dos atributos do solo de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas, Brasil.	33
Tabela 3. Teste de média e estatística descritiva das frações granulométricas do solo na profundidade de 0,00-0,05 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.	34
Tabela 4. Teste de média e estatística descritiva das frações granulométricas do solo na profundidade de 0,05-0,10 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.	35
Tabela 5. Teste de média e estatística descritiva das frações granulométricas do solo na profundidade de 0,10-0,20 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.	36
Tabela 6. Teste de média e estatística descritiva dos atributos estruturais do solo na profundidade de 0,00-0,05 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.	37
Tabela 7. Teste de média e estatística descritiva dos atributos estruturais do solo na profundidade de 0,05-0,10 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.	38
Tabela 8. Teste de média e estatística descritiva dos atributos estruturais do solo na profundidade de 0,10-0,20 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.	39
Tabela 9. Teste de média e estatística descritiva da estabilidade dos agregados e carbono orgânico do solo na profundidade de 0,00-0,05 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.	41
Tabela 10. Teste de média e estatística descritiva da estabilidade dos agregados e do carbono orgânico do solo na profundidade de 0,05-0,10 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.	42

Tabela 11. Teste de média e estatística descritiva da estabilidade dos agregados e carbono orgânico do solo na profundidade de 0,10-0,20 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.....	43
Tabela 12. Correlação entre cada componente principal e variáveis analisadas e análise fatorial dos atributos do solo coletadas a uma profundidade de 0,00-0,20 m, com os fatores rotacionados (<i>varimax</i>) (Fator 1 e 2) correspondentes aos ambientes estudados, na região de Novo Aripuanã, Amazonas.....	45
Tabela 13. Resultado dos parâmetros dos modelos ajustados do semivariograma dos componentes principais dos atributos do solo em áreas de TPA na região de Novo Aripuanã, Amazonas.....	48
Tabela 14. Estatística descritiva a análise de Kruskal-Wallis do efluxo de CO ₂ , temperatura do solo e umidade do solo nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas.	51
Tabela 15. Análise de correlação dos atributos granulométricos, efluxo de CO ₂ (FCO ₂), temperatura (TS) e umidade do solo (US) nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas.	53
Tabela 16. Parâmetros dos modelos ajustados do semivariograma do efluxo de CO ₂ , temperatura do solo e umidade do solo na camada 0,00-0,10 m nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas.....	54
Tabela 17. Características químicas do solo de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas, Brasil.	80
Tabela 18. Características físicas do solo de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas, Brasil.	80

LISTAS DE ABREVIACÕES E SIGLAS

<1,00 -	Classes de agregados menor que 1,00 mm
>2,00 -	Classes de agregados maior que 2,00 mm
2,00-1,00 -	Classes de agregados entre 2,00 a 1,00 mm
ACP -	Análise de componentes principais
C_0 -	Efeito pepita
COT -	Carbono orgânico do solo
CO ₂ -	Dióxido de carbono
CP -	Componente principal
CV -	Coefficiente de variação
d -	Máxima distância de separação entre as amostras onde o semivariograma é definido
DMG -	Diâmetro médio geométrico
DMP -	Diâmetro médio ponderado
DP -	Desvio padrão
Ds -	Densidade do solo
EC -	Estoque de carbono
FCO ₂ -	Efluxo de CO ₂ do solo
FJ -	Feijão guandu
FN -	Floresta natural
g -	Aceleração da gravidade
GDE -	Grau de dependência espacial
h -	Distância de separação das amostras
INMET	Instituto nacional de meteorologia
Kc -	Coefficiente de curtose
KMO -	Estatística de Kaiser-Meyer-Olkin
Ks -	Coefficiente de assimetria
K-S -	Teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov
MaP -	Macroporosidade
MiP -	Microporosidade
MO -	Matéria orgânica do solo

m_s -	Massa de solo seco
m_{solo} -	Massa do solo
$m_{\text{solução}}$ -	Massa do fluido
$n(h)$ -	Número de pares de amostras separadas a uma distância h
PT -	Pastagem
r -	Raio de uma partícula
r	Coefficiente de correlação
R^2 -	Coefficiente de determinação
RP -	Resistência do solo à penetração
SQR -	Soma dos quadrados dos resíduos
TPA -	Terra Preta Arqueológica
t_q -	Tempo de queda
TS -	Temperatura do solo
Ug -	Umidade gravimétrica
US -	Umidade do solo
v -	Velocidade
V -	Volume
VTP -	Volume total dos poros
x_i -	Posição das amostras
$\hat{y}(h)$ -	Semivariância
$Z(x_i)$ -	Valor do atributo na posição x_i
α -	Alcance
η -	Viscosidade
λ_i -	Variância
ρ -	Densidade
ρ_{solo} -	Densidade do solo
$\rho_{\text{solução}}$ -	Densidade da solução

RESUMO

CUNHA, J.M. **Atributos do solo e emissão de CO₂ em ambientes de Terra Preta Arqueológica preservada e sob cultivo em Novo Aripuanã, Amazonas, Brasil.** Cuiabá, 2016, 80 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

As alterações na composição da vegetação de ecossistemas naturais, pelo uso e manejo do solo, podem trazer consequências negativas ao solo, favorecendo ao aparecimento de zonas suscetíveis à degradação física. Em adição, há a dificuldade de encontrar informações sobre os usos de Terra Preta Arqueológica em comparação a ambientes sob floresta, mais especificamente em avaliar possíveis alterações dos atributos físicos e do carbono orgânico, além das variações espaciais do efluxo de CO₂ do solo. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar os atributos físicos, o carbono orgânico e ao efluxo de CO₂ em áreas de Terra Preta Arqueológica com diferentes coberturas vegetais: feijão guandu (*Cajanus cajan*), pastagem (*Brachiaria brizanta*) e floresta natural, utilizando técnicas de estatística tradicional univariada e multivariada, além de geoestatística. Foram delimitadas malhas amostrais com espaçamentos regulares com 88 pontos amostrais por malha e georreferenciadas. Amostras de solos e anéis volumétricos foram coletadas nas camadas 0,0-0,05 m, 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m, para as determinações dos atributos físicos e do carbono orgânico do solo. As avaliações do efluxo de CO₂ foram mensuradas utilizando o sistema LI-6400 nos pontos amostrais e, concomitantemente foram mensuradas a temperatura do solo na camada de 0,0-0,10 m de profundidade, utilizando um termômetro de termistor portátil, e a umidade do solo, utilizando amostras de solo coletadas na camada de 0,0-0,10 m em latas de alumínio. Os resultados mostraram mudanças nos atributos do solo entre os ambientes, sendo as áreas sob feijão guandu e pastagem diferiram da área sob floresta, que apresentaram características da estabilidade dos agregados acima da média, assim como características estruturais, granulométrica e do carbono orgânico abaixo da média. O efluxo de CO₂ e a temperatura do solo foram menores sob floresta, com maior teor de umidade do solo. Não houve diferença estatística entre o efluxo de CO₂ e temperatura do solo sob o feijão guandu e pastagem, mas com menor teor de umidade do solo sob pastagem. Pela análise geoestatística, as propriedades do solo apresentaram mudanças de comportamento do padrão de variabilidade espacial aos ambientes avaliados, analisados em termos das componentes principais relacionados à estabilidade dos agregados (PC1) e às características estruturais, granulometria e do carbono orgânico (PC2). Por outro lado, foram observados mudanças nos padrões de variabilidade espacial dos atributos efluxo de CO₂, temperatura do solo e umidade do solo em comparação às áreas de estudo. Os modelos de ajuste do semivariograma experimental foram o esférico e o exponencial. Os mapas dos padrões de distribuição espacial indicam uma tendência de concentração entre os atributos avaliados.

Pavavras-chave: solos antrópicos; usos e manejo do solo; atributos físicos do solo; efluxo de CO₂.

ABSTRACT

CUNHA, J.M. **Soil attributes and soil CO₂ emissions in Archaeological Dark Earth environments preserved and under cultivation in Novo Aripuanã, Amazonas, Brazil.** Cuiabá, 2016, 80 f. Thesis (Doctorate in Environmental Physics); Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

Changes in the composition of the vegetation of natural ecosystems, the use and management of soil, can have negative consequences on the ground, favoring the emergence of areas susceptible to physical degradation. In addition, there is the difficulty of finding information on the uses of Archaeological Dark Earth compared to environments under forest, specifically to evaluate possible changes in physical attributes and organic carbon, in addition to spatial variations of soil CO₂ efflux. Thus, the aim of this study was to evaluate the physical properties, the organic carbon and the soil CO₂ efflux in areas of Archaeological Dark Earth with different cover vegetation: guandu bean (*Cajanus cajan*), pasture (*Brachiaria brizanta*) and in native forest, using techniques of traditional univariate and multivariate statistics and geostatistics. Were delimited meshes sampling with regular spacing with 88 sampling points per mesh, and georeferenced. Soil samples and volumetric cylinders were collected in the layers 0.0-0.05 m, 0.05-0.10 m and 0.10-0.20 m for determination of physical properties and soil organic carbon. Assessments of soil CO₂ efflux were performed using the LI-6400 systems in each sample point, and simultaneously were made measurements of soil temperature at 0-10 cm depth, using a thermometer portable thermistor, and soil moisture, using soil samples collected in the 0-10 cm layer. The results showed behavioral changes between environments with areas under guandu bean and pasture differ statistically with the area under forest, which showed stability aggregate characteristics above average, as well as structural characteristics, particle-size distribution and organic carbon below average. Soil CO₂ efflux and soil temperature were lower in forest, with higher soil moisture. There was no statistical difference between the soil CO₂ efflux and soil temperature under the guandu bean and pasture, but with lower soil moisture under pasture. By geostatistical analysis, soil properties showed standard behavioral changes of the spatial variability environments evaluated, analyzed in terms of the main components related to stability aggregate characteristics (PC1) and the structural characteristics, particle-size distribution and organic carbon (PC2). On the other hand, we observed changes in patterns of spatial variability of the soil CO₂ efflux, soil temperature and soil moisture attributes, compared with the study areas. The adjustment models of semivariogram were spherical and exponential. The maps of the spatial distribution patterns indicate a tendency of concentration of the evaluated attributes.

Keywords: anthropogenic soils; uses and soil management; physical attributes of the soil; CO₂ efflux.

1. INTRODUÇÃO

A região Sul do Amazonas ocupa uma área de aproximadamente 474.021,81 km², correspondendo um total de 30% do estado do Amazonas. Formada pelas microrregiões de Boca do Acre, Madeira e Purus, abrange os municípios de Boca do Acre, Pauini, Humaitá, Manicoré, Novo Aripuanã, Borba, Apuí, Lábrea, Canutama e Tapauá. Apresenta clima tropical com expressiva variabilidade espacial e temporal de chuvas, zona climática pertencente ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) segundo a classificação climática de Köppen, caracterizada pelo tipo AM (chuvas do tipo monção), com período seco de pequena duração e pluviosidade limitada pelas isoietas de 2200 e 2800 mm ao ano. Apresenta temperaturas médias anuais variando entre 25 a 27 °C e umidade relativa do ar variando entre 85 e 90%. A precipitação máxima ocorre entre os meses de outubro e março (período úmido) e o período seco ocorre de junho a agosto (BRASIL, 1978).

A região Sul do Amazonas abrange uma extensa área com grande diversidade de material geológico. Encontram-se solos de naturezas distintas, que conseqüentemente interferem nos padrões vegetacionais. Dentre as causas possíveis do aumento da diversidade geológica, encontra-se a atividade antrópica. O registro de atividades humanas sobre alguns aspectos ambientais é explícito na Amazônia desde os tempos pré-históricos, uma dessas manifestações é a presença de solos antrópicos conhecidos por Terra Preta Arqueológica (TPA).

As TPA são unidades de solo que apresentam como característica marcante a sua coloração escura e presença de fragmentos cerâmicos e/ou líticos, incorporados à matriz dos horizontes superficiais do solo (KAMPF & KERN, 2005; GLASER & BIRK, 2012); apresentam elevada fertilidade natural, resultante possivelmente da prolongada ocupação antrópica e da incorporação de carvão pirogênico (SANTOS et al., 2013). Solos com carbono pirogênico contêm elevada capacidade de troca catiônica, por apresentar em suas extremidades substâncias ácidas, principalmente do grupo carboxílico (GLASER et al., 2000), que por sua vez leva para uma maior sustentabilidade e estabilidade da matéria orgânica nesses solos.

Muitas dessas áreas são utilizadas em atividades voltadas para exploração da madeira ou produção de alimentos em substituição à floresta. No entanto, o solo preservado em seu estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características

físicas adequadas ao desenvolvimento das plantas (CALONEGO et al., 2012). Para Rozane et al.(2010), Viana et al. (2011) e Rossetti e Centurion (2015), o uso de práticas agrícolas inadequadas e de forma intensiva promovem alterações em suas propriedades originais. Por outro lado, a compreensão e a qualidade do uso e manejo do solo de forma correta são fundamentais para um bom desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis.

As TPA do Amazonas têm sido fortemente exploradas por variados tipos de atividades agrícolas, assim como também na pecuária. A intensidade do uso do solo e, conseqüentemente, as diminuições da sua cobertura vegetal natural podem levar à degradação. Entretanto, os processos de alterações dos ecossistemas florestais naturais, em relação à sua composição vegetal e associada ao uso do solo, trazem conseqüências tanto à biodiversidade quanto à possibilidade de reutilização e/ou conservação.

Além disso, um fator importante de qualidade do solo e de sustentabilidade ambiental é o processo de respiração do solo, pois o CO₂ da superfície do solo é produzido principalmente pelo sistema radicular das plantas e por processos de decomposição aeróbicos da matéria orgânica pelos microrganismos. O uso e manejo do solo promovem alterações nos padrões de variabilidade espacial do efluxo de CO₂ do solo entre os ambientes, além de influenciar na temperatura e umidade do solo, por esses manterem relações tanto com os atributos do solo como com os fatores ambientais (PANOSSO et al., 2008; 2009; SILVA, et al., 2016a).

O uso de práticas agrícolas tem efeito direto sobre a qualidade física do solo, além de expressivas interferências no conteúdo de matéria orgânica. Nesse sentido, a variabilidade espacial dos atributos do solo em ambientes naturais e transformados, torna-se importante para o entendimento dos processos de evolução da formação do solo e variações desses atributos nos diferentes sistemas de manejos.

De modo geral, a variabilidade espacial dos atributos do solo é resultado de processos pedogenéticos diversos, e pode ser demonstrada pelos levantamentos amostrais e sua análise, bem como do vegetal e produtividade das plantas (SOUZA et al., 2008). Com isso, a variabilidade espacial dos atributos do solo vem sendo objeto de estudo em recorrentes trabalhos em ciência do solo, abrindo diversas

discussões no que tange às relações de solo-paisagem (CASTIONE et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2015a; OLIVEIRA et al., 2015c).

É muito utilizada para uma melhor compreensão dos aspectos relacionados às características físicas e químicas do solo, além das inter-relações desses atributos, para uma melhor interpretação das correlações espaciais entre sistemas de uso e manejo dos solos (AQUINO et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2015a). Assim, o uso da análise geoestatística permite mostrar padrões de variabilidades espaciais dos atributos do solo e identificar quais atributos apresentam melhores correlações espaciais dentro de cada ambiente e, com isso, identificar zonas susceptíveis à degradação, ou possíveis mudanças atribuídas às atividades antrópicas.

Porém, na comparação entre os ambientes com relação aos conjuntos de variáveis que estejam influenciando diretamente no seu desenvolvimento, leva-se em consideração a aplicação da estatística clássica. Nesse sentido, o solo é considerado um sistema complexo, resultante da interação de fatores geológicos, topográficos e climáticos, entre outros, que juntos formam indicadores que o caracterizam (FREITAS et al., 2014). Uma das soluções propostas é o uso de ferramentas estatísticas tradicionais, como a análises univariadas e multivariadas, que possibilitam explicar as mudanças de comportamento atribuídas a valores médios dos atributos do solo, identificar máxima correlação entre as variáveis, além de apontar quais delas contribuem mais para a caracterização e/ou alteração do solo.

Ainda assim, são poucos os estudos preocupados em quantificar as alterações nas Terras Pretas Arqueológicas (TPA) naturais e transformadas na região Sul do Amazonas. Estas informações podem ser utilizadas na orientação de uso do solo e possivelmente apontar para os impactos das mudanças ocorridas nos ambientes de TPA natural e transformadas. Por outro lado, o uso dos solos sem a devida reposição de nutrientes, e ao mesmo tempo sem a adoção de práticas de manejo adequadas, poderá levar a perda da sua capacidade produtiva. Entretanto, para que se proponham práticas ou conjunto de práticas de manejo, é necessário antes de tudo conhecer os solos de TPA.

Acredita-se que as mudanças de cobertura das áreas de TPA ocorridas pela ocupação antrópica na Amazônia tem gerado uma série de impactos à sua biodiversidade, especificamente aos que estão relacionados à conservação do solo e à

devida recomposição da vegetação. É sabido que as TPA são grandes reservatórios de carbono orgânico, chegando a apresentar até seis vezes mais carbono orgânico estável que solos adjacentes (FALCÃO et al., 2009). Neste sentido, são poucas as informações sobre a dinâmica do carbono orgânico no solo em TPA naturais e transformadas. Os dados provenientes desta pesquisa podem proporcionar mecanismos para boas práticas de manejo do solo, além de servir de instrumento em Unidades de Conservação para a tomada de decisões.

Soma-se a isto que a emissões de CO₂ no solo são componentes importantes no ciclo global do carbono. A avaliação dos padrões espacial e temporal do efluxo de CO₂, em sistema de manejo de TPA e em áreas preservadas em seu estado natural, torna-se um instrumento importante no que diz respeito às incertezas na dinâmica dos sistemas atmosféricos. Medidas destes componentes ajudam a entender melhor o processo e viabilizam a implementação de modelos matemáticos em simulações computacionais.

Com isso, de modo a ajuizar se há ou não diferenças significativas nas TPA sob diferentes usos, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar os efeitos ou impactos do uso de solos, em condições amazônicas, sobre os atributos do solo e do efluxo de CO₂ em ambientes de Terra Preta Arqueológica preservada e sob cultivo de feijão guandu e pastagem.

No entanto, para alcançar esse objetivo, foram propostos os seguintes objetivos secundários: a) determinar e avaliar os atributos estruturais, granulométricos e estabilidade dos agregados do solo; b) quantificar os teores de carbono orgânico e o estoque de carbono nas áreas de TPA sob respectivos usos; c) medir e avaliar o efluxo de CO₂, temperatura e umidade do solo *in loco*; d) fazer uso dos atributos do solo, a fim de identificar variações em relação ao uso do solo, além do efluxo de CO₂, temperatura e umidade do solo, no que diz respeito ao mecanismo de uso e exploração de ambientes naturais e transformados; e) avaliar a variabilidade espacial para o conjunto dos atributos do solo, a fim de comparar certas correlações espaciais dos atributos do solo em ambientes preservados e transformados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ATRIBUTOS DO SOLO

A formação dos solos é proveniente da ação conjunta entre o clima e os organismos, que atuam sobre o material de origem, sendo disciplinado pelo relevo em uma escala de tempo. Em seu processo de formação, as rochas são transformadas em solos e, por sua vez, passam a constituir-se de camadas horizontais que diferem entre si pela cor, espessura, granulometria, conteúdo de matéria orgânica e de nutrientes. Dentre os principais constituintes dos solos, os materiais rochosos abrangem diversos tipos, tais como os magmáticos (granito, basalto, diabásio), metamórficos (gnaisse, quartzito e xistos), e os sedimentares (arenitos, argilitos e calcários) (COSTA LIMA & LIMA, 2007). Os minerais resultantes dos processos de intemperismo podem se apresentar em diversas formas, tamanhos, arranjos cristalinos e composição química. O conjunto de partículas de solo de vários tamanhos dão origem à granulometria do solo, assim como o arranjo destas formam a estrutura do solo (FERREIRA, 2010).

A textura do solo representa a distribuição quantitativa das partículas sólidas menores que 2,00 mm de espessura. Por ser um dos atributos do solo mais estáveis, é considerada de grande importância na descrição, identificação e classificação dos solos (FERREIRA, 2010). Assim, areia, silte e argila são as três frações texturais do solo. A Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SiBCS) adota os tamanhos dos grãos entre 2,0-0,05 mm, 0,05-0,002 mm e <0,002 mm, respectivamente, para cada uma dessas frações.

Os indicadores físicos de qualidade do solo assumem importância por estabelecer relações fundamentais com os processos hidrológicos, como a taxa de infiltração, escoamento superficial, drenagem e erosão (QUEIROZ et al., 2014; DRESCHER et al., 2016; SALES et al., 2016). A textura representa um importante indicador, pois sua alteração se verifica quando o processo de degradação do solo é a erosão, por esse remover seletivamente a argila, deixando frações mais grosseiras (MENEZES et al., 2010).

Há concordância de que o conteúdo de água no solo, a densidade, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade e a resistência do solo à penetração indicam o estado em que a estrutura do solo se encontra e servem como indicadores

do seu estado de estruturação (ANDRADE et al., 2009; ARATANI et al., 2009; SALES et al., 2016). Funcionalmente, uma estrutura do solo ideal oferece melhores condições para o desenvolvimento das plantas, espaço poroso suficiente e contínuo para o movimento de água e gases, e de baixa resistência do solo à penetração das raízes, de forma a não impedir o seu crescimento.

A densidade do solo reflete primeiramente o arranjo das partículas do solo, que define as características do sistema poroso (FERREIRA, 2010). Representa a relação entre a massa do solo seco em estufa (m_s) pelo volume total (V), expressa pela equação:

$$\rho = \frac{m_s}{V}, \quad (1)$$

sendo V , por sua vez, definida em termos do volume ocupado pelo ar e água no solo e o volume ocupado por partículas do solo.

Quanto maior a densidade do solo, tanto mais compactado é o solo, podendo restringir o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Por outro lado, a variação da porosidade do solo tem relação direta com a densidade do solo, que geralmente apresenta valores mais elevados com a profundidade do perfil, devido às pressões exercidas pelas camadas superiores sobre as subjacentes, que provocam sua compactação e redução da porosidade total. Corroborando também com essas variações, o manejo incorreto do solo, que pode provocar sua compactação e, conseqüentemente, alteração da estruturação do solo (CUNHA et al., 2011).

No entanto, a porosidade total é a fração do solo não preenchida por componentes orgânicos e inorgânicos. Em termos de caracterizar a distribuição dos poros por tamanhos, Schumacher (1960), citado por Kiehl (1979), classificou a porosidade total em duas categorias, os macroporos, com diâmetro maior que 0,05 mm e os microporos com diâmetro menor que 0,05 mm (RESENDE et al., 2002). Os macroporos representam os espaços do solo em que a água e o ar possuem livre movimentação, enquanto que os microporos são importantes no armazenamento e retenção de água no solo, o que favorece o crescimento e o desenvolvimento das plantas e raízes. A porosidade total do solo pode variar entre 30 a 60% em relação às frações texturais do solo, densidade do solo, agregados e do conteúdo de matéria orgânica (GIAROLA et al., 2007).

Outra propriedade físico-mecânica, que pode ser alterada pelo uso do solo, é a resistência do solo à penetração, que é determinada por penetrômetros. A resistência do solo à penetração é uma medida que tem por finalidade avaliar indiretamente o estado de melhores condições à permeabilidade das raízes das plantas, o que se opõem a solos compactados. Tem correlação direta com a densidade do solo e inversa com a macroporosidade e umidade do solo, por ter relações com os espaços porosos do solo e a lubrificação das partículas, respectivamente (SILVEIRA et al., 2010).

Em termos da estrutura do solo, o agrupamento de duas ou mais partículas com intensidade da força de atração que une essas partículas superior a da força entre as partículas adjacentes, é caracterizado pela formação de agregados. O uso dos solos, que incluam espécies com diferentes tipos de sistemas radiculares, influencia fortemente na estabilidade da estrutura do solo e, em particular, a proporção de agregados estáveis em água (PALMEIRA et al., 1999). A avaliação da estabilidade dos agregados por tamanho é importante na determinação dos espaços porosos do solo, sendo fundamental para o suprimento de água e nutrientes, assim como a resistência à erosão, mantendo um equilíbrio favorável ao desenvolvimento de plantas (FERREIRA, 2010). Os efeitos das plantas sobre a estabilidade dos agregados podem ser diretos ou indiretos, principalmente pela ação de proteção dos agregados superficiais, contribuição da matéria orgânica na superfície ou internamente ao solo, e ação do sistema radicular (BARCELOS et al., 1999).

A matéria orgânica do solo, por sua vez, é um dos componentes mais importantes do solo, pois tem influência direta e indireta na fertilidade e na produção das culturas, além de favorecer a estrutura dos solos, ou seja, atua em diversas propriedades físicas e químicas, como capacidade de troca de cátions, pH, densidade do solo, porosidade e estabilidade dos agregados (VIANA et al., 2011). O uso e manejo do solo de forma intensivo interferem nos componentes orgânicos do solo, tanto em sua qualidade como em quantidade, o que promove um desequilíbrio natural dos ecossistemas (CUNHA et al., 2011).

Entretanto, em solos de TPA, a estabilidade da matéria orgânica é devida à elevada contribuição dos carvões presentes nestes solos (MADARI et al., 2009; CUNHA et al., 2009). Assim, o incremento de matéria orgânica sobre a TPA, além

de sua maior estabilidade, tem sido associado à presença de carbono pirogênico oriundos da queima parcial de resíduos nesses solos. Cerca de 35 a 45% do carbono orgânico em solos de TPA encontram-se na forma pirogênica, o que os diferencia dos solos adjacentes, em que representam apenas 14% (GLASER et al., 2000). Apesar de inerte e pouco susceptível à decomposição, o carbono pirogênico pode sofrer degradação e transformação no solo, o que pode estar relacionado com o aumento da reatividade e da capacidade de troca de cátions dos solos de TPA (MADARI et al., 2009; CUNHA et al., 2009) que, por sua vez, garante sua sustentabilidade e fertilidade.

2.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SOLOS NO SUL DO AMAZONAS

Os solos do Sul do Amazonas, de modo geral, possuem baixa fertilidade natural e são imperfeitamente drenados, cuja característica é a ocorrência da Plintita (material constituída da mistura de argila, pobre em carbono orgânico e rica em ferro, ou ferro e alumínio, com grãos de quartzo e outros minerais) em todo o perfil, devido às flutuações do lençol freático. Assim, apresenta excesso de água durante um período do ano, em geral, na época de maior precipitação pluviométrica (BRASIL, 1978). A cobertura pedológica está desenvolvida sobre as rochas terciárias com destaque a Formação Solimões, constituída de sedimentos continentais areno-argilosos (VALE JÚNIOR et al., 2011). Parte dessa extensa região é coberta por campos de cerrado e floresta, com aproximadamente 560 mil hectares de campos não contínuos intervalados por floresta, distribuídos isoladamente entre os rios Purus e Madeira, mais precisamente entre os municípios de Humaitá, Lábrea e Canutama (MARTINS et al., 2006). Nesses campos têm predominância às gramíneas, com florestas circundantes formadas por florestas mesófilas baixas, florestas perinifólias altas, palmeiras, castanhais, entre outras (VIDOTTO et al., 2007). Existe também uma grande parte formada por matas de planície de inundação (mata de várzea) e matas de terra firme (VIDOTTO et al., 2007; CAMPOS et al., 2011). Frequentemente as variações desses solos refletem em grande parte as características do material de origem, influenciadas pelas condições bioclimáticas, pelo relevo, nível elevado do lençol freático, inundações periódicas e arraste de sedimentos pelas águas (CAMPOS et al., 2011).

As formas da vegetação indicam ambientes peculiares, com relação ao regime hídrico, à fertilidade natural e à aeração do solo (MARTINS et al., 2006; CAMPOS et al., 2012b). O conhecimento do solo-paisagem torna-se um importante instrumento para auxiliar no estudo do uso do solo, além de auxiliar o levantamento pedológico e a adoção de práticas de manejo que permitam incrementar o rendimento das culturas, a contínua sustentabilidade e a conservação dos ecossistemas (OLIVEIRA et al., 2015b).

As áreas de floresta nativa ainda ocupam, em sua maior parte, com tipologia de florestas tropicais densas, mas encontram-se outras de vegetação de campos e matas abertas denominadas de Campos Naturais (VIDOTTO et al., 2007). Mesmo assim, devido à necessidade social e econômica da região, existe ambientes para fins agropecuários, com áreas cultivadas com cana-de-açúcar, mandioca, pastagem braquiária, além de ambientes agroflorestais, cultivadas com café, cacau, palmeiras, andiroba, laranjeiras, entre outras (OLIVEIRA et al., 2015b).

Dos solos do Amazonas, os Latossolos e os Argissolos apresentam predominância, compreendendo com a classe em 26% e 45% da área, respectivamente. Gleissolos Háplicos e Neossolos Flúvicos predominam nas planícies de inundações, com 9% dos solos do Amazonas, sendo em sua quase totalidade férteis quimicamente quando ocorrem nas margens dos rios (Solimões, Madeira, Purus, Juruá, dentre outras) (MAIA, 2010). Para o mesmo autor, os Plintossolos, com 3,5%, são os solos predominantes nos campos e cerrados do sul do Amazonas, principalmente nos municípios de Humaitá, Lábrea e Canutama.

Entretanto, foi constatado em pedoambientes de campos e florestas, precisamente na região de Humaitá, Amazonas, a formação de três grupos de classes de solos: o Cambissolos, o Gleissolos e o Argissolos (CAMPOS et al., 2012a). Para esses autores, a área sob floresta foi encontrada a ordem dos Argissolos, localizados em pontos mais altos e de melhor drenagem. Cambissolos foi encontrada em ambiente de campo alto (situado no platô rebaixado da paisagem) e em zona de ecótono (caracterizado entre dois ambientes campo/floresta), já em campo baixos (áreas inundadas durante as chuvas), foram encontrados os Gleissolos.

Os solos no Amazonas são predominantemente pobres em nutrientes (LIMA et al., 2006), com áreas de solos agricultáveis no sul do Estado do Amazonas de reação

ácida, baixa capacidade de troca catiônica, além de baixa fertilidade (CUNHA et al., 2007). Pesquisas têm confirmado que a capacidade de troca catiônica, a complexa formação, a agregação de partículas do solo e as trocas gasosas dependem da superfície das cargas e da matéria orgânica (ZECH et al., 1997; JUO & FRANZLUEBBERS, 2003). Nestes ambientes, os minerais de argilas predominantes são do tipo 1:1 de caulinita e óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos de Fe e Al, com pouca estrutura de carga (CUNHA et al., 2009).

Na Amazônia, grande parte dos elementos minerais está armazenada na biomassa florestal, e o clima tropical úmido promove condições ideais de fornecimento de nutrientes, oriundas da decomposição do *litter*, favorecendo a manutenção da floresta. Nesse sentido, a matéria orgânica é considerada o principal componente para a capacidade de troca catiônica em solos tropicais (ZECH et al., 1997), tendo importante papel na proteção do solo para evitar a remoção de nutrientes e seu respectivo esgotamento.

Em meio a essa diversidade de pedoambientes, há solos que se caracterizam pela coloração escura e a presença de fragmentos cerâmicos e/ou líticos e artefatos indígenas incorporados à matriz dos horizontes superficiais do solo (KAMPF & KERN, 2005). São denominados de Terra Preta Arqueológica e presentes em forma de manchas em todo território amazônico, na maioria das vezes situados às margens dos rios Purus, Madeira, Juruá, Solimões e Amazonas (KERN et al., 2003), com cerca de 80% dessas áreas contidas entre dois a cinco hectares.

Nestas áreas, a espessura do horizonte antrópico varia de 10 a 200 cm, com a maioria situando-se na faixa de 30 a 60 cm (PESSOA JUNIOR et al., 2012). Estes solos apresentam grande concentração de carbono orgânico estável, elevados teores de fósforo, cálcio e magnésio, além de intensa atividade biológica (GLASER, 2007). As formações desses solos estão, em sua grande maioria, sobre as classes dos Latossolos e Argissolos, com áreas bem drenadas e de textura variando de média a muito argilosa e arenosa/média a argilosa/muito argilosa (PESSOA JUNIOR et al., 2012).

2.3. ATRIBUTOS DO SOLO DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA

Atualmente, tem-se aceitado a tese de que a formação das TPA é consequência das atividades humanas em assentamentos pré-colombianos, com depósitos de

resíduos animais (restos de ossos, carapaças de tartaruga, conchas, etc), além de componentes vegetais (NEVES et al., 2003), o que contribuiu para a formação de solos com elevados teores de matéria orgânica estável de origem pirogênica e de elevados teores de nutrientes, em relação a solos adjacentes ou de outras regiões.

O carbono orgânico em TPA é seis vezes mais estável que o dos grupos Latossolos (matéria orgânica derivada apenas de cobertura vegetal), com Ca, Mg e K trocável apresentando correlação positiva com a matéria orgânica, indicando a presença de complexos organo-metálicos nos húmus (PABST, 1992), responsáveis por mecanismos de transporte de cátions dentro do solo. Localizam-se em terra firme, em áreas bem drenadas, na maioria das vezes situada às margens dos rios Purus, Madeira, Juruá, Solimões e Amazonas, e quase sempre em posição topográfica que permite uma boa visibilidade da área (KERN et al., 2003).

Em seu processo de formação, os solos passam a constituir-se de camadas verticais que diferem entre si por alguma característica morfológica, resultante dos processos pedogenéticos e que guardam relações entre si. Os sítos de TPA, entretanto, podem pertencer a várias classes de solos. Mesmo assim, essa classificação é pouco eficiente no agrupamento e distinção dos diversos tipos de solos antrópicos antigos (KÄMPF et al., 2009).

Os solos de TPA apresentam características físicas e químicas distintas, principalmente em relação aos horizontes superficiais (horizontes A), cujos contrastes podem estar relacionados aos limites da área de atividade de ocupação humana pré-histórica (PESSOA JUNIOR et al., 2012). Normalmente apresenta fração areia em maior percentual, com grande variação entre os sítos, o que torna complexa a comparação de valores e a caracterização como uma classe de solo (TEIXEIRA et al., 2009). No Sul do Amazonas, solos de TPA apresentaram textura variando entre franca, franco-arenosa, franco-siltosa e franco-argilosa, enquanto nos horizontes diagnósticos subsuperficiais, as texturas foram classificadas como franco-siltosa, franca, argilosa e muito argilosa (SANTOS et al., 2013), com horizontes antrópicos variando entre 27 a 50 cm de espessura.

Em termos de estrutura do solo, as TPA apresentam excelentes propriedades físicas, com densidade do solo relativamente baixa comparada aos solos adjacentes (SANTOS et al., 2013), mas, melhor correlacionada com a distribuição

granulométrica das partículas do solo do que com os teores de matéria orgânica (TEIXEIRA et al., 2009). Estudos sobre caracterização do solo em sete sítios arqueológicos no Sul do Amazonas (SANTOS et al., 2013) indicam ser notável a diferença, sob o horizonte antrópico, dos valores da densidade do solo em relação ao teor de areia, com valores variando de $0,7 \text{ g cm}^{-3}$ em Argissolo Amarelo eutrófico típico a $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ em Neossolo Litólico distrófico típico.

Em relação aos atributos químicos do solo, entre os aspectos que mais distinguem as TPA aos solos adjacentes, destacam-se baixa acidez e baixos teores de Al^{3+} , além de teores elevados de alguns elementos como cálcio (Ca) e magnésio (Mg), e em teores ainda mais elevados de fósforo (P) (LIMA et al., 2009). Campos et al. (2012b), comparando características químicas de TPA com solos não antropogênicos, no Sul do Amazonas, observaram valores elevados de pH, que foram justificados por elevados teores de Ca e Mg e baixos teores de Al^{3+} . Concomitantemente foram verificados baixos valores de K e elevados valores de P, em comparação aos solos não antrópicos. Pesquisas mais recentes desenvolvidas no Amazonas também confirmam essas características (CUNHA et al., 2009; SILVA et al., 2011; SILVA et al., 2012a; SANTOS et al., 2013).

Estes ambientes com alta fertilidade natural apresentam sustentabilidade agrícola mesmo sob as condições climáticas de uma floresta tropical úmida (KERN et al., 2003; CAMPOS et al., 2012b), que é atribuída ao elevado nível de matéria orgânica e suas propriedades físico-químicas, como a reatividade das frações húmicas (CUNHA et al., 2007; CUNHA et al., 2009; SILVA et al., 2011). A matéria orgânica do solo é considerada o principal componente para a capacidade de troca catiônica, podendo contribuir para até 80% das cargas negativas do solo (MADARI et al., 2009).

Estes solos são, portanto, muito utilizados para o cultivo de subsistência, com os usos sob mandioca, banana, milho, mamão, dentre outras, resultando em alta produtividade e muitas vezes sem o uso de fertilizantes minerais. Esta elevada fertilidade, entre outras peculiaridades, tem atraído atenção de grupos de pesquisas interessados em melhor compreensão das formações das substâncias húmicas, de forma a desenvolver métodos de uso sustentável do solo de TPA, além de reproduzir condições similares de fertilidades em solos adjacentes (SOMBROEK et al., 2009).

2.4. EFLUXO DE CO₂ DO SOLO

O efluxo de CO₂ do solo é a componente do balanço de CO₂ no ecossistema que representa o processo físico de fluxo de gás para fora do solo. O gás carbônico emitido pela superfície do solo é produzido por processos biológicos, tais como os processos de decomposição aeróbicos da matéria orgânica e a respiração do sistema radicular de plantas e microrganismos (RAICH & SCHLESINGER, 1992). Os ecossistemas interagem biologicamente pela fixação do carbono por fotossíntese na vegetação, e liberação pela respiração autotrófica e heterotrófica.

No entanto, existe a necessidade de se entender os fatores que contribuem para o efluxo de CO₂. A intensidade das variações climáticas, como a umidade e a temperatura exerce forte influência na troca de CO₂ entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera (RAICH & SCHLESINGER, 1992). Na Amazônia, 84% da troca de CO₂ no ecossistema terrestre pode estar associado ao solo, cujas maiores contribuições provêm de florestas tropicais e subtropicais (MEIR et al., 1996; RAICH et al., 2002).

A taxa de transferência de CO₂ para a atmosfera, governada pela equação de difusão, é influenciada, além da quantidade de serrapilheira sobre o solo e do teor de matéria orgânica (SCHWENDENMANN et al., 2003), por diversos outros fatores, em particular pela temperatura e pela umidade do solo, atributos com grande variabilidade temporal e espacial (PANOSSO et al., 2008), mas que também podem ser controlados pelas propriedades físicas do solo.

A respiração do solo é um dos efluxos de carbono mais importante em ecossistemas e tem grande contribuição para o balanço global do carbono (RAICH & SCHLESINGER, 1992; DIXON et al., 1994). Com isso, muitos esforços vêm sendo dedicados para a obtenção de melhores estimativas de efluxo de CO₂, a fim de melhorar a compreensão das interações entre as variáveis ambientais e respiração do solo, tudo isso como resultado da crescente preocupação sobre as alterações climáticas, bem como a importância cada vez maior para o reconhecimento do papel dos solos como potenciais reservatórios de carbono (ALMAGRO et al., 2009).

É importante compreender que os fatores ambientais controlam a respiração do solo, e como esses fatores afetam as emissões de CO₂ do solo, especialmente em ecossistemas amazônicos, em que tem registrado diversas alterações ambientais devido à substituição de áreas florestais por atividades voltadas para a agricultura

(SATHLER et al., 2015). As atividades agrícolas influenciam no efluxo do CO₂ do solo para a atmosfera, porque o uso e manejo de forma adequada favorecem no ganho de matéria orgânica, o que incluem no aumento da agregação do solo e de sua biodiversidade, além da redução das perdas de solo por escoamento superficial e erosão (LAL, 2009).

A variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo tem sido objeto de estudo em diversos trabalhos (OLIVEIRA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2015a; OLIVEIRA et al., 2015d; AQUINO et al., 2015). Por outro lado, estudos da emissão de CO₂ do solo têm mostrado um padrão de variabilidade espacial, cujo principal fator determinante desse padrão é a umidade do solo (TANG et al., 2006; ZHOU et al., 2006; MARIKO et al., 2007; KOSUGI et al., 2007; ALMAGRO et al., 2009; PANOSSO et al., 2009).

Os padrões de variabilidades espaciais da emissão de CO₂ dentro de uma mesma malha são de difícil explicação, porque a variabilidade em pequena escala requer um grande número de medições espacialmente distribuídas (HERBST et al., 2008; RODEGHIERO & CESCATTI, 2008). Para a temperatura do solo, a variabilidade tanto espacial quanto temporal é pequena. A justificativa para isso é a presença de grande volume de vegetação nativa ou mesmo da grande biomassa na superfície proporcionada por práticas agrícolas (SILVA et al., 2015).

A variabilidade espacial das propriedades do solo ocorre naturalmente devido a fatores pedogênicos diversos que, conseqüentemente, podem exibir variações de macro, meso e microescalas, devido ao uso e manejo dos solos (PANOSSO et al., 2008). Em ambientes agricultáveis, há a necessidade de estudos relacionados à respiração do solo em comparação ao uso e manejo do solo, para um melhor entendimento dos padrões espaciais desses atributos. Ambientes de Terra Preta Arqueológica podem se apresentar como áreas muito mais propícias às altas taxas de emissão de CO₂ que solos não antropogênicos, devido às diferentes características físicas e químicas (OLIVEIRA et al., 2015b). Desses ambientes, existem poucos estudos relacionados à variabilidade espacial da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo sob floresta e áreas agricultáveis.

2.5. ESTATÍSTICA E GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIA DO SOLO

O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo, com a elaboração e análise de mapas, é essencial para dar um diagnóstico em relação à qualidade física e química do solo, de modo a identificar zonas de degradação ambiental, contribuindo assim para um manejo sustentável do solo e minimizar os impactos ambientais. Isso permite um melhor entendimento das relações entre atributos do solo e os fatores ambientais, além de ajudar a determinar práticas de manejo específicas para determinadas culturas (CRUZ et al., 2010).

A análise de diversas situações ambientais permite caracterizar o ambiente de forma diretamente voltada para a utilização racional do solo, o que vem a dar auxílio na tomada de decisões relativas à aplicação de insumos em ambientes agricultáveis e, assim, minimizar os custos da produção agrícola e possibilitar melhores condições para a capacidade produtiva em toda sua extensão.

Ao invés de assumir uniformidade entre as amostras dentro de uma mesma malha amostral, a análise geoestatística avalia as correlações espaciais entre as observações vizinhas, uma vez que as propriedades dos solos variam de local para local dentro de uma mesma área (BICALHO et al., 2014; AQUINO et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015d). Quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização expresso pela dependência espacial, devem-se adotar procedimentos estatísticos que levem em conta essa continuidade (VIEIRA, 2000).

2.5.1. Geoestatística

A geoestatística é o ramo da estatística aplicada que desenvolve modelos como representação dos atributos em função das distâncias espaciais dos pontos de amostragem. Assumida a hipótese intrínseca, ou seja, que a esperança estatística das variáveis regionalizadas para qualquer posição no espaço e a uma determinada distância h é sempre uma constante, e que a esperança do quadrado da diferença entre os valores dos pontos no espaço separado por uma distância h é a própria função variograma definido por $2\gamma(h)$, que é a medida do comportamento da variável regionalizada, a semivariância pode ser expressa pela seguinte expressão:

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

Se considerarmos $n(h)$ pares de valores separados a uma distância h , a semivariância média, a uma distância h , passa a ser definida por:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

sendo $Z(x_i)$ o valor do atributo Z na posição x_i ; e $Z(x_i + h)$ o valor do atributo Z separado por uma distância h da posição x_i .

A função semivariância é uma medida da variância das diferenças nos valores da variável regionalizada entre pontos separados por uma distância h . Pontos mais próximos, por estarem correlacionados, terão essa variância pequena, aumentando à medida que os pontos se distanciem (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). O semivariograma é o gráfico gerado pela função semivariância que representa a variabilidade espacial em função da distância numa determinada direção (**Figura 1**).

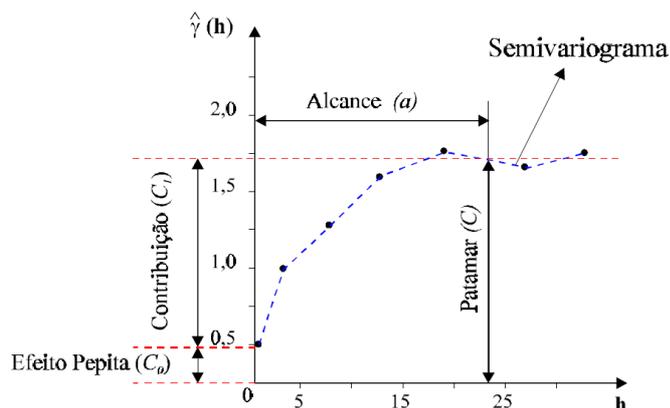


Figura 1. Semivariograma teórico e seus componentes.
Fonte: CAMARGO (1996).

Calculado o semivariograma para um determinado atributo com o uso da **Eq. 3**, podemos definir alguns parâmetros de análises gerados a partir de modelos ajustados:

Amplitude (a): conhecida também com o alcance ou “*range*”, é à distância de máxima correlação espacial entre as amostras coletadas em pontos espacialmente distribuídas, ou seja, a partir da qual as amostras passam a ser independentes. A semivariância cresce em função de h até um determinado ponto onde não se observa mais a continuidade espacial (VIEIRA, 2000).

Patamar ($C+C_0$): também chamada de “*sill*”, é o valor no qual o semivariograma estabiliza-se. Isso se deve ao fato que, a partir desse ponto, as amostras tornam-se independentes devido à grande distância de separação entre elas.

Efeito Pepita (C_0): é o valor da função semivariograma para distância zero, ou seja, amostras coletadas no mesmo ponto. Geralmente é atribuída a erros de amostragem e/ou de análise. Reflete a variabilidade dos dados não explicada em função da distância de amostragem utilizada (CAVALCANTE et al., 2007).

Para amostras coletadas a distâncias maiores que o alcance (a), tem-se distribuição espacial aleatória e, por isso, independentes entre si. Nesse caso, o uso da estatística clássica deve ser aplicado. Por outro lado, amostras coletadas por distâncias inferiores que a , são correlacionadas umas com as outras, o que permite a aplicação da geoestatística na estimativa de valores por interpolações para espaçamentos menores do que os amostrados (VIEIRA, 2000).

Quando o semivariograma é idêntico para qualquer direção de h , ele é chamado de isotrópico. Por outro lado, quando há um comportamento anisotrópico dos atributos, ou seja, o semivariograma apresenta uma variabilidade que não é a mesma em todas as direções devido a alguma característica do ambiente, que para solos podem ser o relevo, o material de origem, escoamento superficial, entre outros (VIEIRA, 2000).

Para amostras coletadas em intervalos regulares de distância de separação h , a análise pode seguir uma anisotropia nas direções usuais, como 0° , 45° , 90° e 135° (**Figura 2**).

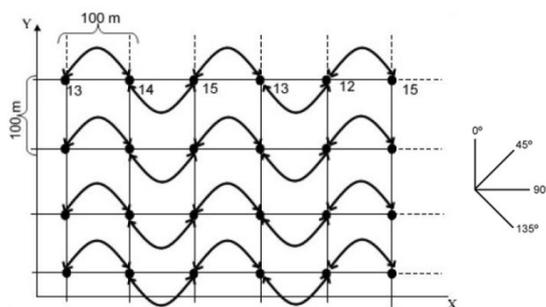


Figura 2. Representação de uma grade amostral para as direções usualmente adotadas.
Fonte: Adaptado de CAMARGO (1996).

Assim, assumindo distâncias de separação de 100 m na direção de 90° , o cálculo do semivariância (**Eq. 3**) é repetido para todos os pares dos pontos em intervalos consecutivos a uma distância $h = 100$ m, num total de 20 pares ($n(h) = 20$), como representado na **Figura 2**. Para $h = 200$ m, o procedimento será o mesmo, mas para um número de pares total reduzido de $n(h) = 16$. O procedimento se repete até que algum ponto de parada desejado seja alcançado (CAMARGO, 1996). Assim,

teremos, para cada distância h , os respectivos valores da semivariância: $\gamma(90^\circ, 100 \text{ m})$, $\gamma(90^\circ, 200 \text{ m})$, $\gamma(90^\circ, 300 \text{ m})$,..., $\gamma(90^\circ, h)$.

A partir do gráfico gerado pelo semivariograma experimental dos valores da semivariância definida, o objetivo é estimar um modelo para o ajuste do semivariograma experimental, de tal forma que possa melhor representar a tendência da semivariância em função da distância h . Desse modo, as estimativas obtidas pela krigagem, que é um método de interpolação dos valores gerados a partir dos modelos estimados pelo semivariograma, serão mais confiáveis (CAMARGO, 1996), para o caso em que se deseja estimar valores em pontos não amostrados. O termo krigagem é derivado do nome Daniel G. Krige, que foi o pioneiro a introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas de mineração (Delfiner & Delhomme, 1975).

O ajuste dos modelos de semivariogramas pode ser realizado, de acordo com as características das variáveis analisadas, as quais apresentam variabilidade específica. Para o presente estudo, os modelos matemáticos utilizados são descritos a seguir:

a) **Modelo Esférico:** um dos modelos mais comuns é representado pela **Eq. 4:**

$$\begin{aligned} \hat{y}(h) &= C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], \text{ se } 0 < h < a \\ &= C_0 + C_1, \quad \text{se } h \geq a \end{aligned} \quad (4)$$

b) **Modelo exponencial:** caracteriza-se por atingir o patamar assintoticamente, com alcance definido com a distância cujo valor é 95 % do patamar (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). É definida pela **Eq. 5:**

$$\hat{y}(h) = C_0 + C_1 = \left[1 - \exp \left(-3 \frac{h}{a} \right) \right], 0 < h < d \quad (5)$$

O modelo gerado pelo semivariograma será o de referência para a geração de mapas pela interpolação de krigagem (VIEIRA, 2000). A diferença entre krigagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. Assim, em krigagem, o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, mas que atribui os pesos a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece estimativa não tendenciosa e com variância mínima (CAMARGO, 1996).

Na krigagem ordinária se considera uma superfície sobre a qual é observada alguma propriedade Z em n pontos distintos. Um conjunto de valores $\{Z(x_i), i=1, \dots, n\}$, onde x_i , identifica uma posição em duas dimensões representada pelos pares de coordenadas (x_i, y_i) . Assim, o valor estimado da propriedade $Z(x_0)$ em algum ponto x_0 do plano é devido à combinação linear dos n valores observados (JOURNEL, 1988, apud CAMARGO, 1996):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \quad (6)$$

com $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, que minimizando os erros ($Var[Z_{x_i} - Z^*_{x_i}]$), os pesos de λ_i são obtidos das seguintes condições:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i, x_j) - \alpha = C(x_i, x_0), \text{ para } i=1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \quad (8)$$

em que $C(x_i, x_j)$ e $C(x_i, x_0)$ são as semivariâncias entre os pontos (x_i, x_j) e (x_i, x_0) , respectivamente, e α é o multiplicador de Lagrange necessário para a minimização da variância do erro.

A krigagem ordinária é um interpolador exato de forma que, quando definidos pelo semivariograma experimental, os valores irão coincidir com os dos pontos amostrais (CAMARGO, 1996).

2.5.2. Estatística univariada e multivariada

Microvariações do terreno podem promover variações geoespaciais dos atributos do solo (AQUINO et al., 2015) e, desse modo, a adição de técnicas estatísticas são necessárias, pois a maioria dos solos pode mudar tanto espacialmente, quanto também ao longo do tempo (SOUZA et al., 2006).

Neste sentido, o uso de técnicas de análise univariada e multivariada pode explicar tanto relações dos atributos do solo em comparação aos ambientes, como também as intercorrelações entre as variáveis, e identificar quais os atributos do solo que mais discriminam os ambientes. Na análise simultânea de muitas variáveis, a estatística multivariada é uma ferramenta eficiente (AQUINO et al., 2016), que pode auxiliar na tomada de decisão sobre o uso e manejo adequado do solo, com base nas variações dos atributos do solo, e indicar os atributos que mais sofrem mudança pela

ação antrópica, além de servir de base para o planejamento agrícola, visando sustentabilidade ambiental (OLIVEIRA et al., 2015b; AQUINO et al., 2016).

A Análise de Variância Univariada (ANOVA) é uma técnica estatística de comparação de médias de populações amostrais, que, fundamentalmente, verificar se as médias e os fatores exercem influência em alguma variável dependente. A hipótese a ser testada (H_0 de igualdade das médias, ou seja, $\mu_1=\mu_2=\mu_3=\dots\mu_n$), para esse caso, é se existe diferença significativa entre as médias dos atributos avaliados em comparação aos ambientes (fatores). Os pressupostos para a ANOVA simples levam em conta que os dados deverão construir amostras aleatórias provenientes de populações normais e que essas amostras pertencem a grupos populacionais com idênticas variâncias (REIS, 2001).

Quando o objetivo é a comparação entre os ambientes para diferentes variáveis simultaneamente, uma opção é o uso de análise de variância multivariada (MANOVA). De modo geral, as técnicas de estatísticas multivariadas são usadas para simplificação dos dados por meio da redução de sua dimensão, agrupamentos dos dados, estudo da dependência entre os dados e a construção de testes de hipóteses. Para isso, existem as técnicas de análise fatorial e de componentes principais.

A análise fatorial inclui um conjunto de técnicas estatísticas cujo objetivo é representar ou descrever um número de variáveis iniciais a partir de um menor número de variáveis hipotéticas, os fatores (REIS, 2001). É uma técnica de análise exploratória de dados que tem por objetivo descobrir e analisar a estrutura de um conjunto de variáveis inter-relacionadas, de modo a construir uma escala de medida para fatores (intrínsecos) que, de alguma forma (mais ou menos explícita), controla as variáveis originais (MAROCO, 2007).

Já a análise de componentes principais (ACP) é um método estatístico multivariado que permite transformar um conjunto de variáveis inicialmente correlacionados entre si, em outros conjuntos de variáveis não correlacionadas (ortogonais), chamadas de componentes principais, resultando em combinações lineares do conjunto inicial (REIS, 2001).

Assim, as componentes principais (CP) são expressas como combinações lineares das variáveis originais (MANLY, 2008), ou seja:

$$\begin{aligned}
CP_1 &= a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \dots + a_{p1}X_p \\
CP_2 &= a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{p2}X_p \\
&\vdots \\
CP_p &= a_{1p}X_1 + a_{2p}X_2 + \dots + a_{pp}X_p
\end{aligned} \tag{9}$$

A transformação dos valores X para CP é ortogonal, de tal forma que é simplesmente a sua matriz inversa:

$$\begin{aligned}
X_1 &= a_{11}CP_1 + a_{21}CP_2 + \dots + a_{p1}CP_p \\
X_2 &= a_{12}CP_1 + a_{22}CP_2 + \dots + a_{p2}CP_p \\
&\vdots \\
X_p &= a_{1p}CP_1 + a_{2p}CP_2 + \dots + a_{pp}CP_p
\end{aligned} \tag{10}$$

No planejamento da análise fatorial, é comum o uso dos componentes principais como uma técnica de extração dos fatores comuns (*FC*). Para a análise fatorial, somente m das componentes principais (*CP*) são retidas, dependendo do poder de explicação das *CP* em relação à variância dos dados, e assim a última equação se torna:

$$\begin{aligned}
X_1 &= a_{11}CP_1 + a_{21}CP_2 + \dots + a_{m1}CP_m + e_1 \\
X_2 &= a_{12}CP_1 + a_{22}CP_2 + \dots + a_{m2}CP_m + e_2 \\
&\vdots \\
X_m &= a_{1p}CP_1 + a_{2p}CP_2 + \dots + a_{mp}CP_m + e_p
\end{aligned} \tag{11}$$

em que e_i é uma combinação linear dos componentes principais CP_{m+1} a CP_p e representa a parcela das variáveis com reduzidas contribuições às *CP*. Como a análise fatorial requer a variância unitária dos seus fatores, é feita a padronização dos *CP* a partir da divisão pelo respectivo desvio padrão, ou seja, $FC_i = CP_i/\sqrt{\lambda_i}$, em que $\sqrt{\lambda_j}$ é a raiz quadrada dos correspondentes autovalores na matriz de correlações. Assim o modelo dos fatores não rotacionados extraídos a partir dos componentes principais se torna:

$$\begin{aligned}
X_1 &= b_{11}FC_1 + b_{21}FC_2 + \dots + b_{m1}FC_m + e_1 \\
X_2 &= b_{12}FC_1 + b_{22}FC_2 + \dots + b_{m2}FC_m + e_2 \\
&\vdots \\
X_m &= b_{1p}FC_1 + b_{2p}FC_2 + \dots + b_{mp}FC_m + e_p
\end{aligned} \tag{12}$$

com $b_{ij} = \sqrt{\lambda_j}a_{ij}$.

Na análise fatorial, há presença de erro, ao qual representa uma parcela da variância das variáveis não explicadas pelos valores comuns (REIS, 2001). Assim, se alguma das variáveis apresentarem uma combinação linear dos fatores, com

autovalores (valores comuns) próximos de zero, sua contribuição para explicar a variância dos dados será pequena, de tal forma que a retirada dessas componentes não implica em perda significativa de informação. Entretanto, existem alguns critérios para a determinação de quantos componentes devem ser excluídos da análise:

- a) Inclusão de componentes principais suficientes que expliquem mais de 70% da variância;
- b) Excluir autovalores (fatores comuns) cujos valores são inferiores a 1 (critério de Kaiser (1958));
- c) Teste da esfericidade de Bartlett: avalia o grau de adequação dos dados que consiste em testar se, na população dos dados, a matriz avaliada representa a matriz identidade (hipótese nula), ou seja, não existe correlação significativa entre as variáveis. Nesse caso, a análise pressupõe a rejeição da hipótese nula.
- d) Estatística de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO): compara o coeficiente de correlação entre as variáveis com a correlação parcial das mesmas variáveis estimadas pelos fatores. Quanto maior melhor, tendo com 0,50 o patamar mínimo.

Como resumo, a aplicação da análise fatorial corresponde a quatro passos (REIS, 2001), a saber:

1. Estimar a matriz de covariância entre as variáveis e testar a aplicabilidade da análise (Teste de Bartlett significativo com $p < 0,05$ e $KMO > 0,50$);
2. Extração das componentes principais e satisfação do critério de Kaiser;
3. Tornar os componentes mais facilmente interpretáveis, o que requer rotacionar os valores (escores) das variáveis;
4. Análises da matriz dos escores individuais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ÁREAS DE ESTUDO

O estudo foi realizado no município de Novo Aripuanã, Amazonas, Brasil, entre agosto de 2014 a julho de 2016, situado ao longo da rodovia Transamazônica, BR-230, com coordenadas geográficas 07°51'30" S e 61°18'01" W (**Figura3**). O clima da região é Tropical Chuvoso, apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade média parcial varia entre 2250 e 2750 mm ao ano, com período chuvoso entre outubro e junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25 e 27°C e a umidade relativa do ar entre 85 e 90% (BRASIL, 1978).

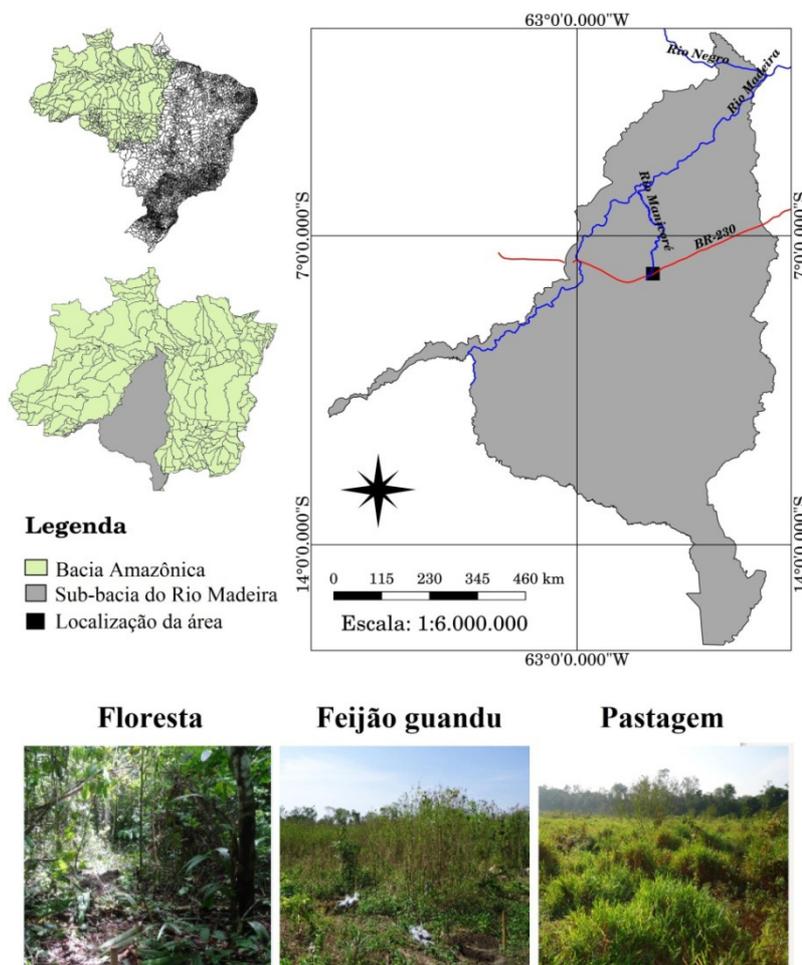


Figura 3. Localizações dos ambientes de Terra Preta Arqueológica sob os respectivos usos em Novo Aripuanã, Amazonas.

A região apresenta relevo marcado pela presença de platôs nas partes mais elevadas e por planície nas partes mais baixas, que tem como principais características a presença de uma superfície pediplanada, localmente interrompida por colinas de topo plano (CPRM, 2001).

O estudo incluiu três áreas de Terra Preta Arqueológica, a primeira é um fragmento florestal (FN) que vem sendo preservada a mais de vinte e cinco anos, com árvores secundárias de porte entre quinze e vinte metros de altura; a segunda encontra-se sob o cultivo de feijão guandu (*Cajanus cajan*) (FJ) com espaçamento de 1,0 x 0,8 m, estando coberto com várias plantas trepadeiras nativas; e uma terceira com brachiaria (*Brachiaria brizanta*) (PT), sendo que as áreas de TPA sob cultivo de feijão guandu e pastagem abrigaram nos últimos 25 anos os cultivos milho, feijão e melancia.

Nas **Tabelas 17 e 18** (no apêndice A) são apresentados os atributos físicos e químicos do solo classificado como Latossolo Amarelo Eutrófico argissólico, segundo a SiBCS (EMBRAPA, 2013).

Em cada uma das três áreas foi delimitada uma malha amostral. Duas com 88 pontos de coleta de material por malha, e uma, a área do feijão guandu, com 90 pontos de coleta. As dimensões das malhas foram de 2500 m² para a FN (**Figura4A**), 1700 m² para o FJ (**Figura4B**) e 4800 m² para a PT (**Figura4C**), com espaçamentos regulares entre os pontos de coleta do solo de 6 x 6 m, de 4 x 5 m e de 8 x 8 m, respectivamente. A escolha das dimensões das malhas foi definida no campo, conforme avaliada as dimensões da área de TPA e a respectiva cobertura representativa do solo. Os pontos de coleta do solo e da leitura do efluxo do CO₂, temperatura e umidade do solo foram georreferenciados com um equipamento de GPS.

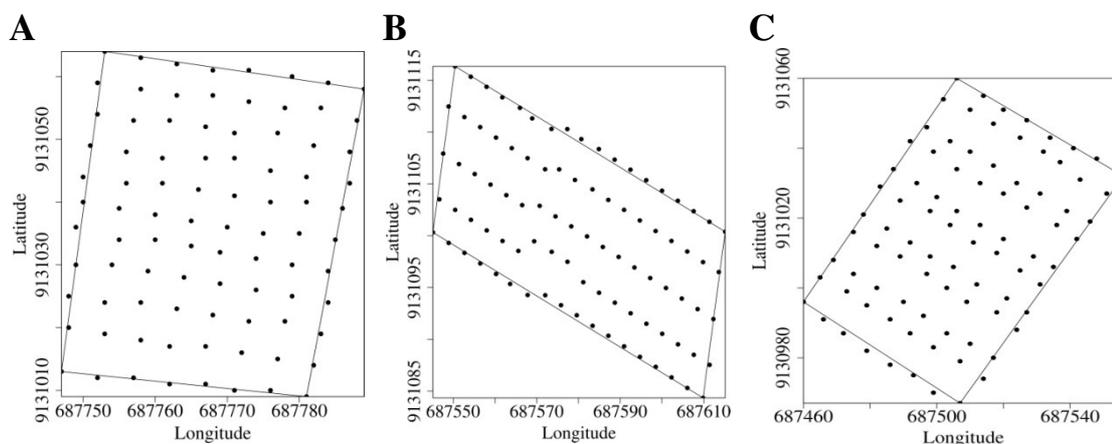


Figura 4. Representação das malhas amostrais e pontos de coleta nas áreas de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas. **A:** Floresta; **B:** feijão guandu; **C:** pastagem.

Sobre as proximidades das áreas em estudo, foi constatada precipitação acumulada diárias conforme a **Tabela 1**, para os dias de amostragem. Dados da

precipitação para o ano de 2015 são apresentados na **Figura 5**, obtidas da Agência Nacional de Águas (ANA), estação Bonamigo (código 00861002), situado no município de Manicoré, aproximadamente a 35 km da área de estudo. As leituras do efluxo de CO₂ do solo, temperatura e umidade do solo foram feitas nos dias 06, 07 e 08 de novembro de 2015, nas áreas de feijão guandu, floresta e pastagem, respectivamente.

Tabela 1. Precipitação acumulada referente aos dias de coleta registradas na estação Bonamigo da Agência Nacional de Águas no município de Manicoré, no estado do Amazonas, Brasil.

Dia juliano 2015	Precipitação (mm/dia)
308	0,0
309	43,5
310	4,8
311	0,00

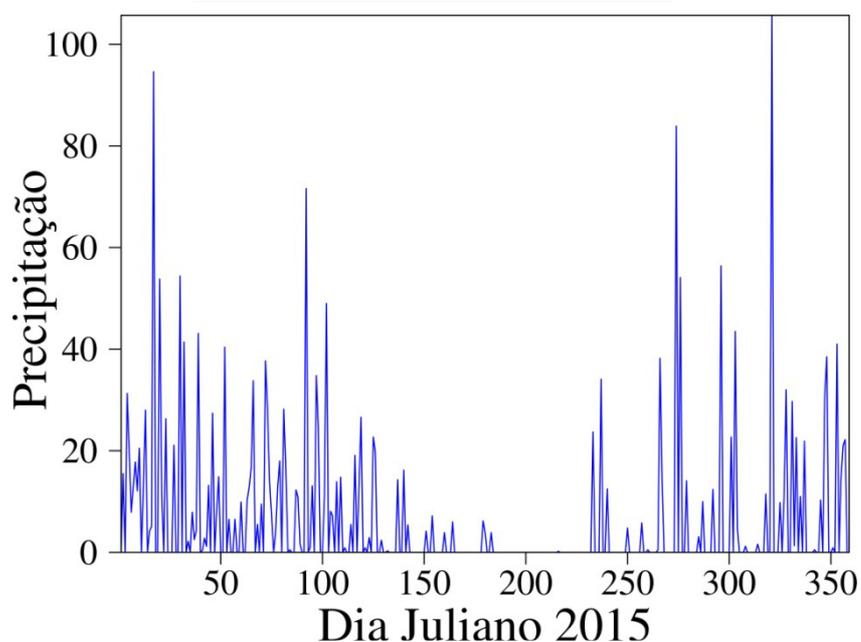


Figura 5. Precipitação acumulada para o ano de 2015 registradas na estação Bonamigo da Agência Nacional de Águas no município de Manicoré, no estado do Amazonas, Brasil.

3.2. METODOLOGIAS DE CAMPO

Foram coletadas, nos pontos de cruzamento da malha, blocos de solo com estrutura preservada e anéis volumétricos de 4,0 cm de altura e 5,1 cm de diâmetro interno, centralizados nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m (**Figura 6**), para a determinação das propriedades físicas estruturais, textura e mecânicas do solo, além do carbono orgânico.



Figura 6. Imagem da trincheira de coleta das amostras de solo em Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas.

Nos pontos de coleta das malhas, também foram avaliadas o efluxo de CO_2 do solo (FCO_2), utilizando o LI-COR 8100 (LI-COR Inc, Lincoln, NE, USA), que consiste de um analisador de gás de infravermelho equipado por uma câmara estática de 20 cm de altura (**Figura 7**). O CO_2 emitido pelo solo é captado pela câmara de gás acoplada a um sistema de análise portátil LI-COR 8100, que por sua vez calcula o efluxo de CO_2 do solo no interior da câmara por meio de espectroscopia de absorção óptica, na faixa do infravermelho. O efluxo de CO_2 foi calculado usando um aplicativo visualizador de arquivo LI-8100 (FV8100, LI-COR Inc) e expresso em $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Concomitantemente às leituras de FCO_2 , foram realizadas medidas da temperatura do solo (TS) na camada de 0,0-0,10 m de profundidade, utilizando-se um termômetro de termistor portátil. Para a determinação da umidade do solo (US), foram coletadas amostras deformadas de solo em latas de alumínio, na camada de 0,0-0,10 m para cada ponto amostral. Dessas amostras de solos, foram medidas as massas úmidas e secas em estufa a 105 °C, para assim determinar a US segundo a metodologia da EMBRAPA (2011). As avaliações do efluxo de CO_2 , temperatura e umidade do solo foram realizadas nos dias 06, 07 e 08 de novembro de 2015, entre os horários de 09 a 11 h de cada dia.



Figura 7. Imagem das medições do efluxo de CO₂ do solo na área de floresta em Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas, AM.

3.3. METODOLOGIAS DE LABORATÓRIO

As amostras dos blocos de solos com estrutura preservada foram secas à sombra e posteriormente levemente destorroadas de forma manual. Estas amostras foram divididas em duas partes. Uma parte da amostra foi utilizada para as análises relativas à estabilidade de agregados, onde o solo foi colocado e agitado sobre um jogo de peneiras de 9,51 e 4,76 mm de diâmetro, sendo utilizada a amostra de solo retida nesta última peneira. A segunda porção de solo foi passada em peneira de 2,00 mm, sendo utilizada nas análises granulométricas e químicas.

O método empregado para a separação e estabilidade dos agregados foi determinado segundo KEMPER & CHEPIL (1965), com modificações nas seguintes classes de diâmetro: 4,76-2,0 mm; 2,0-1,0 mm; 1,0-0,50 mm; 0,50-0,25 mm; 0,25-0,125; 0,125-0,063 mm. Os agregados foram colocados em contato com a água sobre a peneira de 2,0 mm e submetidos à agitação vertical em aparelho Yoder (SOLOTEST, Bela Vista, São Paulo, Brasil) por 15 min e com 32 oscilações por minuto. O material retido em cada classe das peneiras foi colocado em estufa a 105°C, e em seguida mensurada as respectivas massas em uma balança digital.

Os resultados foram expressos em porcentagem dos agregados retidos em cada uma das classes das peneiras e a estabilidade dos agregados avaliados pelo diâmetro médio ponderado (DMP), obtido pela fórmula proposta por CASTRO FILHO et al. (1998), e o diâmetro médio geométrico (DMG), segundo SCHALLER &

STOCKINGER (1953), citados por ALVARENGA et al. (1986), de acordo com as equações:

$$DMP = \frac{\sum_{i=1}^N n_i D_i}{\sum n_i} \quad (13)$$

$$DMG = 10^{\frac{\sum_{i=1}^N n_i \log D_i}{\sum n_i}} \quad (14)$$

em que n_i é a porcentagem de agregados retidos em uma determinada peneira, D_i é o diâmetro médio de uma determinada peneira e N é o número de classes de peneiras.

A análise granulométrica 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 min, seguindo metodologia proposta pela EMBRAPA (2011). A fração argila foi separada por sedimentação, a areia por tamisação e o silte foi calculado pela diferença.

Para as determinações da densidade do solo (D_s), macroporosidade (MaP) e microporosidade (MiP), volume total de poros (VTP) e umidade gravimétrica (Ug), as amostras coletadas em anéis volumétricos foram saturadas por meio da elevação gradual, até dois terços da altura do anel, de uma lâmina de água numa bandeja plástica. Após a saturação, as amostras foram pesadas e levadas à mesa de tensão para determinação da MiP do solo, sendo submetidas a um potencial matricial de -0,006 MPa (EMBRAPA, 2011).

Após atingirem o equilíbrio em um potencial matricial de -0,006 MPa, as amostras foram novamente pesadas e, em seguida, foram feitas as medidas da resistência do solo à penetração (RP), utilizando-se um penetrógrafo eletrônico de bancada (MA-933, Marconi, SP, BR). Posteriormente, as amostras foram levadas à estufa a 105 °C para a determinação da Ug, D_s e VTP, pelo método do anel volumétrico, e a MaP foi determinada pela diferença entre VTP e MiP (EMBRAPA, 2011).

O carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método de Walkley-Black, modificado por YEOMANS & BREMNER (1988). A matéria orgânica foi determinada pelo produto do COT multiplicado pelo fator 1,724 (EMBRAPA, 2011). Já o estoque de carbono (EC) foi definido pela equação:

$$EC = D_s \times h \times COT \quad (15)$$

em que EC = estoque de carbono (Mg ha^{-1}); Ds = densidade do solo (g cm^{-3}); h é a espessura da camada de solo amostrada (cm); COT = teor de C (%).

3.4. TRATAMENTOS DOS DADOS

Após a determinação dos atributos físicos e do carbono orgânico, foram feitas análises estatísticas univariadas e multivariadas e correlação de Spearman. A análise de variância univariada (ANOVA) foi utilizada na comparação dos atributos individualmente pelo teste de Games-Howell, a 5 % de probabilidade, em relação à cobertura do solo de TPA. Esse tipo de análise torna-se menos robusto quanto à violação dos pressupostos de normalidade e da homoscedasticidade.

A análise fatorial dos componentes principais foi realizada a fim de encontrar significância estatística dos conjuntos dos atributos do solo que mais discriminam os ambientes, com relação à cobertura do solo de TPA, obtendo como resposta quais são os ambientes cujos atributos sofrem maior influência pela ação antrópica. As análises estatísticas foram feitas utilizando o programa computacional Statistica 7 (STATSOFT, 2004).

A adequabilidade da análise fatorial foi feita pela medida de KMO, que avalia as correlações simples e parciais das variáveis, e pelo teste de esfericidade de Bartlett, ao qual se pretende rejeitar a igualdade entre a matriz correlação com a identidade. A extração dos fatores foi feita pela análise de componente principal (ACP), incorporando as variáveis que apresentaram comunalidades igual ou superior a cinco (5). A escolha do número de fatores a ser utilizado foi feita pelo critério de Kaiser (fatores que apresentam autovalores superiores a 1). A fim de simplificar a análise fatorial, foi feita a rotação ortogonal (*varimax*) e representada em um plano fatorial das variáveis e dos escores para os componentes principais.

Nos gráficos de dispersão da ACP após rotação *varimax*, os escores foram construídos com valores padronizados, de tal forma que a média é zero e a distância entre os escores é medida em termos do desvio padrão. Dessa forma, as variáveis em um mesmo quadrante (1°, 2°, 3° e 4°) e mais próximas no gráfico de dispersão das ACP são mais bem correlacionadas. Da mesma forma, escores atribuídos às amostras que se encontram próximos e em um mesmo quadrante, estão relacionadas com as variáveis daquele quadrante (BURAK et al., 2010).

A geoestatística foi utilizada para verificar a existência e, nesse caso, quantificar o grau de dependência espacial dos dados gerados por meio da aplicação da ACP, o que foi feito a partir do ajuste de funções teóricas aos modelos de semivariogramas experimentais, com base na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca e conforme a equação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (16)$$

sendo, $\hat{\gamma}(h)$ o valor da semivariância para uma distância h ; $n(h)$ o número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; $Z(x_i)$ o valor do atributo Z na posição x_i ; e $Z(x_i + h)$ o valor do atributo Z separado por uma distância h da posição x_i .

Para a análise do grau de dependência espacial (GDE) dos atributos em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que as propriedades do solo são consideradas com dependência espacial forte se a razão $\left[\frac{C_0}{C_0+C_1}\right]$ for menor ou igual a 25%. Se essa razão estiver entre 26 a 75%, a dependência espacial é considerada moderada, enquanto que, se a propriedade do solo for maior que 75% a aproximadamente 95%, classificam-se como dependência espacial fraca.

O semivariograma pode apresentar um padrão de comportamento que pode ser descrito por modelos teóricos. A escolha para o modelo teórico do semivariograma foi realizada em menor erro residual (SQR), maior coeficiente de determinação (R^2) e de máximo coeficiente de regressão (r) da validação cruzada. Os modelos utilizados nos ajustes do semivariograma foram o esférico (**Eq. 17**) e o exponencial (**Eq.18**):

$$\begin{aligned} \hat{\gamma}(h) &= C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], \text{ se } 0 < h < a \\ &= C_0 + C_1, \quad \text{ se } h \geq a \end{aligned} \quad (17)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 = \left[1 - \exp \left(-3 \frac{h}{a} \right) \right], 0 < h < d \quad (18)$$

em que, C_0 é o efeito pepita; $C_0 + C_1$ é o patamar; $[(C_0/(C_0 + C_1)) \times 100]$ é o grau de dependência espacial (GDE); a representa a distância com que os atributos estão correlacionados, de acordo com uma área com um raio uniforme estimado; e d é a máxima distância em que o semivariograma foi definido.

Por outro lado, análise geoestatística para os atributos FCO₂, TS e US foram avaliados separadamente. Os modelos ajustados aos semivariogramas experimentais para o FCO₂, TS e US foram avaliados e utilizados na krigagem, para melhor representação da estimativa desses atributos em locais não amostrados dentro das áreas de estudo, e as estimativas simuladas pela krigagem foram apresentadas sem tendências. Os modelos do semivariograma para esses atributos foram estimados pelo programa computacional GS+ (GAMMA DESIGN, 1998) e construídos os mapas dos padrões espaciais. A correlação de Pearson foi utilizada para avaliar a força e direção da correlação dos mapas do padrão de distribuição dessas variáveis.

Para os semivariogramas experimentais que não se estabilizam em um patamar, propôs-se retirar a tendência em termos das coordenadas espaciais. Segundo Davis (1986), a componente do semivariograma que contribui para a tendência depende exclusivamente das coordenadas geográficas dos pontos amostrais. Assim, uma componente aleatória pode ser estimada por regressões múltiplas polinomiais obtidas em função dessas coordenadas. Após a retirada da tendência, os semivariogramas foram modelados em termos dos resíduos, que após a krigagem, na representação dos mapas, retornou-se aos dados originais utilizando os coeficientes estimados pela regressão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM DIFERENTES AMBIENTES DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA

Análises estatísticas dos atributos granulométricos (**Tabelas 3, 4 e 5**), estruturais do solo (**Tabelas 6, 7 e 8**), estabilidade dos agregados e do carbono orgânico (**Tabelas 9, 10 e 11**), são apresentadas e discutidas em relação aos usos de solos de Terra Preta Arqueológica (TPA) sob feijão guandu, pastagem e floresta, para as respectivas camadas 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m.

Assim, foi observado coeficiente de assimetria com valores próximos à zero, com exceção das classes de agregados <1,00 mm para o uso de TPA sob pastagem, nas camadas 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m. Os resultados tendam a apresentar valores simétricos nos ambientes em estudo. Já com respeito ao coeficiente de curtose, boa parte dos atributos apresentou uma distribuição platicúrtica (distribuição mais achatada que a distribuição normal).

As medidas de tendência central média e mediana, devido aos dados apresentar uma distribuição simétrica, indicaram valores muito próximos para todos os atributos e em suas respectivas camadas, o que justifica distribuições normais ou aproximadamente normais. Pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, a normalidade dos dados mostrou-se variações entre os ambientes, apresentando significância estatística para a maioria dos atributos do solo em suas respectivas camadas. Assim, o teste de média foi utilizado na comparação entre os ambientes com estatística apropriada.

Em geral, todas as propriedades do solo foram correlacionadas significativamente (**Tabela 2**). COT apresentou correlação negativa com a D_s, indicando altos conteúdos de COT para baixos valores de D_s, o que justifica como um componente importante na estruturação do solo. Comportamento semelhante foi verificado em ambientes de TPA sob o cultivo de cacao em um Argissolo Amarelo Eutrófico (SILVA et al., 2016b). O COT é considerado também como um elemento importante na agregação das partículas do solo, o que vem sendo confirmados pelas correlações significativas com o DMG, DMP e classes de agregados (**Tabela 2**).

Tabela 2. Coeficiente de correlação de Spearman (n=798) dos atributos do solo de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas, Brasil.

	Ds	MaP	MiP	VTP	Ug	RP	COT	EC	Areia	Silte	Argila	DMG	DMP	>2,0	2,0-1,0
MaP	-0,73*	1,00													
MiP	0,01	-0,51*	1,00												
VTP	-0,86*	0,77*	0,10*	1,00											
Ug	-0,60*	0,06	0,77*	0,61*	1,00										
RP	0,55*	-0,76*	0,54*	-0,49*	0,08*	1,00									
COT	-0,47*	0,21*	0,29*	0,43*	0,52*	-0,04	1,00								
EC	0,09*	-0,24*	0,28*	-0,08*	0,16*	0,11*	0,53*	1,00							
Areia	0,47*	-0,22*	-0,16*	-0,37*	-0,41*	0,23*	-0,40*	-0,13*	1,00						
Silte	-0,54*	0,26*	0,20*	0,43*	0,49*	-0,22*	0,46*	0,14*	-0,88*	1,00					
Argila	0,17*	-0,06	-0,11*	-0,15*	-0,21*	-0,04	-0,16*	-0,04	-0,18*	-0,27*	1,00				
DMG	-0,35*	0,22*	0,16*	0,35*	0,34*	0,07*	0,29*	-0,26*	-0,18*	0,23*	-0,13*	1,00			
DMP	-0,36*	0,22*	0,17*	0,36*	0,36*	0,08*	0,30*	-0,26*	-0,17*	0,23*	-0,15*	0,99*	1,00		
>2,0	-0,37*	0,22*	0,17*	0,36*	0,36*	0,08*	0,30*	-0,27*	-0,17*	0,23*	-0,16*	0,99*	1,00*	1,00	
2,0-1,0	0,35*	-0,21*	-0,19*	-0,35*	-0,37*	-0,10*	-0,29*	0,28*	0,11*	-0,18*	0,20*	-0,90*	-0,93*	-0,94*	1,00
<1,0	0,36*	-0,23*	-0,17*	-0,35*	-0,35*	-0,07*	-0,29*	0,26*	0,18*	-0,24*	0,15*	-0,99*	-1,00*	-1,00*	0,91*

*Correlações significativas a 5% de probabilidade. Ds: densidade do solo; MaP: macroporosidade; MiP: microporosidade; VTP: volume total de poros; Ug: umidade gravimétrica; RP: resistência do solo à penetração; COT: carbono orgânico; EC: estoque de carbono; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado.

Os atributos granulométricos (**Tabelas 3, 4 e 5**) apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$) entre os ambientes estudados e com dominância na fração de areia para as áreas em estudo. As áreas de TPA sob feijão guandu e pastagem evidenciaram maiores teores de areia nas três camadas, em comparação aos ambientes sob floresta e, conseqüentemente, menores teores de silte e argila, com as exceções da fração silte na camada 0,00-0,05 m (**Tabela 3**) e da fração argila na camada 0,10-0,20 m (**Tabela 5**), que não promoveram diferenças estatísticas ($p > 0,05$) entre o feijão guandu e a floresta, assim como entre a pastagem e a floresta, respectivamente.

A presença de cobertura vegetal favorece a interceptação das gotas de chuva e evita o desprendimento das partículas do solo, pois chuvas de grande intensidade causam maior desagregação do solo e, normalmente, originam escoamento superficial, sendo as partículas de menores tamanhos são mais facilmente transportadas (VOLK & COGO, 2009).

Tabela 3. Teste de média e estatística descritiva das frações granulométricas do solo na profundidade de 0,00-0,05 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Estatística Descritiva	g kg ⁻¹		
	Areia	Silte	Argila
	Floresta		
Média	701,10 B	203,40 A	95,50 A
Mediana	697,30	199,50	94,60
DP	27,40	27,60	16,02
CV (%)	3,91	13,57	16,77
Assimetria	-0,15	-0,05	-0,03
Curtose	0,00	-0,38	-0,50
K-S	0,20	0,20	0,20
	Feijão guandu		
Média	732,50 A	194,90 A	72,60 B
Mediana	734,60	192,50	72,40
DP	39,40	35,21	18,50
CV (%)	5,38	18,07	25,48
Assimetria	-0,24	0,22	0,16
Curtose	-0,41	-0,14	-0,15
K-S	0,20	0,20	0,20
	Pastagem		
Média	741,40 A	180,50 B	78,10 B
Mediana	745,60	180,40	78,00
DP	29,40	34,30	18,97
CV (%)	3,97	19,00	24,29
Assimetria	-0,42	-0,25	0,08
Curtose	0,22	-0,06	-0,25
K-S	0,08	0,20	0,20

Dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); K-S: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Games-Howell ($p < 0,05$).

Tabela 4. Teste de média e estatística descritiva das frações granulométricas do solo na profundidade de 0,05-0,10 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Estatística Descritiva	g kg ⁻¹		
	Areia	Silte	Argila
Floresta			
Média	701,34 C	195,89 A	102,77 A
Mediana	698,40	195,05	103,21
DP	39,64	36,31	14,71
CV (%)	5,65	18,54	14,31
Assimetria	0,25	-0,13	-0,32
Curtose	-0,33	-0,42	0,06
K-S	0,20	0,20	0,20
Feijão guandu			
Média	768,73 A	145,22 C	86,07 B
Mediana	773,95	150,07	82,98
DP	39,39	40,39	25,20
CV (%)	5,12	27,81	29,28
Assimetria	-0,28	-0,11	0,22
Curtose	-0,28	0,16	-0,41
K-S	0,05	0,20	0,20
Pastagem			
Média	745,19 B	173,70 B	81,11 B
Mediana	740,37	171,99	78,80
DP	27,42	31,50	17,05
CV (%)	3,68	18,13	21,02
Assimetria	0,25	0,05	0,63
Curtose	-0,13	-0,89	-0,07
K-S	0,20	0,01	0,20

Dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); K-S: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Games-Howell ($p < 0,05$).

Oliveira et al. (2015a) evidenciaram numa área de TPA sob cultivo dominância na fração silte na camada de 0,00-0,20 m, para um Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico abrupto. No entanto, a textura do solo constitui um dos atributos físicos mais estáveis, e refere-se à distribuição proporcional das frações areia, silte e argila que compõem o solo. Por outro lado, em estudos da gênese dos solos, a relação entre as frações silte/argila se constitui um dos indicadores de intemperismo.

Não houve alterações significativas ($p > 0,05$) das propriedades físicas Ds, MaP, MiP, VTP e Ug para a camada entre 0,00-0,05 m (**Tabela 6**), em comparação aos usos dos solos. Os arranjos das partículas de um determinado solo em camadas superficiais são os mais influenciados por fatores como clima, vento e relevo, assim como a ação antrópica, que promovem interações diretas a esses atributos, ao passo que pode ter contribuído em sua maior homogeneidade sob a respectiva camada.

Entretanto, em camadas subsequentes, houve mudanças significativas ($p < 0,05$) (**Tabelas 7 e 8**), com menor Ds no solo sob floresta nas camadas de 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m, que corrobora com menores valores MiP e Ug, e maiores valores da

MaP e VTP nas respectivas camadas, com exceção do VTP, que não apresentou diferença significativa ($p>0,05$) entre as áreas de floresta e feijão guandu na camada 0,05-0,10 m. Em adição, também não houve diferença significativa para o VTP na camada de 0,10-0,20 m nas respectivas áreas em estudo.

Tabela 5. Teste de média e estatística descritiva das frações granulométricas do solo na profundidade de 0,10-0,20 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Estatística Descritiva	g kg ⁻¹		
	Areia	Silte	Argila
	Floresta		
Média	718,74 B	194,02 A	87,24 B
Mediana	726,16	191,57	86,59
DP	37,79	37,79	13,16
CV (%)	5,26	19,48	15,08
Assimetria	-0,59	0,22	0,16
Curtose	-0,21	-0,75	-0,33
K-S	0,03	0,20	0,20
	Feijão guandu		
Média	764,95 A	137,64 B	97,41 A
Mediana	775,05	130,99	101,64
DP	34,20	41,27	23,12
CV (%)	4,47	29,98	23,73
Assimetria	-0,80	0,65	-0,40
Curtose	0,31	-0,06	-0,12
K-S	0,00	0,01	0,20
	Pastagem		
Média	762,22 A	146,61 B	91,17 B
Mediana	760,33	146,67	94,08
DP	27,85	32,63	21,04
CV (%)	3,65	22,26	23,08
Assimetria	0,26	0,06	-0,41
Curtose	-0,39	-0,48	-0,17
K-S	0,17	0,20	0,04

Dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); K-S: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Games-Howell ($p < 0,05$).

Como complemento, a área sob pastagem apresentou os maiores valores para a MiP e Ug e os menores valores para MaP nas camadas 0,05-0,10 m e de 0,10-0,20 m e, similarmente, menor valor para VTP na camada de 0,05-0,10 m (**Tabelas 7 e 8**). Resultados semelhantes foram verificados por Barros et al. (2016), em sítios arqueológicos em Latossolos sob florestas secundárias de até 30 anos de preservação. Os autores observaram que as propriedades físicas dos atributos do solo foram fortemente relacionadas ao teor de matéria orgânica presente no solo, o que também foram confirmadas no presente estudo correlações significativas do COT aos demais atributos (**Tabela 2**).

Maiores valores da Ds para as camadas subseqüentes (0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m) sob as áreas de feijão guandu e pastagem podem ser justificado devido às

elevadas concentrações de areia em comparação ao solo sob floresta e, portanto, partículas de maior densidade. A Ds apresentou correlação positiva do com os teores de areia e argila e negativa com o silte (**Tabela 2**). Estudos em solos de TPA também mostraram fortemente correlacionados com as classes texturais (TEIXEIRA et al., 2009). Além do mais, o conhecimento da Ds pode constituir como um indicativo das condições de uso e manejo do solo, estando esse atributo associado ao sistema poroso do solo, ou seja, solos com maior concentração de macroporos tendem a ser menos denso, o que é justificado pela correlação negativa entre esses atributos (**Tabela2**).

Tabela 6. Teste de média e estatística descritiva dos atributos estruturais do solo na profundidade de 0,00-0,05 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Estatística Descritiva	Ds	MaP	MiP	VTP	Ug	RP
	mg m ⁻³	%				MPa
Floresta						
Média	1,27 A	26,50 A	30,90 A	57,40 A	24,40 A	0,40 B
Mediana	1,27	26,10	30,70	57,50	24,30	0,37
DP	0,08	3,59	2,19	3,30	2,40	0,13
CV (%)	6,30	13,55	7,09	5,75	9,84	32,50
Assimetria	0,05	0,11	0,16	-0,03	0,54	0,46
Curtose	0,17	-0,16	0,00	0,02	0,68	-0,02
K-S	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,03
Feijão guandu						
Média	1,26 A	26,40 A	30,80 A	57,20 A	24,90 A	0,49 A
Mediana	1,26	27,00	30,80	57,02	24,70	0,44
DP	0,14	5,40	3,30	4,70	3,80	0,21
CV (%)	11,11	20,45	10,71	8,22	15,26	42,86
Assimetria	-0,04	-0,36	0,19	0,12	0,40	0,78
Curtose	-0,43	-0,27	-0,22	-0,22	-0,08	0,30
K-S	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,01
Pastagem						
Média	1,22 A	27,70 A	30,90 A	58,60 A	25,30 A	0,49 A
Mediana	1,22	28,30	31,10	58,30	25,30	0,44
DP	0,10	6,60	3,60	4,50	2,60	0,22
CV (%)	8,20	23,83	11,65	7,68	10,28	44,90
Assimetria	0,06	-0,22	0,40	0,16	0,12	0,68
Curtose	-0,16	-0,36	-0,40	-0,72	-0,51	0,01
K-S	0,20	0,20	0,01	0,20	0,20	0,06

Dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); K-S: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov; Ds: densidade do solo; MaP: macroporosidade; MiP: microporosidade; VTP: volume total de poros; Ug: unidade gravimétrica; RP: resistência do solo à penetração. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Games-Howell ($p < 0,05$).

Esses resultados demonstram que os sistemas de uso do solo contribuem efetivamente nas condições físicas do solo, promovendo aumento da Ds em relação à área de floresta. Resultados semelhantes também foram verificados por Cunha et al. (2011) em solos não antropogênicos, em avaliar os atributos físicos de solo cultivado

com feijão e milho orgânicos sob a influência das plantas de cobertura, que apresentaram, em solo sob mata nativa, menores valores de Ds e MiP e maiores valores de MaP e VTP. Para os autores, essas condições foram propícias devido ao solo não sofrer o trânsito de máquinas e equipamentos ou animais. Em solos antropogênicos, a variação na porosidade estrutural também pode acarretar mudança na Ds (BARROS et al., 2016). Essa, por sua vez, foi relacionada por maior disponibilidade de água às plantas e pela aeração das raízes, condução e drenagem da água no solo, respectivamente.

Tabela 7. Teste de média e estatística descritiva dos atributos estruturais do solo na profundidade de 0,05-0,10 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Estatística Descritiva	Ds	MaP	MiP	VTP	Ug	RP
	mg m ⁻³	%				MPa
Floresta						
Média	1,36 B	23,31 A	28,00 C	51,31 A	20,59 C	0,40 C
Mediana	1,37	23,48	28,08	51,16	20,70	0,39
DP	0,07	2,95	2,11	3,04	2,09	0,12
CV (%)	5,29	12,66	7,54	5,92	10,15	30,00
Assimetria	-0,13	-0,05	0,15	-0,16	0,00	0,12
Curtose	0,26	-0,02	-0,46	-0,51	-0,56	-0,05
K-S	0,20	0,09	0,20	0,20	0,20	0,20
Feijão guandu						
Média	1,43 A	19,54 B	31,58 B	51,12 A	22,25 B	0,66 B
Mediana	1,45	19,29	31,49	50,37	21,48	0,64
DP	0,10	4,28	3,41	3,83	3,16	0,20
CV (%)	6,99	21,90	10,80	7,49	14,20	30,30
Assimetria	-0,58	0,36	0,20	0,62	0,59	0,54
Curtose	0,09	-0,04	-0,72	0,11	-0,29	0,03
K-S	0,01	0,09	0,20	0,19	0,03	0,20
Pastagem						
Média	1,41 A	15,75 C	33,81 A	49,56 B	23,97 A	0,77 A
Mediana	1,41	15,90	33,61	49,31	24,10	0,72
DP	0,09	4,50	3,14	3,54	2,75	0,24
CV (%)	6,38	28,57	9,29	7,17	11,47	31,17
Assimetria	0,00	0,07	0,11	0,43	0,04	0,71
Curtose	-0,25	-0,37	-0,17	-0,07	-0,85	-0,23
K-S	0,20	0,20	0,20	0,20	0,04	0,02

Dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); K-S: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov; Ds: densidade do solo; MaP: macroporosidade; MiP: microporosidade; VTP: volume total de poros; Ug: umidade gravimétrica; RP: resistência do solo à penetração. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Games-Howell ($p < 0,05$).

A ausência de práticas ao solo em ambientes preservados afeta diretamente a estrutura do solo, com baixos valores de Ds (CALONEGO et al., 2012). A matéria orgânica favorece o aumento da porosidade total do solo e conseqüentemente reduz a Ds. Contudo, valores muito baixos de Ds foram encontrados em solos TPA sob cultivo (CAMPOS et al., 2012b; SANTOS et al., 2013), cujas variações entre os

resultados ao presente estudo podem também estar relacionado ao tipo de solo, com características físicas que diferem em relação aos perfis do solo para determinados atributos. Valores semelhante de Ds foram verificados por Santos et al. (2011), em solos de TPA com perfil Neossolo Litólico sob o uso de pastagem, mas que constatou valores mais baixos aos perfis sob Argissolico Amarelo e Cambissolo Háptico.

Tabela 8. Teste de média e estatística descritiva dos atributos estruturais do solo na profundidade de 0,10-0,20 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Estatística Descritiva	Ds	MaP	MiP	VTP	Ug	RP
	mg m ⁻³	%				MPa
Floresta						
Média	1,37 B	22,29 A	28,20 C	50,49 A	20,74 B	0,38 C
Mediana	1,37	22,30	28,35	50,62	20,62	0,37
DP	0,09	3,11	2,66	3,77	2,94	0,10
CV (%)	6,57	13,95	9,43	7,47	14,18	26,32
Assimetria	-0,22	0,10	0,17	-0,14	0,18	0,00
Curtose	-0,50	0,00	-0,94	-0,49	-0,99	-0,66
K-S	0,20	0,20	0,20	0,20	0,08	0,20
Feijão guandu						
Média	1,48 A	18,58 B	31,28 B	49,86 A	21,26 AB	0,55 B
Mediana	1,47	18,29	30,19	49,86	20,69	0,53
DP	0,09	4,82	4,11	2,91	3,37	0,18
CV (%)	6,08	25,94	13,14	5,84	15,85	32,73
Assimetria	0,17	0,06	0,31	-0,22	0,63	0,36
Curtose	-0,26	-0,83	-0,23	-0,76	-0,09	-0,27
K-S	0,20	0,20	0,20	0,20	0,17	0,20
Pastagem						
Média	1,46 A	16,29 C	32,88 A	49,17 A	22,61 A	0,65 A
Mediana	1,47	16,23	32,85	49,34	22,61	0,65
DP	0,08	3,92	2,95	3,68	2,63	0,18
CV (%)	5,48	24,06	8,97	7,48	11,63	27,69
Assimetria	-0,06	0,11	0,39	0,00	0,17	0,32
Curtose	-0,51	-0,62	-0,08	-0,23	-0,43	0,13
K-S	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); K-S: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov; Ds: densidade do solo; MaP: macroporosidade; MiP: microporosidade; VTP: volume total de poros; Ug: umidade gravimétrica; RP: resistência do solo à penetração. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Games-Howell ($p < 0,05$).

Em relação à resistência do solo à penetração (RP) (Tabelas 6, 7 e 8), houve diferença significativa ($p < 0,05$) sob os sistemas de uso do solo nas três camadas, em comparação aos ambientes avaliados. Maiores valores da RP estão associados aos usos sob feijão guandu e pastagem, que corroboram para elevados valores de Ds nas camadas subsequente se, conseqüentemente, baixo valor de MaP. Mesmo assim, esses resultados ainda são superiores aos encontrados por Soares et al. (2015), em solos de TPA sob Latossolo Amarelo cultivado com milho a 120 m do plantio.

Contudo, o solo sob a cultura da pastagem apresentou resultado mais baixo da MaP (**Tabelas 6, 7 e 8**), o que corrobora como aumento da Ds. Correlações positivas da RP com os atributos Ds e MiP e negativas com a Map e o VPT (**Tabela 2**) reforçam a hipótese de que as alterações da estrutura do solo, pelo uso e manejo, causam mudanças expressivas no selamento superficial em diferentes tipos de cobertura.

No solo sob floresta, os valores de RP foram menores que 0,50 MPa nos 0,20m de profundidade, diferindo dos solos manejados, que apresentaram resultados semelhantes apenas nos primeiros 0,05 m de profundidade. Mesmo assim, esses valores ainda são muito baixos se considerarmos os valores limites definidos do Tavares Filho e Tessier (2009) para solos compactados (RP de 2,0 MPa). Em solos de TPA sob o uso de pastagem, verificou-se valores acima de 2,0 MPa para uma camada de 0,0-0,05 mm (SOARES et al., 2015) que, segundo os autores, justifica-se pela compactação do solo devido ao pisoteio animal.

Em estudo sobre a relação entre a umidade do solo e a resistência do solo à penetração de um Argissolo Amarelo distrocoeso na região do Recôncavo da Bahia, Silveira et al. (2010) constataram que solos com baixo conteúdo de água, apresentam partículas mais próximas e difíceis de serem separadas, e conseqüentemente promovem o aumento da RP. Em solos de ambientes naturais, foi observado menor RP em relação ao solo cultivado, ou seja, a densidade do solo foi maior sob as plantas de cobertura, o que se reflete na maior resistência do solo à penetração, que por sua vez, tem apresentado correlação negativa com o teor de carbono orgânico no solo (CUNHA et al., 2011; SILVA et al., 2012b).

Tanto para o carbono orgânico total (COT) quanto para o estoque de carbono (EC) (**Tabela 9, 10 e 11**) houve alterações para os respectivos usos do solo, apresentado maiores valores sob o uso de feijão guandu na camada 0,00-0,05 m (**Tabela 9**), passando a ter menor valor na camada 0,05-0,10 m (**Tabela 10**). Não se encontraram, entretanto, diferença estatística ($p > 0,05$) entre os usos na camada 0,10-0,20 m para COT e EC (**Tabela 11**). Para Viana et al. (2011), a matéria orgânica tem influência direta e indiretamente aos atributos do solo e, além do mais, seu estudo em agroecossistema brasileiro é base para que se alcance a sustentabilidade agrícola (CUNHA et al., 2011). É sabido também que práticas de uso e manejo dos solos, e

suas variações, interferem no equilíbrio natural dos ecossistemas, alterando os componentes orgânicos tanto em quantidade como em qualidade (MELO & SCHAEFER, 2009).

Tabela 9. Teste de média e estatística descritiva da estabilidade dos agregados e carbono orgânico do solo na profundidade de 0,00-0,05 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Estatística Descritiva	COT g kg ⁻³	EC t ha ⁻¹	DMG		Classes (%)		
			DMP mm		>2,00	2,00-1,00	<1,00
Floresta							
Média	22,96 B	145,80 B	2,74 A	3,10 A	91,19 A	1,29 B	8,05 B
Mediana	22,17	141,70	2,76	3,10	91,17	1,17	7,43
DP	4,50	25,80	0,26	0,12	3,96	0,73	3,88
CV (%)	19,60	17,82	9,49	3,87	4,34	56,59	48,20
Assimetria	0,29	0,40	-0,58	-0,57	-0,56	0,65	0,82
Curtose	-0,53	-0,02	-0,22	-0,29	-0,29	-0,21	0,35
K-S	0,20	0,20	0,06	0,20	0,20	0,20	0,20
Feijão guandu							
Média	33,93 A	213,76 A	2,24 B	2,80 B	80,86 B	2,58 A	17,36 A
Mediana	33,02	210,30	2,29	2,90	83,55	2,54	14,58
DP	7,34	40,90	0,58	0,37	12,26	1,58	11,41
CV (%)	21,63	19,35	25,89	13,21	15,16	61,24	65,73
Assimetria	0,04	-0,14	-0,24	-0,63	-0,60	0,66	0,59
Curtose	-0,33	0,00	-1,09	-0,40	-0,51	-0,04	-0,55
K-S	0,20	0,20	0,00	0,00	0,01	0,20	0,00
Pastagem							
Média	22,77 B	138,90 B	2,64 A	3,10 A	90,86 A	0,93 C	8,47 B
Mediana	22,51	133,30	2,65	3,11	91,85	0,80	7,34
DP	4,25	28,40	0,26	0,13	4,33	0,56	4,28
CV (%)	18,66	20,42	9,85	4,19	4,77	60,22	50,53
Assimetria	0,27	0,49	-0,48	-1,00	-1,00	0,60	1,17
Curtose	-0,35	-0,02	-0,18	0,67	0,65	-0,51	0,85
K-S	0,20	0,20	0,20	0,01	0,01	0,04	0,01

Dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); K-S: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov; COT: carbono orgânico; EC: estoque de carbono; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Games-Howell ($p < 0,05$).

Altas concentrações de cobertura vegetal verificadas *in loco* sob o uso do feijão guandu podem ter favorecido os maiores teores de COT e do EC na camada superficial. Esse resultado difere do proposto por Rossetti et al. (2015), ao determinar o efeito do sistema plantio direto sobre o estoque de carbono e atributos físicos do solo cultivados com soja e milho, e ao comparar com a mata nativa, identificaram maior concentração de MO sob mata nativa em relação aos demais tratamentos, para as quais os autores associam à deposição contínua de serrapilheira, além da ausência de ação antrópica. Em outros trabalhos, os teores de carbono orgânico sob floresta foram maiores do que em solos adjacentes, que por sua vez favoreceram aos processos de estrutura do solo (SILVA et al., 2008; ANDRADE et al., 2009).

Tabela 10. Teste de média e estatística descritiva da estabilidade dos agregados e do carbono orgânico do solo na profundidade de 0,05-0,10 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Estatística Descritiva	COT g kg ⁻³	EC t ha ⁻¹	DMG		Classes (%)		
			mm		>2,00	2,00-1,00	<1,00
Floresta							
Média	23,28 A	158,30 A	2,06 B	2,66 B	75,95 B	4,54 A	19,51 A
Mediana	24,00	161,47	2,09	2,75	79,04	3,97	17,40
DP	4,97	30,29	0,45	0,34	11,70	2,57	9,54
CV (%)	21,35	19,18	21,84	12,78	15,40	56,61	48,90
Assimetria	0,02	0,03	-0,29	-0,55	-0,52	0,72	0,65
Curtose	-0,23	-0,37	-0,87	-0,80	0,87	-0,31	-0,60
K-S	0,20	0,07	0,07	0,02	0,02	0,02	0,01
Feijão guandu							
Média	17,55 B	125,48 B	2,27 A	2,80 A	80,70 A	3,40 B	15,93 B
Mediana	17,42	123,29	2,36	2,90	84,31	2,79	13,28
DP	4,75	32,41	0,46	0,32	10,94	2,28	9,06
CV (%)	27,07	26,10	20,26	11,43	13,56	67,06	56,87
Assimetria	0,12	0,10	-0,47	-0,82	-0,78	0,84	0,94
Curtose	0,24	0,43	-0,61	-0,29	-0,40	-0,17	0,03
K-S	0,05	0,20	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
Pastagem							
Média	21,90 A	154,39 A	2,32 AB	2,87 A	83,35 A	2,21 C	14,44 B
Mediana	22,80	156,24	2,36	2,93	85,39	1,95	12,69
DP	5,95	42,52	0,50	0,31	10,53	1,50	9,02
CV (%)	27,17	27,61	21,55	10,80	12,63	67,87	62,49
Assimetria	-0,12	0,03	-0,47	-0,97	-0,96	0,91	1,00
Curtose	-0,95	-0,84	-0,60	0,39	0,38	0,46	0,48
K-S	0,20	0,20	0,20	0,02	0,01	0,03	0,00

Dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); K-S: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov; COT: carbono orgânico; EC: estoque de carbono; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Games-Howell ($p < 0,05$).

O DMG e o DMP (**Tabela 9,10 e11**) diferiram estatisticamente ($p < 0,05$) em relação aos respectivos usos do solo em comparação a ambientes sob floresta. Foram identificados seus menores valores sob feijão guandu na camada 0,00-0,05 m (**Tabela 9**), o que é justificado por menores concentrações de agregados grandes ($>2,00$ mm), seguido de maiores concentrações de agregados pequenos ($<2,00$ mm), no respectivo solo, que é justificado pelas correlações de DMG e DMP positivamente com classes de agregados $>2,00$ mm e negativamente com classes de agregados 2,00-1,00 mm e $<1,00$ mm de diâmetro (**Tabela 2**). Em camadas subsequentes (**Tabelas 10 e 11**), o DMG e DMP apresentaram maiores valores sob o feijão guandu e pastagem (na camada 0,05-0,10 m) e sob a pastagem (na camada de 0,10-0,20 m), ambos corroborando com maiores concentrações de agregados grandes ($>2,00$ mm) e concentrações de agregados pequenos ($<1,00$ mm) sob o feijão guandu e pastagem nas respectivas camadas.

Tabela 11. Teste de média e estatística descritiva da estabilidade dos agregados e carbono orgânico do solo na profundidade de 0,10-0,20 m para as áreas com diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Estatística Descritiva	COT g kg ⁻³	EC t ha ⁻¹	DMG		DMP mm	Classes %		
						>2,00	2,00-1,00	<1,00
Floresta								
Média	18,07 A	247,56 A	1,34 B	1,98 B	52,37 B	8,76 A	38,87 A	
Mediana	17,69	247,40	1,26	2,00	53,56	8,20	38,67	
DP	6,53	82,43	0,47	0,51	17,22	3,32	15,25	
CV (%)	36,14	33,74	35,07	25,76	32,88	37,90	39,23	
Assimetria	-0,12	-0,17	0,37	-0,19	-0,11	0,47	0,35	
Curtose	-0,68	-0,44	-0,43	-0,64	-0,75	0,00	-0,41	
K-S	0,08	0,20	0,00	0,20	0,20	0,03	0,20	
Feijão guandu								
Média	17,38 A	257,22 A	1,40 AB	2,02 B	54,20 B	7,73 B	38,12 AB	
Mediana	14,82	217,80	1,31	2,01	53,08	7,73	37,44	
DP	8,42	119,02	0,53	0,56	18,97	3,10	16,74	
CV (%)	48,45	46,77	37,86	27,72	35,00	40,10	43,91	
Assimetria	0,76	0,75	0,34	-0,22	-0,16	0,47	0,36	
Curtose	-0,27	-0,27	-0,54	-0,73	-0,82	0,35	-0,52	
K-S	0,00	0,00	0,20	0,20	0,18	0,20	0,20	
Pastagem								
Média	18,35 A	267,91 A	1,55 A	2,24 A	61,92 A	5,77 C	32,31 B	
Mediana	18,52	270,28	1,45	2,25	62,11	5,97	32,18	
DP	4,83	65,28	0,61	0,58	19,35	3,26	16,75	
CV (%)	26,32	24,59	39,35	25,89	31,25	56,50	51,84	
Assimetria	0,04	0,11	0,27	-0,39	-0,34	0,06	0,48	
Curtose	-0,31	0,00	-0,96	-0,48	-0,56	-1,12	-0,31	
K-S	0,20	0,20	0,06	0,17	0,20	0,19	0,01	

Dp: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); K-S: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov; COT: carbono orgânico; EC: estoque de carbono; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Games-Howell ($p < 0,05$).

A importância da avaliação da estabilidade dos agregados é identificar solos que mantenham a persistência à estruturação, fundamental para o suprimento de água e nutrientes, além da resistência à erosão, o que, conseqüentemente, mantém um equilíbrio favorável do desenvolvimento das plantas. A estrutura do solo se dá pelo arranjo das partículas, e solos bem estruturados apresentam melhores condições para uma exploração sustentável que, de certa forma, opõe-se à degradação do solo. O agrupamento dessas partículas com a formação dos agregados, por sua vez, requer a presença de substâncias cimentantes, tais como sílica coloidal, argila e matéria orgânica, que ajudam na agregação do solo.

Correlações significativas ($p < 0,05$) do DMG e DMP (**Tabela 2**) com os atributos do solo foram confirmados para os respectivos solos, apresentando correlações positivas com atributos relacionados à estrutura do solo, com exceção a Ds, classes de agregados $>2,00$ mm e teor de silte. Conseqüentemente, correlações

negativas com teores de areia e argila, além de classes de agregados 2,00-1,00 mm e <1,00 mm.

Correlações positivas do DMG e DMP com o carbono orgânico foram verificadas por Rozane et al. (2010), indicando sua importância na agregação do solo. Esses resultados também corroboram com os de Matos et al. (2008), quando avaliaram a estabilidade de agregados sobre o impacto da adubação orgânica e mineral sobre o solo.

Os atributos apresentaram coeficiente de variação (CV) com valores variando de baixo, moderado e alto (**Tabelas 3 a 11**), segundo os critérios de Warrick & Nielsen (1980). Isso é um indicativo da heterogeneidade dos dados. Verificou-se que em todas as áreas estudadas, e em suas respectivas profundidades, os atributos apresentaram predominância de CV baixo a moderado, concordando com resultados de Aquino et al. (2015), que avaliaram os atributos físicos em ambientes utilizando o semivariograma escalonado. Também foram verificados comportamentos semelhantes a outros trabalhos com variabilidade espacial dos atributos físicos do solo (OLIVEIRA et al., 2015a; SANTOS et al., 2012).

4.1.1. Inter-correlações entre os atributos físicos do solo e do carbono orgânico nos diferentes sistemas de uso do solo de TPA

As amostras de solos coletadas em uma camada de 0,00-0,20 m foram avaliadas para identificar quais atributos dos solos que mais discriminam os ambientes, no que diz respeito ao uso e manejo do solo em relação ao ambiente de floresta.

A análise fatorial indicou resultados significativos ($KMO = 0,78$ e $p < 0,05$, teste de esfericidade de Barlett) e, portanto, é adequada para os atributos avaliados. Na análise de componentes principais (ACP), o número de fatores a ser extraído foi estabelecido de forma a explicar acima de 70% da variância total dos dados (**Tabela 12e Figura 8**), que apresentaram autovalores da matriz de covariância superior a um (1) (MANLY, 2008), com 4,71 na CP1 e 3,80 na CP2. Do percentual da variância explicada, observou-se que a CP1 é responsável por 42,79 % da variância total, enquanto que a CP2 é responsável por 34,54%, o que devem explicar a variabilidade dos dados originais (ANDRADE et al., 2007).

Tanto o primeiro quanto o segundo fator (**Tabela 12**) apresentam alto percentual de explicação para as características estruturais, estabilidade dos agregados, carbono orgânico e a textura do solo. Assim, a discriminação entre os ambientes diz respeito a essas características, com CP1 representando as características de estabilidade dos agregados do solo (DMG, DMP e classes de agregados >2,00 mm, 2,00-1,00 mm e <1,00 mm), enquanto a CP2 as características estruturais do solo, textura e do carbono orgânico do solo (Ds, VTP, Ug, COT, teor de areia e silte).

Tabela 12. Correlação entre cada componente principal e variáveis analisadas e análise fatorial dos atributos do solo coletadas a uma profundidade de 0,00-0,20 m, com os fatores rotacionados (*varimax*) (Fator 1 e 2) correspondentes aos ambientes estudados, na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Atributos	Variância Comum	Fatores	
		PC1	PC2
Ds	0,79	-0,15	-0,86*
VTP	0,75	0,09	0,80*
Ug	0,61	0,25	0,74*
COT	0,44	0,19	0,67*
Areia	0,88	0,08	-0,82*
Silte	0,88	0,03	0,85*
DMG	0,91	0,95*	0,11
DMP	1,00	0,99*	0,09
>2,00 mm	1,00	0,99*	0,08
2,00-1,00 mm	0,77	-0,88*	0,06
<1,00 mm	0,99	-0,97*	-0,11
Variância explicada (%)		42,79	34,54

Ds: densidade do solo; MaP: macroporosidade; MiP: microporosidade; VTP: volume total de poros; Ug: umidade gravimétrica; RP: resistência do solo à penetração; COT: carbono orgânico; EC: estoque de carbono; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado; >2,00 mm (%): classe de agregados maior que 2,00 milímetros; 2,00-1,00 mm: classe de agregados entre 2,00 e 1,00 milímetros; <1,00 mm (%): classe de agregados menor que 1 milímetros.

* Atributos com cargas fatoriais elevadas

Na **Figura 8** está representado o plano fatorial da distribuição dos escores das diferentes áreas estudadas e da disposição das cargas fatoriais dos atributos do solo, coletadas a uma profundidade de 0,00-0,20 m, formado pelos PC1 e PC2. Para uma interpretação geométrica, os pesos atribuídos a cada variável correspondem as projeções a cada um dos eixos de coordenadas representado pelas componentes principais (MANLY, 2008).

Observa-se maior adensamento dos escores da floresta no primeiro e segundo quadrantes da **Figura 8**, o que discrimina a área sob floresta. Assim, amostras de solos coletadas sob floresta promoveram valores aos atributos VTP, Ug, COT e teor de silte acima da média e correlacionados positivamente com a PC2. Assim como os atributos Ds e o teor de areia com valores abaixo da média e correlacionados

negativamente com a PC2. Por outro lado, amostras de solo coletadas sob a área de feijão guandu apresentam-se mais distribuídos entre o segundo e terceiro quadrantes, com atributo classes de agregados 2,00-1,00 mm e <1,00 mm acima da média em comparação aos demais ambientes e correlacionado negativamente com a PC1, e os atributos DMG, DMP, e classes de agregados >2,00 mm, abaixo da média e correlacionado positivamente com a PC1. Entretanto, as amostras de solo coletadas sob a área de pastagem obtiveram um comportamento inverso aos do feijão guandu, sendo os valores mais distribuídos entre o primeiro e o quarto quadrante, com os atributos DMG, DMP e classes de agregados >2,00 mm promovendo valores acima da média em comparação aos demais ambientes e correlacionados positivamente com a PC1, ao passo que os atributos classes de agregados 2,00-1,00 mm e <1,00 mm tiveram valores abaixo da média e negativamente correlacionados a PC1.

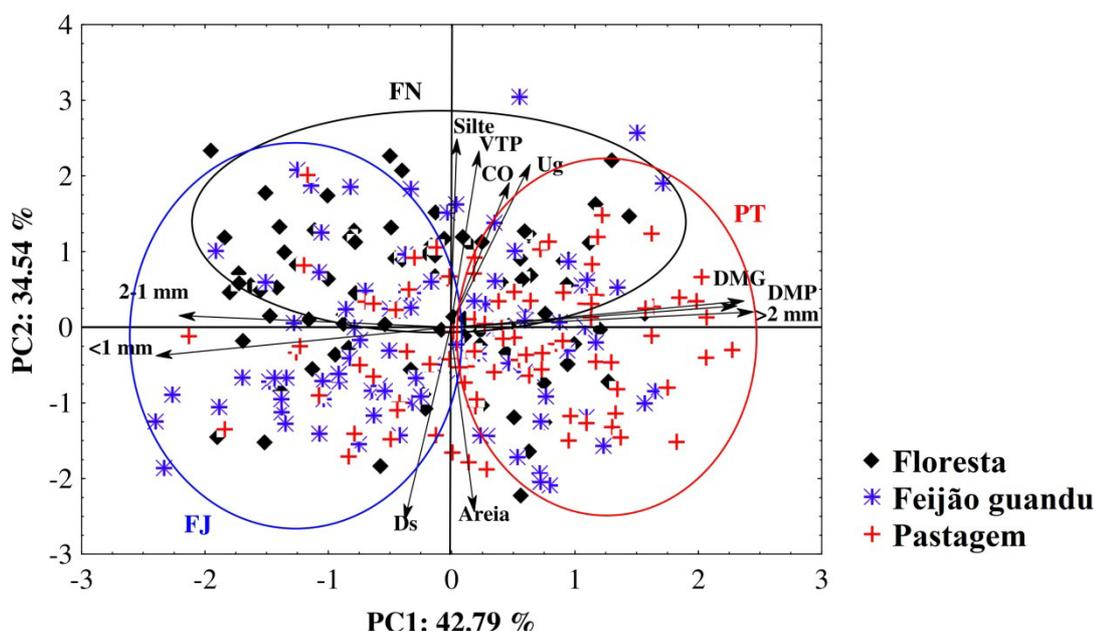


Figura 8. Plano fatorial dos atributos do solo coletadas a uma profundidade de 0,00-0,20 m em áreas de Terra Preta Arqueológica sob diferentes usos na região de Novo Aripuanã, Amazonas. Valores padronizados de tal forma que a média é zero e as distancias entre os escores é medido pelo desvio padrão. FN: floresta; FJ: feijão guandu; PT: pastagem.

Assim, a discriminação entre os ambientes de manejo se resume sobre as características estruturais do solo, principalmente aos atributos mais fortemente relacionados com o sistema poroso do solo. Na área de feijão guandu houve perda de características estruturais, com mudanças de comportamento tanto ao sistema poroso do solo quanto a estabilidade de agregados, em comparação ao ambiente de floresta. Por outro lado, sob área de pastagem, foi observada melhoria na estabilidade dos

agregados do solo, que nesse caso pode estar associada ao maior nível de compactação e resistência à ruptura (SOARES et al., 2016), e é confirmada a maiores valores de D_s e RP em comparação a o solo sob floresta.

4.1.2. Semivariograma dos componentes principais dos atributos do solo de TPA para diferentes ambientes

Um número muito grande de variáveis que envolvem toda a dinâmica do sistema solo-planta-atmosfera, aliados ainda às variações temporais e espaciais no campo, torna-se muito complexa quanto à tomada de decisão. Uma opção de análise da variabilidade espacial para o conjunto de variáveis do solo é o uso da geoestatística multivariada. Assim, a facilidade da interpretação dos mapas proveniente da análise é devido à redução do número de variáveis a partir dos componentes principais (SILVA et al., 2010; ALVES et al., 2014). Com isso, os escores provenientes da análise de componentes principais foram utilizados na geoestatística.

A **Figura 9** mostra os variogramas experimentais e os modelos clássicos de ajuste para a pontuação dos fatores relacionados com a estabilidade dos agregados do solo (CP1) e a características estruturais do solo, textura e do carbono orgânico do solo (CP2). Os parâmetros e os resultados de validação cruzada para estes modelos são apresentados na **Tabela 13**.

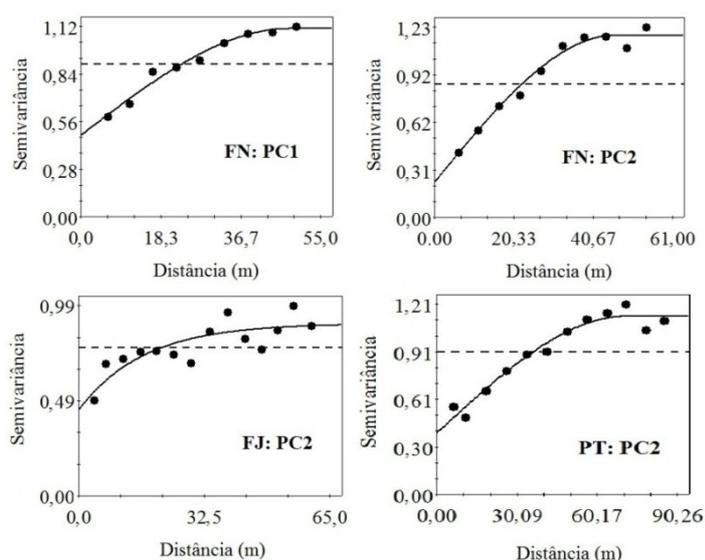


Figura 9. Parâmetros e modelos dos semivariogramas dos componentes principais dos atributos do solo em áreas de TPA na região de Novo Aripuanã, Amazonas. FN: floresta natural; FJ: feijão guandu; PT: pastagem; CP1: componente principal referente à estabilidade dos agregados; CP2: componente principal relacionado com as características estruturais, textura do solo e carbono orgânico do solo.

Para os modelos clássicos propostos no ajuste do semivariograma experimental dos componentes principais (**Tabela 13**), os coeficientes de determinação foram relativamente alto, acrescidos de erro residual baixos, além de promoverem coeficientes de regressões da validação cruzada acima de 98%.

Tabela 13. Resultado dos parâmetros dos modelos ajustados do semivariograma dos componentes principais dos atributos do solo em áreas de TPA na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Áreas	Escores	Modelo	C_0	$C_0 + C_1$	GDE (%)	a (m)	SQR	R^2	r
FN	PC1	Esf	0,48	1,11	43,20	47,80	7,0 E-03	0,98	0,99
	PC2	Esf	0,23	1,18	19,50	46,30	1,57 E-02	0,98	0,99
FJ	PC1	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	PC2	Exp	0,45	0,90	50,0	16,80	6,86 E-02	0,67	0,98
PT	PC1	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	PC2	Esf	0,39	1,14	34,2	70,90	2,87 E-02	0,96	0,99

C_0 : efeito pepita; $C_0 + C_1$: patamar; GDE: grau de dependência espacial; a : alcance; SQR: resíduo; R^2 : coeficiente de determinação; r : coeficiente de regressão da validação cruzada; Esf.: modelo esférico; Exp.: modelo exponencial; EPP: efeito pepita puro.

Houve mudança de comportamento dos padrões de variabilidade espacial dos componentes principais para os ambientes avaliados. O grau de dependência espacial, segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), foi forte para o PC2 da área sob floresta e moderado aos demais componentes das áreas em estudo (**Tabela 13**). O alcance de correlação espacial foi menor para o CP2 da área do feijão guandu e maior para o CP2 da área de pastagem.

Esses resultados indicam que os atributos relacionados à estrutura do solo foram influenciados pelo tipo de cobertura, quando avaliamos em relação à área de floresta que, por sua vez, corrobora com o aumento da dependência espacial sob a pastagem, uma vez que o agrupamento de partículas torna-se mais favorável devido ao tipo de sistema radicular dessa cultura. Em adição, quanto maior o alcance de correlação do semivariograma ajustado, melhor será a precisão dos resultados de interpolação estimativa pela krigagem ordinária, tornado-se ainda mais robusto a análise (SILVA, et al., 2010; ALVES et al., 2014).

Contudo, o ambiente de floresta apresentou dependência de correlação espacial acima de 40 m. O tipo de cobertura pode também ter sido um fator determinante para as mudanças de comportamento em relação à variabilidade dos atributos relacionados à CP1 (estabilidade dos agregados).

Os componentes principais relacionados à estabilidade dos agregados (CP1) para os ambientes de feijão guandu e pastagem não apresentaram dependência

espacial para as distâncias de amostragem (**Tabela 13**), impedindo o uso de modelos geoestatística (JOSÉ et al., 2013). Como consequência, o método de interpolação do inverso do quadrado da distância foi utilizado aos semivariogramas que não apresentaram dependência espacial. Por outro lado, os modelos e parâmetros dos semivariogramas com apresentaram dependência espacial foram interpolados por meio da krigagem ordinária. Ambos os métodos foram utilizados no mapeamento dos atributos relacionados aos componentes principais.

Os mapas dos padrões de variabilidades espaciais apresentam distribuição das características do solo relacionadas à CP1 e a CP2 (**Figura 10**). Aqui os valores foram padronizados de tal forma que a média tornou-se zero. Assim, sob a floresta, há predominância de valores acima da média tanto para CP1 quanto CP2. Desse modo, a área mais escura do mapa da CP1 reflete regiões da área de maior valor de DMG, DMP e classe de agregado >2,00 mm, e menor valor para classes de agregados 2,00-1,00 mm e <1,00 mm, uma vez que estes atributos apresentam uma correlação negativa com a CP1. Em adição, a área mais escura do mapa da CP2 reflete maior Ug, VTP, COT e teor de silte e menor Ds e teor de areia, corroborando a resultados apresentados na seção anterior.

Tanto o solo sob cobertura de feijão guandu como a pastagem apresentaram valores predominantemente próximo a média para ambas componentes principais, com exceção apenas da CP2 sob pastagem, que promoveu aos atributos relacionados a essa componente valores acima da média. Assim, o cultivo do feijão guandu pouco influenciou sob a variabilidade dos atributos do solo relacionado com a CP1 e CP2, assim também com a pastagem para a CP1, mas que o uso do solo sob pastagem promoveu influência aos atributos relacionados à CP2 (características estruturais do solo, textura e do carbono orgânico do solo), o que acarretou em melhoria a essas características no que diz respeito aos índices de qualidade física do solo.

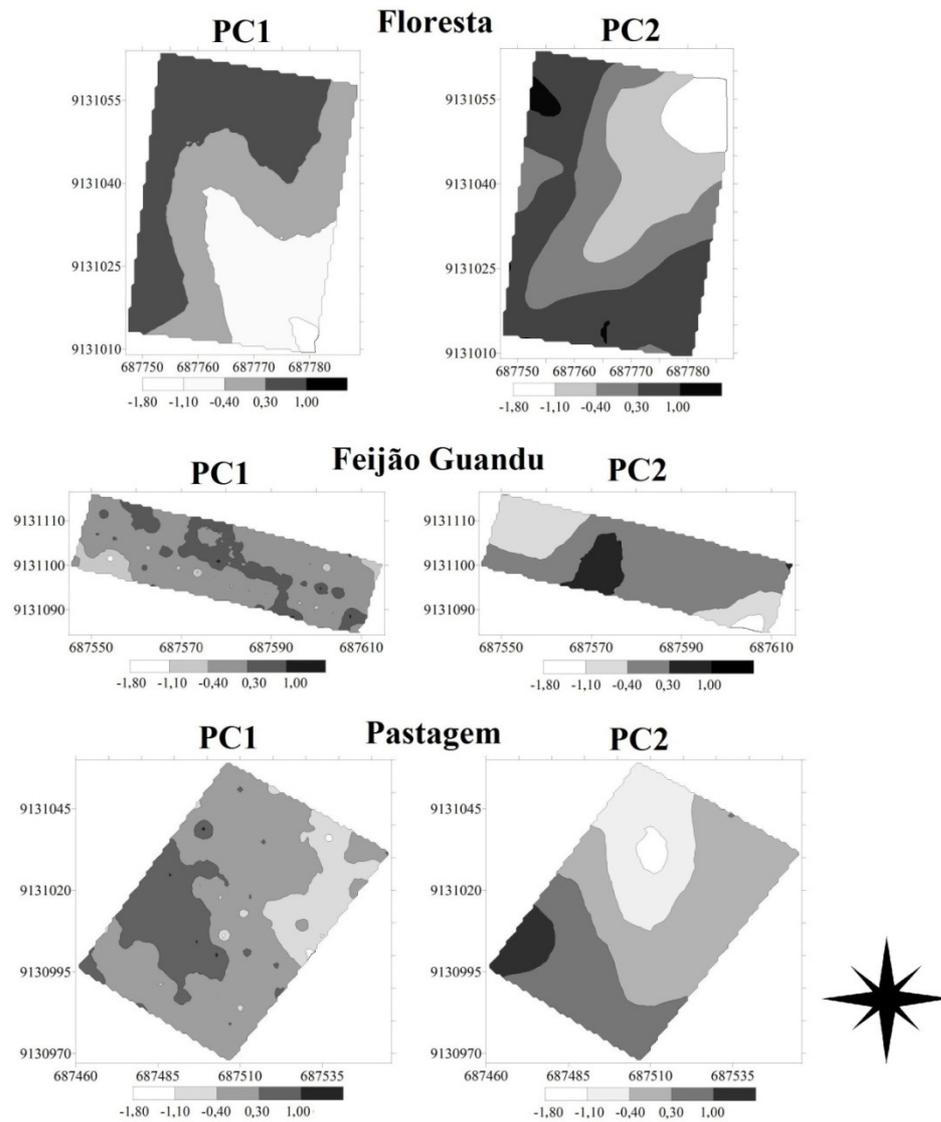


Figura 10. Distribuição espacial dos componentes principais relacionados à estabilidade dos agregados (CP1) e às características estruturais, textura e carbono orgânico do solo (CP2) em ambientes de Terra Preta Arqueológica na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

4.2. EFLUXO DE CO₂, TEMPERATURA E UMIDADE DO SOLO EM TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA EM DIFERENTES AMBIENTES

O solo sob floresta apresentou menores valores de FCO₂ e TS e o maior valor de US (**Tabela 14**). O efluxo de CO₂ do solo é, em grande parte, controlada pela temperatura do solo, mas que pode ser também influenciada pela umidade do solo, dependendo dos limites do conteúdo de água no solo (TANG et al., 2006; ZHOU et al., 2006; ALMAGRO et al., 2009). Tem-se constatado que o molhamento do solo aumenta o efluxo de CO₂ pelo solo, desde que o teor volumétrico de água no solo seja inferior a 10% (MARIKO et al., 2007). Assim, a incidência de chuvas no dia anterior à coleta do FCO₂ na área de floresta (**Tabela 1**) pode ter proporcionado o acúmulo de água no solo, com a substituição imediata dos poros cheios de ar pela água, e a formação de um tampão que impede a difusão de gás de CO₂ do solo para a atmosfera. Por outro lado, esses resultados também podem ser justificados por menores teores de MO e EC na área de floresta, em comparação ao do feijão guandu, não apresentando diferença significativa (p>0,05) com a pastagem (**Tabelas 9 e 10**).

Tabela 14. Estatística descritiva a análise de Kruskal-Wallis do efluxo de CO₂, temperatura do solo e umidade do solo nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Efluxo de CO ₂ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)					
Área	Média	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose	CV%
Floresta	1,91 b	0,56	0,84	0,55	29,3
Feijão guandu	2,29 a	0,54	0,67	0,42	23,6
Pastagem	2,26 a	0,71	0,78	0,83	31,4
Temperatura do solo (°C)					
Área	Média	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose	CV%
Floresta	25,87 b	0,41	1,02	0,82	1,6
Feijão guandu	28,09 a	0,62	0,34	-0,34	2,2
Pastagem	28,26 a	0,84	0,61	0,01	3,0
Umidade do solo (% volume)					
Área	Média	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose	CV%
Floresta	20,07 a	3,50	0,23	-0,29	17,4
Feijão guandu	18,48 b	3,03	0,33	-0,54	16,4
Pastagem	16,94 c	2,87	-0,44	-0,39	16,9

FN: Floresta natural (n=87); FJ: Feijão guandu (n=90); PT: Pastagem (n=88); CV: coeficiente de variação (%). Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Games-Howell (p < 0,05).

Não houve diferença significativa (p<0,05) entre o FCO₂ e a TS em relação às áreas de feijão guandu e pastagem (**Tabela 14**). No entanto, a US apresentou menor

valor sob a pastagem. A umidade do solo sob feijão guandu se justifica pela incidência de chuva duas horas anterior à coleta (**Tabela 1**), mas que o teor de água no solo proveniente da chuva não afetou muito na temperatura do solo. Resultados de pesquisas têm revelado pouca variação do efluxo de CO₂ e da temperatura do solo poucas horas após o molhamento do solo (PANOSSO et al., 2009), para solos com umidade acima de 14%.

Pinto-Junior et al. (2009) verificaram valores mais elevados do efluxo de CO₂ em novembro, com temperatura do solo semelhante ao respectivo estudo, mas com umidade do solo abaixo de 10%, para área de floresta de transição Amazônica Cerrado e de pastagem do tipo *Brachiaria sp.* Bicalho et al. (2014) constataram valores de 1,51 μmol m⁻²s⁻¹, 19,40 °C e 19,68% para o efluxo de CO₂, temperatura e umidade do solo, respectivamente, em julho de 2010, em uma área de cana-de-açúcar na região de Guariba, São Paulo, apresentando valores inferiores para o efluxo de CO₂ e temperatura do solo, mas com umidade do solo próximo a 20%.

Os coeficientes de assimetria e curtose para o FCO₂, TS e US (**Tabela 14**), em todas as áreas deste estudo, indicaram uma distribuição das variáveis próximo à distribuição normal (coeficientes iguais a zero). Por outro lado, a normalidade dos dados não é um pressuposto necessário para a aplicação de técnica geoestatística, mas sim que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, que nesse caso poderia comprometer a análise (OLIVEIRA et al., 2015b).

A temperatura do solo apresentou coeficiente de variação (CV) baixo (**Tabela 14**), segundo os critérios de Warrick e Nielsen (1980), o que é um indicativo da heterogeneidade dos dados. Assim a TS teve uma variação entre 1,6 a 3,0%, com maior homogeneidade dos dados para os pontos de amostragem, o que diferiu para os casos da US e FCO₂, cujo primeiro apresentou um CV mediano com valores entre 16,4 a 17,4%, e o segundo, com alta variação (CV entre 29,3 a 31,4%) entre os pontos de amostragem. Esses resultados são compatíveis aos valores relatados em ambientes de floresta tropical na Amazônia (SILVA et al. 2016a).

A hipótese mais provável da baixa emissão de CO₂ sob floresta é a baixa temperatura e o excesso de umidade em comparação às áreas de feijão guandu e pastagem, além de valores baixos de teores de MO e de EC (**Tabela 9 e 10**). Outra influência sobre a variação do efluxo de CO₂ do solo diz respeito às características

texturais. O efluxo de CO₂ é 21% maior em solos com alto teor de areia do que em solos argilosos, do mesmo modo que a variação para a umidade do solo é maior em solos argilosos (SOTTA et al., 2006). A temperatura do solo nas camadas superficiais, com maior concentração de silte e argila, apresentam maiores flutuações, consequência da maior capacidade do solo em reter água devido ao elevado número de microporos, o que acarreta principalmente na sua difusividade térmica (CARNEIRO et al., 2014).

Assim, para as classes texturais do presente estudo (**Tabela 3, 4 e 5**), maiores concentrações de silte e argila, e menor teor de areia estão sob a área de floresta, diferiram estatisticamente ($p > 0,05$) entre as áreas de feijão guandu e pastagem. A TS e a US mostraram-se correlacionadas com os teores de areia e silte. Entretanto, não foram confirmadas correlações entre o FCO₂ com a TS e a US nas áreas de estudo (**Tabela 15**), com exceção do FCO₂ e o teor de silte sob a área de feijão guandu.

Tabela 15. Análise de correlação dos atributos granulométricos, efluxo de CO₂ (FCO₂), temperatura (TS) e umidade do solo (US) nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Floresta Natural (n=88)					
	Areia	Silte	Argila	TS	FCO2
Silte	-0,92*				
Argila	-0,30*	-0,03			
TS	0,34*	-0,32*	-0,06		
FCO2	-0,09	0,08	-0,02	0,04	
US	-0,50*	0,49*	0,13	-0,29*	-0,01
Feijão guandu (n=90)					
	Areia	Silte	Argila	TS	FCO2
Silte	-0,87*				
Argila	-0,29*	-0,18			
TS	-0,26*	0,24*	0,08		
FCO2	-0,18	0,22*	0,05	0,13	
US	-0,40*	0,39*	0,06	-0,11	-0,06
Pastagem (n=88)					
	Areia	Silte	Argila	TS	FCO2
Silte	-0,84*				
Argila	-0,02	-0,47*			
TS	-0,19	0,18	0,03		
FCO2	0,18	-0,07	-0,16	0,02	
US	-0,45*	0,45*	-0,13	0,09	-0,09

* Correlação de Spearman significativo a 5% de probabilidade.

Assim, a variabilidade espacial e temporal do efluxo de CO₂ do solo envolve uma gama de variáveis dependentes de vários fatores, que pode justificar a dificuldade na modelagem desses atributos em paisagens distintas (SOTTA et al., 2006; RODEGHIERO & CESCATTI, 2008; D'ANDREA et al., 2010; FIENER et al., 2012).

4.2.1. Variabilidade espacial dos atributos efluxo de CO₂, temperatura do e umidade do solo

O comportamento do CV para os atributos do solo estudados pode ser útil na comparação da variação desses atributos com unidades distintas. Para a avaliação da variabilidade espacial dos atributos do solo, foi calculada a semivariância entre os pontos de amostragem, cujos modelos ajustados no semivariograma experimental foram utilizados na krigagem para estimar valores de atributos em pontos não amostrados dentro da malha.

Assim, foi observada variabilidade espacial para o FCO₂, TS e US (**Tabela 16**), que promoveu mudanças de comportamento dos padrões de variabilidade espacial desses atributos para as áreas em estudo. FCO₂ apresentou um grau de dependência espacial (GDE) forte para área de floresta (**Tabela 16**), o que diferiu das áreas de feijão guandu e pastagem, ambas com variabilidade espacial moderada, segundo a classificação de Cambardella et al. (1994).

Tabela 16. Parâmetros dos modelos ajustados do semivariograma do efluxo de CO₂, temperatura do solo e umidade do solo na camada 0,00-0,10 m nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Efluxo de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹)							
Áreas	Modelo	C ₀	C ₀ + C ₁	GDE (%)	a (m)	SQR	R ²
FN	Exp	0,05	0,27	18,52	25,80	7,94 E-03	0,75
FJ	Exp	0,21	0,43	48,83	10,00	1,19 E-02	0,58
PT	Esf	0,27	0,54	50,00	43,30	1,06 E-02	0,84

Temperatura do solo (°C)							
Áreas	Modelo	C ₀	C ₀ + C ₁	GDE (%)	a (m)	SQR	R ²
FN	Esf	0,02	0,21	9,52	36,80	7,28 E-03	0,84
FJ	Esf	0,07	0,19	36,84	23,10	3,24 E-03	0,80
PT	Esf	0,47	0,71	66,20	68,69	3,78 E-02	0,76

Umidade do solo (% volume)							
Áreas	Modelo	C ₀	C ₀ + C ₁	GDE (%)	a (m)	SQR	R ²
FN	Esf	4,99	15,01	33,24	44,09	6,64	0,95
FJ	Esf	4,56	9,60	47,50	21,00	11,8	0,65
PT	Exp	0,99	8,41	11,77	20,70	1,94	0,80

FN: Floresta natural; FJ: Feijão Guandu; PT: Pastagem. Modelos: esférico (Esf) e exponencial (Exp). C₀ = efeito pepita; C₀ + C₁ = patamar; GDE = grau de dependência espacial; a = alcance; SQR = soma do quadrado do resíduo; R² = coeficiente de determinação.

Não foi constatada pelo semivariograma cruzado a influência da TS e da US

nos padrões de distribuição do FCO₂ sob as áreas em estudo. Em outros trabalhos, a variabilidade espacial do efluxo de CO₂ foi afetada principalmente pela umidade do solo (PANOSSO et al., 2009), cujos estudos foram realizados em um Latossolo desprovido de vegetação. Kosugi et al. (2007), em estudo da variabilidade espacial da emissão de CO₂ do solo em floresta tropical, também constataram que a umidade do solo foi fator determinante na variabilidade espacial do FCO₂. O que distingue os solos de TPA em relação aos adjacentes é o elevado teor de matéria orgânica estável e de nutrientes, além de alta atividade microbiana, o que pode ainda mais justificar a complexidade de avaliação do padrão de variabilidade do efluxo de CO₂ nesses ambientes.

Com base em ajustes do modelo do semivariograma experimental, verificaram-se semelhanças no comportamento do FCO₂ (**Tabela 16**) entre as áreas de floresta e feijão guandu, com ajuste do modelo exponencial, enquanto a área de pastagem teve seu ajuste ao modelo esférico, ambos levando em consideração ao menor resíduo. Os modelos tiveram bons ajustes, com coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,58 a 0,84. Na validação cruzada (**Figura 11**), os valores estimados apresentaram correlações acima de 0,76, justificando a predição dos modelos com os dados originais.

O alcance de dependência espacial do FCO₂ (**Tabela 16** e **Figura 11**) foi menor que a distância máxima ao qual o variograma foi definido, mas dentro dos limites para o uso da geoestatística e na precisão de resultados de interpolação estimativa pela krigagem ordinária (SILVA et al., 2010; JOSÉ et al., 2013; ALVES et al., 2014), com alcances de correlação espacial entre 10,00 m para a área do feijão guandu, a 43,30 m para a área da pastagem.

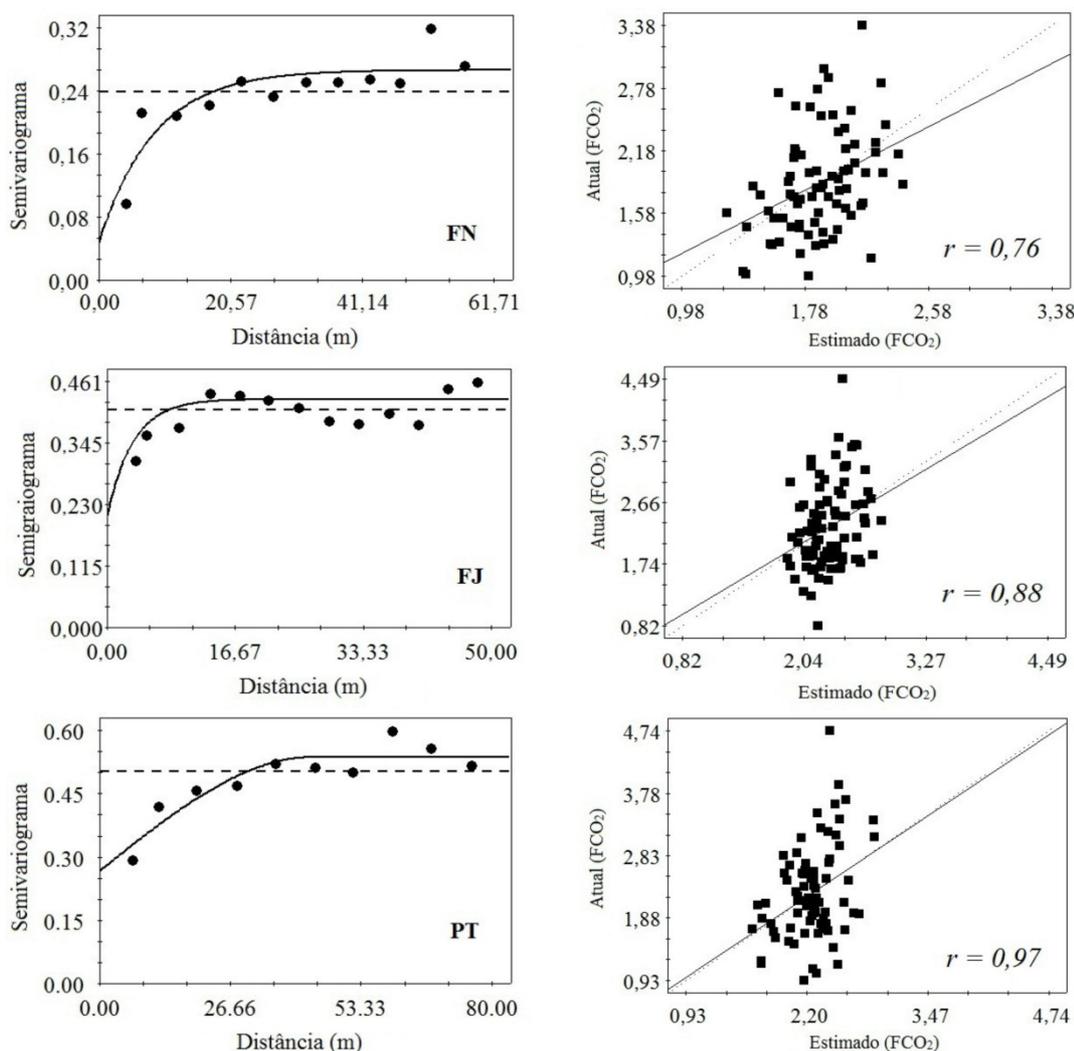


Figura 11. Semivariogramas experimentais e modelos ajustados do efluxo de CO₂ do solo na camada 0,00-0,10 m nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas. FN: Floresta natural; FJ: Feijão guandu; PT: Pastagem.

A TS (Tabela 16 e Figura 12) apresentou modelos de ajuste predominantemente esférico, com GDE forte sob floresta e moderado sob feijão guandu e pastagem. Entretanto, nas áreas de feijão guandu e pastagem, foram necessárias à retirada da tendência em termos das coordenadas espaciais, devido à violação da hipótese intrínseca do semivariograma experimental, e calculadas os semivariograma a partir dos resíduos estimado por regressão (DAVIS, 1986). Os ajustes dos modelos foram adequados, com erros residuais mínimos e coeficientes de determinação variando entre 0,76 a 0,84 (Tabela 16). As correlações obtidas pela validação cruzada (Figura 12) mostraram-se convincentes para a precisão dos modelos. Os alcances de correlação espacial entre os pontos foram acima de 23,10 m e muito inferior à distância máxima proposta pelo variograma.

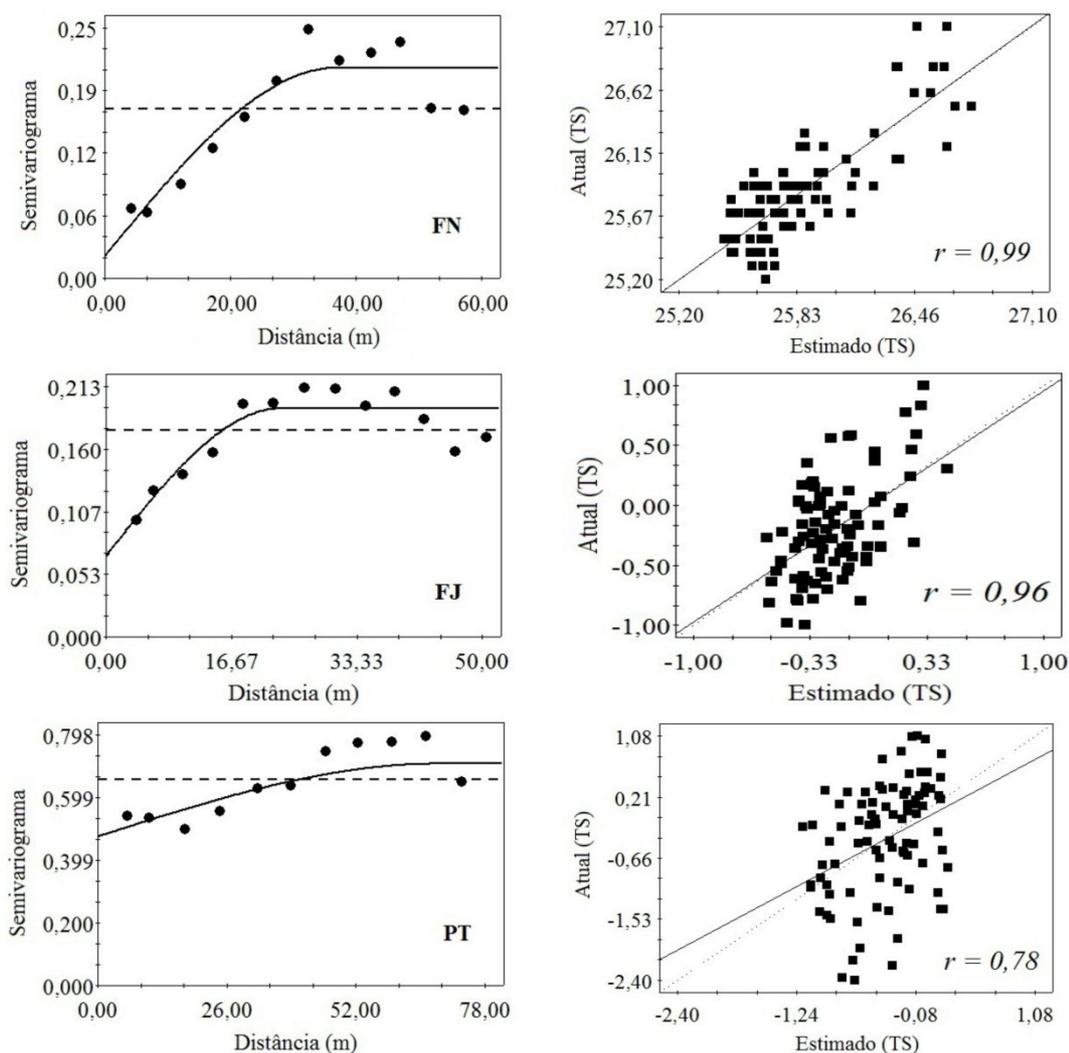


Figura 12. Semivariogramas experimentais e modelos ajustados para a temperatura do solo na camada 0,00-0,10 m nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas. FN: Floresta natural; FJ: Feijão Guandu; PT: Pastagem.

Os resultados apresentam concordâncias aos propostos por Panosso et al. (2009) para uma área desprovida de vegetação e que apresenta um controle de irrigação, ao qual após o molhamento da área, a dependência espacial alcançou até 20 m com modelo gaussiano do ajuste para o semivariograma experimental. Em outro trabalho, sobre cultivo de cana-de-açúcar sob manejo, a temperatura do solo resultou em uma variabilidade com alcance de até 77 m para modelos esféricos sob cana queimada e exponencial sob cana crua (PANOSSO et al., 2008).

A US (Tabela 16 e Figura 13), os modelos de ajuste dos semivariogramas experimentais foram o esférico (para as áreas de floresta e o feijão guandu) e o exponencial (para a área de pastagem). Em contraste aos resultados encontrados nas áreas sob feijão guandu e pastagem, a US obteve uma estabilidade da curva do

semivariograma experimental para a área sob floresta, apresentando correlação espacial acima de 44 m. Apesar de elevados valores para o erro residual (SQR) em comparação aos demais atributos, a validação cruzada foi superior, promovendo correlações acima de 0,93. Altos valores para o SQR também foram encontrados em outros trabalhos (PANOSSO et al., 2008; 2009).

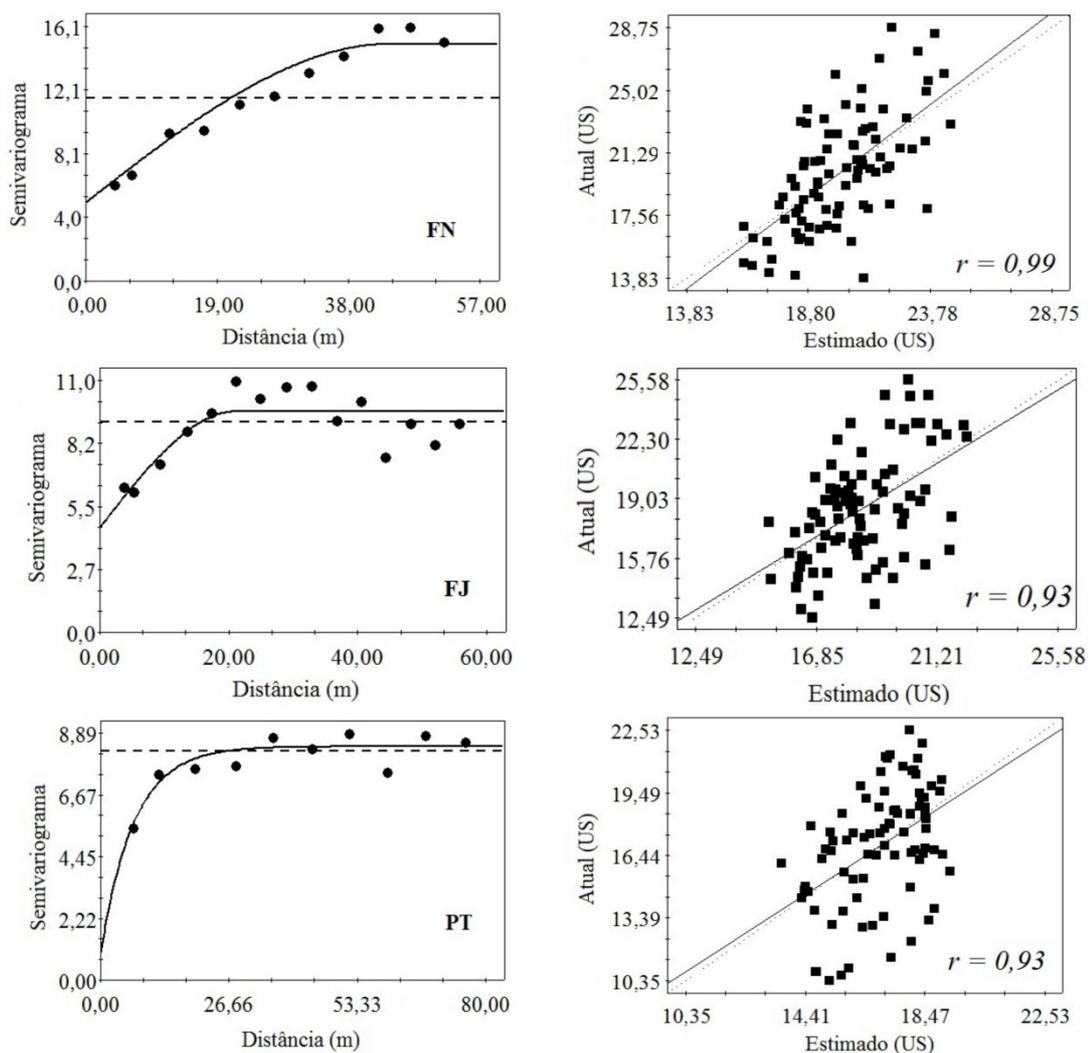


Figura 13. Semivariogramas experimentais e modelos ajustados para a unidade do solo na camada 0,00-0,10 m nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas. FN: Floresta natural; FJ: Feijão Guandu; PT: Pastagem.

Na área sob floresta, o padrão de distribuição de valores do FCO_2 (**Figura 14**) não indica uma tendência de concentração, mas há uma predominância de valores entre 1,1 a 2,7 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, concomitantemente com valores dominantes mais baixos da TS (25,3 a 26,9 °C) e US (15,5 a 24,5 %). A distribuição espacial do FCO_2 promoveu correlação de Spearman (r_s) positiva significativa ($p < 0,05$) com a US ($r_s = 0,41$) e negativa com a TS ($r_s = -0,27$), indicando que ambos influenciaram na

variabilidade espacial do FCO_2 , mas com maior influência da US sob a área em estudo. A TS e US na área de floresta reproduziram um comportamento mais tendencioso de concentração entre os maiores valores de TS a menores valores de US em locais específicos (**Figura 14**), que podem ser corroborados pela correlação negativa ($r_s = -0,48$) entre os mapas desses atributos, o que concorda com o trabalho proposto por Panosso et al. (2009).

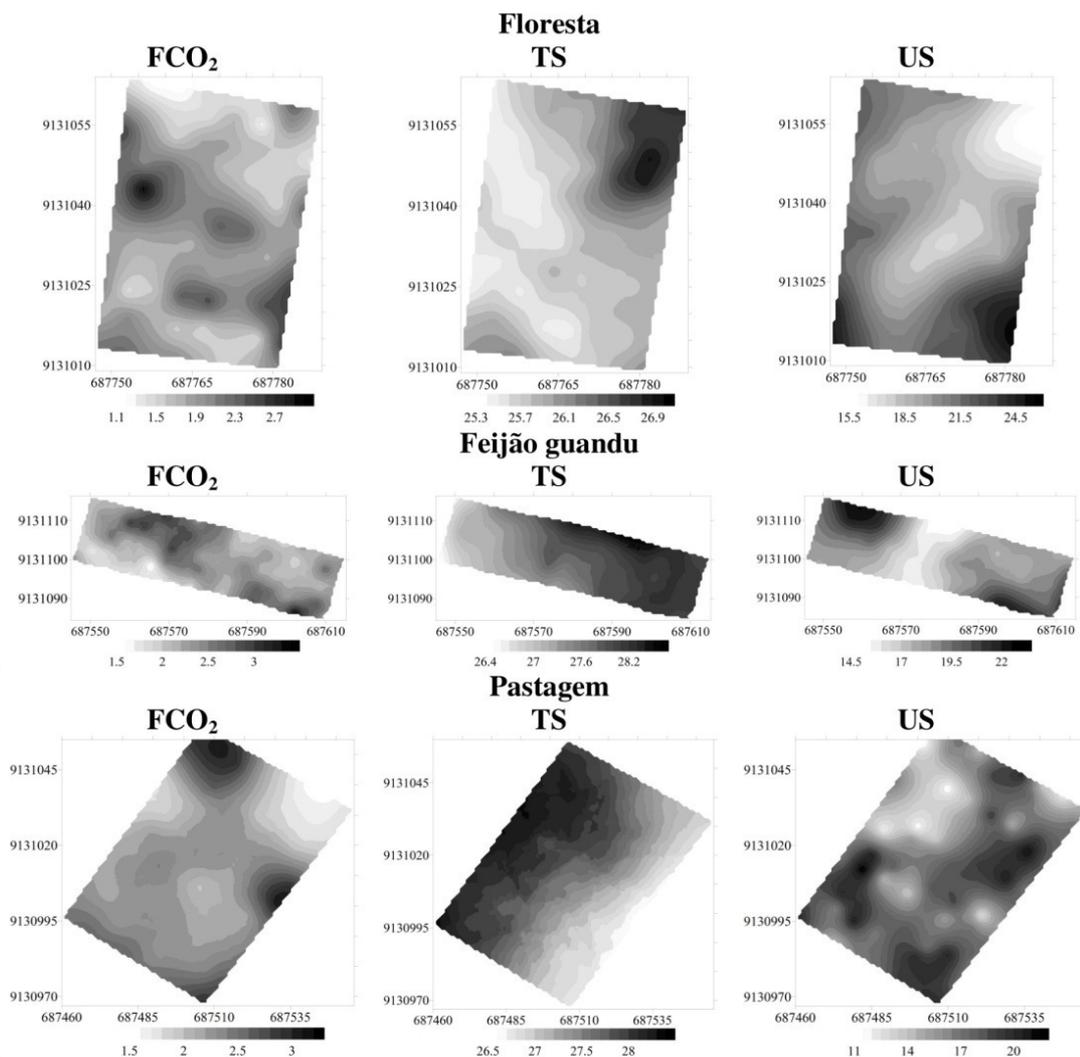


Figura 14. Mapas de padrão espacial do efluxo de CO_2 , temperatura do solo e umidade do solo nas áreas de Terra Preta Arqueológicas na região de Novo Aripuanã, Amazonas.

Na área de feijão guandu (**Figura 14**) há um padrão de distribuição espacial tendencioso entre o FCO_2 e US, de altos valores do FCO_2 para altos valores da US, promovendo correlações positivas ($r_s = 0,32$) entre ambos. Dentre os fatores que podem ter influenciado, destaca-se principalmente o tipo de cobertura do solo, além de raízes das plantas mais superficiais em comparação aos da floresta. A incidência de chuvas horas anterior à leitura de dados também podem ter contribuído para essa

variação, ao qual o molhamento do solo pode ter promovido a substituição do gás entre os espaços porosos do solo e assim aumentado ao efluxo de CO₂ pelo solo. Há uma predominância de valores entre 1,5 a 3,0 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para o FCO₂ combinado de 14,5 a 22,0 % para a US (**Figura 14**). Nesse ambiente, a TS promoveu correlações positivas ($r_s = 0,34$) com o FCO₂, o que contrariou o resultado avaliado na floresta, cuja correlação foi negativa, e não houve correlações significativas ($p > 0,05$) entre a TS e a US sob a área do feijão guandu.

A textura do solo é um fator determinante intrínseco para a temperatura do solo, sendo que em solos mais arenosos promove menor condutividade térmica, que também pode ser uma justificativa da perda de correlação entre a TS e US sobre a mesma área. Em adição, o silte e a argila promovem um aumento elevado do número de microporos nos solos, que por sua vez apresenta maior capacidade de retenção de água no solo, o que acarreta no aumento da difusividade térmica (CARNEIRO et al., 2014). Assim, conforme apresentado na **Tabelas 3, 4e5**, o teor de silte e argila sob floresta foi maior do que nas demais áreas, representando mais do que 29% do total das suas classes texturais, enquanto que no feijão guandu e pastagem representam de 23% e 25%, respectivamente.

Os padrões da distribuição dos valores de FCO₂, TS e US sob a área de pastagem (**Figura 14**), não promoveram associação, com característica singular na configuração do ambiente. Assim, houve predominância de valores baixos de FCO₂ (entre 1,5 a 3,0 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e TS (26,5 a 28,0 °C), mas com padrões de distribuição distintos da US em relação às áreas de floresta e feijão guandu, com predominância de valores mais elevados (11,4 a 20% de US). Houve correlação positiva ($r_s = 0,26$) da distribuição do FCO₂ com a US, não apresentando significância ($p > 0,05$) entre essas e a TS.

Conforme elucidado, o tipo de cobertura do solo, associado ao uso e manejo do solo, promoveu características distintas entre os ambientes quanto ao FCO₂, assim como para a TS e US, consequências essas associadas às alterações das propriedades físicas do solo, principalmente quanto à porosidade e a textura do solo, além das variações do teor de matéria orgânica. Assim como na área de feijão guandu, o tipo de cobertura do solo, além das características texturais, pode ter corroborado para o padrão de distribuição do FCO₂ sob a área de pastagem.

5. CONCLUSÕES

Houve mudança significativa para Ds, VTP, MaP e MiP em relação ao sistema de uso do solo na camada de 0,00-0,05 m, mas com comportamento distinto para as camadas subsequentes. A RP apresentou seu menor valor sob floresta, que corrobora com o resultado de baixos valores de Ds. Os respectivos usos do solo também promoveram alterações aos valores de CO e EC, com melhores resultados em áreas sob o uso de feijão guandu e floresta.

As áreas de feijão guandu e pastagem apresentaram comportamentos semelhantes, como caracterizados de estabilidade dos agregados (PC1) acima da média, assim com características estruturais, textura e do carbono orgânico (PC2) abaixo da média, em comparação ao solo sob floresta.

As PC1 e PC2 apresentaram dependência espacial, com mudança de comportamento do padrão de variabilidade espacial aos ambientes avaliados. Assim, o grau de dependência espacial foi forte para o PC2 sob a área de floresta e moderado aos demais componentes e ambientes. PC2 apresentou menor alcance de correlação espacial sob feijão guandu e maior sob pastagem, enquanto que a PC1 apresentou correlação espacial somente sob a área de floresta.

O efluxo de CO₂, a temperatura e a umidade do solo promoveram diferenças significativas entre as três áreas de estudo. São observados valores mais baixos de efluxo de CO₂ e temperatura do solo para a área Terra Preta Arqueológica sob floresta, seguido de maior umidade do solo.

Foi observada variabilidade espacial para a FCO₂, TS e US, com mudanças nos padrões de variabilidade espacial desses atributos na comparação às áreas de estudo. Assim, o GDE para a FCO₂ e TS foram forte para floresta e moderado para feijão guandu e pastagem, enquanto a US apresentou GDE moderado sob floresta e feijão guandu, mas forte sob a área de pastagem. Foram constatados menores alcances de correlação espacial do FCO₂ e TS para a área sob feijão guandu e Us sob feijão guandu e pastagem, sendo maiores alcances de correlação de FCO₂ e TS sob a área de pastagem e da US sob a área de floresta. Os modelos de ajuste do semivariograma experimental foram predominantemente o esférico, com exceção do FCO₂ para as áreas da floresta e feijão guandu, e da US sob a área de pastagem, que teve ajuste ao modelo exponencial. Os mapas dos padrões de distribuição espacial indicam uma

tendência de concentração entre os atributos avaliados, apresentando correlações positiva entre FCO₂ com US, e negativa com a TS, sob a área de floresta. Sob o feijão guandu, o padrão de distribuição do FCO₂ correlacionou positivamente tanto com a TS como a US, enquanto que na pastagem, houve correlação do FCO₂ apenas com a US.

TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se, como perspectiva para avanços na investigação em solos de Terra Preta Arqueológica, identificar as características multivariadas dos atributos químicos em comparação aos ambientes de floresta, além de comparação entre os solos de TPA aos ambientes adjacentes, tanto em relação aos atributos físicos quanto aos químicos e do efluxo de CO₂.

Uma combinação da estatística multivariada e da análise geoestatística para os atributos do solo em ambientes de TPA faz-se necessária, a fim de identificar zonas de maior intercorrelação entre os atributos físicos e químicos do solo, por meio da variabilidade espacial dos escores produzidos pelas componentes principais. Nesse caso, com essa investigação é possível comparar, dentro de um mesmo ambiente, as correlações simultâneas das propriedades do solo e identificar regiões de possível degradação ambiental.

Em adição, torna-se também importante uma investigação do padrão de variabilidade espacial do efluxo de CO₂ em decorrência de um período que abrange as estações seca e chuvosa, além dos períodos de transição seco-chuvoso e chuvoso-seco, a fim de identificar a presença de dependência temporal desse atributo em ambientes de Terra Preta Arqueológica preservada e sob cultivo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMAGRO, M.; LÓPEZ, J.; QUEREJETA, J. I.; MARTÍNEZ-MENA, M. Temperature dependence of soil CO₂ efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 41, p. 594-605, 2009.

ALVARENGA, R. C.; FERNANDES, B.; SILVA, T. C. A.; RESENDE, M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo e de manejo da palha do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, n. 2, p.273-277, 1986.

ALVES, S. M. F.; QUEIROZ, D. M.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo usando técnicas de análise de componentes principais e geoestatística. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, p. 22-30, 2014.

ANDRADE, E. M.; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M. F.; GOMES, R. B.; LOBATO, F. A. O. Fatores determinantes da qualidade das águas superficiais na bacia do Alto Acaraú, Ceará, Brasil. **Ciência Rural**, v.37, p.1791-1797, 2007.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 411-8, 2009.

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; JÚNIOR, J. M., SILVA, D. M. P.; SILVA, D. A. P. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênicos e não antropogênicos na região de Manicoré, AM. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 4, p. 988-997, 2014.

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; JUNIOR, J. M.; OLIVEIRA, I. A.; TEIXEIRA, D. D. B.; CUNHA, J. M. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil physical properties in southern Amazonas, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 21-30, 2015.

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; OLIVEIRA, I. A.; FRANCISCON, U.; SILVA, D. M. P.; CUNHA, J. M. Chemical soil attributes evaluated by multivariate techniques and geostatistics in the area with agroforestry and sugarcane in Humaitá, AM, Brasil. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 1, p. 61-72, 2016.

ARATANI, R. G.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Qualidade física de um Latossolo Vermelho Acriférrico sob diferentes sistemas de uso de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 677-687, 2009.

BARCELOS, A. A.; CASSOL, E.A.; DENARDIN, J.E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-Escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 35-43, 1999.

BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V.; RODRIGUES, S.; KERN, D. C. Distribuição da porosidade textural e estrutural em solos de Terra Preta Arqueológica. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 47, n. 4, p. 609-615, 2016.

BICALHO, E. S.; PANOSSO, A. R.; TEIXEIRA, D. D. B.; MIRANDA, J. G. V.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Spatial variability structure of soil CO₂ emission and soil attributes in a sugar cane area. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 189, p. 206-215, 2014.

BURAK, D. L.; PASSOS, R. R.; SARNAGLIA, S. A. Utilização da análise multivariada na avaliação de parâmetros geomorfológicos e atributos físicos do solo. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, n. 9, p. 1-11, 2010.

BRASIL. **Ministério das Minas e Energia. Projeto Radambrasil** - Folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro, 1978. 561p.

CALONEGO, J. C.; SANTOS, C. H.; TIRITAN, C. S.; CUNHA JÚNIOR, J. R. Estoque de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Caatinga**, v. 24, p. 128-135, 2012.

CAMARGO, E. C. G.; CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. Geoprocessamento em projetos ambientais. In: **Geoestatística: Fundamentos e aplicações**. Ed.: CAMARGO, E. C. São José dos Campos: INPE, 1996.

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. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1501-11, 1994.

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SOUZA, R. V. C. C.; ALMEIDA, M. C. Características mineralógicas de latossolos e argissolos na região sul do Amazonas. **Revista Acadêmica: Ciência Agrária e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 11-18, 2011.

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R. ALMEIDA, M. C. Toposequência de solos na transição Campos Naturais-Floresta na região de Humaitá, Amazonas. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 3, p. 387-398, 2012a.

CAMPOS, M. C. C.; SANTOS, L. A. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOARES, M. D. R. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, AM. **Revista Agro@mbiente**, v. 6, p. 102-109, 2012b.

CARNEIRO, R. G.; MOURA, M. A. L; SILVA, V. P. R.; SILVA JUNIOR, R. S.; ANDRADE, A. M. D.; SANTOS, A. B.Variabilidade da temperatura do solo em função da liteira em fragmento remanescente de mata atlântica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.1, p.99-108, 2014.

CASTIONE, G. A. F.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; CAMPOS, M. C. C.; CUNHA, J. M. Variabilidade espacial da textura do solo em área irrigada por pivô central em diferentes posições na paisagem. **Revista Agro@mbiente**, v. 9, n. 3, p. 219-226, 2015.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 3, p.527-538, 1998.

CAVALCANTE, E. G. S. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p. 1329-339, 2007.

CEDDIA, M. B.; VIEIRA, S. R.; VILLELA; A. L. O.; MOTA, L. S.; ANJOS, L. H. C.; CARVALHO, D. F. Topography and spatial variability of soil physical properties. **Scientia Agrícola**, v. 66, p. 338-52, 2009.

CENTRO DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens**. Manaus, 2001. 93p. Relatório Técnico.

COSTA LIMA, V.; LIMA, M. R. Formação do solo. In: **O solo no meio ambiente: Abordagem para Professores do Ensino Fundamental e Médio e Alunos do Ensino Médio**. Ed.s: COSTA LIMA, V.; LIMA, M. R.; MELO, V. F. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola. Curitiba, PR. Capítulo de livro, p. 1-10, 2007.

CORRÊA, J. C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 203-209, 2002.

CRUZ, J. S.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MATIAS, S. S. R.; CAMACHO-TAMAYO, J. H.; TAVARES, R. C. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana-deaçúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, p. 271-278, 2010.

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; CANELAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. O.; TROMPOWSKY, P.; 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**, v. 37, p. 91-98, 2007.

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; CANELLAS, L. P.; RIBEIRO, L. P.; BENITES, V. M.; SANTOS, G. A.; Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (terra preta de índio) in the Brazilian Amazon basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p.85-93. 2009.

CUNHA, E. Q.; STONE L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e cultura de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 589-602, 2011.

D'ANDREA, A. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CURI, N.; SILVA, C. A. Variações de curto prazo no fluxo e variabilidade espacial do CO₂ do solo em floresta nativa. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 62, p. 85-92, 2010.

DAVIS, J. C. Statistics and analysis in geology. 2 ed. New York: John Wiley, 1986. 646 p.

DELFINER, P; DELHOMME, J. P. Optimum interpolation by kriging. In: **Display and Analysis of Spatial Data**. Ed.s: DAVIS, J. D.; MC CULLAGH M. J. New York, John Wiley and Sons, p. 96-114, 1975.

DIXON, R. K.; BROWN, R. A.; HOUGHTON, A. M., SOLOMON, M. C., TREXLER, M. C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global ecosystems. **Science**, v.263, p.185-190, 1994.

DRESCHER, M. S.; REINERT, D. J.; DENARDIN, J. E.; GUBIANI, A. F.; DRESCHER, G. L. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.51, n.2, p.159-168, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 3.ed. revisada e ampliada. Brasília, 2013. 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solo, 2011. 230p.

FALCÃO, N.; MOREIRA, A.; COMENFORD, N. B. A fertilidade do solo de Terra Preta do Índio da Amazônia Central. In: **As Terras Pretas de índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. Ed.s: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM, Capítulo de livro. p. 189-200, 2009.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: **Física do solo**. Ed.: JONG VAN LIER, Q. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG. Capítulo de livro, p. 1-27, 2010.

FIENER, P.; DLUGOB, V.; KORRES, W.; SCHNEIDER, K. Spatial variability of soil respiration in a small agricultural watershed – Are patterns of soil redistribution important? **Catena**, v. 94, p. 3-16, 2012.

FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; SOUZA JÚNIOR, P. R.; CAMPOS, M. C. C. Análises multivariadas de atributos químicos do solo para caracterização de ambientes. **Revista Agro@ mbiente**, v. 8, n. 2, p. 155-164, 2014.

GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; DUTRA, A.C. Degradação física de um Latossolo Vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p. 863-873, 2007.

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

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

GLASER, B.; BIRK, J. J. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (Terra Preta de Índio). **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 82, p. 39-51, 2012.

HERBST, M; HELLEBRAND, HJ; BAUER, J; HUISMAN, JA; SIMUNEK, J; WEIHERMÜLLER, L; GRAF, A; VANDERBORGHT, J; VEREECKEN, H. Multi-year heterotrophic soil respiration: evaluation of a coupled CO₂ transport and carbon turnover model. **Ecological Modelling**, v. 214, p. 271-283, 2008.

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 Journal**, v. 28, n. 1, p. 185-195, 2012.

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

JOSÉ, J. V.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L.; HONGYU, K.; PERBONI, A. MARQUES, P. A. A.; DIAS, C.; T. S.; COELHO, R. D. Análise multivariada e geoestatística de variáveis físico-hídricas de diferentes solos. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 2, n. 3, p. 121-129, 2013.

JUO, A. S. R.; FRANZLUEBBERS, K. **Tropical Soils: Properties and management for sustainable agriculture**. Oxford University Press, 2003. 267p.

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

KÄMPF, N.; WOODS, W. I.; KERN, D. C., CUNHA, T. J. Classificação das Terras Pretas de índio e Outros Solos Antrópicos Antigos. In: **As Terras Pretas de índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas**

Áreas. Ed.s: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM, Capítulo de livro. p. 87-103, 2009.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: **Methods of soil analysis – Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling.** Ed.s: BLACK, C. A., EVANS, D. D., WHITE, J. L., ENSMINGER, L. E.; CLARK, F. E. Madison, American Society of Agronomy, p. 499-510. (Agronomy Series, 9), 1965.

KERN, D. C.; D'AQUINO, G.; RODRIGUES, T. E.; FRAZÃO, F. J. L.; SOMBROEK, W.; MYERS, T. P.; NEVES, E. G. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: **Amazonian Dark Earths: origin, properties, Management.** Ed.s: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W.I. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. p. 51-75, 2003.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p.

KOSUGI, Y.; MITANI, T.; ITHO, M.; NOGUCHI, S.; TANI, M.; MATSOU, N.; TAKANASHI, S.; OHKUBO, S.; NIK, A. R. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 147, p. 35-47, 2007.

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, v. 60, p. 158-169, 2009.

LIMA, H. N.; MELLO, J. W. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; LIMA, A. M. N. Mineralogia e química de três solos de uma topossequência da Bacia Sedimentar do Alto Solimões, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 59-68, 2006.

LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KÄMPF, N.; COSTA, M. L.; SOUZA, K. W. Características Químicas e Mineralógicas e a Distribuição de Fontes de Fósforo em Terras Pretas de Índio da Amazônia Ocidental. In: **As Terras Pretas de índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas**

Áreas. Ed.s: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM, Capítulo de livro. p. 212-224, 2009.

LU, A. X.; WANG, J. H.; QIN, X. Y.; WANG, K. Y.; HAN, P.; ZHANG, S. Z. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China. **Science of the total Environment**, v. 425, p. 66-74, 2012.

MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; NETO, L. M.; BENITES, V. M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (Terra Preta do Índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In: **As Terras Pretas de índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. Ed.s: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM, Capítulo de livro. p. 212-224, 2009.

MAIA, M. A. M.; MARMOS, J.L. **Geodiversidade do estado do Amazonas**. Manaus: CPRM, 2010. P. 73-77.

MANLY, B. J. F. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**. 3^a ed. Porto Alegre: Bookman; 2008.

MARIKO, S.; URANO, T.; ASANUMA, J.; Effects of irrigation on CO₂ and CH₄ fluxes from Mongolian steppe soil. **Journal of Hydrology**, v. 333, n. 1, p. 118-123, 2007.

MAROCO, J. **Análise estatística com a utilização do SPSS**. 3.ed. Lisboa: Lisboa. 2007. 822p.

MARTINS, G. C.; FERREIRA, M. M.; CURI, M.; VITORINO, A. C. T.; SILVA, M. L. N. Campos nativos e matas adjacentes da região de Humaitá (AM): atributos diferenciais dos solos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 02, p. 221-227, 2006.

MATOS, E. S.; MENDONÇA, E. S.; LEITE, L. F. C.; GALVÃO, J. C. C. Estabilidade de agregados e distribuição de carbono e nutrientes em Argissolo sob adubação orgânica e mineral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 1221-30, 2008.

MEIR, P.; GRACE, J.; MIRANDA, A.C.; LOYD, J. Soil respiration in amazonia and in cerrado in central Brazil. In: **Amazon Deforestation and Climate**. Ed.s: GASH, J.C.H.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R. John Wiley and Sons, Chichester, UK, p. 319-330, 1996.

MELO, V. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Matéria orgânica em solos desenvolvidos de rochas máficas no nordeste de Roraima. **Acta Amazonica**, v. 39, p. 53-60, 2009.

MENEZES, M. B. M.; PEJON, O. J. Análise da influência do teor de umidade na absorção da água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade. **Geociências**, v. 29, n. 2, p. 211-228, 2010.

NEVES, E. G., PETERSON, J. B., BARTONE, R. N.; DA SILVA, C. A. Historical and socio-cultural origins of Amazonian Dark Earths. In: **Amazonian Dark Earths: origin, properties, Management**. Ed.s: LEHMANN, J.; KERN, D. C; GLASER, B.; WOODS, W. I. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. p. 29-49, 2003.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; JUNIOR, J. M.; NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1103-1112, 2013.

OLIVEIRA, I. A.; JUNIOR, J. M.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; SIQUEIRA, D. S.; CUNHA, J. M. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 668-681, 2015a.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; FREITAS, L.; SOARES, M. D. R. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta Amazônica**, v. 45, n. 1, p. 1-12, 2015b.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; SILVA, D. M. P.; CUNHA, J. M.; SOUZA, Z. M.; SOARES, M. D. R.; FREITAS, L. Spatial variability of physical attributes of cambisol under cassava cultivation in Southern Amazonas. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 49, p. 4414-4423, 2015c.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; AQUINO, R. E.; TEIXEIRA, D. B.; SILVA, D. M. P. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil chemical properties in southern Amazonas, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 31-39, 2015d.

PABST, E. Critérios de distinção entre Terra Preta e Latossolo na região de Belterra e os seus significados para a discussão pedogenética. **Bolletim de Museo Paraense do Emilio Goeldi Serie Antropologia**, v.7, 5-19, 1991.

PALMEIRA, P.R.T.; PAULETTO, E.A.; TEIXEIRA, C.F.A.; GOMES, A.S.; SILVA, J.B. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 189-195, 1999.

PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; JÚNIOR, J. M.; JÚNIOR, N. L. S. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 2, p. 227-236, 2008.

PANOSSO, A. R.; RIBEIRO, C. E. R.; ZANINI, J. R.; PAVANI, L. C.; PEREIRA, G. T.; JÚNIOR, N. L. S. Variabilidade espacial da emissão de CO₂, da temperatura e umidade de um latossolo desprovido de vegetação sob diferentes lâminas de molhamento. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 30, n. 1, p. 1017-1034, 2009.

PESSOA JUNIOR, E. S.; SOUZA, W. B.; SOUZA, K. S.; PIO, M. C. S.; SANTANA, G. P. Terra Preta de Índio na Região Amazônica. **Scientia Amazônia**, v. 1, n.1, 1-8, 2012.

PINTO-JUNIOR, O. B.; SANCHES, L.; DALMOLIN, A. C.; NOGUEIRA, J. S. Efluxo de CO₂ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. **Acta Amazônica**, v. 39, n. 4, p. 813-822, 2009.

QUEIROZ, H. A.; ALVES, M. C.; SILVA, R. H. Qualidade dos solos de uma microbacia na região de Ilha Solteira, SP. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 1, n. 1, p. 26-37, 2014.

R CORE TEAM. R: 2013. **A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2013. URL <http://www.R-project.org/>

RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus**, v.44, p. 81-99, 1992.

RAICH, J.W.; POTTER, C.S.;BHAGAWATI, D. Interannual variability in global soil respiration 1980-94. **Global Change Biology**,v. 8, p. 800-812, 2002.

REIS, E. Estatística multivariada aplicada. 2ª ed. Lisboa: Edições Sílabo, 2001. 343p.

RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, S. A. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 4. ed. Viçosa: NEPUT, 338 p, 2002.

ROBERTSON, G.P. **GS+: Geostatistics for the environmental sciences**. Gamma design software, Plainwell: MI; 1998.

RODEGHIERO, M; CESCATTI, A. Spatial variability and optimal sampling strategy of soil respiration. **Forest Ecology and Management**, v. 255, p. 106-112, 2008.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Estoque de carbono e atributos físicos de um Latossolo em cronosequência sob diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 252-258, 2015.

ROZANE, D. E.; CENTURION, J. F.; ROMUALDO, L. M.; TANIGUCHI, C. A. K.; TRABUCO, M.; ALVES, A. U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho Distrófico, sob diferentes manejos. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 1, p. 24-32, 2010.

SALES, R. P.; PORTUGAL, A. F.; MOREIRA, J. A. A.; KONDO, M. K. PEGORARO, R. F. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, p. 429-438, 2016.

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

SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANDRADE, T. S.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos do vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 828-35, 2012.

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

SATHLER, D.; ADAMO, S. B.; LIMA, E. E. C. Mudanças climáticas e mitigação no setor florestal: REDD+, políticas nacionais e desenvolvimento sustentável local na Amazônia Legal. **Revista brasileira de estudo de população**, v. 32, n. 3, p. 619-630, 2015.

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rainforest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, v. 64, p. 111-128, 2003.

SILVA, F. F.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; ARATANI, R. G.; ANDRIOLI, F. F.; ANDRIOLI, I. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. **Revista Irriga**, v. 13, p. 191-204, 2008.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C. TEIXEIRA, M. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 34, p. 15-22, 2010.

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**, v. 35, p. 673-681, 2011.

SILVA, A. K. T.; GUMARÃES, J. T. F.; LEMOS, V. P.; COSTA, M. L.; KERN, D. C. Mineralogia e geoquímica de perfis de solo com Terra Preta Arqueológica de Bom Jesus do Tocantins, sudeste da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 42, p. 477-490, 2012a.

SILVA, A. R.; SILVA, L. L.; FRAZÃO, J. J.; SALGADO, F. H. M.; SILVA, M. C.; CORRECHEL, V. Resistência mecânica à penetração do solo com diferentes coberturas vegetais sob sistema. **Revista Científica Eletrônica da Agronomia**, v. 22, p. x-x, 2012b.

SILVA, L. C.; CUNHA, J. M.; MACHADO, N. G.; CAMPOS, M. C. C.; BIUDES, M. S. Estimativa do balanço de radiação por sensoriamento remoto de diferentes usos de solo no sudoeste da Amazônia brasileira. **Sociedade & Natureza**, v. 27, n. 2, p. 341-356, 2015.

SILVA, CM; VASCONCELOS, SS; MOURÃO JÚNIOR, M; BISPO, CLC; KATO, OR; SILVA JUNIOR, AC; CASTELLANI, DC. Variação temporal do efluxo de CO₂ em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental. **Acta Amazônica**, v. 46, n. 1, p. 1-12, 2016a.

SILVA, D. M. P.; CAMPOS, M. C. C.; FRANCISCON, U.; ALHO, L. C.; SANTOS, L. A. C.; NETO, P. P.; BERGAMIN, A., C.; SOUZA, Z. M. Spatial Variability of Soil Properties in Archeological Dark Earth Sites under Cacao Cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-12, 2016b

SILVEIRA, D. C.; FILHO, J. F. M.; SACRAMENTO, J. 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**, v. 34, p. 659-67, 2010.

SOARES, D. R.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M.; BRITO, W. B. M.; FRANCISCON, U.; CASTIONI, G. A. F. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista Ciências Agrárias**, v. 58, n. 4, p. 434-441, 2015.

SOMBROEK, W.; KERN, D. C.; RODRIGUES, T. E.; CRAVO, M. S.; CUNHA, T. J. F.; WOODS, W.; GALSER, B. Terra preta e terra mulata: suas potencialidades agrícolas, sua sustentabilidade e suas reproduções. In: **As Terras Pretas de índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. Ed.s: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM, Capítulo de livro. p. 251-257, 2009.

SOTTA, E. D.; VELDKAMP, E.; GUIMARÃES, B. R.; PAIXÃO, R. K.; RUIVO, M. L. P.; ALMEIDA, S. S. Landscape and climatic controls on spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an Eastern Amazonian Rainforest, Caxiuanã, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 237, p. 57-64, 2006.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMPOS, M. C. C. Amostragem de atributos químicos e físicos em área com variação nas formas do relevo. **Científica**, v. 34, n. 3, p. 249-256, 2006.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. B. Variabilidade espacial de atributos químicos em um Argissolo sob pastagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, n. 4, p. 589-596, 2008.

STATSOFT Inc 7.0. Statistica (data analysis software system). USA: 2004

TANG, X.; ZHOU, G.; LIU, S.; ZHANG, D.; LIU, S.; LI, J.; ZHOU, C. Dependence of Soil Respiration on Soil Temperature and Soil Moisture in Successional Forests in Southern China. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 48, n. 6, p. 654-663, 2006.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Compressibility of oxisol aggregates under no-till in response to soil water potential. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1525-1533, 2009.

TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C.; MACEDO, R. S.; NEVES JÚNIOR, A. F.; MOREIRA, A.; BENITES, V. M.; STEINER, C. N. As propriedades físicas e hídricas dos horizontes antrópicos das Terras Pretas Arqueológicas. In: **As Terras Pretas de índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. Ed.s: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM, Capítulo de livro. p. 242-250, 2009.

VALE JÚNIOR, J. F.; SOUZA, M. I. L.; NASCIMENTO, P. P. R. R.; SOUZA CRUZ, D. L. Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável. **Revista Agro@mbiente**, v. 5, n. 2, p.158-165, 2011.

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**, v. 35, p. 2105-2114, 2011.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: **Tópicos em ciência do solo. Viçosa**. Ed.s: NOVAIS, R. F., ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1: 1-54, 2000.

VIDOTTO, E.; PESSENDA, L. C. R.; RIBEIRO, A. S.; FREITAS, H. A.; BENDASSOLLI, J. A. Dinâmica do ecotono floresta-campo no sul do estado do Amazonas no Holoceno, através de estudos isotópicos e fitossociológicos. **Acta Amazonica**, v. 37, p. 385-400, 2007.

VOLK, L. B. S.; COGO, N. P. Relações entre tamanho de sedimentos erodidos, velocidade da enxurrada, rugosidade superficial criada pelo preparo e tamanho de agregados em solo submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1459-71, 2009.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: **Applications of soil physics**. Ed.: Hillel D. New York: Academic Press; 1980, p.319-44.

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

ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T. M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, v. 79, p. 117-161, 1997.

ZHOU, X.; SHERRY, R.; AN, Y.; WALLACE, L. L.; LUO, Y. Main and interactive effects of warming, clipping, and doubled precipitation on soil CO₂ efflux in a grassland ecosystem. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 20, GB1003, p. 1-12, 2006.

APÊNDICE A – TABELAS DE CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

Tabela 17. Características químicas do solo de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas, Brasil.

Perfil	pH em H ₂ O	pH em KCl	ΔpH	Ca	Mg	K	SB	Al	H+Al	CTC	V (%)	m	P mg dm ⁻³	C g kg ⁻¹	MO
				cmol dm ⁻³											
0-14	5,49	5,78	0,29	4,71	0,4	0,05	5,16	0,02	5,92	11,1	46,62	0,39	50	26,61	45,77
14-38	5,92	5,29	-0,63	6,02	0,62	0,03	6,67	0	4,47	11,17	59,97	0	117	25,88	44,51
38-51	6,12	5,50	-0,62	3,86	0,54	0,01	4,41	0	2,54	6,96	63,47	0	56	14,14	24,33
51-76	6,2	5,62	-0,58	2,22	0,68	0,01	2,91	0	1,2	4,12	70,74	0	24	7,28	12,52
76-89	6,27	5,35	-0,92	1,48	0,63	0,01	2,12	0	1,3	3,42	61,92	0	19	4,51	7,75
89-128	6,25	5,27	-0,98	1,1	0,62	0,01	1,73	0	1,07	2,81	61,82	0	24	2,89	4,98
128-170	6,31	5,33	-0,98	0,79	0,54	0,00	1,33	0	0,83	2,16	61,84	0	15	2,63	4,53

ΔpH: diferença entre pH em H₂O com pH em KCl; Ca: cálcio; Mg: magnésio; K: potássio; Al: alumínio; P: fósforo; C: carbono orgânico; MO: matéria orgânica; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V: índice de saturação por bases; m: índice de saturação por alumínio;

Tabela 18. Características físicas do solo de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas, Brasil.

Perfil	Ds	Dp	VTP	Areia	Silte	Argila	S/A
	mg kg ⁻¹		%	g kg ⁻¹			
0-14	1,11	2,58	56,79	689,05	136,51	174,44	0,78
14-38	1,21	2,53	52,13	693,16	132,88	173,96	0,76
38-51	1,40	2,60	46,11	747,59	99,25	153,16	0,65
51-76	1,63	2,66	38,81	725,08	77,64	197,28	0,39
76-89	1,76	2,60	32,35	646,32	140,64	213,04	0,66
89-128	1,73	2,63	34,32	623,60	121,20	255,20	0,47
128-170	1,64	2,59	36,52	628,54	76,06	295,40	0,26

Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partícula; VTP: volume total de poros; S/A: relação silte e argila.