

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS SOB DIFERENTES
AMBIENTES NA REGIÃO SUL DO AMAZONAS

Ivanildo Amorim de Oliveira

Engenheiro Agrônomo

2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS SOB DIFERENTES
AMBIENTES NA REGIÃO SUL DO AMAZONAS

Ivanildo Amorim de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

Co-orientador: Milton César Costa Campos

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)

2013

Oliveira, Ivanildo Amorim de
O48c Caracterização de solos sob diferentes ambientes na região Sul do Amazonas / Ivanildo Amorim de Oliveira. -- Jaboticabal, 2013
x, 105 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2013
Orientador: José Marques Júnior
Banca examinadora: Gener Tadeu Pereira, Zigomar Menezes de
Souza
Bibliografia

1. *Geoestatística*. 2. Multivariada. 3. Terra Preta Arqueológica. I.
Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.47:528

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS SOB DIFERENTES AMBIENTES NA REGIÃO
SUL DO AMAZONAS

AUTOR: IVANILDO AMORIM DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

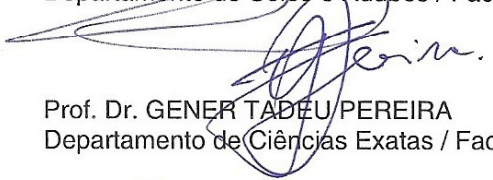
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. MILTON CESAR COSTA CAMPOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA
(CIÊNCIA DO SOLO) , pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. GENE TADEU PEREIRA

Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA

Universidade Estadual de Campinas / Campinas/SP

Data da realização: 15 de julho de 2013.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

IVANILDO AMORIM DE OLIVEIRA – nascido no dia 24 de junho de 1988 em Jaru – RO, graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal do Amazonas – Câmpus de Humaitá, AM (2012). Foi bolsista de iniciação científica no período de 2008 a 2011. Atualmente é aluno de Mestrado do curso de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo pela FCAV/UNESP Jaboticabal (Bolsista FAPESP). Membro do grupo de pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP Câmpus de Jaboticabal.

*“Aplica teu coração ao ensino e teus ouvidos às
palavras que trazem conhecimento.”
(Provérbios 23:12)*

DEDICO

A Ludmila de Freitas, pelo companheirismo, força, apoio e dedicação que foram fundamentais para alcançar mais este objetivo.

OFEREÇO

A minha família, especialmente ao meu pai Ivanilson Teixeira de Oliveira, minha mãe Ivete Silva de Amorim Oliveira, meus irmãos Ivanilde e Idenildo que mesmo distante, me deram incentivo e carinho em todos os dias da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pois se não fosse por ele nada disso seria possível.

Aos meus pais, irmãos e todos familiares pela força, incentivo e paciência na elaboração final do trabalho.

A Ludmila de Freitas, pela força, carinho e atenção nos momentos de mais difíceis.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho pela oportunidade.

Ao Prof. José Marques Júnior pela oportunidade, orientação e disposição durante a realização do curso e deste trabalho.

Ao Prof. Milton César Costa Campos pelo incentivo, correções e sugestões referentes ao trabalho.

Aos Professores Gener Tadeu Pereira e Zigomar Menezes de Souza pela contribuição na participação da banca de avaliação do trabalho.

Ao professor Antônio Sérgio Ferraudo, pelo curso e sugestões nas análises estatísticas multivariadas.

Aos professores do departamento de solos e adubos e a todos os professores que ministraram disciplinas no decorrer do curso.

À Fundação de Amparo à pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM- pela concessão da bolsa de estudos.

Aos amigos do Grupo CSME, pelo incentivo, ensinamentos e trabalho em equipe.

Aos amigos Renato Eleotério de Aquino, Jordana de Araújo Flores, Ederlon Flávio da Veiga Moline e Eliza Barboza pelo apoio.

Aos colegas de laboratório do IEAA/UFAM e UNESP pela força nas análises laboratoriais.

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

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2. REVISÃO DE LITERATURA	3
1.2.1 Caracterização da região do Médio Rio Madeira - Sul do Amazonas	3
1.2.2 Terras Pretas Arqueológicas.....	9
1.2.3 Técnicas estatísticas aplicadas à ciência do solo	12
1.2.4 Suscetibilidade magnética na ciência do solo	20
1.3 REFERÊNCIAS.....	23
CAPÍTULO 2 – VARIABILIDADE ESPACIAL E PLANEJAMENTO AMOSTRAL DA SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E DOS ATRIBUTOS DO SOLO EM DIFERENTES AMBIENTES NA REGIÃO SUL DO AMAZONAS	35
2.1 INTRODUÇÃO	36
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	38
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
2.4. CONCLUSÕES	56
2.5. REFERÊNCIAS.....	57
CAPÍTULO 3 – ANÁLISES MULTIVARIADAS DA SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO PARA CARACTERIZAÇÃO DE AMBIENTES NA REGIÃO SUL DO AMAZONAS	65
3.1. INTRODUÇÃO	66
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	69
3.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
3.4 CONCLUSÕES	86
3.5. REFERÊNCIAS.....	87

CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS SOB DIFERENTES AMBIENTES NA REGIÃO SUL DO AMAZONAS

RESUMO - O uso de técnicas estatísticas para quantificar os teores dos atributos do solo é uma importante ferramenta na determinação de manejo e uso adequado do solo. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a variabilidade espacial da suscetibilidade magnética e atributos físicos e químicos do solo e técnicas multivariadas para caracterizar diferentes ambientes na região Sul do Amazonas. O estudo foi realizado em um Argissolo Vermelho submetido a diferentes ambientes: solo com horizonte antrópico ou terra preta arqueológica (TPA) na superfície, solo em ambiente natural ou floresta e solo em uso pecuário com pastagem de braquiária (*Brachiaria brizanta*). Nestas áreas foram estabelecidas malhas de 70 m x 70 m, com espaçamento regular de 10 m. Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,40-0,60 m nos pontos de cruzamentos da malha. Foram determinados os atributos químicos (pH em água, matéria orgânica, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e acidez potencial, físicos (textura, macroporosidade, microporosidade, diâmetro médio ponderado, densidade do solo e densidade de partículas) e suscetibilidade magnética. Os dados foram submetidos análises de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para verificar a diferença dos atributos estudados entre os ambientes. A variabilidade dos dados foi caracterizada pela estatística descritiva e a variabilidade espacial por técnicas geoestatísticas que serviu de base para a determinação dos semivariogramas escalonados. O coeficiente de variação e o alcance do semivariograma escalonado, foram utilizados para determinar a densidade amostral mínima de coleta que possa promover a caracterização da variabilidade espacial dos atributos estudados para os três ambientes. Por outro lado, os dados foram submetidos as técnicas de estatísticas multivariadas afim de caracterizar os ambientes. Os resultados mostram que a área com terra preta arqueológica necessita de maior número de amostras de solo para caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo (5 pontos ha⁻¹). A SM apresenta comportamento espacial similar aos atributos, sendo a sua densidade amostral próxima a densidade amostral dos atributos físicos e químicos nos ambientes estudados. O estudo mostra que a área com floresta e pastagem apresentam comportamento similar e diferem da área com terra preta arqueológica, o que demonstra a maior fertilidade de horizontes antrópicos em solos amazônicos. Os atributos que melhor caracterizam os ambientais são o cálcio para terra preta arqueológica, acidez potencial na área com floresta e argila para a pastagem.

Palavras-chave: geoestatística, multivariada, terra preta arqueológica.

CHARACTERIZATION OF SOILS UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTS IN SOUTHERN AMAZON

ABSTRACT - The use of statistical techniques to assess measuring the behavior of attributes of the soil is an important factor in the determination of management and proper use of soil. Thus, this work has as objective to evaluate the spatial variability of the magnetic susceptibility and physical and chemical attributes of soil and apply multivariate techniques to characterize different environments in the Southern region of Amazonas. The study was carried out in a Red Argisol submitted to different environments: soil horizon with anthropic or archaeological black earth (TPA) on the surface, soil in the natural environment or the forest and soil in use with livestock grazing brachiaria (*Brachiaria brizantha*). These areas were established grids of 70 x 70 m, with regular spacing of 10 m. Soil samples were collected at depths of 0-20 and 40-60 cm. Were determined chemical attributes (pH in water, organic matter, phosphorus, potassium, calcium, magnesium and potential acidity) and physical (texture, macroporosity, microporosity, mean weight diameter, bulk density, particle density and magnetic susceptibility). The data were submitted analyzes of variance, and the averages compared by Tukey test at 5% probability. For characterization of the variability, was performed the descriptive statistics and geostatistics that served as the basis for the determination of the scaled semivariograms. The coefficient of variation and the range of scaled semivariogram, were used to determine the density minimum sample collection that can promote the characterization of the spatial variability of the studied attributes for the three environments. On the other hand, the data were analyzed by subjecting them to multivariate statistical techniques in order to characterize the environments. The results show that the area with black earth archaeological requires more number of soil samples for characterization of the spatial variability of attributes (5 points ha⁻¹). The SM presents spatial behavior similar to attributes, being its density sample next to sample density of attributes we studied environments. The study shows that the area with forest and pasture exhibit similar behavior and differ from the archaeological area with black earth, which shows the greater fertility of horizons anthropic in Amazonian soils. The attributes that best characterize the environmental are the calcium black land archaeological, potential acidity in the area with forest and clay for pasture.

Keywords: geoestatistics, multivariate, Archaeological Black Earths.

Lista de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 1. Médias dos atributos físicos, químicos e suscetibilidade magnética em áreas sob diferentes ambientes na região Sul do Amazonas.45

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos físicos, químicos e suscetibilidade magnética em áreas sob diferentes ambientes na região Sul do Amazonas.49

Tabela 3. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas atributos físicos, químicos e suscetibilidade magnética em áreas sob diferentes ambientes na região Sul do Amazonas.51

Tabela 4. Densidade amostral mínima com base no coeficiente de variação e alcance dos semivariogramas para atributos físicos, químicos e suscetibilidade magnética em áreas sob diferentes ambientes na região Sul do Amazonas.55

Capítulo 3

Tabela 1. Autovalores e % da variância pela Análise dos Componentes Principais para as análises químicas do solo.78

Tabela 2. Correlação entre cada componente principal e variáveis analisadas nos três ambientes estudados.79

Tabela 3. Coeficientes de correlação dos atributos do solo e suscetibilidade magnética do solo nas duas profundidades estudadas com um (1) fator (Fator 1) nos ambientes estudados na região Sul do Amazonas.81

Tabela 4. Autovalores e % da variância pela análise de discriminante canônica para os atributos do solo nos ambientes estudados.....83

Tabela 5. Valores resultantes da análise discriminante canônica, evidenciando o peso de cada variável.85

Tabela 6. Resultado da análise multivariada contrastando as áreas estudadas com todas as variáveis em conjunto.85

Lista de Figuras

Capítulo 1

Figura 1. Perfil esquemático mostrando a vegetação, relevo e as classes de solos em uma topossequência típica da transição campos/floresta na região Sul do Amazonas.	4
Figura 2. Pluviosidade da região Sul do Estado do Amazonas.	6
Figura 3. Caracterização geológica do Médio Rio Madeira.	7
Figura 4. Etapas na modelagem da variabilidade espacial utilizando a krigagem como interpolador.	26
Figura 5. Coeficientes e parâmetros do ajuste do modelo de semivariograma.	14
Figura 6. Modelos de semivariogramas que melhor se ajustam aos atributos do solo.	17
Figura 7. Tipos de comportamento magnético na presença de um campo magnético externo (ímã).	22

Capítulo 2

Figura 1. Mapa de localização e modelo de elevação digital das áreas estudadas na região de Manicoré, Amazonas.	39
Figura 2. Medidor de susceptibilidade magnética MS2 da Bartington Instruments Ltd.	41
Figura 3. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonado ajustados aos atributos do solo na TPA [modelo (efeito pepita - patamar – GDE - R^2 – alcance - resíduo)]. GDE = grau de dependência espacial; R^2 = Coeficiente de determinação.	52
Figura 4. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonado ajustados aos atributos do solo em floresta [modelo (efeito pepita - patamar – GDE - R^2 – alcance - resíduo)]. GDE = grau de dependência espacial; R^2 = Coeficiente de determinação.	53
Figura 5. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonado ajustados aos atributos do solo em pastagem [modelo (efeito pepita - patamar – GDE - R^2 – alcance (m) - resíduo)]. GDE = grau de dependência espacial; R^2 = Coeficiente de determinação.	54

Capítulo 3

Figura 1. Mapa de localização e esquema de amostragem do solo nas áreas estudadas na região Sul do Amazonas.....	70
Figura 2. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo as variáveis analisadas na profundidade de 0,0 – 0,20 m.	75
Figura 3. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo as variáveis analisadas na profundidade de 0,40 – 0,60 m.	75
Figura 4. Proporção da variação no conjunto de dados explicada pelo componente principal (PC) e contribuição de cada variável para explicação da variância total pelo método “scree plot”. A = profundidade de 0,0 – 0,20 m; B = profundidade de 0,40 – 0,60 m.	77
Figura 5. Análise de componentes principais das médias dos atributos do solo nos ambientes estudados. A = profundidade de 0,0 – 0,20 m; B = profundidade de 0,40 – 0,60 m; TPA= terra preta arqueológica; P= pastagem; F= floresta.	80
Figura 6. Carta controle da variabilidade dos atributos em cada ambiente estudado na região Sul do Amazonas	82
Figura 7. Agrupamento das áreas pela Análise Discriminante Canônica 1 e 2 das variáveis químicas, físicas e SM nos ambientes estudados. A = profundidade de 0,0 – 0,20 m; B = profundidade de 0,40 – 0,60 m.	84

CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 INTRODUÇÃO

A região Sul do Amazonas se difere das demais regiões do estado. Além da questão logística e transporte, esta apresenta algumas particularidades na paisagem, como a presença de campos naturais e áreas de florestas densas. No entanto, a região está localizada ao longo do arco do desmatamento (BECKER, 2005), sendo o fenômeno atribuído a diversos fatores, tais como a conversão de floresta em pastagens, o corte e a queima da floresta para cultivos, a abertura de estradas ilegais, as quais expõem extensas áreas de floresta intacta a exploração madeireira predatória e a grilagem de terras (ALENCAR et al., 2004, COHEN et al., 2007).

O cenário indica que as florestas dos municípios do Sul do Amazonas estão criticamente ameaçadas, assim como sua grande diversidade biológica que possui ambientes heterogêneos e espécies endêmicas de extrema relevância para a conservação da biodiversidade amazônica (NELSON; OLIVEIRA, 1999). A conversão de floresta em algum manejo agropecuário vem sendo destaque de alguns estudos na região, além da caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo nestes ambientes alterados.

No trabalho realizado por Campos et al. (2012) na região sul do Amazonas, os autores observaram variabilidade espacial na resistência do solo à penetração em solo cultivado com mandioca. Já Campos et al. (2013a), encontraram variabilidade espacial em atributos físicos, em solo sob sistema agroflorestal, e afirmam, que estes atributos, podem sofrer alterações, quando submetidos a outras formas de manejo. Campos et al. (2013b), avaliando a variabilidade espacial dos atributos físicos em área com floresta, encontraram variabilidade espacial nos atributos estudados, no entanto, este estudo avaliou somente o comportamento do solo em ambiente natural, não sendo comparado a solo em ambiente alterado.

Já no trabalho de Campos et al. (2011a), que realizaram uma caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira, observaram que solos com horizontes antrópicos amostrados na região são de caráter eutrófico e teores altos a muito altos de fósforo disponível, sempre maiores que os dos horizontes subjacentes. Já Campos et al. (2012), caracterizaram física e

quimicamente as terras pretas arqueológicas e solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas, e concluíram, que os solos com horizonte antrópico, apresentam melhor qualidade física, e que os atributos químicos em geral, são superiores aos horizontes não antropogênicos, conferindo-lhes, maior fertilidade.

Essas Terras Pretas Arqueológicas (TPA) ou Terra Preta de Índio (TPI) são horizontes localizados na superfície de vários solos na região, como Argilssolos, Neossolos, Latossolos, Cambissolos, Plintossolos e Espodossolos (CAMPOS, 2009; LIMA, 2001, KERN et al., 2003), apresentam alta fertilidade natural sendo estes solos encontrados em toda a região amazônica (PETERSEN et al., 2001, LEHMANN et al., 2003, GLASER et al., 2004, GLASER, 2007, WOODS et al., 2009), normalmente associados a corpos d'água ou em terrenos com maiores cotas de altitude, tendo como característica marcante a coloração escura e presença de fragmentos de cerâmica e/ou líticos incorporados a matriz dos horizontes superficiais (KAMPF; KERN, 2005), sendo estes fragmentos, possivelmente deixados por tribos indígenas que anteriormente, habitavam estes locais.

Poucos são os estudos em ambientes naturais (floresta), ambientes alterados (manejo com pastagem ou outro tipo de cultivo) e em ambientes com a presença de horizonte antrópico, principalmente, quando este está relacionado ao impacto ou alteração que pode ocorrer nestes ambientes com algum manejo específico, sendo estes estudos sempre voltado a caracterização de atributos do solo.

O estudo e a avaliação de impactos ocorridos em ambientes alterados, como a conversão de florestas em pastagem ou outro manejo, além, de melhorar o entendimento do comportamento de solos com horizontes antropogênicos, quando comparados a solos adjacentes. Para isso, técnicas como a geoestatísticas, que esta baseada na teoria das variáveis regionalizadas (VIEIRA, 2000), tem como objetivo, o estudo da variabilidade de atributos do solo no espaço. Porém, estudos sobre a variabilidade espacial necessitam de grande número de amostras, o que implica a elevação do custo, tempo de coleta e realização das análises dos atributos do solo e impacto ambiental provocado pela utilização de reagentes. Para amenizar este problema, um método alternativo para estimar atributos do solo é a suscetibilidade magnética (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000). Dearing et al. (1996), ressaltam que a suscetibilidade magnética é ideal para a realização de estudos que requerem uma grande quantidade de amostras.

Porém, o uso da ferramenta geoestatística esta ferramenta não tem como função, o agrupamento de um conjunto de variáveis e separá-las por similaridade, distinguindo ambientes que apresentam características similares e aqueles que diferem. No estudo da caracterização de ambientes por similaridade o uso de técnicas multivariadas é mais indicado por muitos pesquisadores. Esta é um tipo de análise que tem como vantagem a redução dimensional do problema e a facilidade de interpretação dos resultados obtidos de um banco de dados (BUENO, 2001). A análise multivariada é usada para transformar, por exemplo, os dados a duas dimensões e, assim, fazer uma estimativa da similaridade dos dados (GOLOBOËANIN et al., 2004), agrupando ambientes ou dados, de acordo com sua semelhança ou sua similaridade.

Sendo assim, o objetivo do trabalho é avaliar o comportamento de atributos do solo em três diferentes ambientes na região Sul do Amazonas, aplicando técnicas geoestatística com uso de semivariograma escalonado para estimar a variabilidade espacial e o uso de técnicas multivariadas, para caracterizar estes ambientes, segundo sua homogeneidade ou semelhança.

1.2. REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1 Caracterização da região do Médio Rio Madeira - Sul do Amazonas

A região do Médio Rio Madeira ocupa 12% da área total do estado do Amazonas, com aproximadamente 177.526,80 km², abrangendo os municípios de Humaitá, Manicoré, Apuí e Novo Aripuanã (CAMPOS et al., 2011b). De forma genérica esta região apresenta três diferentes fisiografias a Várzea/Terra Firme; Campo/Floresta e áreas de relevo movimentado.

De acordo com Rodrigues e Oliveira (1997), as áreas de Várzea/Terra Firme apresentam características marcantes. As várzeas referem-se às áreas que margeiam os rios de “águas barrentas”, ricas em material suspenso e sujeitas à inundação sazonal; enquanto que as áreas de terra firme não sofrem inundação e são formadas por sedimentos do Terciários. Por outro lado, segundo Braun e Ramos (1959), as áreas de campo/floresta (Figura 1) são caracterizadas por unidades de campo, separadas umas das outras por zonas florestadas, ou mesmo por zonas de cerrado, cujos contatos nem sempre são gradativos.

De forma geral destacam-se na região dois padrões fitofisionômicos principais as Florestas e os Campos. Na tipologia vegetal de Florestas, destacam-se as Florestas Tropicais Abertas e Densas. As Florestas Tropicais Densas se desenvolvem em função da conjugação de fatores climáticos extremamente favoráveis ao desenvolvimento de atividades biológicas, como abundância de luminosidade, água e temperatura (CAMPOS, 2009). Já as Florestas Tropicais Abertas, por sua vez, são caracterizadas fisionalmente pela presença de grandes árvores espaçadas, possibilitando a penetração de luz até os estratos inferiores, permitindo o aparecimento de cipoal, cocal ou bambuzal, nestes espaços abertos (BRASIL, 1978).

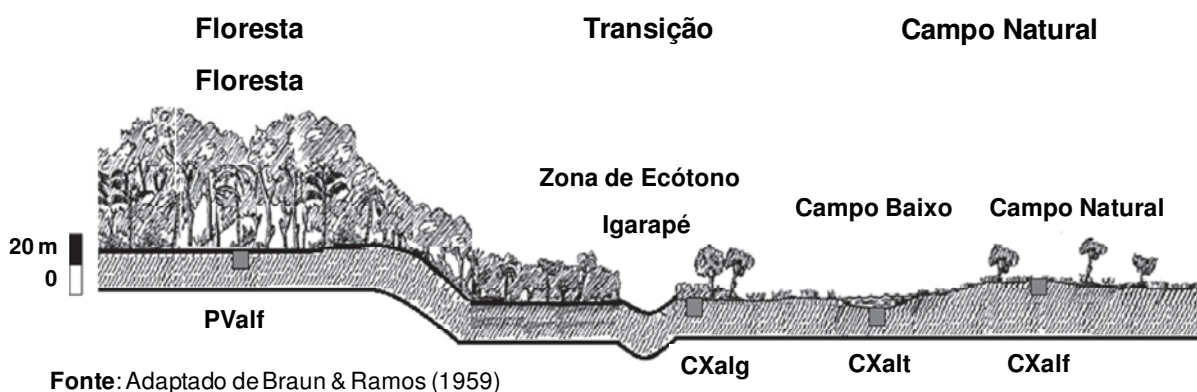


Figura 1. Perfil esquemático mostrando a vegetação, relevo e as classes de solos em uma topossequência típica da transição campos/floresta na região Sul do Amazonas.

Na região ocorre também contato Campo/Floresta (Figura 1). A região dos Campos compreende as áreas dos “Campos de Puciari – Humaitá” e inclui várias formações campestres, onde a vegetação que prevalece é a gramíneo-lenhosa baixa, que se alternam, às vezes, pequenas árvores isoladas e galerias florestais ao longo dos rios (BRAUN; RAMOS, 1959). De acordo com Freitas et al. (2002), esses campos formam alguns mosaicos com as florestas circundantes. O contato entre essas vegetações ocorre, em alguns locais, de maneira abrupta, mas em outros a mudança da vegetação entre a floresta e o campo é gradual (ecótono).

A vegetação rasteira, constituída principalmente por gramíneas, distribui-se em forma de moitas espaçadas de 40 a 60 cm, umas das outras (CAMPOS, 2009). A flora dos campos tem ciclo vegetativo como que interrompido durante os meses de seca, quando as reservas de água do solo são esgotadas, com o abaixamento do lençol freático e evaporação intensa, agravados pelas queimadas periódicas,

acidentais ou provocadas, que ocorrem nos campos (CAMPOS, 2009). Embora a queda de folhas seja total durante o período seco, observam-se no solo poucos detritos vegetais formadores de húmus.

De maneira geral, a variação dos solos reflete em grande parte as características do material de origem, sendo, também, influenciada por outros fatores como as condições bioclimáticas e o relevo. Na região amazônica estas condições não são diferentes, sendo incrementadas por outros fatores, tais como nível elevado do lençol freático, inundações periódicas e arraste de sedimentos pelas águas, que limitam a evolução pedogenética (LIMA, 2001), ocasionando assim, a presença de solos jovens e, em alguns casos, sedimentos em processo incipiente de pedogênese.

De acordo com Lima et al. (2006), os solos de várzeas normalmente apresentam teores elevados de silte e de areia fina e são, frequentemente, eutróficos, apresentando elevados valores de capacidade de troca de cátions e de cátions trocáveis, especialmente Ca^{2+} e Mg^{2+} . Em contraste os solos bem drenados de terra firme, apresentam reação mais ácida, níveis mais baixos de cátions básicos, elevados teores de saturação por alumínio e argilominerais de baixa atividade (LIMA, 2001).

Além disso, na região Sul do Amazonas, as florestas ainda guardam algumas peculiaridades, como é o caso das Terras Pretas Arqueológicas (TPAs) ou Terras Pretas de Índio (TPIs), que são classes de solos cuja característica marcante é a coloração escura e a presença de fragmentos de cerâmica e/ou líticos e artefatos indígenas incorporados à matriz dos horizontes superficiais do solo (KAMPF; KERN, 2005). De acordo com Glaser (2007), esses solos normalmente apresentam elevada fertilidade natural, com altos teores de P, Ca, Mg e matéria orgânica estável, além de intensa atividade biológica quando comparados aos solos adjacentes.

A formação desses solos ainda não é bem explicada, mas a hipótese mais aceita se baseia em evidências pedológicas e arqueológicas de que as Terras Pretas Arqueológicas teriam sido formadas não intencionalmente pelo homem pré-colombiano (KERN; KAMPF, 1989).

Em relação ao clima, a região do Médio Rio Madeira está situada na zona climática, pertencente ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso), segundo Köppen, sendo caracterizada pelo tipo Am (chuvas do tipo monção), que apresenta um período seco de pequena duração (BRASIL, 1978), de junho até outubro. A elevada

pluviosidade é um dos aspectos mais característicos da região, limitada pelas isoietas de 2.200 e 2.800 mm (Figura 2) com temperaturas médias anuais variando entre 25° e 27°C, e uma umidade relativa do ar variando entre 85 e 90% (BRASIL, 1978).

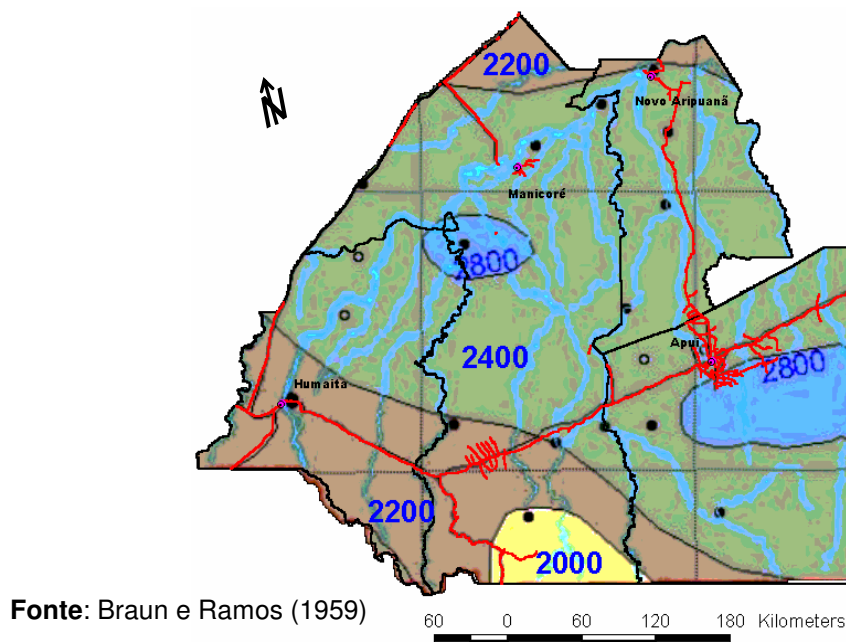


Figura 2. Pluviosidade da região Sul do Estado do Amazonas.

A geologia da região do Médio Rio Madeira apresenta materiais de diversas idades geológicas e de diferentes naturezas. Dentre os substratos geológicos que predominam na região podem ser destacados (Figura 3):

a) Aluviões Holocênicos - são provenientes de deposições fluviais recentes são constituídos de argilas, siltes e areias predominantemente finas, de granulação geralmente decrescente da base para o topo, com cascalhos subordinados. Tem cor cinza-esbranquiçado a cinza-escuro com mosqueamento frequente vermelho, apresentando localmente lâminas limoníticas. São constituídos por sedimentos inconsolidados da planície fluvial, depósitos de canais e transbordamentos (BRASIL, 1978).

b) Sedimentos da Formação Solimões são referidos ao Plioceno Médio – Pleistoceno Superior são provenientes de deposição em ambiente continental fluvial ou lacustre, fácies planície de inundação. Formam depósitos em pontal e canal formados por arenitos muito finos a médios com níveis grosseiros a conglomeráticos,

matriz argilosa, cores variegadas, vermelho, amarelo, marrom e cinza-esverdeado, localmente feldspáticos, micáceos e ferruginosos, maciços ou acamados, geralmente inconsolidados (BRASIL, 1978).

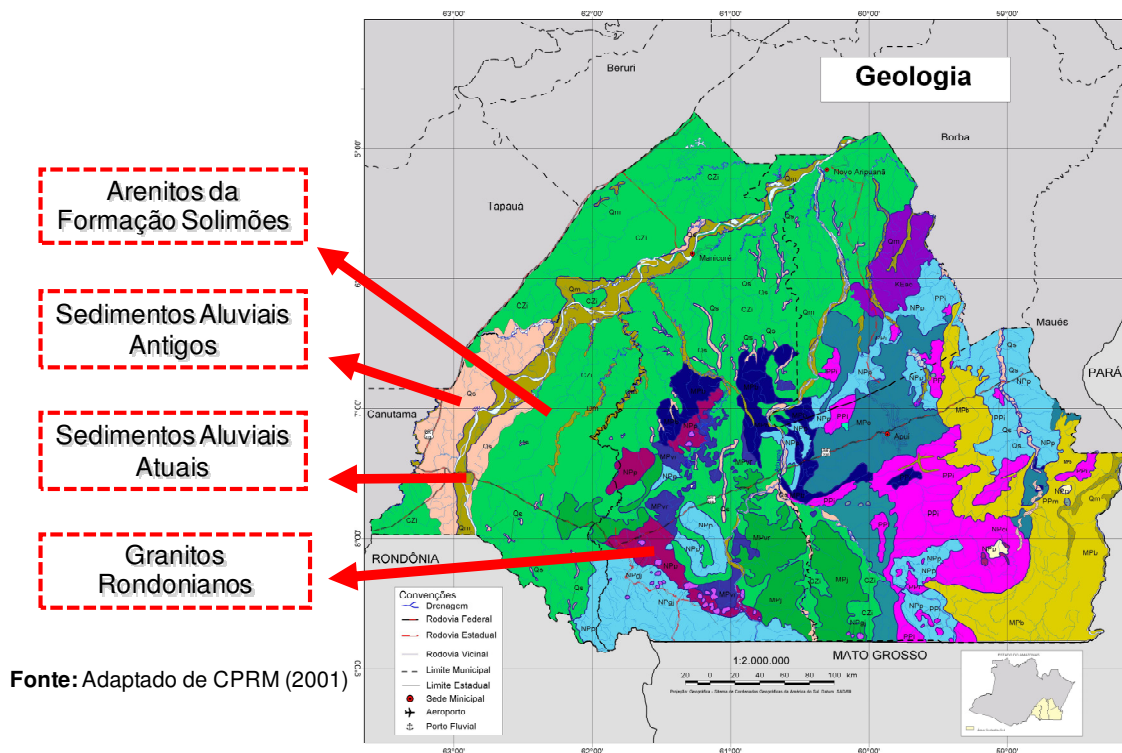


Figura 3. Caracterização geológica do Médio Rio Madeira – Sul do Amazonas.

c) Aluviões Indiferenciados ou Antigos - são cronologicamente oriundos do Holoceno e advindos de dois ciclos de sedimentação: a) bancos arenosos, inferiores, que representam a sedimentação plúvio-fluvial e b) sedimentos argilosos superiores, indicando sedimentação lacustrina. Este ambiente é constituído por argilas, siltes e areias muito finas a grossas, com diminuição granulométrica para o topo (BRASIL, 1978).

c) Granitos Rondonianos – Os Granitos Rondonianos caracterizam-se pela presença de granitos, com muscovita e biotita, adamelitos e granodioritos, de origem intrusiva, cratogênicos em forma de “stocks” e batolitos (BRASIL, 1978).

O relevo da região se diversifica e possui configurações bem distintas. De acordo com Schubart (1983) grande parte da Amazônia encontra-se em altitude abaixo de 200m e, conforme a estrutura geológica pode ser dividida nas seguintes unidades de relevo:

a) Planícies de Inundação Atuais, ou Várzeas ou Igarapós - Têm como característica a constituição por sedimentos recentes (holocênicos), pouco acima do nível das águas e intermitente inundadas. A idade desses terrenos está estimada em 6.000 anos. É uma unidade geomorfológica importante de ocorrência na região do Médio Rio Madeira, que é formada por uma área aplainada resultante de acumulação fluvial, periódica ou permanentemente alagada, geralmente comportando diques marginais em processos de colmatagem (BRASIL, 1978). Em parte desta área, encontram-se formas de dissecação de interflúvios tabulares, com relevos de topo aplainado, separados geralmente por vales em “V” e/ou localmente por vales de fundo plano, mapeados com diferentes índices de dissecação (BRASIL, 1978).

b) Terraços Pleistocênicos ou Terraços Fluviais - Têm como característica a formação em vários períodos inter-glaciais, tendo o último ocorrido há 100 mil anos, quando o nível do mar estava a cerca de 15m acima do normal (CCPA, 2006). Outra unidade geomorfológica que ocorre na região que de acordo com Brasil (1978), encontram-se na transição entre as formas de dissecação de interfluvios tabulares, com relevos de topo aplainado. Braun e Ramos (1959) afirmam que o relevo desta área é próximo ao do tipo “tabuleiro”, com desnível muito pequeno e bordos ligeiramente abaulados. Essas terras mais altas constituem os divisores topográficos de água entre rios da região. O desnível dessas zonas elevadas, relativamente ao vale dos igarapés, é da ordem de 15 a 20 metros, ocorrendo, entretanto, de maneira súbita.

Ainda em relação aos Terraços Fluviais, Braun & Ramos (1959) afirmam que estes não são rigorosamente planos. Possuem tênue ondulação superficial e são dotados, em certos locais, de ligeiras depressões (CAMPOS, 2009). Em algumas unidades seus bordos abaulados apresentam-se visivelmente destacados do relevo local. Devido a essas especificidades, vale um detalhamento maior, pois neste ambiente ocorrem os campos naturais, que são dotados de relevo incipiente, em formação, submetidos a processo erosivo lento, executado por pequenos córregos temporários (BRAUN; RAMOS, 1959).

c) Planalto Amazônico ou Planaltos Residuais Sul Amazônicos - Formado por sedimentos argilosos, com altitude entre 150 a 200m a leste, mais baixo a oeste,

distribuído na área da bacia sedimentar do Amazonas, contida entre os escudos das Guianas e o escudo Brasileiro (CCPA, 2006). A rede de drenagem da Bacia Amazônica iniciou o seccionamento deste planalto, formando três níveis de terraço no Pleistoceno inferior. Toda essa unidade é comumente denominada como a “Planície Amazônica”, que segundo Crpm (2001) apresentam configuração de relevo variada, marcada pela presença de platôs nas partes mais elevadas, e por uma parte mais baixa, com cerca de 150 m de desnível. As regiões de platôs exibem superfícies topográficas planas, sendo a zona de borda marcada por colinas e cristas alinhadas, e localmente escarpadas com desníveis entre 50 e 100 m, enquanto que as áreas de planícies tem como principais características a presença de uma superfície pediplanada, localmente interrompida por colinas de topo plano (CPRM, 2001).

O relevo da planície Amazônica tem como principal característica a presença de uma superfície pediplanada, localmente interrompida por colinas de topo plano. No limite entre estes dois tipos de relevo desenvolve-se uma zona de transição, a Depressão Marginal Sul Amazônica, esculpida sobre os terrenos do embasamento cristalino, caracterizada por colinas, superfícies tabulares e formas de relevo residual (ZEE 2008),

d) Escudos Cristalinos – Esses escudos são periféricos, e situam-se ao norte e ao sul da bacia do Amazonas, extremamente pediplanados e nivelados com os terrenos sedimentares, de tal modo que o contato é apenas assinalado pelas cachoeiras dos afluentes do Amazonas (CCPA, 2006). As altitudes predominantes estão acima de 200m. O Pico da Neblina, ponto culminante do Brasil (com 3.014m), encontra-se no escudo das Guianas.

1.2.2 Terras Pretas Arqueológicas

A região do Médio Rio Madeira, apresenta grande diversidade de solos conforme Brasil (1978), como Latossolos, Argissolos, Plintossolos, Gleissolos, Espodossolos e Neossolos, que segundo Campos (2009), esta variação dos solos reflete em grande parte as características do material de origem, sendo, também, influenciada por outros fatores como as condições bioclimáticas e o relevo.

Muitos destes solos, como Argissolos, Latossolos, Cambissolos, Neossolos, Plintossolos e Espodossolos (LIMA, 2001, KERN et al., 2003), apresentam uma

particularidade que é a presença do horizonte A antrópico, com espessura variando entre 30 e 70 cm, sendo mais profundos que os solos adjacentes. Este horizonte A antrópico é denominado Terra Preta Arqueológica (TPA) ou Terra Preta de Índio (TPI), que tem ocorrência em toda a Amazônia, especialmente no Brasil, Colômbia, Guiana, Equador, Peru e Venezuela. De acordo com German (2003), as áreas de ocorrência das TPA apresentam extensões variadas e normalmente estão localizadas próximas a cursos de água, ocupando várzeas e elevações marginais adjacentes (Terra Firme). Esses locais apresentam duas características marcantes: 1) possibilidade de acesso aos recursos de diferentes ambientes; 2) posição que permita o controle das vias de acesso e visibilidade para defesa.

A presença destes solos ainda não é bem explicada, mas a hipótese mais aceita é baseada em evidências pedológica e arqueológica de que as TPAs teriam sido formadas não intencionalmente pelo homem pré-colombiano (KERN; KAMPF, 1989). Lima et al. (2002) afirmaram que as TPA localizam-se em antigos assentamentos, contendo artefatos culturais, cuja coloração escura se deve a material orgânico decomposto, em parte na forma de carvão, como resíduo de fogueiras domésticas e de queimadas para uso agrícola do solo.

Quanto a sua formação, Glaser (2007) enfoca três principais processos responsáveis pela formação das TPA:

a) formação do carvão - formação do carbono pirogênico, com composição e estrutura molecular complexa (grupos aromáticos), bastante reativo e que contribui com a fertilidade do solo;

b) incorporação de nutrientes de forma antrópica - neste processo os nutrientes foram incorporados ao solo por diferentes fontes, como os excrementos humanos e animais, cinzas advindas de queimadas que também incorporaram resíduos de combustão incompleta e carvão e a incorporação de biomassa de plantas aquáticas e terrestres;

c) ação dos microrganismos – estes microrganismos são responsáveis pela ciclagem de nutrientes, que agem tanto na decomposição da matéria orgânica, como na imobilização de nutrientes, evitando as perdas por lixiviação do solo.

As TPAs são horizontes sob a superfície de solos e apresentam alta fertilidade natural, normalmente associado a corpos d'água ou em terrenos de posições de maiores cotas de altitude, tendo como característica marcante a

coloração escura e presença de fragmentos de cerâmica e/ou líticos incorporados a matriz dos horizontes superficiais (KAMPF; KERN, 2005).

Estes solos apresentam valores elevados de nutrientes, como observados por Steiner et al. (2004) e Campos et al. (2011a). Estes autores encontraram altos valores de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), os quais afirmam que as TPAs exibem elevados níveis de nutrientes, principalmente Ca^{2+} e fósforo (P), provavelmente, proveniente de restos de ossos humanos e de animais, além da formação de complexos matéria orgânica e cálcio, de alta estabilidade (elevados teores de Ca^{2+}), associados ao carvão pirogênico (NOVOTNY et al., 2007). O P normalmente apresenta valores elevados em áreas de TPA, o que segundo Falcão e Borges (2006), esses altos valores de P é a característica química mais marcante na diferenciação entre essas e os solos adjacentes, que tem sido observado por muitos autores (SOMBROEK, 1966, SMITH, 1980, KERN; KÄMPF, 1989). Esta característica é atribuída à incorporação de ossos de animais (e, possivelmente, de seres humanos), de espinhas de peixes e de carapaças de quelônios (SMITH, 1980; LIMA et al., 2002).

Segundo Lima et al. (2002), afirmam que seria improvável para qualquer solo atingir valores altos de fertilidade sem influência antrópica ao qual, grande quantidade de resíduos orgânicos foram depositados durante o processo de formação destes solos, justificando a alta fertilidade.

As TPAs também apresentam elevados teores de matéria orgânica (MO) e Moreira (2007) afirma que a capacidade das TPAs em manter alto teor de matéria orgânica é devida ser constituída, em sua maior parte, por substâncias húmicas mais estáveis, de difícil degradação, além da contribuição de restos orgânicos. Com isso, a MO contribui diretamente com a alta fertilidade destes solos. Embora a maior quantidade de matéria orgânica em TPAs seja um fator relevante, pesquisas têm mostrado que a composição e as características da matéria orgânica em terras pretas também contribuem para o aumento do grau de fertilidade desses solos (MADARI et al., 2009).

Em relação aos atributos físicos das TPAs, Campos et al. (2011a) afirmam que há dominância da fração areia, em particular da areia grossa no horizonte antrópico em áreas da região do Médio Rio Madeira, com nítida variação da textura de arenosa e muito argilosa em função da posição da paisagem de ocorrência da TPA, sendo estes, horizontes bem drenados. Para German (2003) esses elevados

teores da fração areia, podem ser explicados pela contribuição de pequenos fragmentos líticos e cerâmicos. A densidade do solo (D_s) de TPAs apresentam valores mais baixos para os horizontes antropogênicos, resultante de elevados teores de carbono orgânico (CO) e da intensa atividade biológica (fauna e raízes), que constrói canais, cavidades e galerias. Outro atributo bastante relacionado ao teor de carbono orgânico é a estabilidade de agregados destes solos. Lima et al. (2002) afirmam que em TPAs apesar das condições climáticas favoráveis à destruição dos agregados do solo, o estado de organização da estrutura é tão fortemente desenvolvido que não propicia este comportamento. Além disso, a elevada atividade biológica e o teor de matéria orgânica, especialmente os ácidos húmico e fúlvico favorecem a maior agregação (CAMPOS et al. 2011a).

1.2.3 Técnicas estatísticas aplicadas à ciência do solo

A estatística mostra-se, como uma poderosa ferramenta para a análise e avaliação de dados obtidos em um determinado estudo, em várias áreas do conhecimento, sendo muitas vezes um tanto difícil para os profissionais trabalharem conceitos e elaborarem exemplos práticos. Para isso, alguns métodos estatísticos são mais usados, pois mostram maior confiança na interpretação dos resultados.

A análise estatística univariada foi por muito tempo, a medida técnica mais utilizada em estudos de solos, no entanto, esta considera somente valores aleatórios ou médios, sem se importar com a posição no espaço. A estatística clássica assume que a variabilidade ao redor da média é aleatória e independente da distribuição geográfica das unidades amostrais. Porém, para Daniels e Nelson (1987) a estatística univariada é pouco recomendada para estudos ambientais, uma vez que avalia o comportamento das variáveis duas a duas.

Neste sentido, o estudo da variabilidade de atributos do solo no espaço, é feita com base na geostatística, que esta baseada na teoria das variáveis regionalizadas (VIEIRA, 2000). Segundo Matheron (1963), o conceito de variáveis regionalizadas é uma função espacial numérica que varia de um local para o outro, com uma continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples.

No estudo da variabilidade espacial, o resultado é obtido pelo ajuste de um modelo estatístico denominado semivariograma que estuda o grau de dependência espacial entre os pontos amostrais distribuídos em um esquema sistemático e

referenciado de amostras (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989), e este modelo permite a construção de mapas de isolinhas (VIEIRA, 2000). O semivariograma mostra a medida do grau de dependência espacial entre amostras ao longo de um suporte específico e, para sua construção, são usados simplesmente às diferenças ao quadrado dos valores obtidos, assumindo-se uma estacionaridade nos incrementos (LANDIM, 2006). O semivariograma é um gráfico da função semivariância *versus* distância, representado pela seguinte equação 1:

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

em que:

$\gamma(h)$ - valor da semivariância estimada para uma distância h ;

$N(h)$ - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;

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

Para caracterizar a variabilidade de atributos do solo, devem-se seguir algumas etapas. Estabelecer a malha amostral, onde a coleta de solo deve ser realizada de forma esquemática, formando grid ou malha de amostragem (Figura 4). Cada ponto amostral deve ser preferencialmente georreferenciados com aparelho GPS e nas amostras, devem-se, determinar os atributos de interesse no estudo. Nos pontos não amostrados da área, estabelece-se a interpolação dos dados, inferindo os valores nas regiões não amostradas da área.

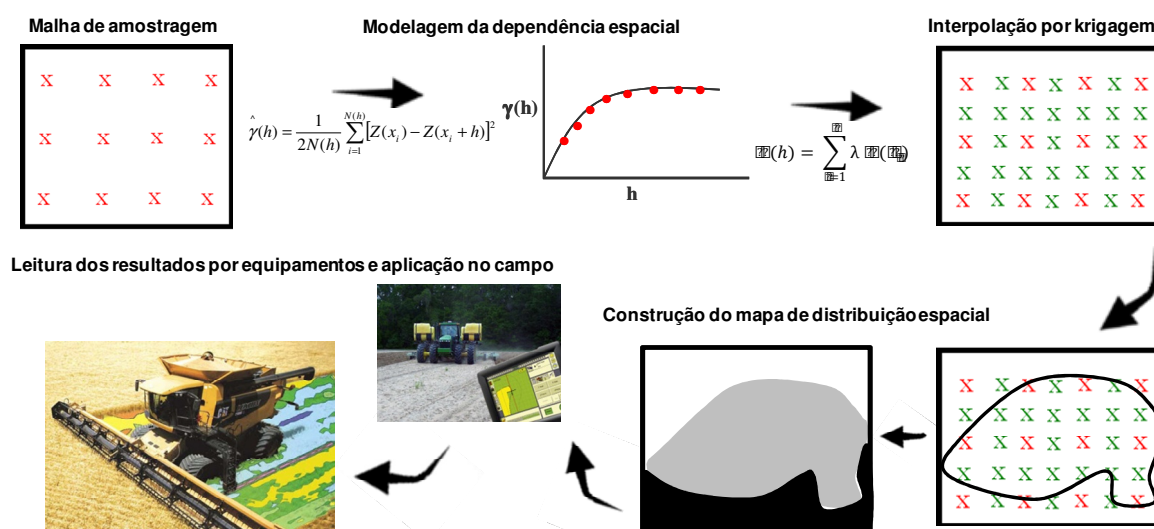


Figura 4. Etapas na modelagem da variabilidade espacial utilizando a krigagem como interpolador.

A partir do ajuste, é gerado o semivariograma, que representa a variabilidade dos atributos estudados, permitindo a construção de mapas de isolinhas. Após a construção dos mapas, estes são interpretados por equipamentos com alta tecnologia, o que segundo Cavalcante et al. (2007), permite a aplicação de insumos no local correto e na quantidade exata, promovendo o aumento da produtividade das culturas e diminuindo grandemente o risco de contaminações ambientais, para áreas cada vez menores e mais homogêneas.

No ajuste do semivariograma, são estimados os coeficientes (VIEIRA et al., 1983), sendo estes ilustrados na Figura 5. Estes coeficientes são:

- a) Efeito pepita (C_0)** - valor da semivariância para distância zero e representa o componente da variação ao acaso e pode ser atribuído a erros de medição ou ao fato de que os dados não foram coletados a intervalos suficientemente pequenos para mostrar o comportamento espacial subjacente do fenômeno em estudo;
- b) Alcance (a)** - distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, expressando a distância além da qual as amostras não são correlacionadas;
- c) Patamar ($C_0 + C_1$)** - valor da semivariância em que a semivariância se estabiliza em torno de um valor constante.

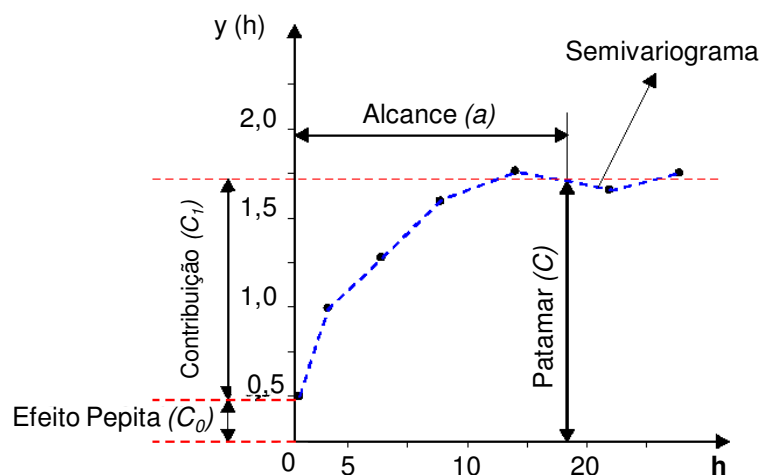


Figura 5. Coeficientes e parâmetros do ajuste do modelo de semivariograma.

O ajuste dos modelos de semivariogramas pode ser realizado, de acordo com as características das variáveis analisadas, ao qual, apresentam variabilidade específica. Alguns modelos matemáticos mais utilizados na área de ciência do solo são descritos a seguir:

a) Modelo gaussiano: a curva é parabólica junto à origem e a tangente nesse ponto é horizontal, o que indica pequena variabilidade para curtas distâncias; “a” corresponde ao alcance prático igual à distância segundo a qual 95% da soleira foi alcançada (LANDIM, 2006). O modelo é apresentado na equação 1.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1[1 - \exp(-3h/a)^2] \quad \text{para } 0 < h < d \quad (1)$$

onde:

C_0 = efeito pepita;

$C_0 + C_1$ = patamar;

a = alcance do semivariograma;

h = distância de separação entre duas observações e a é o alcance de dependência espacial.

d = é a máxima distância na qual o semivariograma é definido.

O modelo gaussiano é usado muitas vezes para modelar fenômenos extremamente contínuos. Este modelo atinge o patamar de forma assíntota. O parâmetro “a” é definido como a distância na qual o valor do modelo é 95 % do patamar (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

b) Modelo Esférico - neste modelo a inclinação da tangente junto à origem ($h \cong 0$) é $3C/2a$; é o modelo mais comum, podendo-se afirmar que equivale à função de distribuição normal da estatística clássica (VIEIRA 2000). O modelo esférico é apresentado na equação 2:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], \quad \text{para } 0 < h < d \quad (2)$$

onde:

C_0 = efeito pepita;

$C_0 + C_1$ = patamar;

a = alcance do semivariograma;

h = distância de separação entre duas observações e a é o alcance de dependência espacial.

d = é a máxima distância na qual o semivariograma é definido.

c) Modelo Exponencial - neste modelo a inclinação da tangente junto à origem é C/a ; C é a assíntota de uma curva exponencial e pode ser equalizada junto à soleira; “a” corresponde ao alcance prático igual à distância segundo a qual 95% da soleira foram alcançadas (McBRATNEY; WEBSTER 1986; VIEIRA 2000). O modelo exponencial é representado na equação 3:

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

sendo:

C_0 = efeito pepita;

$C_0 + C_1$ = patamar;

a = alcance do semivariograma;

h = distância de separação entre duas observações e a é o alcance de dependência espacial.

d = é a máxima distância na qual o semivariograma é definido.

A principal diferença entre o modelo exponencial e o esférico é que este modelo atinge o patamar de forma assíntota, com o alcance definido como a distância na qual o valor do modelo é 95 % do patamar (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

d) Modelo Linear – Nesse modelo, o patamar é determinado por inspeção; o coeficiente angular é determinado pela inclinação da reta que passa pelos primeiros pontos de $\gamma(h)$, dando-se maior peso àqueles que correspondem ao maior número de pares; o efeito pepita é determinado pela interseção da reta no eixo $\gamma(h)$; o alcance é o valor de h correspondente ao cruzamento da reta inicial com o patamar; e C_1 = patamar - C_0 , segundo Vieira (2000). O modelo linear é representado pela equação 4:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + \frac{C_1}{a}h && \text{para } 0 < h < a \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1 && \text{para } h \geq a \end{aligned} \quad (4)$$

onde:

C_0 = efeito pepita;

C_1 = patamar;

C_1/a = coeficiente angular para $0 < h < a$

a = alcance do semivariograma;

h = distância de separação entre duas observações e a é o alcance de dependência espacial.

As formas destes modelos são ilustrados na Figura 6.

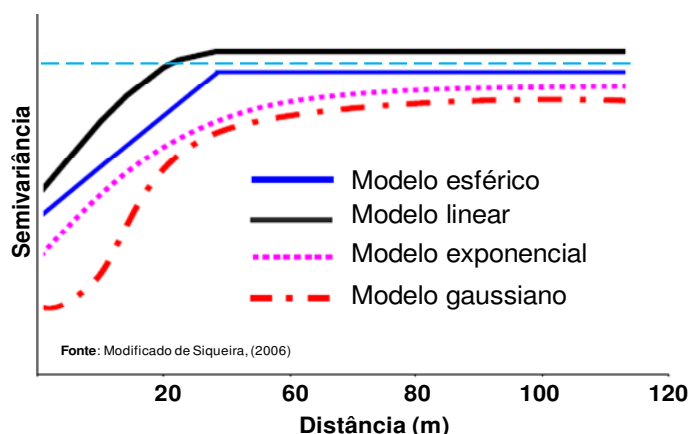


Figura 6. Modelos de semivariogramas que melhor se ajustam às semivariância dos atributos do solo.

Segundo Isaaks e Srivastava (1989) os modelos exponenciais descrevem os fenômenos mais erráticos na pequena escala, enquanto os modelos esféricos descrevem propriedades com alta continuidade espacial, ou menos erráticos na curta distância. Os modelos esféricos e exponenciais (Figura 6) apresentam-se como os modelos teóricos mais comuns aos atributos do solo (TRANGMAR et al., 1985; McBRATNEY; WEBSTER 1986). O modelo esférico é o mais citado por pesquisadores como o mais comum em trabalhos relacionados a atributos do solo e da planta (SALVIANO et al., 1998; BERTOLANI; VIEIRA 2001; CAVALCANTE et al. 2007b, VIEIRA et al., 2011).

A geoestatística mostra-se eficiente no estudo do comportamento espacial de atributos do solo. Porém, nesses estudos, é necessária a modelagem individual da dependência espacial de cada atributo quantificado, para serem relacionados as causas possíveis de variabilidade atribuídas a estes atributos. Isso faz com que seja criado um grande número de semavariograma, o que diminui a eficiência das praticas de planejamento que utilizam esta técnica. Para mitigar este problema, propõe-se a utilização de semivariograma escalonado.

O semivariograma experimental escalonado é obtido através da divisão das semivariâncias pela variância estatística dos dados (GUIMARÃES, 1993; VIEIRA et al., 1997). De acordo com Guimarães (1993) verifica-se proporcionalidade quando os semivariogramas escalonados permitem o ajuste de um único modelo para as variáveis em estudo. Sendo assim, o objetivo é que vários semivariogramas sejam representados simultaneamente para compreender melhor as causas da variabilidade espacial (CEDDIA et al., 2009).

A geoestatística é uma importante ferramenta na avaliação da variabilidade espacial de atributos do solo, porém ela não tem como função agrupar um conjunto de variáveis e separá-las por similaridade, sendo que para estudar e caracterizar o solo, é necessária a avaliação dos diversos atributos e/ou nutrientes que estejam influenciando diretamente no seu comportamento.

Uma opção de análise para esses tipos de estudos é o uso de análise multivariada, a qual tem como vantagens a redução dimensional do problema e a facilidade de interpretação dos resultados obtidos de um banco de dados (BUENO, 2001).

A estatística multivariada possui maior capacidade de descrever as relações de inter e intradependência nos sistemas agrícolas (MARQUES JÚNIOR, 2009, SIQUEIRA et al., 2010). Esta avaliação é importante na tomada de decisão da atividade agrícola, que normalmente é feita com base em resultados quantitativos de inúmeros atributos do solo, da planta e do clima. Os métodos da estatística multivariada são utilizados com o propósito de simplificar ou facilitar a interpretação de um fenômeno, por meio da análise simultânea de todas as variáveis medidas (KHATTREE; NAIK, 2000, JOHNSON; WICHERN, 2002). A análise multivariada é um vasto campo do conhecimento que envolve uma grande multiplicidade de conceitos estatísticos e matemáticos, podendo ser entendida como um processo para se atingir um grupo de informações claras e objetivas, voltadas especificamente para uma melhor tomada de decisão.

A análise multivariada pode ser realizada por alguns métodos, sendo que cada um apresenta um resultado específico, sendo estes descritos a seguir:

a) Análise Fatorial (AF) - É uma técnica multivariada que busca identificar um número relativamente pequeno de fatores comuns que podem ser utilizados para representar relações entre um grande número de variáveis inter-relacionadas

(FÁVERO et al., 2009). Mingoti (2005) destaca que a análise fatorial tem como objetivo principal descrever a variabilidade original do vetor aleatório X , em termos de um número menor de m variáveis aleatórias, chamadas de fatores comuns e que estão relacionadas com o vetor original X a partir de um modelo linear. Para Maroco (2007), a AF 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;

b) Análise de agrupamentos (AA) ou Análise de Clusters – A AA, em sua aplicação, engloba uma variedade de técnicas e algoritmos, sendo que o objetivo é unir e separar os ambientes em grupos similares ou não. A finalidade dessa técnica é verificar se há homogeneidade dentro do grupo e heterogeneidade entre os grupos, objetivando propor classificações. Segundo Valladares et al. (2008), ao se formar grupos pela AA, as características dos atributos de um mesmo grupo são semelhantes e diferentes do comportamento de outros agrupamentos. A AA constitui uma metodologia numérica multivariada, com o objetivo de propor uma estrutura classificatória, ou de reconhecimento da existência de grupos, objetivando, mais especificamente, dividir o conjunto de observações em um número de grupos homogêneos, segundo algum critério de homogeneidade (REGAZZI, 2001).

c) Análise de componentes Principais (ACP) - Dentre as técnicas multivariadas, a ACP é uma das mais utilizadas pela ciência do solo. O objetivo da ACP é encontrar em um conjunto de dados um atributo que seja capaz de explicar parte significativa da variância de toda população amostrada, por meio de correlações lineares (SIQUEIRA, 2010). Esse tipo de análise é interessante para a ciência do solo porque pode eleger as variáveis mais significativas nos processos pedogenéticos (THEOCHAROPOULOS et al., 1997). Assim, os atributos do solo analisados com a análise de componente principais (ACP) são agrupados de acordo com suas semelhanças, nas áreas estudadas, que, por sua vez, são separadas por critérios de dissimilaridade, o que levará à formação de grupos.

d) Carta controle (Teste T^2 Hotelling) - O gráfico T^2 foi desenvolvido por Hotelling (1947), o pioneiro na pesquisa sobre os gráficos de controle multivariado. O autor

utilizou da abordagem multivariada de controle em dados contendo informações sobre localizações de bombardeios na segunda guerra mundial. De acordo com Montgomery (1985) e Kume (1993), a carta de controle é uma das principais ferramentas utilizadas no controle estatístico da qualidade e pode ser um indicativo de como as variáveis se comportam em cada ambiente estudado.

e) Análise discriminante - Segundo Khattree & Naik (2000) é uma técnica da estatística multivariada classificatória que estuda a separação de variáveis analisadas no solo em dois ou mais grupos. A partir desta análise é possível definir o quanto distintas são as áreas estudadas, sendo estas representadas em um gráfico onde é possível verificar a separação entre elas.

Estas análises estatísticas multivariadas contribuem para a interpretação dos dados obtidos em trabalhos na área de ciência do solo, contribuindo para a tomada de decisão na aplicação de manejo específico.

1.2.4 Suscetibilidade magnética na ciência do solo

A suscetibilidade magnética (SM) é um atributo do solo que reflete parte da sua composição mineralógica (SOUZA JÚNIOR et al., 2010) e é resultado da rotação e translação dos elétrons que constituem alguns minerais que estão presentes nas rochas, nos sedimentos e nos solos (LUQUE, 2008). É produzida por indução do campo magnético terrestre durante a cristalização do mineral presente na rocha ou no solo, e se origina das propriedades de rotação dos elétrons (CRAIK, 1995, LUQUE, 2008).

Esta propriedade do solo é afetada por fatores como clima (EYRE; SHAW, 1994), material de origem (FONTES et al., 2000), relevo (JONG et al., 2000), regime hídrico (MAHER, 1998), influência antrópica (HANESCH; SCHOLGER, 2005) e tempo (WHITE; WALDEN, 1997). No entanto, a SM é sensível às variações dos fatores e processos de formação do solo, podendo ser expressa nas propriedades cristalográficas dos minerais presentes nos sedimentos e no solo (MAHER; THOMPSON, 1999).

Na ciência do solo, a SM pode ser usada como método alternativo para estimar atributos do solo (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000). Este método pode facilitar o conhecimento sobre a variabilidade dos atributos do solo, sendo esta útil para identificar o potencial agrícola. No entanto, a coleta de amostras é a etapa mais

intensiva e onerosa, na avaliação quantitativa dos atributos do solo para o planejamento agrícola (McBRATNEY et al., 2002).

Para isso, a SM pode garantir o desenvolvimento de forma sustentável das práticas de manejo do solo (LÓPEZ, 2009), uma vez que pode ser utilizada em ciência do solo para diminuir o custo na obtenção da informação e compreender melhor o funcionamento dos processos do solo que interferem na resposta das culturas agrícolas, sendo a SM utilizada para fazer estimativas de atributos dos solos com maior facilidade e baixo custo (SIQUEIRA, 2010).

São considerados cinco (5) tipos básicos de comportamento magnético, sendo o diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo (Figura 8) e apresentados a seguir:

1) minerais diamagnéticos - os átomos que compõem a cela unitária do mineral, possuem as camadas eletrônicas preenchidas. Assim, o número de spins eletrônicos alinhados numa direção é igual ao número de spins eletrônicos na direção oposta. O campo magnético externo não exerce influência sobre os spins nesse caso, mas inverte o movimento orbital dos elétrons (Exemplo: quartzo). A aproximação de algum corpo magnético (ímã) causa pouca atração (Figura 8).

2) minerais paramagnéticos - as camadas eletrônicas estão incompletas. A presença de um campo magnético externo faz com que os spins se alinhem, e mesmo após a retirada do campo magnético, alguns spins permanecem alinhados (Exemplo: olivina). Os dipolos podem ser alinhados na direção do campo aplicado, é uma forma muito fraca de magnetismo sendo que esses materiais fracamente atraídos pelos ímãs (Figura 8).

3) minerais ferromagnéticos – estes minerais são um caso especial de paramagnetismo. Após a retirada do campo magnético, os spins permanecem alinhados, fazendo com que o mineral possua um grande valor de magnetização remanescente (Exemplo: ferro e cobalto), ou seja, mesmo que o campo externo seja desligado, a amostra ainda apresentará uma magnetização não nula (Figura 8).

4) minerais ferrimagnéticos - os spins não estão emparelhados, assim prevalece o momento magnético do maior número de spins no mesmo sentido (Exemplo:

magnetita). Alguns deles estão opostos e se anulam entre si, no entanto, estes momentos que se anulam estão distribuídos aleatoriamente e não consegue anular por completo a magnetização espontânea (Figura 8).

5) minerais antiferromagnéticos – estes minerais não apresentam propriedades magnéticas, pois o ordenamento magnético de todos os momentos magnéticos do mineral, são na mesma direção mas em sentido inverso (Figura 8).

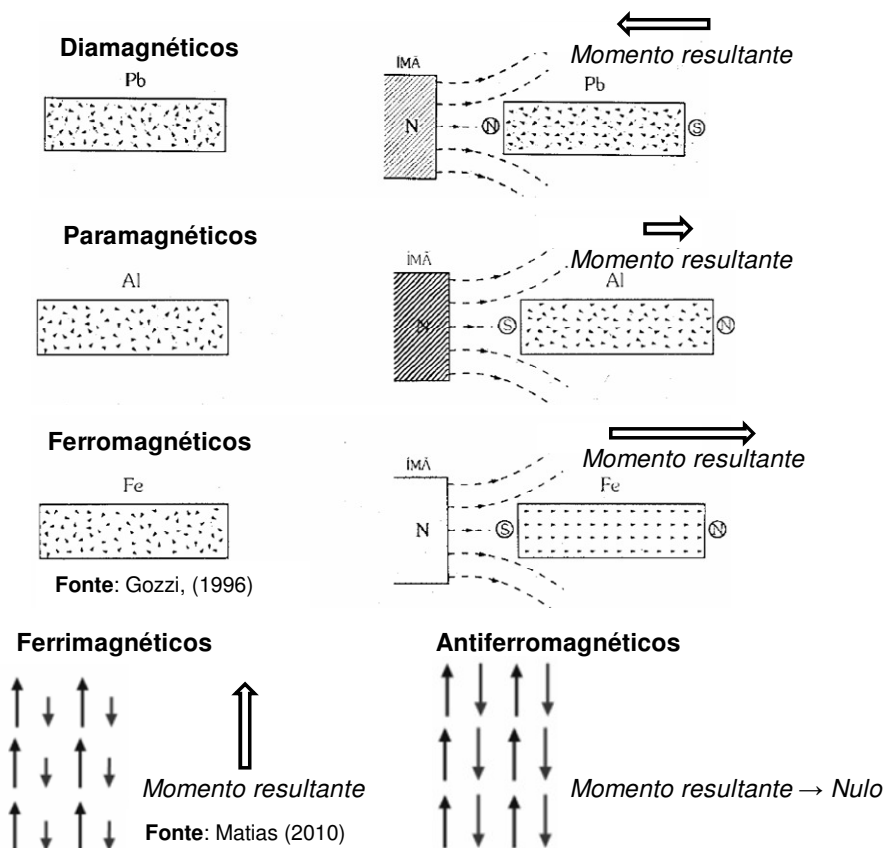


Figura 7. Tipos de comportamento magnético na presença de um campo magnético externo (ímã).

Alguns trabalhos utilizaram a SM para estimar atributos do solo. Siqueira (2010) utilizou a suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar e observou que a SM pode ser utilizada para auxiliar na estimativa do teor de argila, matéria orgânica, saturação por bases (V%) e o teor de hematita de solos. Por outro lado, Matias et al. (2013) avaliaram modelos de paisagem e suscetibilidade magnética na identificação e caracterização do solo e concluiu que a SM demonstrou ter potencial para delimitação das superfícies geomórficas mapeadas no campo, o que indica seu

potencial de uso na identificação e caracterização de áreas mais homogêneas e ambientes semelhantes.

Assim, a SM é um método alternativo eficiente para estimar atributos do solo, além de delimitar superfícies geomórficas homogêneas no campo, sendo que esta ferramenta pode ser utilizada para o uso e manejo do solo de forma sustentável, uma vez que esta diminui consideravelmente o impacto do estudo de solos.

1.3 REFERÊNCIAS

ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; MCGRATH, D.; MOUTINHO, P.; PACHECO, P.; DIAZ, M. D. C. V.; SOARES FILHO, B. **Desmatamento na Amazônia: indo além da emergência crônica**. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia – IPAM, Belém, Brasil, 2004. 89p.

BECKER, B. Geopolítica da Amazônia. **Estudos Avançados**, v.19, n.53, p.71-86, 2005.

BERTOLANI, F. C., VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 987-995, 2001.

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

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

BUENO, B. F. **Aplicação de técnicas multivariadas em mapeamento e interpretação de parâmetros do solo**. 2001. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

CAMARGO, L. A. **Mineralogia da argila e atributos físicos de um Argissolo em curvaturas de relevo**. 111 f. 2009. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2009.

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: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 11-18, 2011b.

CAMPOS, M. C. C. RIBEIRO, M. R. SOUZA JÚNIOR, M. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SOUZA, R. V. C. C.; ALMEIDA, M. C. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.3, p.598-609, 2011a.

CAMPOS, M. C. C.; **Pedogeomorfologia aplicada a ambientes Amazônicos do Médio Rio Madeira**. 2009. 260f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.

CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; OLIVEIRA, I. A.; SANTOS, L. A. C.; AQUINO, R. E. . Spatial variability of physical attributes in Alfissol under agroforestry, Humaitá region, Amazonas state, Brazil. **Revista de Ciências Agrárias (Belém)**, Belém, v. 56, n.2, p. 149-159, 2013a.

CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; SANTOS, L. A. C.; OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C. Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Argissolo Vermelho sob floresta. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v.4, n.2, p.168-178, 2013b.

CAMPOS, M. C. 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, Amazonas. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 6, n. 2, p. 102-109, 2012.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.2, p.394 – 400. 2007b.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M.C.; SOUZA, M. S.; PEREIRA, G. T.; Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1329-1339, 2007a.

CCPA. Centro Cultural dos Povos da Amazônia. **Biodiversidade Amazônica**. Manaus, vol. 1, 2006. 162p.

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**, Piracicaba, v.66, n.3, p. 338-352, 2009.

COHEN, J.C.P., BELTRÃO, J.C., GANDU, A.W., SILVA, R.R. Influência do desmatamento sobre o ciclo hidrológico na Amazônia. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 59, n.3, p. 36-39.

CORA, J. E.; ARAÚJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004.

CPRM. Centro de Pesquisa de Recursos Minerais. **Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens**. (Relatório Técnico) Manaus, 2001. 93p.

CRAIK, D. **Magnetism, principles and applications**. Lisboa. John Wiley and Sons, 1995, p. 1-459.

DANIELS, R.B.; NELSON, L.A. Soil variability and productivity: future developments, In: BOERSMA, L.L. **Future developments in soil science research**. Madison, Soil Science Society of America, p.279-291, 1987.

DEARING, J.A., HAY, K.L., BABAN, S.M.K., HUDDLESTON, A.S., WELLINGTON, E.M. H., LOVELAND, P.J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, Oxfort, v.127, n. 3, p.728–734, 1996.

EYRE, J. K. ; SHAW, J. Magnetic enhancement of Chinese loess—the role of γ Fe_2O_3 . **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 117, n. 9, p. 265–271. 1994.

FALCÃO, N. P. S.; BORGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (Carica papaya L.). **Acta Amazonica**, Manaus, v.36, n.4, p.401-406, 2006.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P.; SILVA, P.; CHAN, B. **Análise de Dados: Modelagem Multivariada para Tomada de Decisões**. 1.ed. Rio de Janeiro: Campos Elsevier, 2009. 544p.

FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S. de; COSTA, L. M. da; CAMPOS, A. A. G.; Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials, **Geoderma**, Amsterdam, v. 96, n. 3, p. 81–99. 2000.

FREITAS, H. A.; PESSENDA, L. C. R; ARAVENA, R.; GOUVEIA, S. E. M.; IBEIRO, A. S.; BOULET, R. Florestas X Savanas no passado na Amazônia. **Ciência Hoje**, São Paulo, v. 32, n. 189, p. 40-46, 2002.

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

GLASER, B. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, London, v.362, n.1478, p.187–196, 2007.

GLASER, B., GUGGENBERGER, G., ZECH, W. Identifying the pre-Columbian anthropogenic input on present soil properties of Amazonian Dark Earths (Terra Preta). In: **Amazonian Dark Earths: Explorations in Space and Time**. Springer, Berlin, p. 145-158, 2004.

GOZZI, G.G.M. **Circuitos Magnéticos**. Ed. Érica, 1996. 140p.

GRIMLEY, D.A., ARRUDA, N.K., BRAMSTEDT, M.W. Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible, and precise delineation of hydric soils in the Midwestern USA. **Catena**, Amsterdam, v.58, n.2, p.183– 213, 2004.

GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um Latossolo Roxo. 1993. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade de Campinas, Campinas, 1993.

HANESCH, M.; SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 161, n. 1, p. 50–56, 2005.

HOTELLING, H. Multivariate Quality Control- illustrated by the air testing of sample bombsights. In: **Techniques of Statistical Analysis**. McGraw Hill, New York, p. 111-184, 1947.

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

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

JONG, E.; PENNOCK, D. J.; NESTOR, P. A. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada, **Catena**, Amsterdam, v. 40, n. 3, p. 291–305, 2000.

KAMPF, N.; KERN, D.C. **O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia**. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; KERN, D. C.; D'AQUINO, G.; RODRIGUES, T. E.; FRAZAO, F. J.; SOMBROEK, W.; MYERS, T.P.; NEVES, E.G. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: Lehmann, J.; Kern, D.C.; Glaser, B.; Woods, W.I. (Eds.). **Amazonian Dark Earths. Origin, properties and management**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003. p. 51-75.

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

KERN, D.C. KÄMPF, N. Antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná, Pará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, n.3, p.219-225, 1989.

KHATTREE, R.; NAIK, D. N. **Multivariate Data Reduction and Discrimination with SAS Software**. SAS Institute, Cary, NC, 2000.

KUME, H. **Métodos estatísticos para melhoria da qualidade**. 4.ed. São Paulo: Gente, 1993. 245p.

LANDIM, P. M. B. Sobre Geoestatística e mapas. Terra e Didática, v.2, n.1, p.19-33, 2006. <http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/> .

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. Lab. Geomatemática, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Texto Didático 03, 2000, 128p.

LEHMANN, J.; KERN, D.C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. (Eds.), Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management. Kluwer Academic Publishers, Dodrecht, 2003. 523p.

LIMA, H. N. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**. Viçosa, 2001. 176 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

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**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 59-68, 2006.

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

LÓPEZ, L. R. **Pedologia quantitativa: espectrometria VIS-NIR-SWIR e mapeamento digital de solos**. 2009. 171 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba 2009.

LUQUE, E. C. L. **Propiedades magnéticas de los óxidos de hierro en suelos mediterráneos**. 2008. 179 f. Tese (Doutorado) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Universidad de Córdoba, Córdoba, 2008.

MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; BENITES, V. M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. (Ed.). **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 172-188.

MAHER, B. A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. v. 137, n. 30, p. 25–54, 1998.

MAHER, B. A.; THOMPSON, R. The magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences, in Quaternary climates. In: MAHER, B. A.; THOMPSON, R. (ed.) **Environments and magnetism**. Cambridge: 1999 p. 81–125.

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

MARQUES JÚNIOR, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Littleton, v. 58, n.8, p. 1246-1266, 1963.

MATIAS, S. S. R. **Suscetibilidade magnética e sua associação com atributos do solo e do relevo em uma topossequência de Latossolos**. 109 f. 2010. Dissertação de Mestrado (Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. 2010.

MATIAS, S. S. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Modelos de paisagem e susceptibilidade magnética na identificação e caracterização do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 1, p. 93-103, 2013.

McBRATNEY, A.B., MINASNY, B., CATTLE, S.R., VERVOORT, R.W. From pedotranfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam, v.109, v.1-2, p.41-73, 2002.

MINGOTI, S. A. **Análise de Dados através de Métodos de estatística Multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 295p.

MONTANARI, R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PAZETO, R. J.; CAMARGO, L. A. Variabilidade espacial de atributos químicos em latossolo e Argissolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.5, p.1266-1272, 2008.

MONTGOMERY, D.C. **Introduction to statistical quality control**. 5.ed. New York: John Wiley, 1985. 489p.

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

MOTOMIYA, A. V. A.; MOTOMIYA W. R.; MOLIN, J.P.; LIRA, A.; OLIVEIRA, J. R. G.; BISCARO, G. A. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produtividade do algodoeiro. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 4, n. 11, p. 01-09, 2011.

NELSON, B. W.; OLIVEIRA, E. A. A. **Avaliação e Ações prioritárias para a conservação do bioma Floresta Amazônia**. Área Botânica. Ações Prioritárias para a Conservação da Biodiversidade da Amazônia. Programa Nacional da Diversidade Biológica- PROBIO, MMA, 1999.

NOVOTNY, E. H.; DEAZEVEDO, E. R.; BONAGAMBA, T. J.; CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; HAYES, M. H. B. Studies of the compositions of humic acids from Amazonian dark earth soils. **Environmental Science and Technology**, Washington, v.41, n.2, p.400-405, 2007.

PETERSEN, J. B.; NEVES, E. G.; HECKENBERGER, M. J. Gift from the past. Terra preta and prehistoric Amerindian occupation in Amazonia. In: Unknown Amazonia. **The British Museum Press**, London, 2001, p.86-105.

REGAZZI, A. J. **INF 766 - Análise multivariada**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Departamento de Informática, 2001. 166p. Apostila de disciplina.

RODRIGUES, T. E.; OLIVEIRA, R. C.; Solos de várzeas da Amazônia: uso e potencialidade. In.: Amazônia: agricultura sustentável. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, p.215-221, 1997.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S.R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L.) em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n. 1, p.115-122, 1998.

SCHUBART, H. O. R. Ecologia e utilização das florestas. (in) **Amazônia: desenvolvimento, integração e ecologia**. Manaus: INPA, 1983.

SIQUEIRA, D. S. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 75 f. 2010. Dissertação de Mestrado (Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. 2010.

SIQUEIRA, D.S., MARQUES JR., J., PEREIRA, G.T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, n.1, p. 55-66, 2010.

SMITH N. J. H. Anthrosols and human carrying capacity in Amazonian. **Annals of the Association of American Geographers**, Washington, v. 70, n.4, p. 553-566, 1980.

SOMBROEK, W. Amazon **soil: A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region**. Wageningen: Centre for Agricultural Publications and Documentation, 1966. 292p.

SOUZA JÚNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; VILAR, C. C.; HOEPERS, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 3, p. 513-519, 2010.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W.G.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Microbial response to charcoal amendments of highly weathered soils and Amazonian dark earths in Central Amazonia – preliminary results. In: GLASER, B.; WOODS, W.I. (Ed.). **Amazonian dark earths: explorations in space and time**. New York: Springer, 2004. p.195-212.

THEOCHAROPOULOS, S. P.; PETRAKIS, P. V.; TRIKATSOULA, A. Multivariate analysis of soil grid data as a soil classification and mapping tool: the case study of a homogeneous plain in Vagia, Viotia, Greece. **Geoderma**, Amsterdam, v. 77, n. 1, p.63-79, 1997.

VALLADARES, G. S.; GOMES, E. G.; MELLO, J. C. C. B. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; EBELING, A. G.; BENITES, V. M. Análise dos componentes principais e métodos multicritério ordinais no estudo de Organossolos e solos afins. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.1, p.285-296, 2008.

VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F.; SIQUEIRA, G. M.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 1, p.185-195, 2011.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Oakland, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S. R.; Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.) **Tópicos ciência do solo - Campinas**: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54. 2000.

WHITE, K.; WALDEN, J. The rate of iron oxide enrichment in arid zone alluvial fan soils, Tunisian southern atlas, measured by mineral magnetic techniques, **Catena**, Amsterdam, v. 30, n. 2-3, p.215–227. 1997.

WOODS, W. I., TEIXEIRA, W. G., LEHMANN, J.; STEINER, C.; WINKLERPRINS, A. M. G. A., REBELLATO, L. (Eds.), **Amazonian Dark Earths**: Wim Sombroeks Vision. Springer, Berlin, 2009. 502p.

ZEE. ZONEAMENTO ECOLOGICO ECONOMICO DO SUL-SUDESTE DO AMAZONAS. **Zoneamento Ecológico Econômico do Sul-Sudeste do Amazonas**. IPAAM, 2008. 53p.

CAPÍTULO 2 – Variabilidade espacial da suscetibilidade magnética e dos atributos do solo em diferentes ambientes na região Sul do Amazonas

RESUMO - A escassez de informações sobre o comportamento espacial dos atributos dos solos na região amazônica tem sido uma preocupação de muitos pesquisadores. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a variabilidade espacial e estimar a densidade amostral mínima da suscetibilidade magnética e dos atributos físicos e químicos do solo em três ambientes na região sul do Amazonas. O estudo foi realizado em um Argissolo Vermelho com diferentes ambientes sendo esses solo com horizonte antrópico ou terra preta arqueológica (TPA) na superfície, solo em ambiente natural ou floresta e solo em uso pecuário com pastagem de braquiária (*Brachiaria brizanta*). Nestas áreas foram estabelecidas malhas de 70 m x 70 m, com espaçamento regular de 10 m. Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,40–0,60 m. Foram determinados os atributos químicos (pH em água, matéria orgânica, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e acidez potencial), físicos (textura, macroporosidade, microporosidade, diâmetro médio ponderado, densidade do solo e densidade de partículas) e suscetibilidade magnética. Os dados foram submetidos análises de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para verificar a diferença dos atributos estudados entre os ambientes. Para caracterização da variabilidade, foi realizada a estatística descritiva e geoestatística que serviu de base para a determinação dos semivariogramas escalonados. O coeficiente de variação e o alcance do semivariograma escalonado, foram utilizados para determinar a densidade amostral mínima de coleta para que possa caracterizar a variabilidade dos atributos estudados e da suscetibilidade magnética nos três ambientes. A área com terra preta arqueológica apresentou maior dependência espacial, apresentando menores alcances, sendo necessário maior número de amostras de solo para caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo (5 pontos ha⁻¹). A suscetibilidade magnética apresentou comportamento espacial similar aos atributos físicos e químicos dos ambientes, apresentando-se como uma técnica auxiliar na caracterização da variabilidade de atributos do solo. A densidade amostral da suscetibilidade magnética apresentou-se próxima a densidade amostral dos atributos nos ambientes estudados.

Palavras-chave: densidade amostral, terra preta arqueológica, semivariograma escalonado.

2.1 INTRODUÇÃO

As informações sobre a distribuição e o comportamento dos solos na região Sul do Amazonas são baseadas, principalmente, em levantamentos generalizados, já que poucos são os trabalhos em nível semi-detalhado ou detalhado. A região se destaca por apresentar grande diversidade de solos, como Argissolos, Latossolos, Cambissolos, Gleissolos, Espodossolos e Neossolos (CAMPOS, 2009), estando em condições naturais ou sob manejo agropecuário.

Vários trabalhos foram realizados visando quantificar os atributos para caracterização de solos na região amazônica, dentre estes pode-se destacar Cunha et al. (2009) e Campos et al. (2011) que estudaram terras pretas arqueológicas; Campos et al. (2012) que estudou solos ocupados por florestas e Perin et al. (2009) solos sob manejo de pastagem. Entretanto, há ausência de trabalhos que visam estudar o comportamento espacial dos atributos do solo em ambientes naturais e cultivados.

Este fato deve-se possivelmente a dois fatores: a) grande extensão territorial da região amazônica e carência de pesquisadores e b) a grande quantidade de amostras de solo nos estudos da variabilidade espacial, tornando o estudo de alto custo, além da falta de conhecimento e consenso sobre o espaçamento ideal de amostragem ou a densidade amostral. Neste sentido, Souza et al. (2006a) utilizaram a relação solo-relevo para a estimar a variabilidade dos atributos químicos em Latossolo e determinar a densidade amostral.

Para Siqueira et al. (2010) de 80-85% dos erros cometidos na aplicação de insumos agrícolas podem ser atribuídos a amostragem mal planejada. Assim, o estudo dos aspectos da amostragem do solo, a fim de subsidiar definições sobre a utilização e recomendação das técnicas de amostragem em ambientes distintos, tem sido fonte de preocupação de vários pesquisadores (VAN GROENIGEN et al., 1999; LARK, 2000, MONTANARI et al., 2005, SIQUEIRA et al., 2010, MONTANARI et al., 2012).

Para isso, algumas técnicas são aplicadas com o objetivo de estabelecer um padrão de amostragem de solo que reflita as condições reais do solo. Alguns trabalhos utilizam as análises geoestatísticas (SOUZA et al., 2006b) por meio do semivariograma escalonado conjuntamente com o uso do software Sanos para subsidiar o planejamento amostral (MONTANARI et al., 2012). Estudos sobre a

variabilidade espacial necessitam de grande número de amostras, o que implica a elevação do custo, tempo de coleta e realização das análises dos atributos do solo. Alguns métodos alternativos para estimar atributos do solo podem ser utilizados para amenizar este problema, como o uso da suscetibilidade magnética (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000). Dearing et al. (1996), ressaltam que a suscetibilidade magnética é ideal para a realização de estudos que requerem uma grande quantidade de amostras.

Porém, nenhum estudo desta natureza foi realizado na região sul do Estado do Amazonas, sendo de fundamental importância no mapeamento da variabilidade espacial dos solos e seus atributos. Estudos que geram resultados para auxiliar no conhecimento da variabilidade dos solos nestes ambientes no estado do Amazonas podem auxiliar na determinação de qual manejo e cultura aplicados a estes solos para melhor exploração do potencial da produção da cultura e solo.

Assim, objetivou-se com este estudo utilizar semivariogramas escalonados no planejamento amostral de atributos físicos, químicos e susceptibilidade magnética do solo em três ambientes na região Sul do Estado do Amazonas.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização do Meio Físico

O estudo foi realizado em propriedades rurais, localizada ao sul do Estado do Amazonas, nas imediações da comunidade Santo Antônio de Matupi, às margens da BR 230, rodovia Transamazônica, região de Manicoré, AM, sendo mapeadas três áreas com diferentes ambientes, solo com presença de horizonte antrópico ou terra preta arqueológica, solo em ambiente natural ou floresta e solo em uso pecuário com pastagem de braquiária (*Brachiaria brizanta*).

A região apresenta configuração do relevo marcada pela presença de platôs nas partes mais elevadas, apresentando superfícies planas, 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 material de origem é proveniente da alteração de granitos Rondonianos, do Pré-Cambriano Superior, sedimentos coluviais, depositados nas partes mais baixas da paisagem, e coberturas terciárias (BRASIL, 1978). O solo foi classificado como Argissolo Vermelho (CAMPOS, 2009) e a vegetação primária da região é Floresta Tropical Densa.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical chuvoso, apresentando um período seco de pequena duração (Am), temperaturas variando entre 25 e 27 °C e precipitação média anual de 2.500 mm, com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho e umidade relativa do ar entre 85 e 90%.

A área com presença de horizonte antrópico ou terra preta arqueológica (TPA) está situada nas coordenadas geográficas de 07° 55' 02,1" de latitude Sul e 61° 31' 45,2" longitude oeste numa altitude média de 102 m, paralela encontra-se a área com solo em ambiente natural ou floresta situada nas coordenadas geográficas: de 7°54'44,5" latitude Sul e 61°31'44,7" longitude oeste numa altitude média de 140 m acima do nível do mar e a área com uso pecuário submetida ao cultivo de pastagem, sob as coordenadas geográficas de 07°54'42" latitude Sul e 61°31'50" longitude oeste, com altitude média de 135 metros.

O ambiente com uso pecuário sob cultivo de pastagem está sob uso de braquiária (*Brachiaria brizanta*) com aproximadamente 10 anos de uso com pastejo extensivo e com aproximadamente uma (1) unidade animal por hectare; a área com

presença de terra preta arqueológica estava submetida ao cultivo de milho com aproximadamente 120 dias após o plantio e a área com ambiente natural sob floresta consta de um fragmento de Floresta Tropical Densa, formada por árvores de 20 a 50 m de altura.

Metodologia de Campo

Nestas áreas foram estabelecidas malhas de 70 x 70 m abrangendo 0,49 hectares. O solo foi amostrado nos pontos de cruzamento da malha, com espaçamentos regulares de 10 em 10 metros, perfazendo um total de 64 pontos amostrais em cada malha (Figura 1). Esses pontos foram georreferenciados com um equipamento de GPS Garmin Etrex (South American '69). Em seguida, foi realizada sob cada ponto amostral a coleta de amostras de solos deformadas e indeformadas nas profundidades 0,0-0,20 e 0,40-0,60 m.

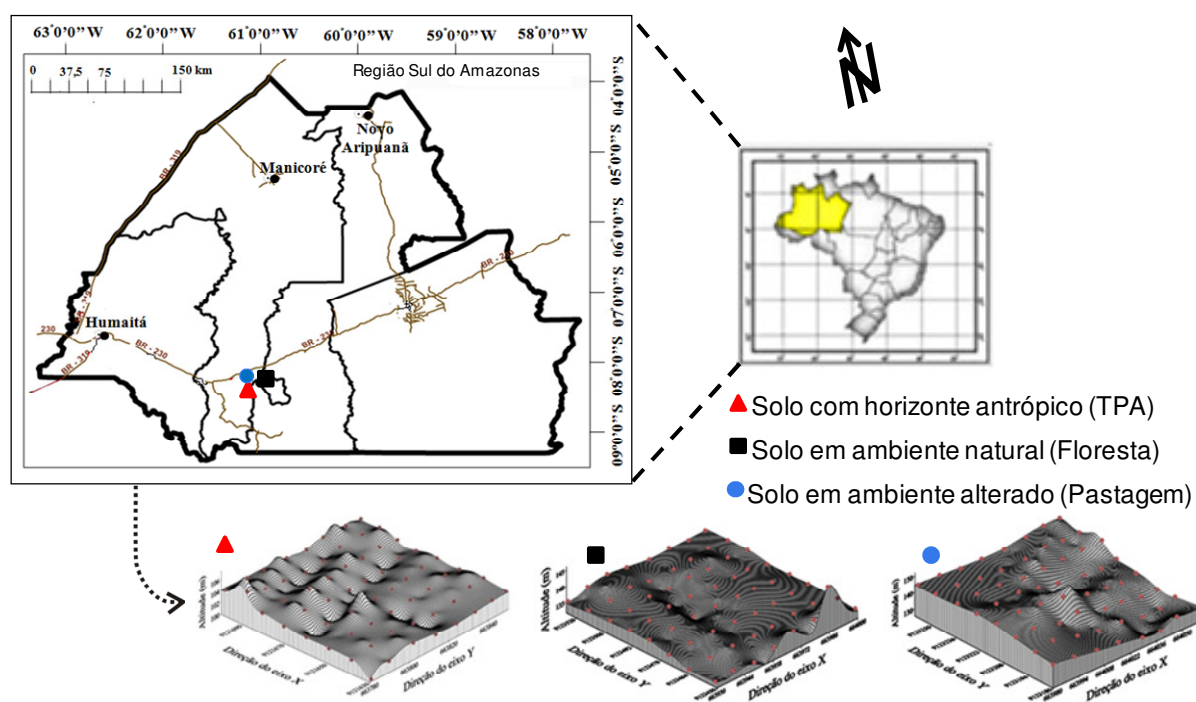


Figura 1. Mapa de localização e modelo de elevação digital das áreas estudadas na região Sul do Amazonas.

Análises físicas

Nas amostras deformadas coletadas nas profundidades 0,0-0,20 e 0,40-0,60 m, foram determinadas a análise granulométrica realizada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação

mecânica em aparato de alta rotação por 15 minutos, seguindo metodologia proposta pela Embrapa (1997). A fração argila foi separada por sedimentação, as areias grossa e fina por tamisação e o silte foi calculado por diferença.

As amostras de solo com estrutura preservada coletadas em anel volumétrico na profundidade 0,0-0,20 m foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de 2/3 da altura do anel, para determinação da porosidade total (Pt) obtida pela diferença entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco em estufa a 105° C durante 24 h (EMBRAPA, 1997). A microporosidade do solo foi determinada pelo método da mesa de tensão, segundo metodologia da Embrapa (1997). Pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, obteve-se a macroporosidade. A densidade do solo (Ds) foi calculada pela relação entre a massa seca a 105 °C durante 24 h da amostra de solo do cilindro volumétrico e o volume do mesmo cilindro (EMBRAPA, 1997).

Em cada ponto amostral, foram coletadas amostras com estrutura preservada na forma de “torrão”, na profundidade 0,0-0,20 m para determinação da estabilidade dos agregados do solo. Estas amostras foram levemente destorroadas, de forma manual e passadas em peneira de 9,51 mm de diâmetro de malha e retidos na peneira de 4,76 mm, secadas à sombra, para as análises relativas à estabilidade de agregados. A separação e estabilidade dos agregados foram determinadas segundo Kemper e Chepil (1965), com modificações, nas seguintes classes de diâmetro, >2,0; 2,0-1,0 e < 1,00 mm. Os agregados foram colocados em contato com a água sobre a peneira de 2,0 mm por quinze minutos, a massa do material retido em cada peneira, foi colocada em estufa a 105°C. Os resultados foram expressos em percentual dos agregados retidos nas peneiras, determinando-se o diâmetro médio ponderado (DMP).

Análises químicas

Foi determinado os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) trocáveis, fósforo (P) disponível e a acidez potencial (H+Al) utilizando-se o método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001).

O pH foi determinado potenciometricamente utilizando-se relação 1:2,5 de solo em água (EMBRAPA, 1997). O carbono total foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yoemans e Bremner (1988), a matéria orgânica, por sua vez, foi estimada com base no carbono orgânico.

Suscetibilidade Magnética

Para determinação da suscetibilidade magnética (SM) na TFSA (terra fina seca ao ar) foi utilizado o equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B (Figura 2). A avaliação foi feita em baixa frequência (0,47 kHz) (DEARING, 1994). Segundo o autor, as medições de dupla frequência (alta – 4,7 kHz e baixa) devem ser utilizadas em estudo de caráter qualitativo para indicar a presença de minerais magnéticos de domínio simples e múltiplos. No caso de única leitura, para obtenção de resultados mais precisos é indicado o uso da baixa frequência (BARTINGTON, 2013), sendo esta metodologia adotada neste trabalho.



Figura 2. Medidor de suscetibilidade magnética MS2 da Bartington Instruments Ltd.

Análises estatísticas e geoestatística

Os dados foram submetidos análises de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade realizada no software estatístico Minitab (MINITAB, 2000) para verificar a diferença dos atributos estudados entre os ambientes.

Foi realizada análise exploratória dos dados, calculando-se média, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e teste de normalidade. O coeficiente de variação (CV%) foi calculado base no critério de Warrick e Nielsen (1980) que classifica o CV como baixo < 12%, médio de 12% a 24% e alto > 24%. A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

Para determinação da existência da dependência espacial foram modelados semivariogramas, utilizando análise geoestatística (MATHERON, 1963; VIEIRA et al., 1983; ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Sob teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela Equação 1:

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

sendo:

$\hat{\gamma}$

$\gamma(h)$ - valor da semivariância para o vetor h ;

$N(h)$ - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;

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

Baseado nos modelos ajustados aos semivariogramas experimentais de cada atributo do solo foi ajustado o semivariograma escalonado. Os semivariogramas experimentais foram escalonados pela divisão das semivariâncias pela variância estatística (GUIMARÃES, 1993, VIEIRA et al., 1997).

De acordo com Guimarães (1993) verifica-se proporcionalidade quando os semivariogramas escalonados permitem o ajuste de um único modelo para as variáveis em estudo. Neste trabalho os semivariogramas foram escalonados com o objetivo de reduzi-los à mesma escala, facilitando a comparação entre resultados de diferentes variáveis. Além disso, o objetivo foi representar vários semivariogramas simultaneamente para compreender melhor os padrões de similaridade e causas da variabilidade espacial (CEDDIA et al., 2009).

Aos semivariogramas experimentais escalonados ajustou-se um modelo tipo esférico (Equação 2), identificado nas figuras como: Esf. (C_0 , $C_1 + C_0$, $[(C_0/(C_0+C_1))]$, R^2 , a , $SQRes.$), cuja equação de ajuste é:

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

onde:

C_0 = efeito pepita;

$C_0 + C_1$ = patamar;

a = alcance do semivariograma;

h = distância de separação entre duas observações e a é o alcance de dependência espacial.

e ao modelo exponencial (Equação 3) identificado nas figuras como Exp (C_0 , $C_1 + C_0$, $[(C_0/(C_0+C_1))]$, R^2 , a , Resíduo), cuja equação de ajuste é:

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

sendo:

C_0 = efeito pepita;

$C_0 + C_1$ = patamar;

a = alcance do semivariograma;

h = distância de separação entre duas observações e a é o alcance de dependência espacial.

A escolha do modelo de semivariograma escalonado que melhor se ajustou aos dados foi realizada com base na menor soma de quadrados do resíduo, além do conhecimento prático do comportamento dos atributos em cada ambiente.

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

Densidade amostral

Através do alcance dos semivariogramas de cada variável, foi determinado o número mínimo de amostras para que ainda seja possível promover a caracterização da variabilidade espacial de cada atributo estudado individualmente.

Posteriormente, os semivariogramas escalonados serviram como base de informação para calcular o número mínimo de amostragem do solo, para determinar a variabilidade de todos os atributos em ambas às profundidades nos três ambientes estudados (Equação 4).

$$N = \frac{A}{(a^2)/10000} \quad (4)$$

em que:

N = número mínimo de amostras necessárias para a determinação de uma malha de amostragem;

A = área total em hectares;

a = alcance do semivariograma em metros.

Com base no coeficiente de variação, determinou-se o número de subamostras necessárias para compor uma amostra composta e estimar o valor médio das variáveis usando a fórmula descrita por CLINE (1944), (Equação 6):

$$n = \left(\frac{t_{\alpha} \cdot CV}{D} \right)^2 \quad (6)$$

sendo:

n = número mínimo de amostras necessárias para a determinação de uma malha de amostragem;

t_{α} = valor da distribuição de t - Student (a probabilidade de 95%)

CV = coeficiente de variação;

D = percentagem de variância a partir do valor médio (5%).

A SM foi utilizada para comparar a densidade amostral mínima com os atributos do solo, sendo usado o alcance do semivariograma escalonado e o CV da SM.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atributos granulométricos apresentam diferenças significativas entre os ambientes estudados. A área com TPA apresenta maiores teores de areia em comparação ao solo das áreas de floresta e pastagem (Tabela 1). A área com TPA apresentou dominância de silte semelhante aos resultados encontrados por Campos et al. (2011) em terra preta arqueológica na região do médio Rio Madeira, já as maiores percentagem de argila foram encontradas na área de pastagem e floresta

com 361,63 e 327,94 g kg⁻¹ respectivamente na profundidade de 0,0–0,20 m. Este mesmo comportamento foi encontrado na profundidade de 0,40–0,60 m.

A dominância de partículas maiores na área de TPA, segundo German (2003), esses elevados teores da fração areia, podem ser explicados pela contribuição de pequenos fragmentos líticos e cerâmicos.

Consequentemente, os maiores valores de macroporosidade foram encontrados na área de TPA e floresta, sendo os valores de macroporosidade mais baixos na pastagem (Tabela 1). O menor valor de macroporosidade encontrados na pastagem pode ser explicado devido ao pisoteio causados por animais, ocasionando maior adensamento das partículas do solo, podendo se observar, maior valor de densidade do solo. Os maiores valores de Ds observados nas pastagens são similares aos encontrados por Araújo et al. (2007) e Neves et al. (2007), em pastagem cultivada por um período semelhante. Flores et al. (2007) avaliando as alterações promovidas pelo pisoteio animal sobre atributos físicos do solo, observaram maior Ds e menor porosidade do solo em áreas pastejadas em relação a áreas não pastejadas. Neste sentido, Pignataro Netto et al. (2009), afirmam que os atributos físicos que mais influenciaram na redução da qualidade do solo foram densidade do solo, porosidade total e resistência do solo à penetração.

Tabela 1. Médias dos atributos físicos, químicos e suscetibilidade magnética em áreas sob diferentes ambientes na região Sul do Amazonas.

Atributos	Unidade	TPA	Floresta	Pastagem	TPA	Floresta	Pastagem
		-----Profundidade 0,0 - 0,20 m-----			----Profundidade 0,40 - 0,60 m----		
Areia	g kg ⁻¹	434,14A	358,81C	410,78B	426,26A	251,35C	321,36B
Silte	g kg ⁻¹	444,36A	313,24B	227,60C	297,99B	355,72A	203,27C
Argila	g kg ⁻¹	121,50C	327,94B	361,63A	275,75C	392,94B	475,38A
Ds	kg dm ⁻³	0,89B	1,30A	1,31A	-	-	-
Dp	g cm ⁻³	2,63A	2,659A	2,40B	-	-	-
Macro	m ³ m ⁻³	22,04A	21,43A	17,12B	-	-	-
Micro	m ³ m ⁻³	28,43A	19,84B	20,61B	-	-	-
DMP	mm	2,57C	2,83B	3,13A	-	-	-
pH	H ₂ O	6,27A	3,97B	4,30B	5,90A	4,11C	4,29B
H+Al	mmol kg ⁻¹	28,30C	74,92A	61,13B	30,56C	59,55A	51,52B
MO	g dm ⁻³	68,19A	18,66C	27,47B	24,11A	14,05B	15,92B
P	mg dm ⁻³	309,39A	6,09B	4,61B	252,38A	6,50B	2,63B
K	mmol kg ⁻¹	1,72A	1,66A	1,71A	0,74B	1,39A	0,69B
Ca ²⁺	mmol kg ⁻¹	166,02A	4,77B	10,27B	75,90A	3,44B	4,69B
Mg ²⁺	mmol kg ⁻¹	29,45A	2,52C	4,64B	14,02A	1,98B	2,34B
SM	-	428,79A	70,27B	82,28B	190,11A	85,80B	87,42B

*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha da mesma profundidade, não diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade.

O pisoteio animal promove geralmente um aumento na densidade e na microporosidade do solo, assim como uma diminuição na taxa de infiltração de água, na macroporosidade e na porosidade total, principalmente na camada mais superficial (SALTON et al., 2002, GOULART et al., 2010).

No entanto, a área de pastagem não apresentou maiores valores de densidade do solo quando comparada a área de floresta nativa, evidenciando que não houve alteração deste atributo do solo, apesar do pisoteio dos animais, resultados contrários foram observados por Araújo et al. (2004) em área de Argissolo Amarelo sob pastagem na Amazônia. Este resultado provavelmente pode ser explicado devido ao curto tempo de estabelecimento da cultura para ocasionar mudanças nas características físicas do solo (BARRETO et al., 2006), além do uso e manejo adequado das pastagens pelo produtor.

A estabilidade dos agregados, representada pelo diâmetro médio ponderado (DMP), apresentou diferença significativamente sendo maior para a pastagem e menor na área de TPA na profundidade 0,0–0,20 m (Tabela 1). Esse aumento no tamanho dos agregados, pode ter ocorrido devido à maior pressão recebida neste solo devido ao pisoteio, ocasionando um maior índice de DMP. Portugal et al. (2010) trabalhando com estabilidade de agregados sob diferentes usos e comparado com mata, encontraram elevada Ds em superfície, e elevada estabilidade de agregados. No entanto, um agregado de elevado DMP nem sempre apresenta adequada distribuição de tamanho de poros no seu interior, o que implica em qualidade estrutural variável (BERTOL et al., 2004).

Um fator importante, para a manutenção da qualidade dos agregados na área de pastagem, é a manutenção da cobertura vegetal, que proporciona acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo e provoca agregação próxima a superfície do solo em função do sistema de raízes com pouca profundidade. Na pastagem a agregação provavelmente está relacionada com a maior ocorrência de ciclos e umedecimento e secagem, devido a pouca cobertura do solo, ocasionando maior exposição aos raios solares (PORTUGAL et al., 2010). Com isso, devido à camada superficial está sujeita a mais ciclos de umedecimento e secagem, e também mais intensos estes podem ter contribuído para a maior estabilidade dos agregados.

O pH em água, MO, P, Ca^{2+} , Mg^{2+} e SM nas duas profundidades estudadas apresentaram maiores valores na área com TPA, justificando a presença do horizonte antrópico (Tabela 1). Nos trabalhos de Steiner et al. (2004) e Campos et

al. (2011), os autores encontraram valores semelhantes para Ca^{2+} e Mg^{2+} , os quais afirmaram que as TPAs exibem elevados níveis de nutrientes, principalmente Ca^{2+} e P, provavelmente, proveniente de restos de ossos humanos e de animais, além da formação de complexos matéria orgânica e cálcio, de alta estabilidade (elevados teores de Ca), associados ao carvão pirogênico (NOVOTNY et al., 2007).

O P normalmente apresenta valores elevados em áreas de TPA, corroborando com Falcão e Borges (2006), ao qual, afirmam que esses altos valores de P é uma característica peculiar das TPAs. É, porém, o teor muito elevado de P nas TPAs, a característica química mais marcante na diferenciação entre essas e os solos adjacentes, e tem sido observado por muitos autores (SOMBROEK, 1966, SMITH, 1980, KERN; KÄMPF, 1989) e atribuído à incorporação de ossos de animais (e, possivelmente, de seres humanos), de espinhas de peixes e de carapaças de quelônios (SMITH, 1980, LIMA et al., 2002).

Dentro deste contexto, no trabalho de Lima et al. (2002), os autores encontraram valores semelhantes em relação a fertilidade destes solos e afirmam que seria improvável para qualquer solo atingir valores altos de fertilidade sem influência antrópica ao qual, grande quantidade de resíduos orgânicos foram depositados durante o processo de formação destes solos. Segundo Smith (1980), Eden et al. (1984), Kern e Kämpf (1989), Kern (1996), essa característica contribui para a alta fertilidade das TPAs sendo esta característica também encontrada no presente trabalho.

Quanto aos teores de MO mais elevados na área com TPA (Tabela 1), Moreira (2007) afirma que a capacidade das TPAs em manter alto teor de matéria orgânica é devido ser constituída, em sua maior parte, por substâncias húmicas mais estáveis, de difícil degradação, além da contribuição de restos orgânicos. Com isso, a MO contribui diretamente com a alta fertilidade destes solos. Embora a maior quantidade de matéria orgânica em TPAs seja um fator relevante, pesquisas têm mostrado que a composição e as características da matéria orgânica em terras pretas também contribuem para o aumento do grau de fertilidade desses solos (MADARI et al. 2009).

A acidez potencial (H+Al) foi menor para a área com TPA e maior para a área com floresta e pastagem, respectivamente (Tabela 1). As áreas de pastagem e floresta é caracterizada por apresentar maior ligação à argila e acidez potencial (H+Al). Os valores de H+Al na área de floresta foram maiores entre os ambientes,

provavelmente, em consequência da maior lixiviação promovida pelo intenso regime hídrico associado às melhores condições de drenagem (CAMPOS et al., 2010, CAMPOS et al., 2012).

O potássio (K) não apresenta diferença significativa entre os ambientes estudados (Tabela 1). Os baixos valores de K, também foram observados por Falcão e Borges (2006) em TPA, pois segundo os autores, normalmente solos com terra preta apresentam baixos teores de K, pois segundo os autores, trabalhos em experimentos de campo em TPA têm revelado que culturas como banana, côco, altamente exigentes em potássio, não apresentaram boa produtividade quando os produtores não aplicam esse nutriente.

A SM foi superior na área com TPA nas duas profundidades em relação aos demais ambientes (Tabela 1), e este comportamento pode ser explicado, devido a maior presença de MO. Segundo Mullins (1977), a presença de matéria orgânica favorece um aumento da suscetibilidade, pois proporciona as condições necessárias para a redução de ferro. Outro fator importante, pode ser a presença de óxidos de ferro, que respondem pela magnetização do solo, especialmente os ferrimagneticamente ordenados, como magnetita e maghemita (SILVA et al., 2005).

Já a estatística descritiva mostrou que quase todos os atributos apresentam valores de assimetria próximos à zero, apresentando simetria dos dados, o que indica que as técnicas geoestatísticas podem ser aplicadas a estes atributos (Tabela 2). Observa-se que os valores de média e mediana de quase todas os atributos estudados estão próximos, evidenciando que as mesmas aproximam-se de uma distribuição normal, ou seja, estes não apresentam influência de valores extremos. Isso pode ser um indicativo que os dados seguem distribuições simétricas, sendo estes valores justificados pelos valores de assimetria e curtose próximos de zero.

Os atributos apresentaram coeficiente de variação variando de baixo $\leq 12\%$, médio de 12% a 24% e alto $\geq 24\%$ segundo a classificação de Warrick e Nielsen (1980) (Tabela 2). Dentre os atributos estudados, o K apresenta alto CV principalmente na área com TPA (82,30 e 141,74%) nas duas profundidades respectivamente seguido da área com floresta e pastagem. Isso pode ser um indicativo de uma alta variabilidade destes atributos, que pode influenciar nos métodos ou quantidade de amostragem para determinação dos atributos destes solos.

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos físicos, químicos e suscetibilidade magnética em áreas sob diferentes ambientes na região Sul do Amazonas.

Áreas	Ambientes de estudo na região Sul do Amazonas																	
	TPA						Floresta						Pastagem					
	Méd.	Med.	D.P	CV	Assim.	Curt.	Méd.	Med.	D.P	CV	Assim.	Curt.	Méd.	Med.	D.P	CV	Assim	Curt.
Profundidade 0,0 – 0,20 m																		
Areia	434,14	442,48	58,83	13,55	-1,13	1.86	358,81	355,65	59,26	16,52	1,74	8,95	410,78	411,80	38,29	9,32	0,1	-0.28
Silte	444,36	432,91	73,39	16,52	1,16	2.32	313,24	312,47	59,46	18,98	-1,23	6,48	227,6	224,00	37,84	16,63	-0,64	2.42
Argila	121,5	120,00	42,54	35,01	0,61	0.32	327,94	324,92	41,56	12,67	0,16	0,04	361,63	360,00	37,62	10,40	0,1	-0.19
Ds	0,89	0,88	0,08	9,40	-0,43	0.99	1,3	1,31	0,08	5,98	-0,62	-0,32	1,31	1,29	0,12	8,79	0,66	0.49
Dp	2,63	2,63	0,08	3,00	0,38	-0.35	2,659	2,67	0,07	2,63	0,16	-0,23	2,4	2,40	0,13	5,51	0,28	0.26
Macro	22,04	22,80	8,34	37,82	0,24	1.08	21,43	21,55	3,22	15,05	-0,16	1,03	17,12	18,08	6,07	35,45	-0,88	0.30
Micro	28,43	28,03	3,20	11,26	0,85	1.41	19,84	19,77	2,96	14,91	0,34	0,53	20,61	20,54	2,68	12,99	0,17	-0.59
DMP	2,57	2,58	0,26	10,03	-0,37	0.40	2,83	2,88	0,23	8,02	-0,62	-0,48	3,13	3,17	0,19	5,96	-2,82	12.27
pH	6,27	6,20	0,30	4,70	0,58	0.48	3,97	3,90	0,19	4,79	0,74	0,25	4,3	4,25	0,26	6,09	1,38	2.59
H+Al	28,3	29,50	6,64	23,46	-0,08	-0.51	74,92	88,00	22,04	29,42	-0,21	-1,54	61,13	64,00	13,59	22,23	-0,48	-0.37
MO	68,19	68,00	13,54	19,86	-0,26	0.31	18,66	20,50	6,58	35,29	-0,28	-1,21	27,47	27,00	3,73	13,59	0,43	0.99
P	309,39	298,5	86,40	27,93	0,53	-0.02	6,09	5,50	2,20	36,13	0,49	-0,84	4,61	4,00	1,16	25,23	1,82	7.16
K	1,72	1,40	1,42	82,30	4,66	24.46	1,66	1,50	1,12	67,25	2,97	14,13	1,71	1,30	1,15	67,29	1,58	2.78
Ca	166,02	164,50	26,72	16,10	-0,51	0.49	4,77	3,00	4,86	101,96	4,5	23,35	10,27	8,00	6,58	64,06	1,69	2.75
Mg	29,45	30,00	6,49	22,04	0,27	-0.12	2,52	2,00	1,27	50,58	1,8	2,53	4,64	4,00	1,80	38,85	0,78	0.08
SM	428,79	426,00	93,05	21,87	0,13	1.46	70,27	69,00	16,47	23,44	0,79	0,92	82,28	411,80	38,29	44,61	2,39	-0.28
CV médio	22,20						28,01						22,83					
Profundidade 0,40 – 0,60 m																		
Areia	426,26	423,85	35,64	8,36	-0,02	1,99	251,35	245,49	47,55	18,92	1,15	2,69	321,36	317,20	47,54	14,79	1,25	2,57
Silte	297,99	295,41	49,00	16,44	1,03	2,80	355,72	363,66	49,28	13,85	0,01	0,15	203,27	211,40	70,11	34,49	-3,7	23,11
Argila	275,75	282,50	67,01	24,3	-1,14	1,89	392,94	398,72	49,68	12,64	-0,53	0,90	475,38	474,00	81,21	17,08	2,16	14,15
pH	5,90	5,90	0,31	5,30	0,66	0,77	4,11	4,10	0,13	3,18	-0,16	0,31	4,29	4,30	0,20	4,59	1,14	3,49
H+Al	30,56	31,00	5,98	19,57	0,03	0,26	59,55	52,00	14,43	24,23	0,87	-0,53	51,52	52,00	10,30	19,99	1,15	3,08
MO	24,11	22,00	5,35	22,19	0,67	-0,23	14,05	11,50	5,44	38,73	0,9	-0,54	15,92	15,00	4,12	25,84	1,46	2,50
P	252,38	238,0	94,99	37,64	2,46	10,69	6,50	6,00	1,78	27,41	1,06	0,23	2,63	3,00	1,16	44,25	0,78	0,90
K	0,74	0,50	1,05	141,74	7,02	53,01	1,39	1,20	0,78	56,24	1,61	3,44	0,69	0,50	0,55	79,20	2,54	6,99
Ca	75,9	73,00	17,12	22,55	0,67	0,69	3,44	3,00	1,88	54,58	2,76	10,41	4,69	4,00	3,21	68,41	2,43	6,13
Mg	14,02	13,00	4,16	29,68	1,62	3,66	1,98	2,00	1,18	59,21	2,64	10,44	2,34	2,00	1,24	52,79	1,44	2,12
SM	190,11	185,00	59,31	31,20	2,52	10,38	85,8	245,49	47,55	105,84	7,27	2,69	87,42	69,50	67,21	76,88	4,3	18,99
CV médio	32,78						39,90						36,14					

CV = Coeficiente de variação (%); d = teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov.

A SM também apresentou alto valor de CV (Tabela 2) seguindo o mesmo comportamento dos atributos nas áreas estudadas, uma vez que o CV médio dos atributos físicos e químicos apresentou valores próximos ao CV da SM. Isto reflete a grande sensibilidade deste atributo aos processos do solo que variam continuamente na paisagem. Segundo Mathé et al. (2006) a SM pode ser utilizada como micro indicador das condições do solo.

Com o CV pode-se comparar a variabilidade entre amostras de variáveis com unidades diferentes, porém não permite analisar a variabilidade espacial dos atributos do solo nem seu padrão espacial (WARRICK; NIELSEN, 1980). Para isso, a análise geoestatística mostra que os ambientes apresentaram variabilidade no espaço dos atributos estudados, sendo este comportamento expresso pelo ajuste dos semivariogramas (Tabela 3). Avaliando os atributos individualmente, nota-se que o modelo esférico e exponencial predominou ao ajuste nos atributos físicos, químicos e suscetibilidade magnética nos três ambientes estudados. A mesma tendência foi observada no ajuste dos modelos de semivariogramas escalonados.

Com base no ajuste dos semivariogramas escalonados, verifica-se comportamento semelhante com os atributos avaliados individualmente (Figuras 3, 4 e 5). Avaliando o comportamento espacial dos atributos do solo na área com TPA, esta apresenta comportamento espacial diferente em relação aos demais ambientes avaliados, pois o modelo que melhor se ajustou aos atributos físicos, químicos e SM para a área com TPA na profundidade de 0,0-0,20 m (Figura 3A e 3C) foi o esférico, sendo o modelo exponencial o que melhor ajustou a estes atributos na profundidade de 0,40–0,60 m (Figura 3B e 3D).

Para floresta e pastagem observou um comportamento entre os ambientes similar quanto ao ajuste dos semivariogramas aos atributos. O modelo exponencial apresentou melhor ajuste aos atributos físicos e químicos para a pastagem e floresta na profundidade de 0,0-0,20 m (Figuras 4A e 5A) e pastagem (0,40–0,60 m) (Figuras 5B). O modelo esférico ajustou a SM nas duas profundidades para floresta (Figuras 3C e 3D) e pastagem (Figuras 4C e 4D), e aos atributos físicos e químicos da floresta na profundidade 0,40 – 0,60 m (Figuras 4B). Estes ajustes mostram a relação espacial entre a SM e os atributos físicos e químicos para os ambientes estudados indicando que a SM está diretamente ligada aos atributos do solo, e que esta pode ser utilizada como um método alternativo para estimar atributos do solo (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000).

Tabela 3. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas de atributos físicos, químicos e suscetibilidade magnética em áreas sob diferentes ambientes na região Sul do Amazonas.

Atributos	TPA					Floresta					Pastagem				
	Modelo	C ₀	C ₀ +C	a	R ²	Modelo	C ₀	C ₀ +C	a	R ²	Modelo	C ₀	C ₀ +C	a	R ²
Profundidade 0,0 - 0,20 m															
Areia	Exp.	189	3.073,00	31,2	0,89	Exp.	0,00	0,02	18,90	0,59	Exp.	605,81	1262,49	40,2	0,83
Silte	Esf.	1.117,00	2.235,00	30,6	0,83	Exp.	0,03	0,10	44,56	0,92	Esf.	574,19	1504	12,9	0,6
Argila	Exp.	3	1.612,00	19,8	0,95	Esf.	0,00	0,01	17,30	0,94	Exp.	437,17	1324	14,7	0,67
Ds	Exp.	0,01	0,01	58,02	0,9	Esf.	0,00	0,01	29,70	0,73	Esf.	0	0,01	29,7	0,73
Dp	Esf.	0,003	0,01	54,90	0,95	Esf.	0,00	0,00	53,20	0,99	EPP	-	-	-	-
Macro	Esf.	44,31	59,47	30,68	0,81	Esf.	1,17	11,57	15,70	0,91	Exp.	2,27	13,31	18,3	0,66
Micro	Esf.	4,92	9,54	28,1	0,88	Esf.	0,00	0,02	36,30	0,90	Esf.	1,67	3,62	52,3	0,98
DMP	Exp.	0,01	0,06	26,36	0,85	Esf.	0,00	0,04	16,10	0,90	Esf.	0,00	0,03	18,80	0,98
pH	Esf.	0,02	0,06	32,70	0,65	Esf.	0,01	0,03	38,70	0,97	Esf.	0,02	0,04	60,50	0,98
H+Al	Esf.	7,21	31,92	22,60	0,87	Esf.	0,02	0,11	60,90	0,99	Esf.	82,90	165,90	53,40	0,97
MO	Esf.	38,40	117,00	33,10	0,77	Esf.	7,60	51,27	63,50	0,98	Esf.	3,14	12,78	16,91	0,75
P	EPP	-	-	-	-	Esf.	0,70	3,81	25,10	0,59	Exp.	0,02	0,04	15,30	0,92
K	Esf.	0,06	0,20	23,86	0,94	Esf.	0,24	0,65	31,80	0,58	Exp.	0,062	0,314	20,7	0,86
Ca	Esf.	215,00	589,00	31,00	0,94	Esf.	0,08	1,70	41,70	0,94	Exp.	6,80	47,28	24,60	0,94
Mg	Esf.	16,70	38,94	35,04	0,54	Esf.	0,70	1,67	55,70	0,89	Exp.	0,96	2,93	25,50	0,82
SM	Exp.	3297,96	7272,35	45,00	0,88	Esf.	0,01	0,04	60,00	0,82	Esf.	410,00	45,00	56,00	0,94
Profundidade 0,40 - 0,60 m															
Areia	Esf.	523	1.536,00	23,98	0,99	Esf.	0,00	0,01	21,00	0,77	Exp.	718,00	2390,00	33,00	0,97
Silte	Exp.	479,06	1284	48,91	0,91	Exp.	0,00	0,02	27,60	0,85	EPP	-	-	-	-
Argila	Esf.	270,94	2.854,00	19	0,73	Exp.	0,00	0,01	14,70	0,61	Esf.	1406,96	6504	15,7	0,86
pH	Esf.	0,04	0,10	24,20	0,73	Exp.	0,0009	0,01	50,16	0,95	Exp.	0,01	0,02	58,12	0,86
H+Al	Esf.	11,64	32,08	26,30	0,77	Esf.	27,659	235,273	62,17	0,97	Esf.	31,53	63,07	40,00	0,93
MO	Exp.	12,22	25,18	40,00	0,51	Esf.	0,100	30,500	55,70	0,97	Esf.	0,03	0,06	39,00	0,96
P	Esf.	1754,00	4716,00	59,10	0,96	Esf.	0,101	1,956	58,68	0,95	Esf.	0,65	1,48	48,60	0,94
K	Esf.	0,01	0,10	23,70	0,96	EPP	-	-	-	-	Esf.	0,01	0,07	19,14	0,99
Ca	Esf.	101,20	208,10	40,00	0,97	Esf.	0,067	0,192	65,36	0,98	Exp.	0,81	2,51	15,00	0,56
Mg	Esf.	2,69	8,26	20,60	0,43	Esf.	0,194	1,03	60,80	0,98	Exp.	0,15	0,70	23,70	0,91
SM	Exp.	0,0001	0,06	45,00	0,85	Esf.	0,016	0,04	54,00	0,99	Exp.	18,90	205,30	42,00	0,98

Exp. = Exponencial; Esf. = Esférico; C₀ + C = Patamar; a = alcance (m). R² = coeficiente de determinação; C₀ = Efeito Pepita.

Os ajustes dos modelos aos atributos explicam o seu comportamento, uma vez que segundo Isaaks e Srivastava (1989) os modelos exponenciais são mais bem ajustados a fenômenos erráticos na pequena escala, enquanto os modelos esféricos descrevem propriedades com alta continuidade espacial, ou menos erráticos na curta distância. Essa afirmativa mostra que as terras pretas por mais que apresente maior variabilidade dos atributos, estes não variam bruscamente no espaço.

O grau de dependência espacial (GDE) para os semivariogramas escalonados, expresso pela razão entre o efeito pepita (C_0) e o patamar ($C_0 + C$) (CAMBARDELLA et al., 1994), foi classificado como moderado para quase todos os ambientes estudados (Figuras 3, 4 e 5), exceto para os atributos físicos, químicos e SM da floresta na profundidade de 0,0–0,20 m (Figuras 4A e 4C) o qual apresentou GDE forte (>25%). Para Cambardella et al. (1994), as variáveis que apresentam forte dependência espacial são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, ou seja, pelos fatores de formação do solo, enquanto que a dependência espacial moderada, possivelmente seria devido à homogeneização do solo.

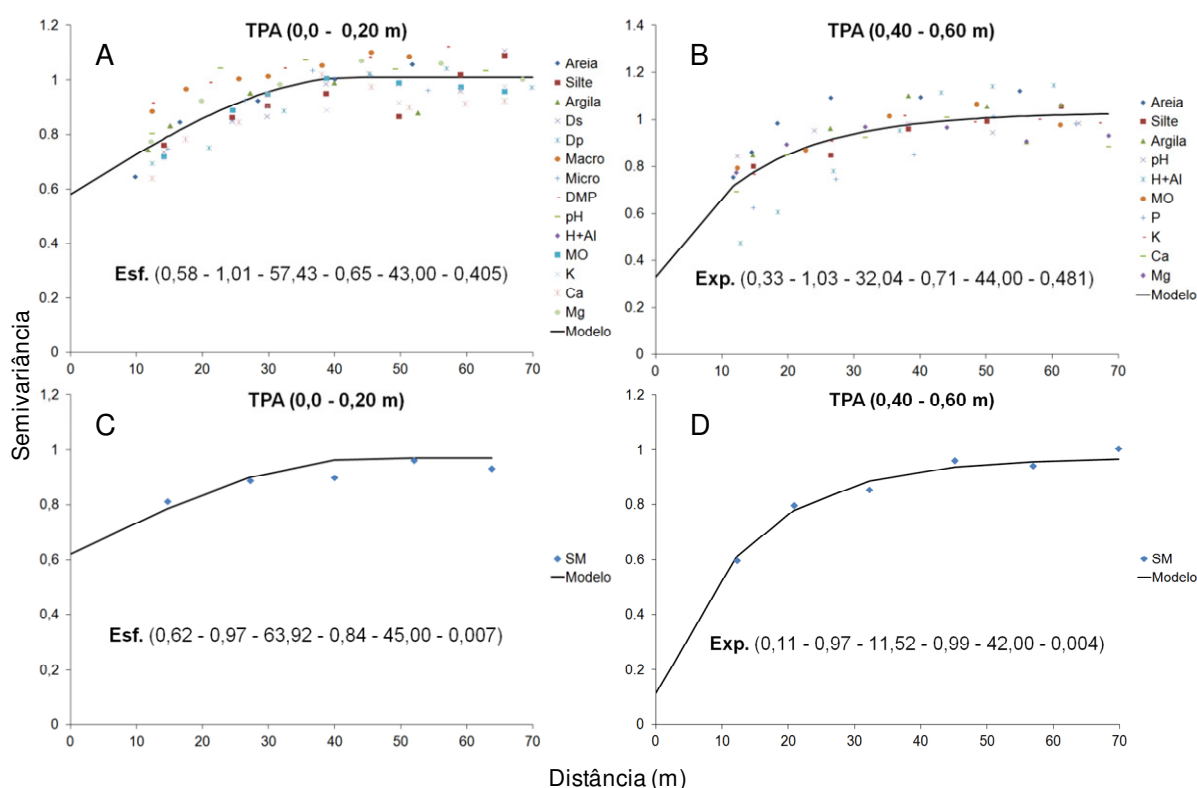


Figura 2. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonado ajustados aos atributos do solo na TPA [modelo (efeito pepita - patamar –GDE - R^2 – alcance - resíduo)]. GDE = grau de dependência espacial; R^2 = Coeficiente de determinação.

Avaliando o alcance dos semivariogramas individualmente, é possível observar que os atributos apresentaram variabilidade espacial menor que o estabelecido na malha amostral (Tabela 3). A TPA apresentou valores de alcance menor em relação à floresta e pastagem, indicando maior variabilidade dos dados. Estes valores de alcance fornecem informações a respeito da heterogeneidade da distribuição espacial em relação às propriedades estudadas em cada ambiente (TRANGMAR et al., 1985). Por outro lado, os valores do alcance ajustados aos modelos dos semivariogramas escalonados, mostrou maior dependência espacial na área de TPA em relação as áreas com floresta e pastagem.

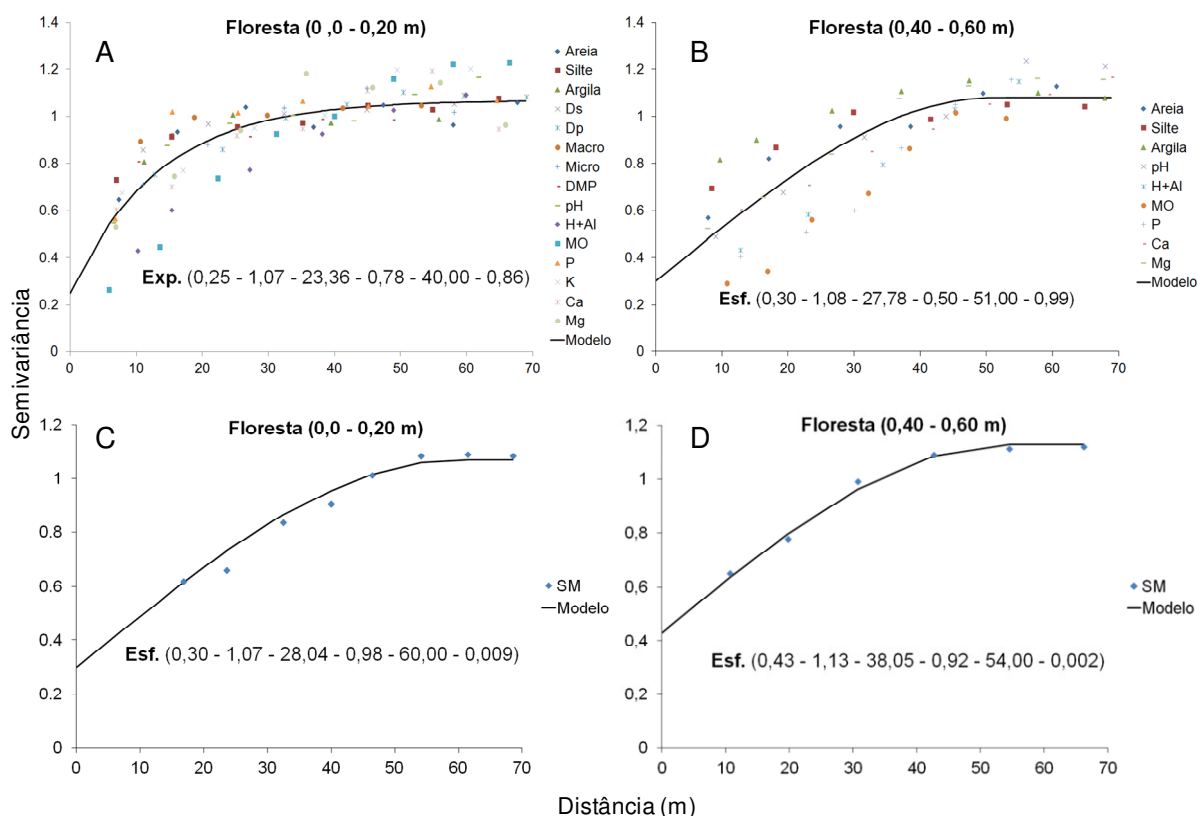


Figura 3. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonado ajustados aos atributos do solo em floresta [modelo (efeito pepita - patamar –GDE - R^2 – alcance - resíduo)]. GDE = grau de dependência espacial; R^2 = Coeficiente de determinação.

O alcance dos semivariogramas para a TPA foi de 43 e 44 metros (0,0–0,20 e 0,40–0,60 m respectivamente) e a SM apresentou valores de alcance similares aos atributos físicos e químicos nas duas profundidades. Para área com floresta, o alcance foi de 40 e 51 metros (0,0–0,20 e 0,40–0,60 m respectivamente) sendo que a SM apresentou valores superiores (60 e 54 metros) nas duas profundidades. Para

área de pastagem, o alcance foi de 43 e 39 metros para os atributos físicos químicos (0,0–0,20 e 0,40–0,60 m respectivamente) e a SM apresentou alcance de 56 e 42 metros nas duas profundidades respectivamente.

Estes valores de alcance superiores na área com TPA mostram que possivelmente existe uma maior heterogeneidade dos atributos neste ambiente, justificando a razão destes solos serem formados por movimentações antrópicas, o que pode causar uma maior variabilidade dos atributos, uma vez que segundo Journel e Huijbregts (1991), o alcance representa a distância em que os pontos amostrais estão dependentes espacialmente entre si, ou seja, os pontos localizados numa área de raio menor ou igual ao alcance são mais similares. Segundo Viera (2000), o alcance do semivariograma é uma medida importante, uma vez que pode auxiliar na definição de práticas de amostragem, ou seja, pontos coletados em uma área circular de raio igual ao alcance são correlacionados espacialmente e, acima deste, são independentes, podendo utilizar a estatística clássica para o estudo dos atributos do solo.

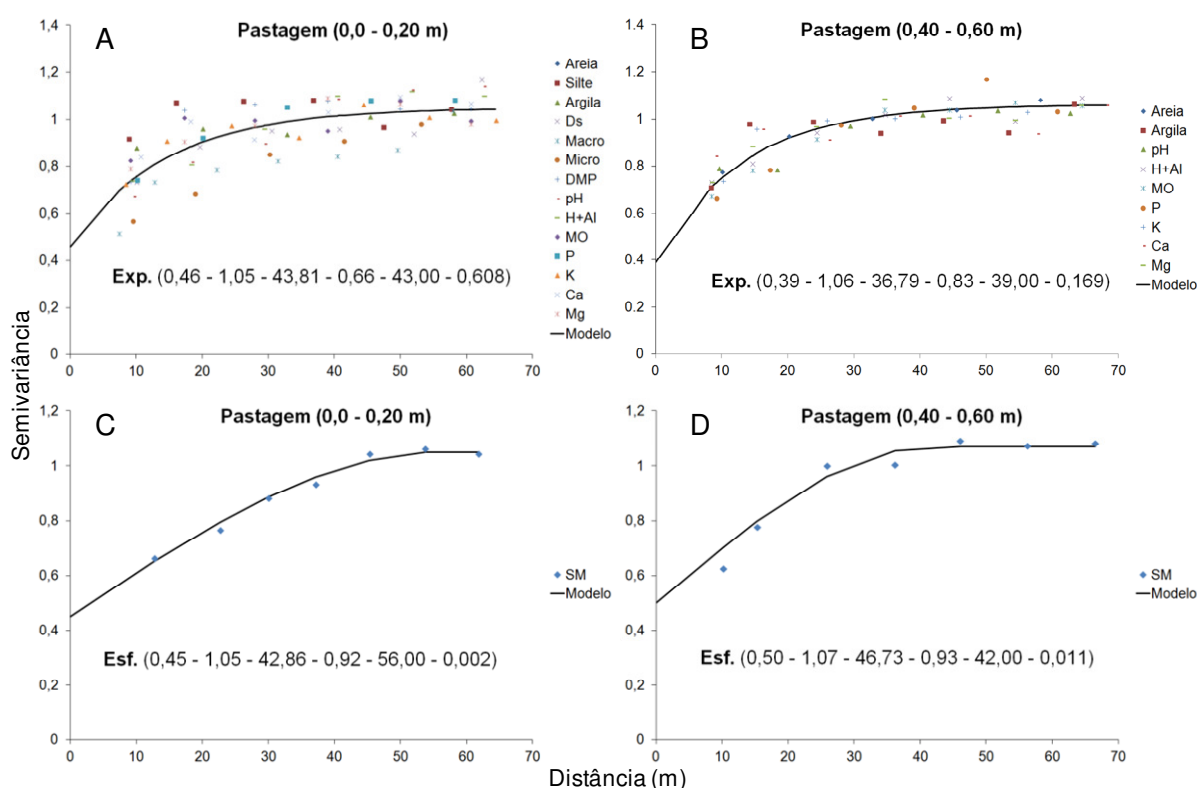


Figura 4. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonado ajustados aos atributos do solo em pastagem [modelo (efeito pepita - patamar – GDE - R^2 – alcance (m) - resíduo)]. GDE = grau de dependência espacial; R^2 = Coeficiente de determinação.

Na Tabela 4, são apresentados os valores de densidade amostral mínima com base no alcance dos semivariogramas e no CV. Analisando os atributos individualmente, observa-se que a densidade amostral mínima variou de 3 a 26 pontos por hectare para a TPA, de 3 a 41 para floresta e 3 a 60 pontos por hectare na pastagem na profundidade 0,0-0,20 m, enquanto que na profundidade 0,40-0,60 m, variou 3 a 28, 1 a 46 e 3 a 44 pontos por hectare para TPA, floresta e pastagem, respectivamente.

Tabela 4. Densidade amostral mínima com base no coeficiente de variação e alcance dos semivariogramas individuais e escalonados para atributos físicos, químicos e suscetibilidade magnética em áreas sob diferentes ambientes na região Sul do Amazonas.

Atributos	Densidade Amostral (números de pontos.ha ¹)					
	TPA		Floresta		Pastagem	
	Profundidade 0,0 – 0,20 m					
	CV	Alcance	CV	Alcance	CV	Alcance
Areia	101	10	151	28	48	6
Silte	151	11	199	5	153	60
Argila	676	26	89	33	60	46
Ds	49	3	20	11	43	11
Dp	5	3	4	4	17	-
Macro	789	11	125	41	693	30
Micro	70	13	123	8	93	4
DMP	56	14	35	39	20	28
pH	12	9	13	7	20	3
H+Al	304	20	478	3	273	4
MO	218	9	687	2	102	35
P	430	-	720	16	351	43
K	3.738	18	2.496	10	2.499	23
Ca ²⁺	143	10	5.737	6	2.265	17
Mg ²⁺	268	8	1.412	3	833	15
SM	264	5	303	3	1.098	3
Médio	467	5	819	6	498	5
Profundidade 0,0 – 0,20 m						
Areia	39	17	198	23	121	9
Silte	149	4	106	13	656	-
Argila	326	28	88	46	161	41
pH	16	17	6	4	12	3
H+Al	211	14	324	3	220	6
MO	272	6	828	3	368	7
P	782	3	415	3	1.081	4
K	1.1087	18	1.745	-	3.461	27
Ca ²⁺	281	6	1.644	2	2.583	44
Mg ²⁺	486	24	1.935	3	1.538	18
SM	537	5	6.182	3	3.262	6
Médio	1.365	5	729	4	1.020	7

CV = Coeficiente de variação.

O alcance do semivariograma escalonado indica comportamento semelhante quanto ao comportamento dos atributos do solo, mostrando maior variabilidade para as áreas com TPA e pastagem, sendo que a TPA apresentou densidade amostral

mínima de 5 pontos por hectare nas duas profundidades, e a pastagem de 5 e 7 pontos por hectare, nas profundidade de 0,0-0,20 e 0,40-0,60 m respectivamente. Este comportamento mostra que a ação antrópica causa maior variabilidade dos atributos do solo.

Avaliando os valores da densidade amostral (Tabela 4) com base no alcance do semivariograma escalonado da SM para os diferentes ambientes, verifica-se comportamento similar. A densidade amostral mínima da SM para a área com TPA é de 5 pontos por hectares nas duas profundidades. Para floresta a densidade amostral mínima da SM é de 3 nas duas profundidades, enquanto, que na pastagem é de 3 e 6 pontos por hectare nas duas profundidades respectivamente.

A SM também apresenta maior variabilidade nas áreas com TPA e pastagem, sendo menor para a floresta, mostrando que esta pode estar diretamente ligada ao comportamento dos atributos destes solos. Siqueira (2010) encontrou relação entre a SM e os atributos do solo. Segundo o autor, a SM pode auxiliar na estimativa de alguns atributos físicos químicos e mineralógicos do solo.

A densidade amostral baseada no CV dos atributos apresenta comportamento semelhante ao do parâmetro alcance, no entanto, a densidade amostral é muito elevada (Tabela 4). Este comportamento é decorrente da alta variabilidade individual de alguns atributos (K, fósforo, Ca, argila, etc.), o que influencia diretamente na determinação média da densidade amostral usando o CV.

2.4. CONCLUSÕES

1. A área com terra preta arqueológica apresentou maior fertilidade no qual o potássio não diferiu dos outros ambientes.
2. A área com TPA e pastagem apresentam maior dependência espacial dos atributos do solo.
3. A suscetibilidade magnética mostrou-se similar aos atributos do solo nos ambientes estudados, apresentando mesmos modelos ajustados de semivariograma.

2.5. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, E. A.; LANI, J. L.; AMARAL, E. F.; GUERRA, A. Uso da Terra e propriedades físicas e químicas de Argissolo Amarelo distrófico na Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n.2, p.307 – 315, 2004.

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

BARTINGTON. **Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System**. Bartington Instruments. 2013, 71p. Disponível em na internet: <http://www.bartington.com/Literaturepdf/Operation%20Manuals/om0408%20MS2.pdf>; Acessado em: 24/01/2013.

BERTOL, I. ALBURQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.1, p.155-163, 2004.

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

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T .; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.6, 2279-2288, 2008.

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 American Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; OLIVEIRA, I. A. Interferências dos pedoambientes nos atributos do solo em uma topossequência de transição Campos/Floresta. **Revista Ciência Agronômica**, 41: 527-535. 2010.

CAMPOS, M. C. C.; **Pedogeomorfologia aplicada a ambientes Amazônicos do Médio Rio Madeira**. 2009. 260f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.

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

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO M. R.; SOUZA, R. V. C. C.; ALMEIDA, M. C. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p.598-609, 2011.

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**, Piracicaba, v.66, n.3, p. 338-352, 2009.

CLINE, M.G. Principles of soil sampling. **Soil Science**, Baltimore, v. 58, n.2, p. 275-288, 1944.

CRESSIE, N. Statistics for spatial data. New York, John Wiley, 1991. 900p.

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**, Viçosa, v.33, n.1, p.85-93, 2009.

CPRM. Centro de Pesquisa de Recursos Minerais. Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens. (Relatório Técnico) Manaus, 2001. 93p.

DEARING, J.A. **Environmental magnetic susceptibility**. Using the Bartington MS2 system. England: British Library, 1994, 104 p.

EDEN, M. J.; BRAY, W.; HERRERA, L. MC EVAN, C. Terra Preta soils and their archaeological context in the Caquetá basin of south-east Colombia. **American Antiquity**, Washington, v. 49, n. 1, p. 125-140, 1984.

EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FALCÃO, N. P. S.; BORGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (Carica papaya L.). **Acta Amazônica**, Manaus, v.36, n.4, p.401-406, 2006.

FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L. C.; CARVALHO(3), P. C. F.; LEITE, J. G. D. B.; FRAGA, T. I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.4, p. 771-780, 2007.

GERMAN, L. A. Historical contingencies in the coevolution of environment and livelihood: contributions to the debate on Amazonian Black Earth. **Geoderma**, Amsterdam, v.111, n.3-4, p.307–331, 2003.

GOULART, R. Z.; LOVATO, T.; PIZZANI, R.; LUDWIG, R. L.; SCHAEFER, P. E. Comportamento de atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.6, n.11, p.1-15, 2010.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um Latossolo Roxo**. 1993. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade de Campinas, Campinas, 1993.

GRIMLEY, D.A., ARRUDA, N.K., BRAMSTEDT, M.W. Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible, and precise delineation of hydric soils in the Midwestern USA. **Catena**, Amsterdam, v.58, n.2, p.183– 213, 2004.

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

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1991. 600p.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Aggregate stability and size distribution. In: BLACK, C. A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: ASA, 1965. pt. 1, cap. 39, p. 499-510.

KERN, D. C. **Geoquímica e pedogeoquímica de sítios arqueológicos com terra preta na florestanacional de Caxiuanã (Portel-PA)**. 1996. 124f . Tese (Doutorado em Geociências, área Geoquímica.). Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1996.

KERN, D.C. KÄMPF, N. Antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná, Pará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, n.3, 219-225, 1989.

LARK, R. M. Designing sampling grids from imprecise information on soil variability, an approach based on the fuzzy kriging variance. **Geoderma**, Amsterdam, v.98, n.1/2, p.35-39, 2000.

LEHMANN, J.; KERN, D.C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. (Eds.), **Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management**. Kluwer Academic Publishers, Dodrecht, 2003. 523p.

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

MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; BENITES, V. M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. (Ed.). **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 172-188.

MATHÉ, V.; LÉVÊQUE, F.; MATHÉ, P. E.; CHEVALLIER, C.; PONS, Y. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 58, n. 3, p. 202–217, 2006.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Littleton, v. 58, n.8, p. 1246-1266, 1963.

MINITAB RELEASE 14.1. **Statistical Software**. US/ Canadá. 2000.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.1, p.69-77, 2005.

MONTANARI, R.; SOUZA, G. S. A.; PEREIRA, G. T.; MARQUES, J.; SIQUEIRA, D. S.; SIQUEIRA, G. M. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Odensee, v.13, n.5, p.542-552, 2012.

MOREIRA, A. Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia Ocidental. **Bragantia**, v.66, p.307-315, 2007.

MULLINS, C. E. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science- a review. **Journal of Soil Science**, v. 28, n.2, p.223–246, 1977.

NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; CARDOSO, E. L.; MACEDO, R. L. G.; FERREIRA, M. M.; SOUZA, F. S. Atributos indicadores da qualidade do solo em Sistemas Agrossilvipastoril no Noroeste do Estado de Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.74, n.5, p.45-53, 2007.

NOVOTNY, E. H.; DEAZEVEDO, E. R.; BONAGAMBA, T. J.; CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; HAYES, M. H. B. Studies of the compositions of humic acids from Amazonian dark earth soils. **Environmental Science and Technology**, Washington, v.41, n.2, p.400-405, 2007.

PERIN, R.; MARTINS, G. C.; MUNIZ, S. R. LINHARES, G. M. Sistema de pastejo rotacionado intensivo como alternativa para a recuperação de áreas degradadas no Estado do Amazonas. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, Belém, v. 4, n. 8, p.235-241, 2009.

PIGNATARO NETTO, I. T.; KATO, E.; GOEDERT, W. J. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho-amarelo sob pastagens com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.5, p.1441-1448, 2009.

PORTUGAL, A. F.; JUNCKSH, I.; , SCHAEFER, C. E. R. G.; NEVES, J. C. L. Estabilidade de agregados em Argissolo sob diferentes usos, comparado com mata. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n.4, p. 545-553, 2010.

RAIJ, B. VAN.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Eds.) **Análise química para avaliação da fertilidade do solo**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285p.

SALTON, J. C.; FABRICIO, A. C.; MACHADO, L. A. Z.; OLIVEIRA, H. Pastoreio de aveia e compactação do solo. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 69, n.1, p. 32-34, 2002.

SILVA, F. D.; COUCEIRO, P. R. C.; FABRIS, J. D.; GOULART, A. T.; KER, J. C. Magnesioferrita e caminho pedogenético de transformação de óxidos de ferro magnéticos em dois perfis de solo derivados de tufito da Região do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.763-775, 2005.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v.155, n.1, p.55–66, 2010.

SMITH N. J. H. Anthrosols and human carrying capacity in Amazonian. **Annals of the Association of American Geographers**, Washington, v. 70, n.4, p. 553-566, 1980.

SOMBROEK, W. Amazon **soil: A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region**. Wageningen: Centre for Agricultural Publications and Documentation, 1966. 292p.

SOUZA, Z. M.; MAQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R. Otimização amostral de atributos de latossolos considerando aspectos solo-relevo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, p.829-836, 2006b.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMPOS, M. C. C. Amostragem de solo para determinação de atributos químicos e físicos em área com variação nas formas do relevo. **Científica**, Jaboticabal, v.34, n.2, p.249-256, 2006a.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W.G.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Microbial response to charcoal amendments of highly weathered soils and Amazonian dark earths in Central Amazonia – preliminary results. In: GLASER, B.; WOODS, W.I. (Ed.). **Amazonian dark earths: explorations in space and time**. New york: Springer, 2004. p.195-212.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R. S.;UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, n.1, p.54-94, 1985.

VAN GROENIGEN, J.W.; SIDERIUS, W.; STEIN, A. Constrained optimisation of soil sampling for minimisation of the kriging variance. **Geoderma**, Amsterdam, v.87, n.3-4, p.239-259, 1999.

VIEIRA, S. R., TILLOTSON, P. M., BIGGAR, J. W., & NIELSEN, D. R. Scaling of semivariograms and the kriging estimation of field-measured properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, n.4, p.525–533, 1997.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Oakland, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S. R.; Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.) **Tópicos ciência do solo - Campinas**: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54. 2000.

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

McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.37, n.4, p.617-639, 1986.

YOEMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v.19, n.13, p.1467-1476, 1988.

CAPÍTULO 3 – Análises multivariadas de atributos do solo para caracterização de ambientes na região Sul do Amazonas

Resumo - O uso de técnicas estatísticas a fim de avaliar o comportamento de atributos do solo é uma importante ferramenta na determinação de manejo e uso adequado de solos. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar conjuntamente os atributos físicos, químicos e a suscetibilidade magnética do solo na caracterização de três ambientes e definir quais atributos apresenta potencial no estudo de indicadores de mudanças ambientais, por meio de estatísticas multivariadas. O estudo foi realizado em um Argissolo Vermelho submetido a diferentes ambientes: solo com horizonte antrópico ou terra preta arqueológica (TPA) na superfície, solo em ambiente natural ou floresta e solo em uso pecuário com pastagem de braquiária (*Brachiaria brizanta*). Nestas áreas foram estabelecidas malhas de 70 m x 70 m, com espaçamento regular de 10 m. Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,40–0,60 m nos pontos de cruzamentos da malha. Foram determinados os atributos químicos (pH em água, matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e acidez potencial (H+Al), físicos (textura) e a suscetibilidade magnética (SM). Os dados foram analisados submetendo-os a técnicas de estatísticas multivariadas. O estudo mostra que a área com TPA apresenta comportamento diferenciado da pastagem e floresta, sendo que os atributos químicos apresentam melhor ligação a TPA demonstrando a maior fertilidade de horizontes antrópicos em solos amazônicos. Os atributos mais fortemente ligados sendo estes possíveis indicadores de mudanças ambientais são o cálcio para TPA, acidez potencial (H + Al) para a floresta e argila para a pastagem

Palavras-chave: componente principal, Amazônia, terra preta arqueológica.

3.1. INTRODUÇÃO

As informações sobre a distribuição e o comportamento dos solos na região sul do Amazonas são baseadas, principalmente, em levantamentos generalizados, já que poucos são os trabalhos em nível de reconhecimento ou semi-detalhado. Neste sentido, o comportamento dos solos pode ser estudado a partir da avaliação de diversos fatores, como a quantificação de nutrientes, que respondem a fertilidade do solo (SILVA et al., (2010a), determinação dos atributos físicos, que representam a organização da estrutura do solo e o estudo dos microrganismos que são responsáveis pelos processos de mineralização, representando uma fonte potencial de fornecimento de nutrientes para as plantas (ANDREOLA; FERNANDES, 2007).

Muitas vezes, a avaliação desses fatores do solo, ao ser realizado por meio de métodos estatísticos univariados, eleva a dimensão do problema, além de onerar o processo (SILVA et al., 2010 a). Uma alternativa de análise para esses tipos de dados é o uso de análise multivariada, que é importante ferramenta para a análise exploratória de dados de solos, permitindo o agrupamento de amostras segundo sua similaridade e ainda permitindo a seleção de variáveis de maior importância na discriminação de grupos pré-selecionados (BENITES et al., 2010).

Uma das técnicas multivariadas que pode ser utilizado para o estabelecimento de grupos padrões é a análise multivariada de dados pela técnica de agrupamento que permite a construção de dendrogramas, que arranja os grupos em função do coeficiente de dissimilaridade, de distância euclidiana ou de outros coeficientes. Esta técnica tem o objetivo de agrupar parcelas de acordo com o grau de similaridade (SILVA et al., 2010a).

Outro procedimento aplicado no estudo dos atributos do solo é a análise de componentes principais (ACP). Esta análise tem como vantagens a redução dimensional do problema e a facilidade de interpretação dos dados (BUENO, 2001). O objetivo da ACP é explicar a estrutura da variância e da covariância de um vetor aleatório, composto de p variáveis aleatórias, por meio da construção de combinações lineares das variáveis originais (SILVA et al., 2010a). Além disso, a ACP pode ser usada para identificar e quantificar a variação do solo associada a diferentes processos pedogenéticos (CARVALHO JUNIOR et al., 2008).

Este tipo de análise é usado para transformar os dados originais para duas dimensões e, fazer uma estimativa da similaridade dos dados, ou seja, estes são

agrupados conforme sua maior similaridade (SANTOS; SANTOS, 2008; VALLADARES et al., 2008). É uma análise que não requer pressuposição da normalidade da distribuição, e não se realiza testes estatísticos de significância, e pode ser usada para reduzir o número de variáveis (VITHARANA et al., 2008), identificar padrões (GOMES et al., 2004) e gerar variáveis não correlacionadas (HENGL et al., 2007). As componentes principais (CP), quando utilizadas como variáveis independentes em modelos preditivos de propriedades e classes de solos, são definidas como componentes preditoras do solo (HENGL et al., 2004).

Outro procedimento utilizado em multivariada é a análise de fatores que, segundo Barroso (2003), é uma técnica estatística que tem por objetivo descrever a estrutura de dependência de um conjunto de variáveis através de fatores, que são variáveis e que supostamente, medem aspectos comuns. A análise fatorial identifica possíveis associações entre as variáveis observacionais, de modo que se defina a existência de um fator comum entre elas. Assim, pode-se dizer que a análise fatorial, ou análise de fator tem como objetivo a identificação de fatores subjacentes às variáveis observacionais, o que, sem dúvida, contribui para facilitar sobremaneira a interpretação dos dados (RODRIGUES, 2002).

Com objetivo de avaliar a variabilidade de atributos do solo, alguns pesquisadores tem utilizado a análise de qualidade com o uso de carta controle. Esta técnica de análise estatística multivariada é uma das principais ferramentas utilizadas no controle estatístico da qualidade e pode ser um indicativo de como as variáveis se comportam em cada manejo estudado (KUME, 1993, MONTGOMERY, 1985).

Outra técnica multivariada aplicada na avaliação de atributos do solo é a análise discriminante (AD) que é utilizada quando a variável dependente é categórica, ou seja, qualitativa (não métrica) e as variáveis independentes são quantitativas (métricas). O objetivo principal da AD é identificar as variáveis que discriminam os grupos e identificar o grupo mais adequado a que elas deverão pertencer, em função de suas características (HAIR et al., 2005). Para alcançar esse objetivo, a AD gera funções discriminantes (combinações lineares das variáveis) que ampliam a discriminação dos grupos descritos pelas variáveis dependentes (FÁVERO et al., 2009).

O uso conjunto destas técnicas pode auxiliar na tomada de decisão e no uso e manejo adequado, tendo por base o comportamento dos atributos do solo, além

disso, pode indicar possíveis atributos que sofrem maior alteração com interferência antrópica. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar conjuntamente os atributos físicos, químicos e a suscetibilidade magnética do solo na caracterização de três ambientes e definir quais atributos apresenta potencial no estudo de indicadores de mudanças ambientais na região Sul do Amazonas, por meio de estatísticas multivariadas.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

Localização e caracterização da área

O estudo foi realizado na região sul do Estado do Amazonas, em Manicoré, AM, sendo realizado o mapeamento de três áreas com diferentes ambientes: terra preta arqueológica (TPA) (07° 55' 02,1" S e 61° 31' 45,2" W) (A1), floresta (7°54'44,5" S e 61°31'44,7" W) (A2), pastagem (07°54'42" S e 61°31'50" W).

O ambiente com uso pecuário sob cultivo de pastagem está sob uso de braquiária (*Brachiaria brizanta*) com aproximadamente 10 anos de uso com pastejo extensivo e com aproximadamente uma (1) unidade animal por hectare; a área com presença de terra preta arqueológica estava submetida ao cultivo de milho com aproximadamente 120 dias após o plantio e a área com ambiente natural sob floresta consta de um fragmento de Floresta Tropical Densa, formada por árvores de 20 a 50 m de altura.

O solo foi classificado como Argissolo Vermelho (CAMPOS, 2009) e a vegetação característica dessa região é a Floresta Tropical Densa. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical chuvoso, apresentando um período seco de pequena duração (Am), temperaturas variando entre 25 e 27° C e precipitação média anual de 2.500 mm, com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho e umidade relativa do ar entre 85 e 90%.

Amostragem do solo

Nestas áreas foram estabelecidas malhas de 70 x 70 m abrangendo 0,49 hectares. O solo foi amostrado nos pontos de cruzamento da malha, com espaçamentos regulares de 10 m, perfazendo um total de 64 pontos amostrais em cada malha (Figura 1).

Atributos físicos e químicos do solo

Nas amostras deformadas coletadas nas profundidades 0,0 – 0,20 e 0,40 – 0,60 m, foram determinadas a análise granulométrica realizada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de alta rotação por 15 minutos, seguindo metodologia proposta pela Embrapa (1997).

Foram realizadas as seguintes análises químicas nas amostras de solo coletadas: pH em água ; cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio trocáveis (K), fósforo disponível (P) e a acidez potencial (H+Al) foi extraído utilizando-se o método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 1987).

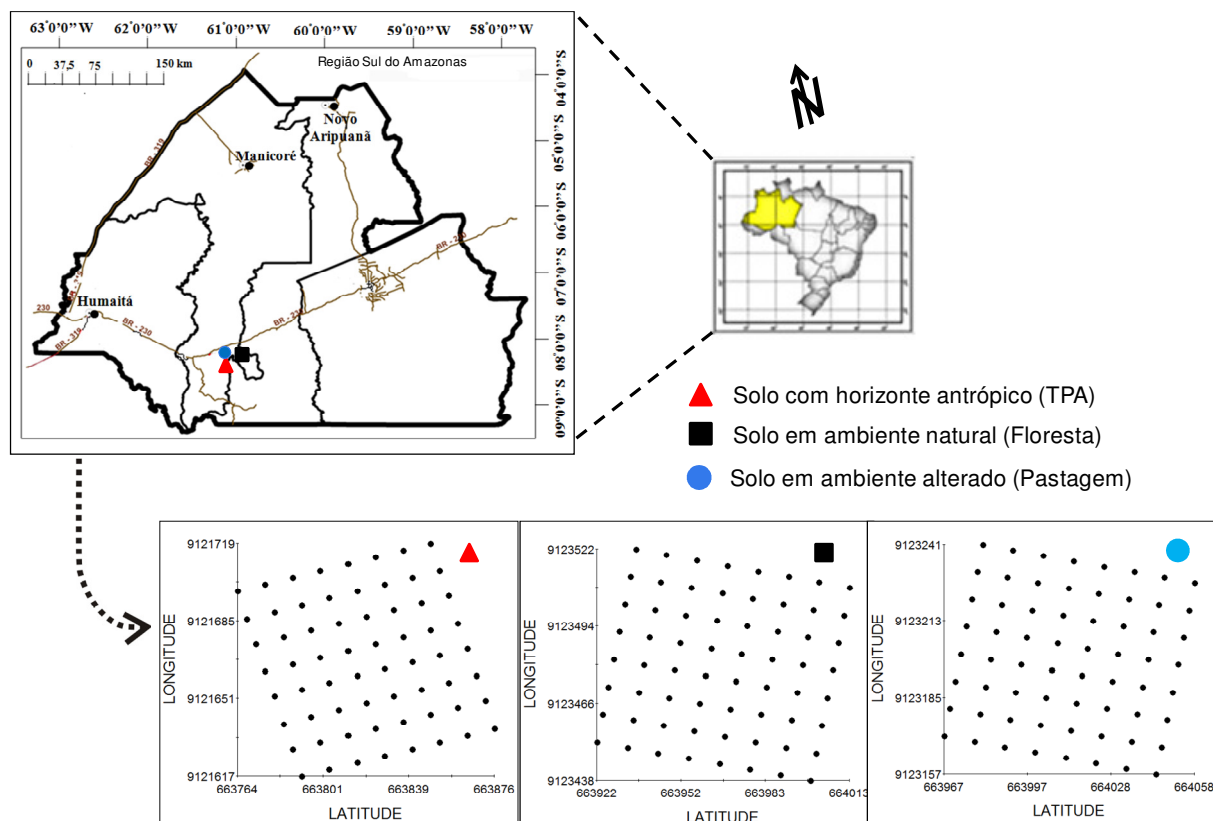


Figura 7. Mapa de localização e esquema de amostragem do solo nas áreas estudadas na região Sul do Amazonas.

O pH foi determinado potenciometricamente utilizando-se relação 1:2,5 de solo: em água (EMBRAPA, 1997). O carbono total foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yoemans e Bremner (1988), a matéria orgânica, por sua vez, foi estimada com base no carbono orgânico.

Suscetibilidade Magnética

Para determinação da suscetibilidade magnética (SM) na TFSA (terra fina seca ao ar) foi utilizado o equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B. A avaliação foi feita em baixa frequência (0,47 kHz) (DEARING, 1994). Segundo o autor, as medições de dupla frequência (alta – 4,7 kHz e baixa) devem ser utilizadas em estudo de caráter qualitativo para indicar a presença de

minerais magnéticos de domínio simples e múltiplos. No caso de única leitura, para obtenção de resultados mais precisos é indicado o uso da baixa frequência (BARTINGTON, 2013), sendo esta metodologia adotada neste trabalho.

Análise dos dados

A partir dos dados quantificados em laboratório, foram obtidas as médias (somente para a análise de agrupamento para cada variável) e os dados foram padronizados para os demais métodos multivariados utilizados (média nula e variância unitária) a fim de eliminar o problema de estarem em escalas diferentes.

A análise multivariada refere-se a todos os métodos estatísticos que simultaneamente analisam múltiplas medidas dependentes entre si sobre cada variável ou atributo a ser investigado. Na posse de uma enorme quantidade de informações, a questão principal que surge é naturalmente como interpretá-las e, obedecendo à natureza multivariada, como extrair a informação relevante. Os dados foram analisados preservando a estrutura multivariada neles contida utilizando as abordagens conhecidas por análises de agrupamento por método hierárquico, scree-plot, componentes principais, fatores, carta controle e análise discriminante sendo um complemento do outro o que permite melhor discussão dos resultados.

Considerando-se a estrutura multivariada contida nos dados, foram empregadas técnicas estatísticas exploratórias para verificar semelhanças entre os manejos na tentativa de agrupá-los usando-se os atributos físicos, químicos e suscetibilidade magnética do solo.

Realizou-se análise de agrupamento por método hierárquico, usando a distância euclidiana como medida de semelhança entre os registros e o método de Ward, como estratégia de agrupamento. O resultado da análise foi apresentado em forma gráfica (dendrograma) que auxiliou na identificação dos agrupamentos dos ambientes com as variáveis analisadas.

Para determinar a quantidade de componentes que devem ser excluídas da análise, foram determinados os autovalores e o gráfico “scree-plot”, o qual é um gráfico dos autovalores em função da ordem das componentes principais, representando graficamente a porcentagem de variância explicada por cada atributo. Quando esta porcentagem se reduz e a curva passa a ser quase paralela ao eixo das abscissas, as componentes correspondentes podem ser excluídas. Vale salientar que as componentes obtidas nesta análise constituem as novas variáveis

respostas que serão utilizadas nas análises subsequentes do estudo (MAESTRE et al., 2010).

A análise de agrupamento foi complementada com a de componentes principais, para obter um conjunto menor de combinações lineares das variáveis que preservasse a maior parte da informação fornecida pelas variáveis originais (SILVA et al., 2010b). Esta análise possibilita avaliar qualitativamente as características de cada área e verificar as variáveis que estão relacionadas com cada uma delas.

Na maioria dos estudos de ciência do solo, como no caso deste trabalho, apenas os dois primeiros componentes são utilizados, considerados suficientes para explicar os dados, pois, facilitam a interpretação do gráfico em duas dimensões (GOMES et al., 2004). Um ponto qualquer plotado no diagrama (representado pelas amostras coletadas em campo em cada ambiente) pode ser relacionado com cada seta (representando o atributo do solo) por meio de perpendicularidade partindo da linha da seta até o referido ponto. A ordem na qual os pontos se projetam na seta, da sua extremidade até sua origem, dá uma indicação dessa relação. As variáveis com sua projeção perpendicular próxima ou além da ponta da seta são mais positivamente correlacionadas e influenciadas pelo atributo em questão. Aquelas na extremidade oposta são influenciadas em menor grau. O ângulo de inclinação de cada seta com relação a cada eixo indica o quanto estreitamente correlacionado está o atributo com este eixo (ALVARENGA; DAVIDE, 1999).

A partir dos escores dos componentes principais é possível condensar a maior quantidade da informação original contida em p variáveis ($p = 10$, neste estudo para a profundidade de 0,0-0,20 m e 0,40-0,60 m) em duas variáveis latentes ortogonais denominadas componentes principais (CP), que são combinações lineares das variáveis originais criadas com os dois maiores autovalores da matriz de covariância dos dados (HAIR et al., 2005).

A adequação desta análise é verificada pela informação total das variáveis originais retida nos componentes principais que mostram autovalores superiores à unidade, ou autovalores inferiores à qual não dispõem de informação relevante. Para a apresentação dos resultados adotou-se a utilização de gráficos a partir de vetores identificando os principais fatores (atributos) responsáveis pelos agrupamentos das áreas. Assim, os atributos do solo analisados com a análise de componente principais (ACP) são agrupados de acordo com suas semelhanças, nas áreas estudadas, que, por sua vez, são separadas por critérios de dissimilaridade, o que

levará à formação de grupos, podendo ser validada ou não a utilização da ACP para atributos do solo, nas áreas estudadas.

Posteriormente, foi realizada uma análise de fatores que é uma técnica exploratória multivariada que permite relações entre um conjunto de variáveis a serem explicadas em termos de um número limitado de novas variáveis, sendo este último adotado como responsável pela covariação entre as variáveis observadas. Dentre as diversas técnicas disponíveis para a extração de fatores, optou-se por utilizar a extração por componentes principais (JEFFERS, 1978) calculado a partir da matriz de correlação entre variáveis. Para facilitar a interpretação, utilizou-se o método de rotação ortogonal denominado Varimax, o qual transforma os coeficientes dos fatores de maneira que os valores das correlações entre os fatores e as n variáveis originais se aproximem de zero ou de 1 (HOFFMANN, 1992). A comunalidade neste tipo de análise representa o quanto que cada variável original é explicada pelos fatores comuns.

O primeiro fator extraído dessa matriz é a combinação linear das variáveis originais, que representa o máximo de variabilidade possível contida nas amostras. O segundo fator é a segunda função linear das variáveis originais, que responde pela maior parte da variabilidade restante, e assim por diante. Os fatores são independentes entre si, não têm unidades e são variáveis padronizadas. Os coeficientes das funções lineares que definem os fatores são usados para interpretar o seu significado, utilizando o sinal e o valor relativo dos coeficientes como uma indicação do peso a ser atribuído a cada variável (MILSTEIN et al., 2005).

O efeito do manejo do solo e sua interação sobre cada variável original e fator extraído foi testado pelo General Linear Model (GLM), utilizado como análise de variância (MANOVA), no qual esse procedimento analisou as áreas (com 3 ambientes diferentes) com os atributos estudados. O objetivo desta análise foi o de verificar se os valores de F formados pelas médias das variáveis analisadas conjuntamente diferiram quando os ambientes foram contrastados entre si. Em caso afirmativo, indica que os manejos são diferentes analisando todos os atributos em conjunto.

Para um melhor entendimento de como ocorre a variabilidade dos atributos do solo em todos os pontos coletados, foi realizado uma análise de qualidade com o uso de carta controle. Em uma linha central coloca-se a tendência das variáveis; já as curvas irão determinar a variabilidade de seu comportamento e a tendência

futura. Segundo Werkema (1997), as cartas de controle são ferramentas para o monitoramento da variabilidade e para a avaliação da estabilidade de um processo. De acordo com Kume (1993) e Montgomery (1985), a carta de controle é uma das principais ferramentas utilizadas no controle estatístico da qualidade e pode ser um indicativo de como as variáveis se comportam em cada manejo estudado.

A fim de comparar os perfis das diferentes áreas utilizando todas as variáveis conjuntamente, foi realizada uma análise complementar que é a análise discriminante, uma matriz de classificação de dados. A partir desta análise é possível definir o quanto a distintas são as áreas estudadas, sendo estas representadas em um gráfico, onde é possível verificar a separação entre elas. Os eixos deste gráfico representam as variáveis canônicas, que são novas variáveis multivariadas criadas a partir do conjunto original de variáveis ou atributos. Através da análise dos coeficientes canônicos é possível definir a natureza da diferença entre os grupos e desta forma justificar o grau de separação obtido.

Todas as análises estatísticas foram processadas com auxílio do programa estatístico Statistica 7.0 (STATISTICA, 2005).

3.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diante da possibilidade de utilização das variáveis selecionadas para distinção dos três ambientes amazônicos estudados, fez-se uso da análise de agrupamento hierárquico objetivando avaliar a similaridade por meio de um dendrograma de ordenação (Figuras 2 e 3).

Uma vez que se obtém variação expressiva nos valores de distância euclidiana entre os acessos, para o conjunto de variáveis consideradas, é possível fazer uma divisão de grupos. A divisão mostrou a ordenação dos acessos segundo as características e a qualidade do solo. Nesta análise, as áreas TPA, floresta e pastagem foram agrupadas com base no seu grau de semelhança, com o objetivo de classificá-las em grupos homogêneos.

Nas profundidades de 0,0–0,20 m e 0,40–0,60 m (Figuras 2 e 3) foi admitido um corte na distância de euclidiana de 2,5 permitindo uma divisão clara de grupos nas duas profundidades. Isso indica que usando conjuntamente os atributos químicos, físicos e a SM, foi possível ordenar os dados em dois grupos de solos: o I, englobando os dados que representam a área com TPA nas duas profundidades, o

II formado pela área floresta e pastagem nas duas profundidades evidenciando, assim, que as áreas possuem diferenças em relação aos atributos analisados.

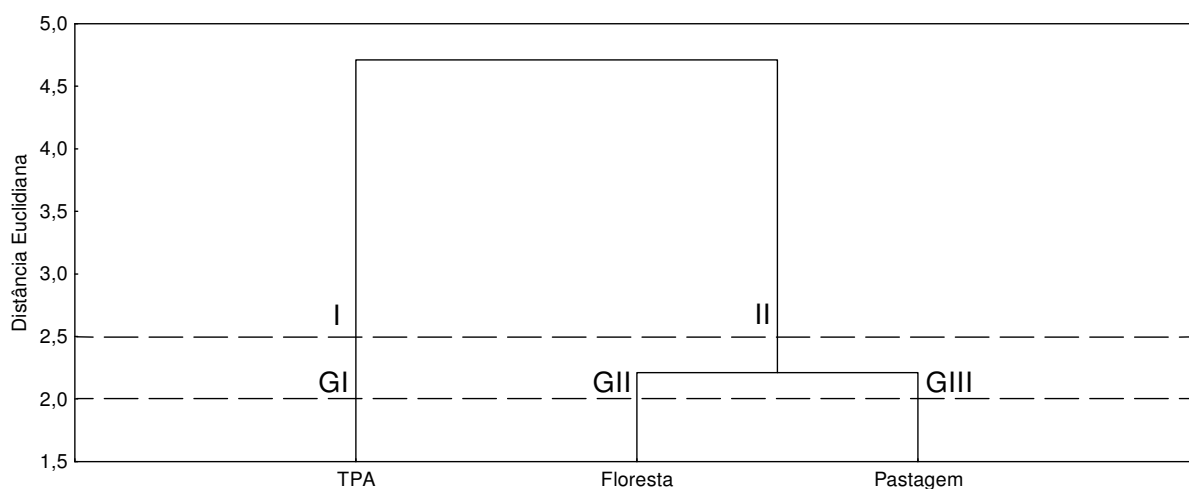


Figura 2. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo as variáveis analisadas na profundidade de 0,0–0,20 m.

A diferenciação dos dois grupos foi marcante, mostrando as particularidades de cada ambiente, pois as características dos atributos de um mesmo grupo são semelhantes e diferentes do comportamento de outros agrupamentos (VALLADARES et al., 2008). Esse resultado deve-se ao fato de que os solos com horizonte antrópico (TPA) se diferem química e fisicamente de solos adjacentes. Campos et al. (2012a) afirmam que as terras pretas arqueológicas apresentam atributos químicos e físico-químicos superiores aos solos não antropogênicos, conferindo-lhes maior fertilidade.

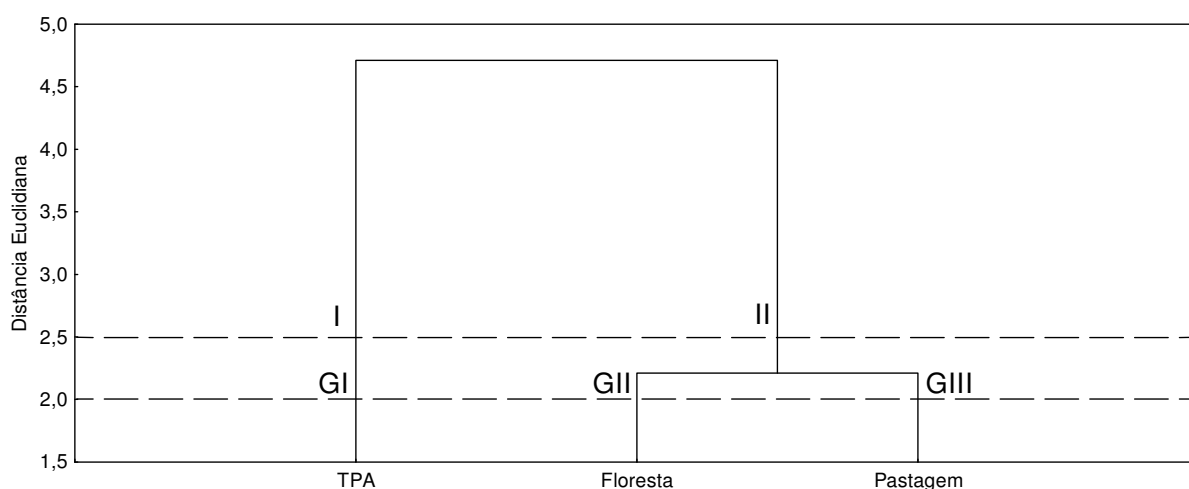


Figura 3. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo as variáveis analisadas na profundidade de 0,40–0,60 m.

Segundo Young e Hammer (2000), esse comportamento diferenciado dos solos ocorre em função de sua natureza genética, confirmando a premissa da análise de agrupamento, que tem por finalidade reunir, por algum critério de classificação, as unidades amostrais em grupos, de tal forma que exista homogeneidade dentro do grupo e heterogeneidade entre grupos.

No entanto, estas áreas mostram comportamento diferenciado, quando se admite um corte na distância euclidiana 2,0 nas duas profundidades (Figura 2 e 3), formando três grupos diferentes, sendo GI o grupo formado pela área com TPA, GII o grupo formado pela área com floresta e o GIII formado pela área com pastagem, o que pode ser um indicativo, de que o manejo pode influenciar neste comportamento.

A Figura 4, com gráfico do “scree plot”, também pode ser usada para a verificação da importância e contribuição de cada variável para explicação da variância total. Esse gráfico conjuntamente com os autovalores pode ser utilizado para a tomada de decisão da quantidade de componentes devem ser retidas para posterior aplicação da análise de componente principal (ACP).

Os pesos dos atributos de cada ambiente, na primeira e segunda componente retida, mostra que os atributos mais significativos, para os 83,07% e 74,88% da variabilidade explicada nas profundidades 0,0–0,20 m e 0,40–0,60 m respectivamente, foram: K (9,96%), Ca^{2+} (9,80%), pH H_2O (9,58%), SM (9,28%), Mg^{2+} (9,26%) e P (9,20%) (0,0 – 0,20 m) (Figura 4 A) e Ca^{2+} (9,60%), pH H_2O (9,24%), Mg^{2+} (9,12%), P (8,64%) e MO (8,57%) (0,40 – 0,60 m) (Figura 4 B). Sendo que nestes atributos, possivelmente, ocorra maior impacto ou alteração, quando submetidos a alguma forma de manejo.

O método “scree plot” pode ser substituído pelo método dos autovalores (Tabela 1) com valor superior a um (1), ou ainda, pelo conjunto de componente principal (CP) que expliquem acima de 70% da variância, como critérios para decisão do número de CP a serem retidas (MANLY, 2008). Neste caso, pode-se utilizar as duas primeiras componentes principais, para representar graficamente, o poder discriminatório dos atributos do solo, em cada ambiente estudado. Estas duas componentes devem explicar no mínimo 70% da variância total, para se obter confiança na tomada de decisão.

Dentro deste contexto, a primeira e a segunda componente principal foram necessárias para explicar a variância total, devido somente estas apresentarem

elevados autovalores (7,30 e 1,00 na profundidade de 0,0-0,20 m, 6,12 e 1,35 na profundidade de 0,40-0,60 m), justificando o uso da CP1 e CP2 (Tabela 1).

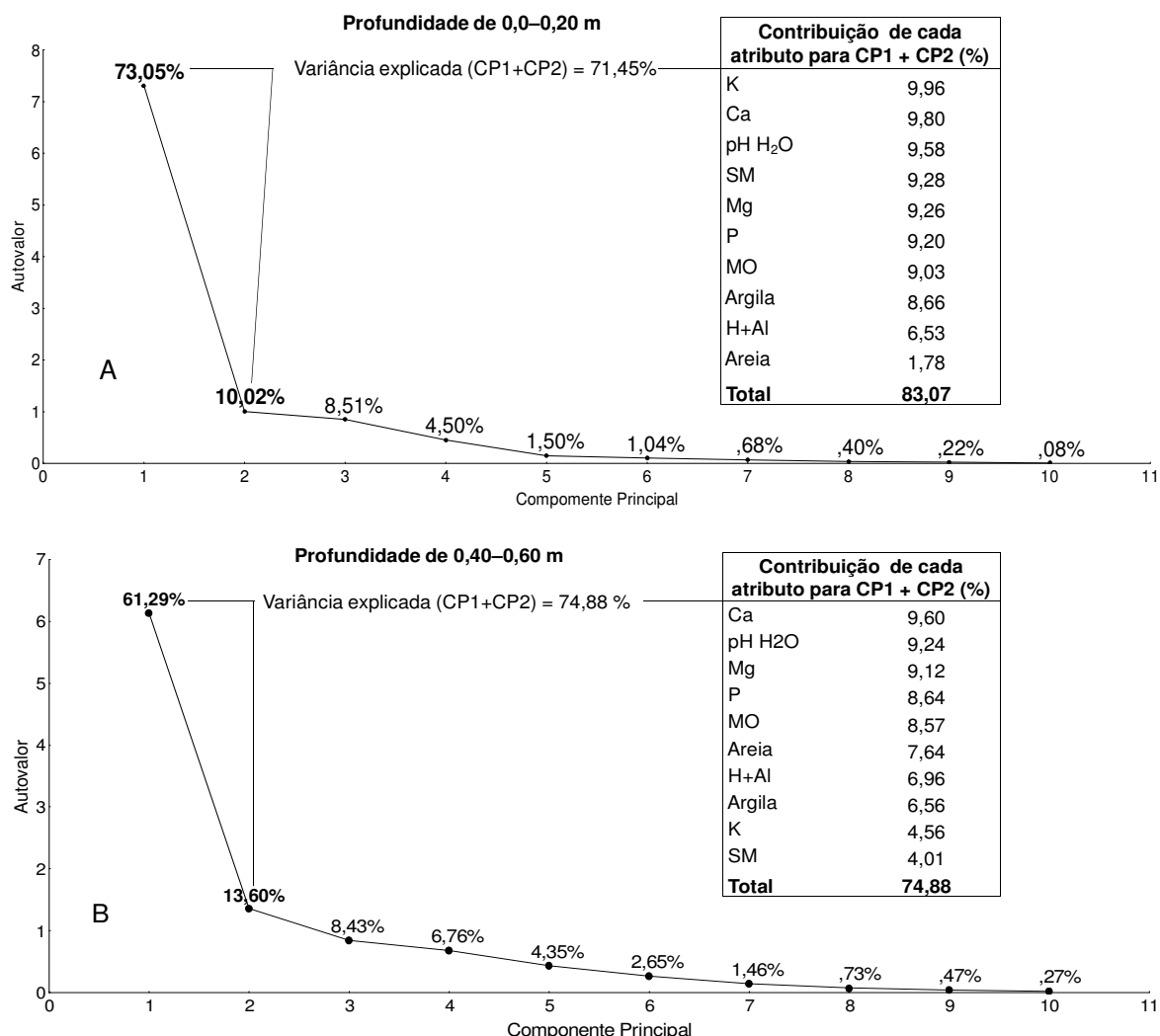


Figura 4. Proporção da variação no conjunto de dados explicada pelo componente principal (PC) e contribuição de cada variável para explicação da variância total pelo método “scree plot”. A = profundidade de 0,0–0,20 m; B = profundidade de 0,40–0,60 m.

A correlação das variáveis e a representação gráfica nos componentes principais (Tabela 2 e Figura 5) permitiram caracterizar as variáveis que mais discriminaram na formação e diferenciação dos ambientes. Quanto ao percentual de variância explicado pelas CPs, verifica-se que na profundidade 0,0–0,20 m (Tabela 2), a primeira e segunda componente é responsável por 83,07% da variância total, sendo 73,05 % na CP1 e 10,02% na CP2. Na profundidade 0,40–0,60 m (Tabela 2), a duas primeiras CPs foram responsáveis 74,88% da variância dos dados originais,

com 61,29% na CP1 e 13,60% na CP2. Loss et al. (2009), Silva et al. (2009) e Kummer et al. (2010), encontraram valores de variância acima de 70% em atributos físicos e químicos do solo, sendo esses valores, atribuídos a variabilidade destes atributos.

Tabela 1. Autovalores e % da variância pela Análise dos Componentes Principais para as análises químicas do solo.

Componente	Autovalores	% dos Autovalores	% Cumulativas dos Autovalores
Profundidade 0,0–0,20 m			
1	7,304793	73,04793	73,0479
2	1,002111	10,02111	83,0690
3	0,850722	8,50722	91,5763
Profundidade 0,40–0,60 m			
1	6,128562	61,28562	61,2856
2	1,359653	13,59653	74,8822
3	0,842834	8,42834	83,3105

As variáveis mais fortemente correlacionadas com a área de TPA na profundidade de 0,0–0,20 m foram pH H₂O, MO, Ca²⁺, Mg²⁺, P e SM (Tabela 2 e Figura 5A), apresentando-se, no terceiro e quarto quadrante, com pequeno ângulo em relação ao eixo das abscissas. Solos com TPA apresentam maior teor de MO, o que lhe confere maior fertilidade. Valores elevados de P é uma característica marcante das TPAs. Em sítios arqueológicos no Amazonas, Cunha et al. (2009) encontraram valor de P de 116 mg kg⁻¹ em áreas de TPA sob floresta, 290,5 mg kg⁻¹ em TPA cultivada e 4,7 mg kg⁻¹ em áreas não antropogênicas. A incorporação de resíduos orgânicos, especialmente espinhas de peixe, carapaças de quelônios, ossos de animais ou mesmo de seres humanos, ricos em P, contribuiu para o seu elevado teor nas TPAs (SMITH, 1980, LIMA et al., 2002).

Quanto aos valores de Ca²⁺ e Mg²⁺ estes são elevados em TPAs como observados por Barros et al. (2012), justificando sua ligação a este ambiente. Este comportamento deve-se à incorporação de ossos ricos em cálcio pelos povos pré-colombianos ou pela maior afinidade do Ca²⁺ pelas superfícies de troca, resultando em sua menor lixiviação. Campos et al. (2012a), encontraram valores de Ca²⁺ e Mg²⁺ mais elevados nas TPAs, em relação a solos não antropogênicos, afirmando a forte ligação destes atributos a TPA (Tabela 2).

A SM também esta relacionada fortemente a área com TPA na profundidade de 0,0–0,20 m (Tabela 2 e Figura 5A), sendo esta ligação devida a este ambiente apresentar maior MO. A presença de matéria orgânica favorece o aumento da

suscetibilidade, pois proporciona as condições necessárias para a redução de ferro (MULLINS, 1977).

Tabela 2. Correlação entre cada componente principal e variáveis analisadas nos três ambientes estudados.

Varáveis	Componente principal		
	CP1	CP2	CP3
Profundidade 0,0 – 0,20 m			
Areia	-0,420577	0,034579	0,905995
Argila	0,930401*	-0,016233	0,003047
pH H ₂ O	-0,978538*	0,019005	-0,026967
Acidez potencia (H+Al)	0,804035*	-0,079144	0,077659
Matéria Orgânica	-0,948272*	-0,057533	-0,035114
Fósforo (P)	-0,958909*	0,012626	-0,092737
Potássio (K)	-0,080809	-0,994790*	0,023764
Cálcio (Ca)	-0,989511*	0,026008	-0,076529
Magnésio (Mg)	-0,962230*	-0,016517	-0,015475
Suscetibilidade Magnética	-0,963315*	0,001161	-0,081444
Profundidade 0,40 – 0,60 m			
Areia	-0,850816*	0,199056	0,086371
Argila	0,747539*	0,311334	0,129342
pH H ₂ O	-0,960924*	-0,015644	-0,128632
Acidez potencial	0,798272*	0,241429	0,368874
Matéria Orgânica	-0,329314	0,865057*	0,306439
Fósforo (P)	-0,928323*	-0,047597	-0,026721
Potássio (K)	0,293114	0,608593	-0,625687
Cálcio (Ca)	-0,977922*	0,058434	-0,021631
Magnésio (Mg)	-0,934860*	0,194632	-0,065652
Suscetibilidade Magnética	-0,631510*	-0,047930	0,418509

* Valores mais significativos; CP1: componente principal 1; CP2: componente principal 2; CP3: componente principal 3.

As áreas de pastagem e floresta são caracterizadas, por apresentar maior ligação à argila e acidez potencial (H+Al) (Tabela 2 e Figura 5A). Os valores de H+Al na área de floresta foram maiores entre os ambientes, provavelmente, em consequência da maior lixiviação promovida pelo intenso regime hídrico associado às melhores condições de drenagem (CAMPOS et al., 2010, CAMPOS et al., 2012b).

Na subsuperfície (0,40– 0,60 m), pode-se observar um comportamento similar a profundidade de 0,0–0,20 m. As variáveis mais fortemente correlacionadas com a TPA na profundidade de 0,40–0,60 m foram a areia, pH H₂O, MO, Ca²⁺, Mg²⁺, P e SM (Tabela 2 e Figura 5B). Em contrapartida, a área com pastagem se caracterizou por apresentar maior ligação à argila (Figura 5B), de acordo com o menor ângulo em relação ao eixo das abscissas, provavelmente, por apresentar solo mais argiloso. A floresta apresenta forte ligação com a H+Al (Figura 5B), como afirma Campos et al. (2012b), essa condição é devido a maior lixiviação promovida pelo intenso regime

hídrico associado às melhores condições de drenagem na áreas com floresta em ambientes amazônicos.

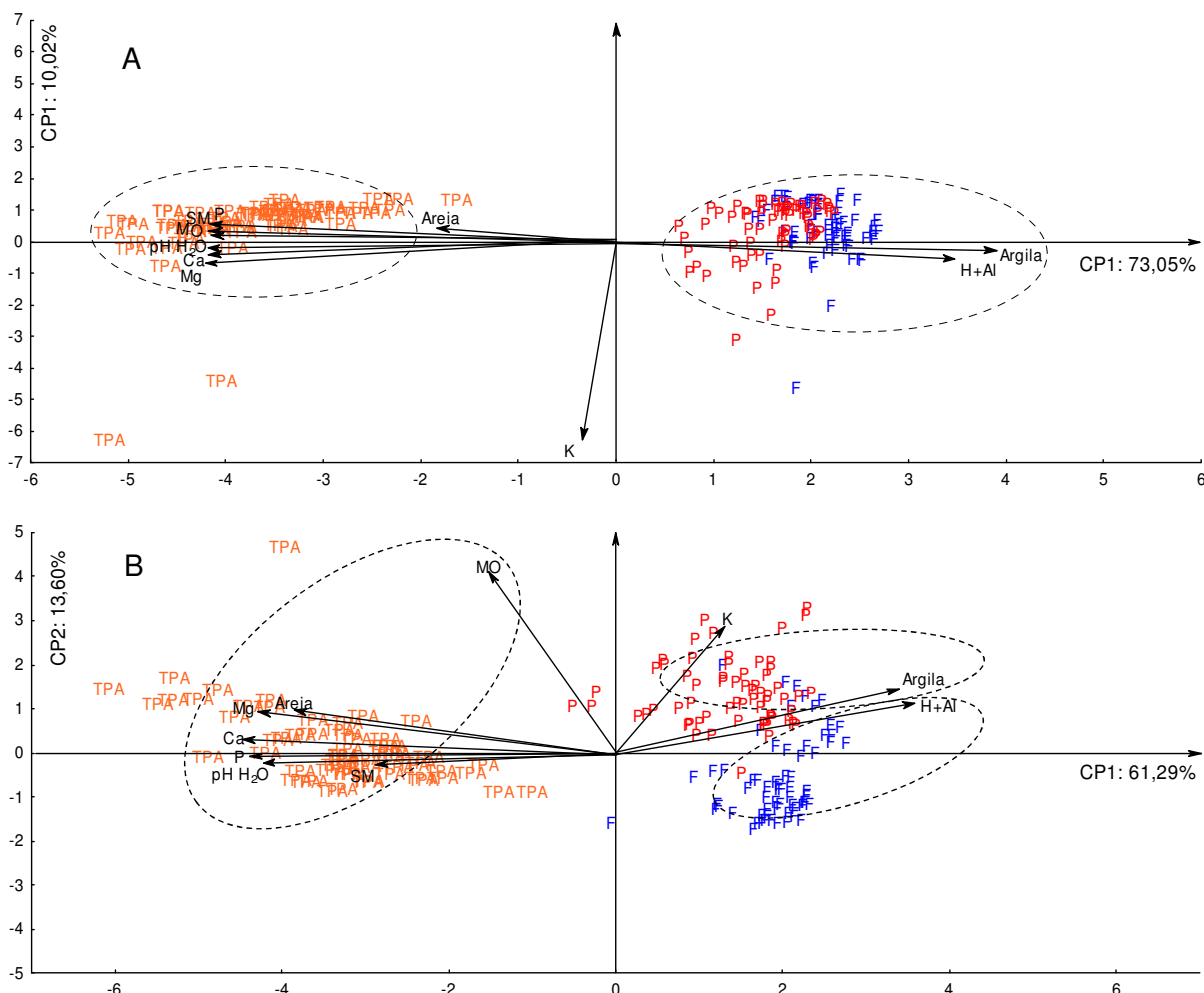


Figura 5. Análise de componentes principais das médias dos atributos do solo nos ambientes estudados. A = profundidade 0,0 – 0,20 m; B = profundidade 0,40 – 0,60 m; TPA= terra preta arqueológica; P= pastagem; F= floresta.

Com base nestes resultados, pode-se indicar que os ambientes floresta e pastagem, são mais semelhantes, ou apresentam comportamento físico, químico e SM mais homogêneo entre os ambientes (Tabela 1 e Figura 4). No entanto, a área com TPA o apresentou-se como um ambiente diferenciado, sendo suas características químicas, físicas e SM peculiar a este tipo de ambiente (Figura 5 A e B).

Com o objetivo de demonstrar a influência dos atributos estudados, no comportamento dos agrupamentos formados pelos ambientes, foi realizado a análises de fatores. Na Tabela 3, são apresentados o fator e a variância a ele

atribuída das duas profundidades estudadas para os atributos do solo e SM. O primeiro fator (Fator 1), que representa 73,69% da variância total, demonstra claramente que somente o potássio apresenta menos poder discriminatório entre, podendo ser um indicativo de que não haja diferença entre os três ambientes na profundidade de 0,0–0,20m, sendo este apresentado no Fator 2.

Tabela 3. Análise fatorial dos atributos do solo e suscetibilidade magnética do solo nas duas profundidades estudadas com os fatores (Fator 1 e 2) correspondentes nos ambientes estudados na região Sul do Amazonas.

Atributos	-----Profundidade 0,0-0,20 m-----		-----Profundidade 0,40-0,60 m-----	
	Fator 1	Fator2	Fator 1	Fator2
Areia	0,526836*	0,205837	0,830345*	0,267486
Argila	-0,927258*	0,031663	-0,764111*	0,266531
pH H ₂ O	0,978019*	-0,021800	0,959871*	0,048330
Acidez potencial	-0,798974*	0,084820	-0,811210*	0,200701
Matéria orgânica (MO)	0,947510*	0,094369	0,248974	0,918742*
Fósforo (P)	0,955780*	-0,002876	0,927550*	0,036452
Potássio (K)	-0,027139	0,981456*	-0,478394	0,514503*
Cálcio (Ca ²⁺)	0,989056*	-0,013465	0,969478*	0,139332
Magnésio (Mg ²⁺)	0,961184*	-0,020344	0,915273*	0,265287
Suscetibilidade Magnética	0,960728*	0,008044	0,632019*	0,046771
Variância relativa	73,69%	10,24%	61,81%	13,87%

* Valores mais discriminatórios.

A argila e H+Al, são diretamente proporcionais aos demais atributos, o que indica que quando a argila e H+Al aumentam, os demais atributos diminuem e vice-versa. Barreto et al., (2006) encontraram relação entre a acidez potencial e o pH do solo, onde observaram que quanto maior o pH, menor a acidez potencial em área de mata. Na profundidade de 0,40–0,60 m nota-se comportamento muito semelhante entre os atributos, onde somente a MO apresentou menor poder discriminatório, sendo apresentada no Fator 2 juntamente com o K. Isso significa que quanto mais elevados teores de MO menor é o poder discriminatório do K.

Para avaliar o comportamento de cada atributo na variabilidade de todos os atributos em conjunto, foi realizado o gráfico ou carta de controle de variabilidade dos atributos em cada ambiente (Figura 6). A análise possibilita visualizar a separação clara dos ambientes, mostrando que estes apresentam variabilidade específica em cada manejo. A área com TPA se difere da área de pastagem e floresta nas profundidades, no entanto, na profundidade de 0,40–0,60 m, a variabilidade dos atributos e SM, é menor, ou os atributos, se apresentam mais

homogêneos. Esta análise facilita a interpretação da influência do horizonte superficial antrópico, ao qual, se difere de solos adjacentes.

Nota-se que a TPA apresenta maior variabilidade dos dados, seguida pela floresta e pastagem. Isso demonstra a influência da transformação antropogênica sob os solos com horizonte antrópico (TPAs). Evidências arqueológicas indicam que atividades humanas antigas nos habitats amazônicos transformaram significativamente as paisagens na vizinhança dos seus assentamentos, notadamente no pré-histórico tardio. Um registro marcante a respeito disso são as áreas de solo que foram afetadas pelo homem pré-histórico, que apresentam cor escura, restos de material arqueológico (fragmentos cerâmicos e de artefatos líticos) e alto teor de Ca, Mg, Zn, Mn, P e C (KERN et al., 2009).

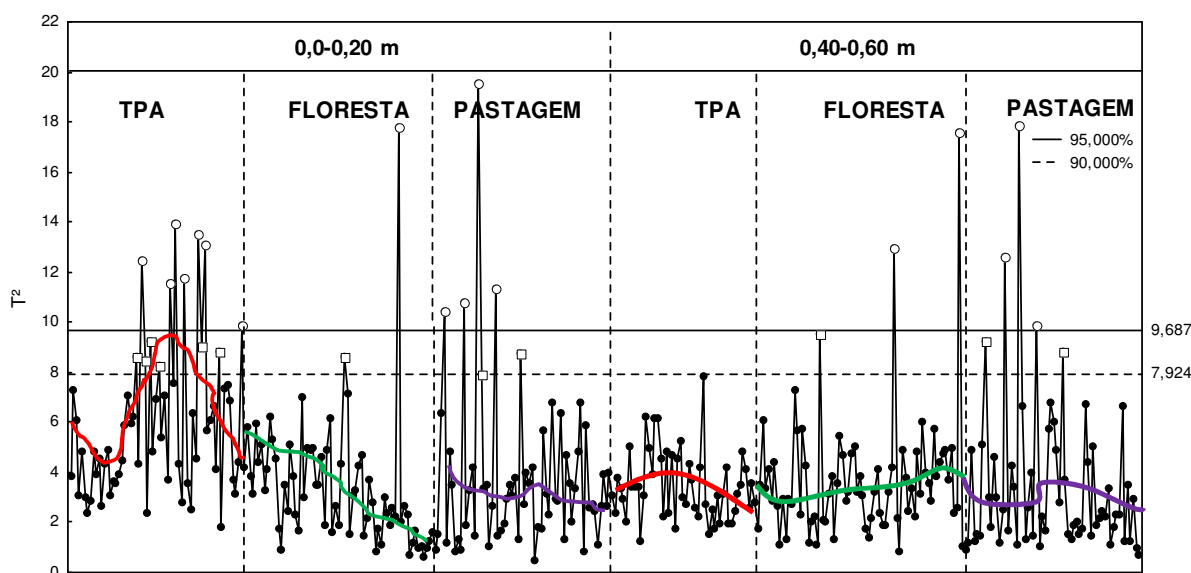


Figura 6. Carta controle da variabilidade dos atributos em cada ambiente estudado na região Sul do Amazonas.

Como observado nas Figuras 5A,B e 6 a área com TPA se difere, devido a maior fertilidade, e este comportamento está diretamente ligada a maior variabilidade dos dados. Neste sentido, com o objetivo de verificar as associações da variabilidade existentes entre os ambientes e seus atributos químicos, físicos e SM foi aplicado à técnica complementar com o uso de análise discriminante o que permitiu complementar, de maneira mais eficiente, os resultados obtidos para todas as áreas (Tabela 4 e Figura 7).

As áreas possuem características diferentes como a área com TPAs e ao mesmo tempo similares como a pastagem e floresta, de acordo com as variáveis analisadas. Como o solo com horizonte antrópico apresenta maior fertilidade e maior teor de MO em relação à floresta e pastagem, este pode ter sido o fator que mais influenciou na caracterização dos atributos e a SM de cada área. Além disso, o fato do solo da floresta e pastagem não apresentarem horizonte antrópico deve ter contribuído decisivamente para que os atributos destas áreas sejam mais semelhantes.

Tabela 4. Autovalores e % da variância pela análise de discriminante canônica para os atributos do solo nos ambientes estudados.

Raiz	% dos Autovalores	% Cumulativas dos Autovalores
	Profundidade 0,0 - 0,20 m	
1	49,33	49,33
2	2,29	51,62
	Profundidade 0,40 - 0,60 m	
1	29,09	29,09
2	3,64	32,73

Pela análise discriminante, 51,62% da variabilidade das relações estudadas foram explicados nas duas primeiras raízes (Tabela 4) na profundidade de 0,0–0,20 m. A primeira raiz canônica (Can 1) apresentou 49,33%, e a segunda (Can 2) 2,29%. Na profundidade de 0,40–0,60 m, as duas primeiras raízes explicaram 32,74%, sendo 29,09 na primeira raiz canônica (Can 1) e 3,64% na Can 2, totalizando 32,73% da variabilidade nas relações estudadas.

Os resultados da análise discriminante estão ilustrados na Figura 7. Nota-se que a área com TPA é totalmente diferente dos demais manejos se analisarmos o eixo da Can 1. Este resultados da análise discriminante demonstram que a Can 1 é responsável pela separação da TPA das outras áreas, sendo este solo, com melhor qualidade física e o que possui uma maior influência positiva da fertilidade e da SM, sendo este solo, com características mais distante dos demais.

Os atributos mais fortemente ligados aos ambientes são, pH H₂O, H+Al, MO e Ca nas duas profundidades (0,0-0,20 m e 0,40-0,60 m) (Tabela 5). Estes resultados demonstra que estes atributos, podem ser os mais importantes e que mais contribuem para a separação das áreas.

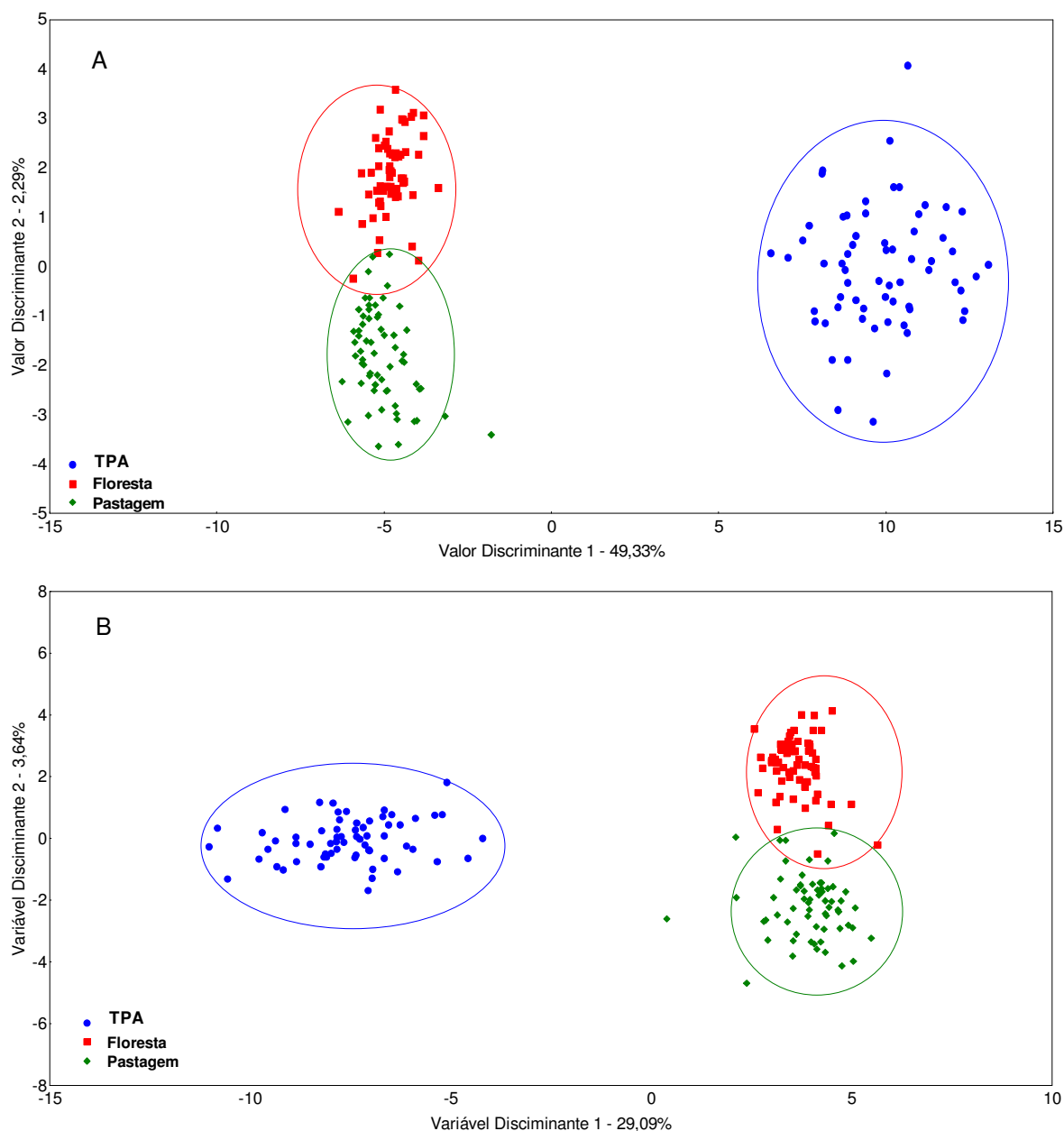


Figura 7. Agrupamento das áreas pela Análise Discriminante Canônica 1 e 2 das variáveis químicas, físicas e SM nos ambientes estudados. A = profundidade de 0,0–0,20 m; B = profundidade de 0,40–0,60 m.

Contrastando os ambientes, é possível verificar, por meio da Tabela 6, que os maiores valores de F são encontrados quando a área com TPA é comparada com as demais, principalmente quando contrastada com a pastagem, o que demonstra que esta área se difere significativamente das demais. Já as áreas de pastagem e de floresta, quando comparadas possuem características semelhantes, como podem ser observadas devido aos seus menores valores de F, sendo estes, não apresentando diferença significativa nas duas profundidades.

Tabela 5. Valores resultantes da análise discriminante canônica, evidenciando o peso de cada variável.

Atributos	---Profundidade de 0,0-0,20 m---		---Profundidade de 0,40-0,60 m---	
	Raiz 1	Raiz 2	Raiz 1	Raiz 2
Areia	0,06287	-0,49534	-0,34401	-0,64447
Argila	-0,19757	-0,50629	-0,22099	-0,46587
pH H ₂ O	0,80518*	-0,85966*	-1,14584*	-0,21075
Acidez potencia (H+Al)	0,92197*	0,55627	-1,15091*	0,61098
Matéria Orgânica	-1,01512*	-1,89896*	0,96410*	-1,32450*
Fósforo (P)	0,01017	-0,46156	0,01965	-0,16534
Potássio (K)	-0,23310	0,37203	0,19983	0,23770
Cálcio (Ca ²⁺)	1,02901*	1,86653*	-1,02969*	0,83193
Magnésio (Mg ²⁺)	0,39721	0,09631	0,11768	0,06386
Suscetibilidade Magnética	0,25995	-0,04610	-0,05913	0,00575

* Caracterização principal das relações canônicas

Este comportamento pode ser justificado devido a maior fertilidade dos solos com presença de horizonte antrópico, como mostrado por Campos et al. (2012a) ao qual, realizaram uma caracterização física e química de solos com horizonte antrópico e não antropogênicos. Os autores observaram que os solos com horizontes antrópicos, apresentam melhor qualidade física e química, quando comparados com solos sem a presença do horizonte antrópico, o que é algo comum na região.

Tabela 6. Resultado da análise multivariada contrastando as áreas estudadas com todas as variáveis em conjunto.

Manejos	Profundidade 0,0 - 0,20 m	Profundidade 0,40 - 0,60 m
	Valor de F	Valor de F
TPA x Pastagem	687,8156***	417,1080***
TPA x Floresta	664,7170***	401,0062***
Pastagem x Floresta	41,5622	65,8633

(***) Todos os valores são significativos para $p < 0.001$

Neste sentido, destacam-se alguns atributos que mais estão fortemente ligados as áreas são: Ca²⁺ para TPA, argila para pastagem e H+Al na floresta. Estes atributos podem sofrer maiores alterações se submetidos a ações antrópicas, sendo estes possíveis indicadores de mudanças ambientais. Um atributo indicador de impacto ambiental diz respeito aos elementos ou parâmetros que fornecem a medida da magnitude de um impacto ambiental. O uso de atributos do solo identificadores de diferentes ambientes é uma ferramenta fundamental para direcionar práticas que reduzam o depauperamento a níveis toleráveis.

3.4 CONCLUSÕES

1. A área com terra preta arqueológica apresentou comportamento diferenciado da pastagem e floresta, sendo que os atributos químicos apresentam melhor ligação nesta área.
2. A floresta e pastagem apresentaram comportamento similar e diferente da área de terra preta arqueológica, o que demonstra a maior fertilidade de horizontes antrópicos em solos amazônicos.
3. Os atributos que podem ser possíveis indicadores de mudanças ambientais são o cálcio para a área com terra preta arqueológica, acidez potencial para a floresta e argila para a pastagem.

3.5. REFERÊNCIAS

ALVARENGA, M. I. N.; DAVIDE, A.C. Características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro e a sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas, v.23, n. 4, p.933-942, 1999.

ANDREOLA, F.; FERNANDES, S. A. P. **A Microbiota do Solo na Agricultura Orgânica e no Manejo das Culturas**. In: SILVEIRA, A. P. D.; FREITAS, S. S. Microbiota do Solo e Qualidade Ambiental. Campinas: Instituto Agrônomo, 2007. Cap. 2. p.21-37.

BARRETO, A. C.; LIMA, F. H. S.; FREIRE, M. B. G. S.; ARAÚJO, Q. R.; FREIRE, F. J. Características químicas e físicas de um solo sob floresta, sistema agroflorestal e pastagem no Sul da Bahia. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.19, n.4, p.415-425, 2006.

BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V.; CANELLAS, L. P.; KERN, D.C. Fracionamento químico da matéria orgânica e caracterização física de Terra Preta de Índio. **Revista Ciência Agrária**, Recife, v. 55, n. 1, p. 44-51, 2012.

BARROSO, L. P. **Análise Multivariada**. 48^a Reunião da RBRAS e 10^a SEGRO. Departamento de Ciências e Exatas. Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG, 151p.

BARTINGTON. **Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System**. Bartington Instruments. 2013, 71p. Disponível em na internet: <<http://www.bartington.com/Literaturepdf/Operation%20Manuals/om0408%20MS2.pdf>>; Acessado em: 24/01/2013.

BENITES, V. M.; MOUTTA, R. O.; COUTINHO, H. L. C.; BALIEIRO, F. C. Análise discriminante de solos sob diferentes usos em área de mata atlântica a partir de atributos da matéria orgânica. **Revista Árvore**, Viçosa, v.34, n.4, p.685-690, 2010.

BUENO, B. F. **Aplicação de técnicas multivariadas em mapeamento e interpretação de parâmetros do solo**. 2001. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

CAMPOS, M. C. C.; **Pedogeomorfologia aplicada a ambientes Amazônicos do Médio Rio Madeira**. 2009. 260f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.

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

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; OLIVEIRA, I. A. Interferências dos pedoambientes nos atributos do solo em uma topossequência de transição Campos/Floresta. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.41, n. 4, p.527-535, 2010.

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, Amazonas. **Revista Agro@mbiente On-line**, Roraima, v. 6, n. 2, p. 102-109, 2012a.

CARVALHO JUNIOR, W. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; CHAGAS, C. S.; ELPÍDIO FERNANDES FILHO, I. Análise multivariada de Argissolos da faixa Atlântica Brasileira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 2081-2090, 2008.

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**, Viçosa, v. 33, n.1, p. 85-93, 2009.

DEARING, J.A. **Environmental magnetic susceptibility**. Using the Bartington MS2 system. England: British Library, 1994, 104p.

EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P.; SILVA, P.; CHAN, B. **Análise de Dados: Modelagem Multivariada para Tomada de Decisões**. 1.ed. Rio de Janeiro: Campos Elsevier, 2009.

GOMES, J. B. V.; CURI, N.; MOTTA, P. E. F.; KER, J. C.; MARQUES, J. J. G. C. M.; SCHULZE, D. G. Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 28, n. 1, p. 137-153, 2004.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Multivariate data analysis**. 5. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998

HAIR J. R.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre, Bookman, 2005. 211p.

HENGL, T.; HEUVELINK, G.B.M.; STEIN, A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, n.1-2, p.75-93, 2004.

HENGL, T.; TOOMANIAN, N.; REUTER, H.I.; MALAKOUTI, M.J. Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: lessons from Iran. **Geoderma**, Amsterdam, v.140, n.4, p.417-427, 2007.

HOFFMANN, R. **Componentes principais e análise fatorial**. Piracicaba: Departamento de Economia e Sociologia Rural. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1992. 25p. (Série Didática n. 76).

JEFFERS J.N.R. **An Introduction to System Analysis: with Ecological Applications**. E. Arnold Publ., London, 1978.198p.

KERN, D. C.; KÄMPF, N.; WOODS, W. I.; DENEVAN, W. M.; COSTA, M. L.; FRAZÃO, F. J. L.; SOMBROEK, W. **As Terras Pretas de Índio na Amazônia: Evolução do Conhecimento em Terra Preta de Índio**. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N. Manaus: Embrapa Amazônica Ocidental, 2009. v.1, Cap. 6, p.72-81.

KUME, H. **Métodos estatísticos para melhoria da qualidade**. 4.ed. São Paulo: Gente, 1993. 245p.

KUMMER, L.; MELO, V. F.; BARROS, Y. J.; AZEVEDO, J. C. R. Uso da análise de componentes principais para agrupamento de amostras de solos com base na granulometria e em características químicas e mineralógicas. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.11, n.6, p.469-480, 2010.

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

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, E. M. R. Atributos químicos e físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo em sistema integrado de produção agroecológica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.1, p.68-75, 2009.

MAESTRE, M. R.; SARTORIO, S. D.; MARCIANO, C. R.; OLIVEIRA, F. C.; PIEDADE, S. M. S. ; LIMA, C. G. **Aplicação da análise de componentes principais na seleção de características de solo**. In: 19º Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística, 2010, São Pedro. Anais 19º SINAPE, 2010.

MANLY, B. J. F. **Métodos estatísticos multivariados**: uma introdução. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2008. 229p.

MILSTEIN, A.; ISLAM, M.S.; WAHAB, M. A.; KAMAL, A. H. M.; DEWAN, S. Characterization of water quality in shrimp ponds of different sizes and with different management regimes using multivariate statistical analysis. **Aquaculture International**, Dordrecht, v.13, n. 6, p.501-518, 2005.

MULLINS, C. E. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science-a review. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 28, n.2, p.223–246, 1977.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas, Fundação Cargill, 1987. 107p.

MONTGOMERY, D.C. **Introduction to statistical quality control**. 5.ed. New York: John Wiley, 1985. 489p.

RODRIGUES, M. C. P. Potencial de desenvolvimento dos municípios Fluminenses: uma metodologia alternativa ao IQM, com base na análise fatorial exploratória e na análise de clusters. **Caderno de Pesquisas em Administração**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 75-89, 2002.

SANTOS, J. S.; SANTOS, M. L. P. Estudo da mobilização de metais e elementos traços em ambientes aquáticos do semiárido brasileiro aplicando análises de componentes principais. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n.5, p. 1107-1111, 2008.

SEAL H.L. **Multivariate Statistical Analysis for Biologists**. Mathuen, London, 1964. 209p.

SILVA, L. G.; MENDES, I. C.; REIS JUNIOR, F. B.; FERNANDES, M. F.; MELO, J. T.; KATO, E. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo de cerrado em plantio de espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.6, p.613-620, 2009.

SILVA, M. O.; FREIRE, M. B. G. S.; MENDES, A. M. S.; FREIRE, F. J.; CAMPOS, M. C. C.; AMORIM, L. B. Discriminação de diferentes classes de solos irrigados com águas salinas, na região de Mossoró, RN, com o uso de análise multivariada. **Ambiência**, Guarapuava, v. 6, n. 2, p. 261-270, 2010 b.

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, n.1, p.15-22, 2010a.

SMITH N. J. H. Anthrosols and human carrying capacity in Amazonian. **Annals of the Association of American Geographers**, Washington, v. 70, n.4, p. 553-566, 1980.

STATISTICA. **Statistica 7.0**. EUA Software. Tucksá: StatSof. Baltimore, 250p. 2005.

VALLADARES, G. S.; GOMES, E. G.; MELLO, J. C. C. B. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; EBELING, A. G.; BENITES, V. M. Análise dos componentes principais e métodos multicritério ordinais no estudo de Organossolos e solos afins. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.1, p.285-296, 2008.

VITHARANA, U. W. A.; MEIRVENNE, M. VAN.; SIMPSON, D.; COCKX, L.; BAERDEMAEKER, J. D. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. **Geoderma**, Amsterdam, v.143, n.1-2, p.206-215, 2008.

YOEMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v.19, n.13, p.1467-1476, 1988.

YOUNG, F. J.; HAMMER, R. D. Defining geographic soil bodies by landscape position, soil taxonomy, and cluster analysis. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.64, n.3, p.989-998, 2000.