

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS – FCA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA TROPICAL – PPGATR

**WILDSON BENEDITO MENDES BRITO**

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DE ARGISSOLOS SOB USOS  
AGRÍCOLAS E NATURAL NO SUL DO AMAZONAS**



MANAUS-AM

2020

WILDSON BENEDITO MENDES BRITO

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DE ARGISSOLOS SOB USOS AGRÍCOLAS E  
NATURAL NO SUL DO AMAZONAS**

Defesa de dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical, Área de Concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), como requisito para obtenção do grau de

**Mestre em Agronomia Tropical.**

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

MANAUS-AM

2020

## FICHA CATALOGRÁFICA

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

B862m Brito, Wildson Benedito Mendes  
Suscetibilidade magnética de solos agrícolas e natural no sul do Amazonas / Wildson Benedito Mendes Brito. 2020  
98 f.: 31 cm.

Orientador: Milton César Costa Campos  
Dissertação (Mestrado em Agronomia Tropical) -  
Universidade Federal do Amazonas.

1. Conversão agrícola. 2. Óxidos de ferro. 3. Anisotropia. 4. Krigagem. 5. Proxy. I. Campos, Milton César Costa. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

WILDSON BENEDITO MENDES BRITO

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DE ARGISSOLOS SOB USOS AGRÍCOLAS E  
NATURAL NO SUL DO AMAZONAS**

Defesa de dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical, Área de Concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), como requisito parcial para obtenção do grau de

**Mestre em Agronomia Tropical.**

Defendido e aprovado em 23/07/2020 pela banca examinadora.

**BANCA EXAMINADORA**

Profº Drº, MILTON CÉSAR COSTA CAMPOS, Orientador  
Universidade Federal do Amazonas

Profº Drº, IVANILDO AMORIM DE OLIVEIRA, Membro  
Universidade Federal de Rondônia

Profº Drº, FLÁVIO PEREIRA DE OLIVEIRA, Membro  
Universidade Federal da Paraíba

Aos meus queridos pais, Benedito de Souza Brito e Maria do Rozário Vales Mendes, por todo o apoio, incentivo e compreensão, além do amparo em minha vida pessoal e acadêmica, dedico.

## AGRADECIMENTOS

Ao senhor Deus, por sempre guiar e abençoar meu caminho em toda minha vida e jornada acadêmica.

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM), em especial ao Grupo de Pesquisa Solos e Ambientes Amazônicos. E A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

Ao meu orientador professor Drº Milton César Costa Campos, por todo o ensinamento e disponibilidade, o que moldou meu desenvolvimento como pesquisador, e por todas as parcerias ao longo da minha jornada acadêmica.

Aos professores Drº Ivanildo Amorim de Oliveira e Drº Flávio Pereira de Oliveira, por terem aceitado participar deste trabalho como examinadores.

Aos meus pais Benedito de Souza Brito e Maria do Rozário Vales Mendes pelo amor, compreensão, dedicação e incentivo durante toda jornada acadêmica. E meus queridos irmãos, Willians, Bárbara e Bianca pela amizade e apoio.

Aos meus amigos companheiros de laboratório que integram o Grupo Solos e Ambientes Amazônicos: Alan Ferreira Leite de Lima, Bruna Firmino Enck, Elilson Gomes de Brito Filho, Elyenayra Nogueira Pinheiro, Fernando Gomes de Souza, Guilherme Abadia da Silva, Juliana Malta de Assis, Lucivânia Izidoro da Silva, Thalita Silva Martins e demais egressos e recém ingressantes ao grupo, pelas amizades, ajudas e contribuições para a realização deste trabalho e demais projetos acadêmicos.

Aos meus amigos, ex colegas de curso, Adriana Miguel Fernando, Brendo Washington Temo, José Carlos Marques Pantoja, Lucas Pereira de Oliveira, Sheury Celante Marques, Thiago Abraão Reis de França e William Maciel da Silva por toda amizade e parceria ao longo de 7 anos de vida acadêmica, e pela disposição a ajudar um ao outro sempre que necessário.

## RESUMO

Com o aprimoramento da agricultura, cada vez mais há demanda por informações rápidas e detalhadas sobre os atributos do solo, para auxiliar na tomada de decisão agrícola e política, além de apoiar a produção sustentável. Porém, obter níveis mais detalhados de informações requerem maior quantidade de amostras, recursos e tempo de processamento. Medições de Suscetibilidade Magnética (SM) como uma *proxy* ambiental pode ser uma alternativa para contornar esses entraves, pois seu uso possibilita a avaliação de atributos físicos e químicos solo de maneira simples, rápida, sem impacto ambiental e custo relativamente baixo. Portanto, este trabalho visou caracterizar a suscetibilidade magnética em Argissolos sob usos agrícolas e natural no sul do Amazonas, verificar seu uso como *proxy* e fornecer aplicações práticas para avaliações de atributos de solo a partir de seu uso. O estudo foi desenvolvido dentro do Projeto de Assentamento São Francisco localizado no município de Canutama, AM. Foram selecionadas quatro áreas, sendo três áreas sob diferentes cultivos: Urucum, Cupuaçu, Guaraná e mais área de floresta (referência). Estabeleceu-se malhas de acordo com as dimensões do cultivo, de modo que a coleta das amostras nos pontos de cruzamentos das malhas resultasse em 64 amostras por área. A amostragem foi feita em três profundidades, 0,00-0,05; 0,05-0,10; e 0,10-0,20 m, conferindo 192 amostras por área e totalizando 768 amostras. Os pontos foram georreferenciados com um equipamento de GPS. Em seguida, foram realizadas análises físicas e químicas e de fertilidade para obtenção dos valores dos atributos do solo. A SM foi determinada utilizando o medidor Bartington Instrument para obtenção da SM específica de massa ( $\chi$ ) em três frequências de leitura: baixa ( $\chi_{bf}$ ), alta ( $\chi_{af}$ ), e dependente ( $\chi_{fd}$ ). Então, foram aplicadas estatísticas descritivas, ANOVA, geoestatística e MANOVA para caracterização da  $\chi$  no sul do Amazonas. No primeiro estudo, os resultados mostram que a conversão dos Argissolos naturais para cultivos agrícolas implicou diretamente no aumento da densidade e amplitude do pH em água e  $Al^{3+}$  do solo, e na redução da macroporosidade, umidade gravimétrica, teores de fósforo disponíveis e ferro oxalato, e da incorporação de carbono orgânico em profundidade. No entanto, todos os Argissolos possuem caracteristicamente baixos valores de  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  devido à baixa concentração de óxidos de ferro com baixa  $\chi$ , e sofrem alto aprimoramento superparamagnético, provavelmente em decorrência dos processos pedogênicos, intemperismo intenso, clima favorável e alta presença de diamagnéticos que interferem na sua medida. Entretanto, as frequências de medição da  $\chi$  foram correlacionadas com os atributos de fertilidade e a textura, significando que o seu emprego pode ser usado como *proxy* adequada ao monitoramento da fertilidade dos Argissolos cultivados no sul do Amazonas. No segundo estudo, todas as frequências de  $\chi$  mostraram ser espacialmente correlacionadas e com presença de anisotropia. Então, a correção anisotrópica aprimorou os parâmetros dos modelos de correlação espacial, juntamente com os mapas temáticos gerados por krigagem da  $\chi$ . Esses mapas devem, portanto, serem utilizados como indicadores da sua variabilidade no solo, tomando atenção especial principalmente em pesquisas relacionadas à delimitação de zonas de manejo específico.

**Palavras-chaves:** Conversão agrícola. Óxidos de ferro. Anisotropia. Krigagem. *Proxy*.

## ABSTRACT

With the improvement of agriculture, there is an increasing demand for quick and detailed information on soil attributes, to assist in agricultural and political decision-making, in addition to supporting sustainable production. However, obtaining more detailed levels of information requires more samples, resources and processing time. Magnetic Susceptibility (SM) measurements as an environmental proxy can be an alternative to circumvent these obstacles, as its use allows the evaluation of physical and chemical soil attributes in a simple, fast, without environmental impact and relatively low cost way. Therefore, this work aimed to characterize the magnetic susceptibility in Argissolos under uses natural and agricultural in the south of Amazonas, to investigate its use as a proxy and to provide practical applications for evaluating soil attributes from its use. The study was developed within the São Francisco Settlement Project located in the municipality of Canutama, AM. Four areas were selected, three areas under different crops: Annatto, Cupuaçu, Guarana and more forest area (reference). Meshes were established according to the dimensions of the cultivation, so that the collection of samples at the crossing points of the meshes resulted in 64 samples per area. Sampling was done at three depths, 0.00-0.05, 0.05-0.10, and 0.10-0.20 m, giving 192 samples per area and totaling 768 samples. The points were georeferenced with a GPS device. Then, physical, chemical and fertility analyzes were performed to obtain the values of the soil attributes. The SM was determined using the Bartington Instrument to obtain the specific mass SM ( $\chi$ ) in three reading frequencies: low ( $\chi_{lf}$ ), high ( $\chi_{hf}$ ), and dependent ( $\chi_{fd}$ ). Then, descriptive statistics, ANOVA, geostatistics and MANOVA were applied to characterize  $\chi$  in southern Amazonas. In the first study, the results show that the conversion of natural Argisols to agricultural crops directly implied an increase in the density and amplitude of the pH in water and  $Al^{3+}$  of the soil, and in the reduction of macroporosity, gravimetric humidity, available phosphorus and iron oxalate contents, and the incorporation of organic carbon in depth. However, all Argisols have characteristically low values of  $\chi_{lf}$  and  $\chi_{hf}$  due to the low concentration of iron oxides with low  $\chi$ , and undergo high superparamagnetic improvement, probably due to the pedogenic processes, intense weathering, favorable climate and high presence of diamagnetic that interfere with your measurement. However,  $\chi$  measurement frequencies were correlated with the fertility and texture attributes, meaning that its use can be used as an adequate proxy for monitoring the fertility of Argissolos grown in southern Amazonas. In the second study, all  $\chi$  frequencies were shown to be spatially correlated and with the presence of anisotropy. Then, the anisotropic correction improved the parameters of the spatial correlation models, together with the thematic maps generated by  $\chi$  kriging. These maps should, therefore, be used as indicators of their variability in the soil, paying special attention mainly in research related to the delimitation of specific management zones.

**Keywords:** Agricultural conversion. Iron oxides. Anisotropy. Krigagem. Proxy.



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivo geral .....	2
2.2. Objetivos específicos.....	2
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>2</b>
3.1. Solos do Amazonas .....	2
3.2. Propriedades da suscetibilidade magnética .....	4
3.3. Medições da SM ( $\chi$ ) como proxy .....	8
3.4. Técnicas anisotrópicas e multivariadas na discriminação de pedoambientes .....	9
3.4.1. <i>Geoestatística e modelagem anisotrópica de variáveis ambientais</i> .....	10
3.4.2. <i>Krigagem ordinária (KO)</i> .....	13
3.4.3. <i>Análises de componentes principais</i> .....	14
<b>4. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>15</b>
<b>5. CAPÍTULO 1 – SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DE ARGISSOLOS SOB FLORESTA E CULTIVOS NO SUL DO AMAZONAS .....</b>	<b>22</b>
<b>5.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>5.2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
5.2.1. Descrição e histórico de uso das áreas .....	25
5.2.2. Metodologia de campo.....	26
5.2.3. Metodologia laboratorial.....	27
5.2.3.1. <i>Análises físicas</i> .....	27
5.2.3.2. <i>Análises químicas</i> .....	28
5.2.3.3. <i>Difratometria de raio-X e suscetibilidade magnética</i> .....	29
5.2.4. Análises estatísticas .....	30
<b>5.3. RESULTADOS.....</b>	<b>30</b>
5.3.1. Atributos físicos e químicos dos Argissolos .....	30
5.3.2. Suscetibilidade magnética específica de massa ( $\chi$ ) e óxidos de ferro.....	33
<b>5.4. DISCUSSÕES .....</b>	<b>38</b>
5.4.1. Caracterização física e química dos Argissolos .....	38
5.4.2. Óxidos de ferro e $\chi$ nos Argissolos natural e cultivados .....	41
5.4.3. Relações e influências de $\chi$ com atributos e tipos de uso do solo.....	43

<b>5.5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>46</b>
<b>5.6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>46</b>
<b>6. CAPÍTULO 2 – PADRÕES ESPACIAIS DA SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DE ARGISSOLOS CULTIVADOS E SOB FLORESTA OTIMIZADOS POR CORREÇÃO ANISOTRÓPICA NO ESTADO DO AMAZONAS, BRASIL .....</b>	<b>54</b>
<b>6.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>6.2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>57</b>
6.2.1. Localização e caracterização das áreas de estudo .....	57
6.2.2. Metodologia de campo .....	59
6.2.3. Metodologia laboratorial .....	59
6.2.4. Análises estatísticas .....	60
<b>6.3. RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>
6.3.1. Características gerais dos Argissolos .....	62
6.3.2. Características gerais da suscetibilidade magnética de massa específica ( $\chi$ ) ...	64
6.3.3. Continuidade da $\chi$ espacialmente correlacionada e dependente .....	66
6.3.4. Padrões espaciais anisotrópicos da $\chi$ .....	69
6.3.5. Correção anisotrópica e densidade amostral da $\chi$ .....	75
<b>6.4. DISCUSSÕES .....</b>	<b>77</b>
6.4.1. Textura magnética nos Argissolos .....	77
6.4.2. Comportamento espacial anisotrópico e densidade amostral da $\chi$ .....	78
6.4.3. Traços anisotrópicos na distribuição espacial da $\chi$ .....	80
<b>6.5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>83</b>
<b>6.6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>84</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A agricultura atual necessita cada vez mais de estudos do solo com maiores níveis de detalhes, no intuito de auxiliar na tomada de decisão agrícola e política, além de apoiar a produção sustentável (Siqueira et al., 2015). Porém, estudos detalhados requerem, no geral, grande volume de amostras, análises laboratoriais e tempo para processar e adquirir resultados. Isto comumente gera resíduos provocados pela utilização de reagentes, resultando em grande desconforto econômico e ambiental (McBratney et al., 2003).

Neste contexto, as propriedades magnéticas dos solos vêm sendo amplamente investigadas nas comunidades de ciência ambiental e geofísica para indicar o desenvolvimento do solo, paleossolos, clima e poluição (Hannam et al., 2009). A compreensão da relação entre as propriedades magnéticas com a geoquímica e material de origem do solo fornece informações sobre os processos de intemperismo e pedogênese, importantes para o gerenciamento do uso agrícola e ambiental (Camêlo et al., 2018).

As técnicas utilizadas para medir os atributos magnéticos do solo incluem, principalmente, a medição da suscetibilidade magnética (SM) específica ao volume ( $\kappa$  – adimensional) e de massa ( $\chi$  –  $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ ), além de magnetização induzida e remanescente ( $A/m$ ) (Aidona et al., 2016). A SM trata-se da capacidade de magnetização de um material por um campo magnético indutor. Suas medições são não-orientadas, em massa, e representam a soma das contribuições individuais de todos os minerais magnéticos presentes em uma amostra (Silva et al., 2015).

As medições de SM vêm sustentando o atual concernimento entre demanda e aquisição de informações, ao permitir aumentar a precisão de estudos sem que haja aumento de custo e tempo de análise por ser uma propriedade de fácil aquisição. Por isso, a SM torna-se uma ferramenta pedométrica capaz de determinar e avaliar atributos do solo como *proxy* ou por meio de correlações de maneira simples, rápida, sem impacto ambiental e custo relativamente baixo devido sua fácil aplicação (Ramos, 2015).

Além destas vantagens, as medições de SM podem ser feitas em laboratório ou campo de forma segura, rápida e não destrutiva para qualquer tipo de material, permitindo ainda identificar os processos de formação ou transporte de minerais contendo ferro (Dearing, 1999). Assim, ao passo em que a SM seja usada como ferramenta *proxie* simples, mais investigações serão possíveis em escalas regionais, nacionais e internacionais (Golden et al., 2015).

Contudo, os estudos de SM do solo são escassos na região norte do Brasil. Pesquisas adicionais são necessárias para entender os processos que definem a concentração e distribuição da SM do solo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Caracterizar a dinâmica da suscetibilidade magnética (SM) em Argissolos sob usos agrícolas e natural no sul do Amazonas.

### **2.2. Objetivos específicos**

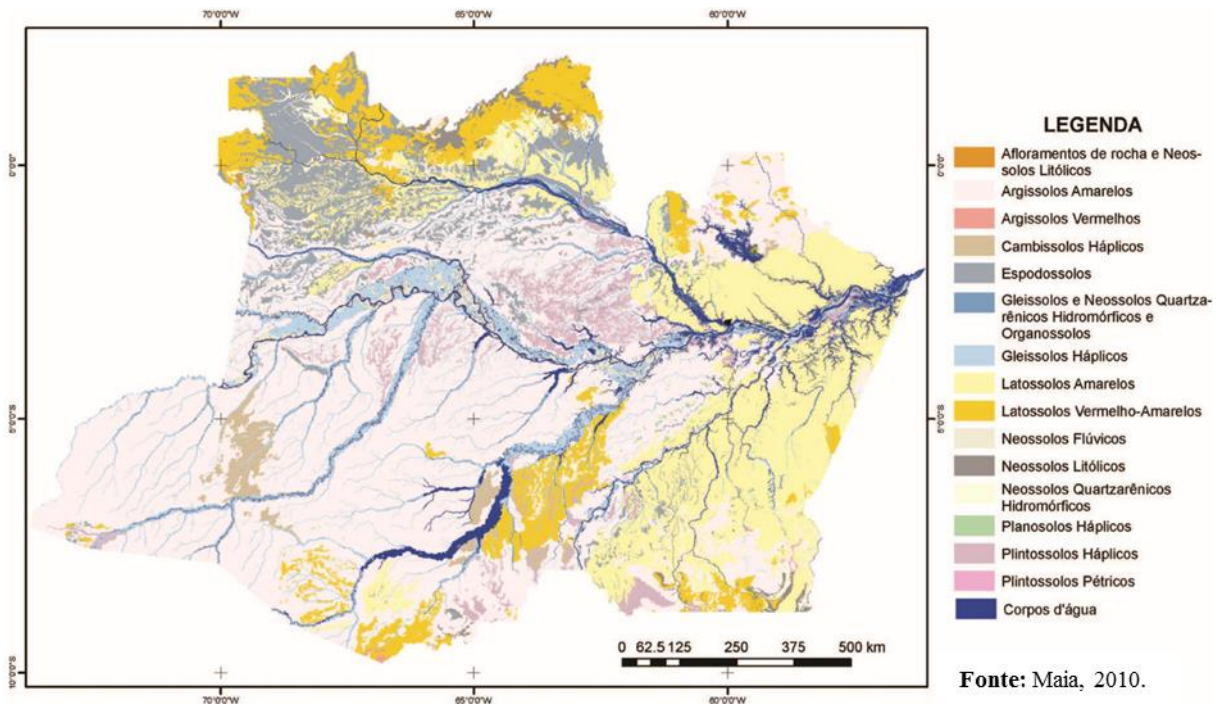
- a) Determinar a SM e atributos físicos e químicos e de fertilidade do solo em áreas natural (floresta nativa) e convertidos (cultivos com cupuaçu [*Theobroma grandiflorum*], guaraná – [*Paullinia cupana*], e urucum – [*Bixa orellana*]) no Assentamento São Francisco, Canutama, Sul do Amazonas;
- b) Comparar a SM de cada ambiente a fim de identificar a relação causa/efeito do manejo adotado com o grau de magnetização;
- c) Discriminar os ambientes a partir da SM do solo, para identificação das influências e relações com atributos e tipos de usos do solo;
- d) Avaliar o comportamento espacial anisotrópico da SM dos solos analisados.

## **3. REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1. Solos do Amazonas**

O Amazonas abriga o bioma mais biodiverso existente, de grande importância socioambiental e econômica. Seus solos são pedodiversos, e por isso, convenientemente são divididos em 11 megasetores pedológicos necessários para o estudo dos pedoambientes que se equiparam a uma escala quase continental (Schaefer et al., 2017).

Dentre as classes de solo dominantes no Amazonas, 45% da área está dominada por Argissolos e 26% por Latossolos (Figura 1). Ambos são geralmente distróficos, exceto onde ocorrem rochas máficas, e se concentram nas zonas cristalinas do Cráton amazônico sob terra firme. Gleissolos e Neossolos predominam nas planícies de inundações e perfazem 9% dos solos do Amazonas, sendo em sua quase totalidade férteis quando ocorrem nas margens dos rios de águas barrentas. Em particular, Gleissolos são dominantes no Baixo Amazonas com atividade de argila alta (Ta). Já os Neossolos predominam em áreas de terras firmes da Vila Amazônia (Parintins) quando são Quartzarênicos, ou estão associados à rios quando Flúvicos (Maia & Marmos, 2010; Schaefer et al., 2017).



**Figura 1:** Classes de solos do Estado do Amazonas. Nota: Compilado da base digital do IBGE/SIPAM.

Os Espodossolos totalizam 7% da área do estado, são característicos da bacia do rio Negro, bem arenosos, profundos, ácidos e pobres quimicamente, além de estarem cobertos geralmente por “campinaranas”. Ainda, são provenientes da destruição de mantos latossólicos ou outros processos de arenização (cólicos fluviais) em clima superúmido. Os Plintossolos, com 3,5%, predominam nos campos e cerrados no sul do estado, principalmente nos municípios de Humaitá, Lábrea e Canutama. As classes restantes ocorrem em menor proporção no estado, apesar de serem dominantes em certas regiões, como os Cambissolos na região do Alto Solimões e na bacia do rio Urucu (Coari) (Maia & Marmos, 2010; Schaefer et al., 2017).

Os solos antrópicos (Terra Preta de índio), característicos por sua elevada fertilidade natural em relação à solos adjacentes, ocorrem frequentemente sobre as Terras Firmes do Médio Amazonas e nas várzeas, nas quais foram mais observadas e estudadas.

As Manchas de Savanas também são comuns e estão geralmente associadas a solos mal ou imperfeitamente drenados, entretanto, também podem ocorrer sobre Latossolos Amarelos subsuperficialmente coesos ou epipedregosos (Monte Alegre), ou arenosos (Alter do Chão) (Schaefer et al., 2017).

Em relação à mineralogia destes solos, principalmente nos Latossolos, há dominância da caulinita, mas também são encontradas pequenas quantidades de gibsitita, ilita e quartzo. A caulinita varia de bem cristalizada até o intermediário caulinita/haloisita desordenada, dependendo do tamanho da partícula mineral. Tamanhos de partículas pequenas tendem a

agregar conforme elevação dos teores de ferro da fração argila, causando aumento em sua aleatoriedade estrutural (Kitagawa & Möller, 1980; Zenero et al., 2016).

### 3.2. Propriedades da suscetibilidade magnética

Na natureza, há inúmeros tipos de rochas formadas sob diferentes condições de pressão, temperatura e na presença ou ausência de água, trazendo consigo um histórico de sua formação. As condições em que as rochas são formadas determinam a composição mineralógica dos minerais que a compõem. Para Dearing (1999), os minerais, por sua vez, são compostos naturais que geralmente estão na forma de cristais. Sua estrutura interna é determinada pelo arranjo de átomos em um padrão tridimensional denominado “treliça”. O comportamento magnético de um mineral é controlado tanto pelos átomos particulares que compõem a treliça quanto pelo modo como a treliça é estruturada. Por isso, átomos de mesmo elementos químicos podem dar origem a diferentes estados magnéticos nos minerais.

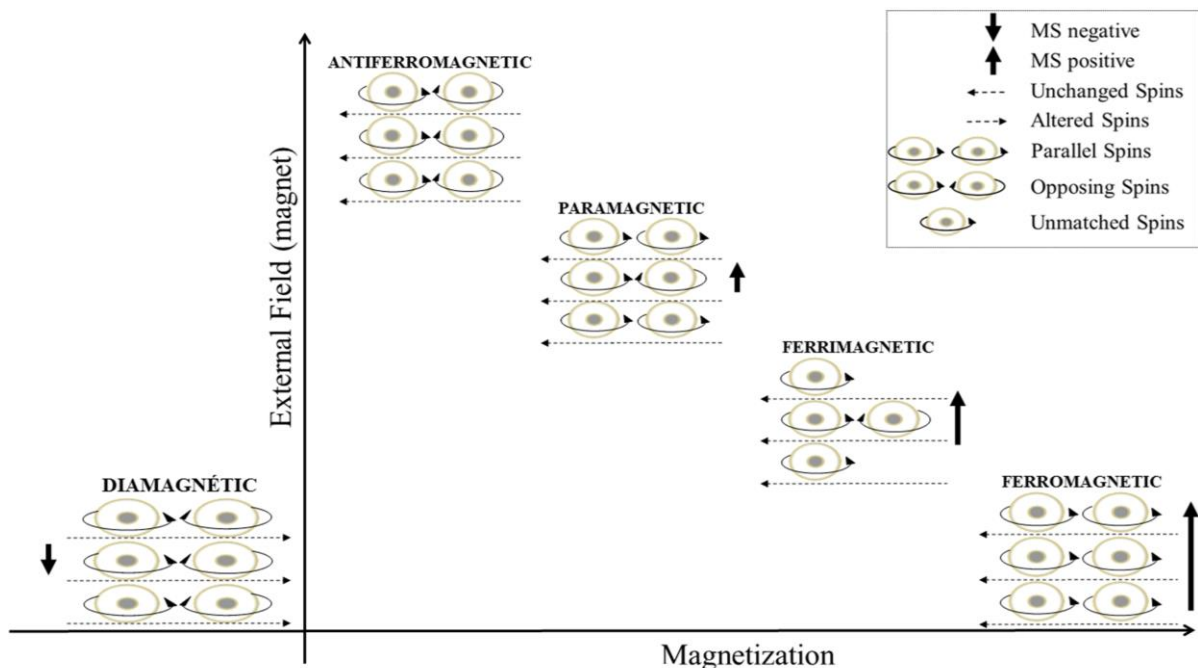
A manifestação magnética de qualquer material ocorre devido ao comportamento dos elétrons dos átomos que o compõe, quando estimulado por um campo magnético induzido. Este seu comportamento possui dois aspectos, um de orbitar o átomo, e outro de girar em torno de si próprio. Este segundo aspecto é denominado de “spin”. A maneira como os diferentes spins dos elétrons são alinhados determina a energia magnética total ou o momento do átomo. Quando há presença de um campo magnético indutor, os spins tendem a se alinhar conforme a orientação desse campo. A razão entre o campo magnético externo (indutor) e a magnetização é denominada Suscetibilidade Magnética (SM) (Dearing, 1999).

Dessa maneira, a SM é um parâmetro definido pela razão entre a resposta da indução magnética ( $M$ ) por um campo magnético aplicado ( $H$ ). Assim, a suscetibilidade ( $\kappa$ ) é definida pela magnetização por unidade de campo ( $\kappa = M/H$ ), sendo referida como SM volumétrica e adimensional. Entretanto, estudos ambientais requerem resultados baseados em massa seca, devido as diferentes densidades de cada material, e por esta razão, normalmente divide-se  $\kappa$  pela densidade aparente ( $\rho$ ) do material, obtendo-se “ $\chi$ ” (SM específica de massa [ $\chi_{(m^3/kg)} = \kappa / \rho$ ]), a qual é a propriedade mais estudada (Dearing, 1999; Liu et al., 2012).

Convencionalmente, os comportamentos dos materiais magnéticos são classificados em cinco formas: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo (Thompson & Oldfield, 1986). Estes comportamentos ocorrem de acordo com a maneira que os spins das celas unitárias que compõem o material se portam frente à aplicação de um campo magnético induzido. Tanto as rochas como os minerais ou sedimentos são assim classificados.

Cada um destes comportamentos magnéticos são parcelas contribuintes da  $\chi$ , ou seja, dos minerais presentes em um material/amostra que retêm ou não uma magnetização remanente, na ausência de um campo aplicado. Assim, conforme explicita Liu et al. (2012), se minerais retêm uma magnetização remanente forte, então são ferromagnéticos (e.g. magnetita, maghemita) e ferrimagnéticos (e.g. magnetita, pirrotita), se é fraca são antiferromagnéticos (e.g. hematita, goethita), se são “não magnéticos” tratam-se de materiais paramagnéticos (e.g. silicatos, argilas) e diamagnéticos (e.g. quartzo, carbonatos, matéria orgânica, água). Portanto, a  $\chi$  de um material ambiental é a soma de todas as  $\chi$  destes componentes (Figura 2).

Apesar de minerais ferromagnéticos apresentarem maior  $\chi$ , são pouco encontrados na natureza. Por isso, os ferrimagnéticos são os mais importantes dos comportamentos magnéticos. Esta categoria inclui a magnetita e alguns outros minerais contendo ferro com altos valores de  $\chi$  (Liu et al, 2012). A magnetita, em rochas ígneas, representa cerca de 1-2% dos minerais e pode ser encontrada em quase todos os solos, destaca-se por ser 1000 vezes mais magnética do que o mineral antiferromagnético ou paramagnético mais forte e cerca de 10.000 vezes mais forte que o mineral de argila mais fraco, predominando, assim, na medição da  $\chi$  onde estão presentes (Dearing, 1999).



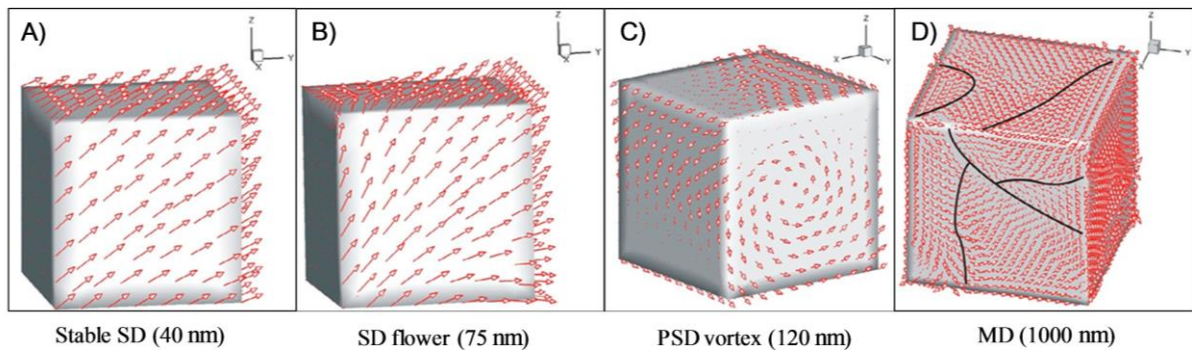
Fonte: Adaptado de Siqueira (2010) e Ramos (2015).

Figura 2: Realinhamento dos spins na presença de um campo magnético.

Entretanto, a classe dos minerais ferrimagnéticos são um caso especial devido à saturação da magnetização quando aplicado um grande campo magnético. Tauxe (2010) explica

que isto torna a suscetibilidade ferrimagnética ( $\chi_{ferri}$ ) levemente dependente do tamanho do grão, assim como da concentração mineral magnética para minerais fortemente magnéticos (Peters & Dekkers, 2003), devido aos efeitos de estruturas de spins complexas que dependem do tamanho e da forma das partículas magnéticas. Por exemplo, em tamanhos maiores do que algumas centenas de nanômetros, cristais de magnetita se dividem em regiões de magnetização uniforme (domínios magnéticos) para reduzir a energia magnética total.

Por este lado, grãos que apresentam domínios magnéticos, conhecidos como grãos de múltiplos domínios (MD), respondem diferentemente à campos aplicados (Figura 3). Em contraste, grãos de simples domínio (SD) são magneticamente ideais e uniformemente magnetizados e não possuem paredes de domínio. No entanto, na pequena extremidade do espectro de tamanho de grãos SD, há momentos magnéticos fortemente restritos a certas direções dentro do grão, o que limita a  $\chi$ . Apesar de Heider et al. (1996) encontrarem que a  $\chi$  é independente do tamanho do grão devido à estresses internos, a magnetização dos menores grãos SD é dominada por flutuações térmicas; seus momentos não são restritos e exibem o denominado comportamento superparamagnético (SP) e têm  $\chi$  muito mais elevada que os grãos SD comuns (Liu et al., 2012).



**Fonte:** Adaptado de Liu et al. (2012).

**Figura 3:** Estado micromagnético teórico associado para um cubo de magnetita uniaxial com diferentes tamanhos. Com o aumento de tamanho do grão, os spins evoluem de uniaxial (A) para flor (B), para vórtex (C) e para estados de múltiplos domínios (D).

Os processos ambientais que determinam a presença de grãos grosseiros e finos podem ser muito diferentes. Por isso se faz necessário a distinção entre SP e MD em estudos magnéticos ambientais. Por exemplo, grãos de tamanho intermediário que são pequenos demais para se separarem em domínios, mas que também são grandes demais para serem uniformemente magnetizados, exibem complexos padrões eletrônicos de spin. Um desses padrões é uma parede de domínio conhecida como “vórtex” (Schabes & Bertram, 1988; Williams & Dunlop, 1989) (Figura 3), no qual o grão de tamanho intermediário pode se



estruturar, ao invés de apresentar dois domínios separados por uma parede de domínio. Outro exemplo clássico está nos grãos pequenos que se espalham em estruturas de “flor”, exibindo comportamentos que são transicionais entre os dos verdadeiros grãos de MD e SD, sendo denominados grãos de pseudo-domínio único (PSD) (Williams & Dunlop, 1995).

Segundo Maher (1988), perto do limite de comportamento SP/SD (e.g. ~ 20-25 nm para magnetita) o limiar no qual uma partícula se transforma de SD estável para SP é controlado pelo tempo ao qual pode responder pelo forçamento externo de um campo aplicado e, portanto, depende do tempo e da temperatura. Dessa forma, ao diminuir a temperatura ou o tempo de observação, ocorre mudança de grãos no limite do SP para o estado SD estável (Worm, 1998).

Na prática, isto pode ser visto com o aumento da frequência de observação (e.g. de baixa frequência [ $\chi_{bf} = 470$  Hz] para alta frequência [ $\chi_{af} = 4700$  Hz], as duas frequências de operação do medidor Bartington Instruments internacionalmente utilizado). De acordo com Till et al. (2011), mudar do SP para o estado SD estável causa uma diminuição acentuada em  $\chi$ . Portanto, convém a utilização de uma relação entre estas duas faixas de frequência, denominada de  $\chi$  dependente de frequência absoluta ( $\chi_{fd}$ ), a qual é utilizada para determinar minerais ferrimagnéticos superparamagnéticos ultrafinos ( $< 0,03 \mu\text{m}$ ) que ocorrem como cristais produzidos majoritariamente por processos bioquímicos no solo (Dearing, 1999).

Assim como minerais com comportamento ferrimagnéticos predominam a  $\chi$  sobre os demais, o ciclo do ferro também está intimamente ligado ao magnetismo ambiental, através de mecanismos químicos, físicos e biológicos. O ciclo do ferro opera em diferentes escalas, incluindo a transformação local ou in situ de óxidos de ferro (e.g. magnetita, maghemita, ferrihidrita, goethita, lepidocrocita, sulfetos de ferro, etc., comuns em solos, poeiras e outros sedimentos) com ou sem efeitos de micróbios em diferentes ambientes (Malki et al., 2006).

Nesse contexto, o magnetismo do solo é um eficiente interrogador de mudanças que ocorrem via deposição e/ou alteração química de íons  $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{3+}$  contidos em óxidos de ferro (magnetita, maghemita, hematita), oxihidróxidos de ferro (goethita, ferridrita, lepidocrocita), sulfetos de ferro (greigita, pirrotita) ou redes cristalinas de carbonato (siderita) (Liu et al., 2012). Tais mudanças iniciam com a migração de íons Fe de uma rede cristalina (por exemplo, goethita) para outra (por exemplo, magnetita), com o potencial de migração reversa quando as condições ambientais se invertem. Por isso que a determinação do tamanho das partículas magnéticas ajuda a identificar cada mudança ambiental. Por exemplo, a redução de ferro origina a neoformação de magnetita ou maghemita no solo superficial como grãos de SP (diâmetro,  $d < 20$  nm), os quais têm alta  $\chi$  (Zhou et al., 1990).

Portanto utilizar medições de  $\chi$ , e principalmente  $\chi_{bf}$ , são fundamentais à determinação de minerais ferrimagnéticos no ambiente, pois seus valores são altamente sensíveis e podem detectar a presença de minerais em níveis de detecção bem abaixo daqueles encontrados na difração de raios-X (DRX) e na espectroscopia Mössbauer (Maher, 1986). Assim, Resende et al. (1988) sugerem a utilização da  $\chi_{bf}$  como critério de classificação de solos em virtude de sua simplicidade de determinação.

### 3.3. Medições da SM ( $\chi$ ) como proxy

Visando adquirir critérios de classificações, diferentes técnicas foram desenvolvidas para avaliar a origem dos minerais que influenciam o sinal da  $\chi$ , incluindo: (1) comparação com outras proxys influenciadas por parâmetros paleo-ambientais; (2) medidas de propriedades magnéticas para obter informações sobre a mineralogia magnética e o tamanho dos grãos; e (3) observação direta dos minerais magnéticos via dissolução (Silva et al., 2015). A partir destas técnicas, pesquisas atuais vêm conseguindo propor novas alternativas de avaliação qualitativa do solo.

A comparação com outras proxys paleo-ambientais permite inferências acerca dos portadores do sinal de  $\chi$ . Uma correlação positiva entre  $\chi$  e *proxies* paleo-ambientais independentes é a primeira indicação de que o sinal primário é preservado (Silva et al., 2015), permitindo inferências da origem do sinal da  $\chi$  e detecção de vários outros parâmetros a depender do estudo. Dentre as mais clássicas proxys entre  $\chi$  e parâmetros paleo-ambientais pode-se citar: o teor de argila ou quartzo ou resíduos insolúveis em rochas carbonáticas (Mabille & Boulvain, 2008; Hladil et al., 2009), o uso de elementos geoquímicos (Tribovillard et al., 2006; Calvert & Pedersen, 2007), medidas de espectrometria de raios gama (Ehrenberg & Svana, 2001; Kozłowski & Sobien, 2012), refletância espectral (e.g. Koptíková et al., 2010), e isótopos radioativos (Burton, 2006; Dopieralska et al., 2006).

As medidas de propriedades magnéticas permitem a identificação da natureza, quantidade e tamanho de grão dos principais minerais magnéticos. Entre as mais estudadas pode-se citar: medidas de histereses (e.g. na quantificação de proporções de minerais ferro, para e diamagnéticos [Riquier et al., 2010; Blumentritt, 2015]), a curva de aquisição de magnetização remanente isotérmica (IRM) e relação-S (Kruiver et al., 2001; Egli, 2003), e medidas termomagnéticas (Devleeschouwer et al., 2010; Ellwood et al., 2015).

Por último, a observação direta dos indicadores de tamanhos de grãos magnéticos fornece discriminação entre estados de domínios a partir do uso de parâmetros como, por exemplo, a  $\chi_{fd}$  (Jackson et al., 1993; Font et al., 2005; Aidona et al., 2016), a plotagem de

quadratura e coercividade (Devleeschouwer et al., 2015),  $\chi$  de magnetização remanescente anespérica (Blumentritt, 2015; Grabowski et al., 2015), entre outras.

### **3.4. Técnicas anisotrópicas e multivariadas na discriminação de pedoambientes**

Atualmente, há grande preocupação com a conversão de áreas naturais para implementação de sistemas de exploração agropecuária, haja vista das alterações isoladas de cada manejo e uso do solo para com seus atributos, além dos distúrbios da macrobiota do ambiente (Lourente et al., 2011). Por exemplo, em estudo sobre alterações em atributos físicos, químicos e biológicos, Carneiro et al. (2009) verificaram que em áreas de vegetação nativa de Cerrado, convertidas em pastagem ou cultivo de grãos, todos esses atributos do solo são alterados. Ainda, segundo Rocha Júnior et al. (2014), a substituição da cobertura vegetal tem causado mudanças negativas nas propriedades do solo, levando à degradação de grandes áreas e ocasionando um declínio na sua qualidade.

Diante disso, a avaliação conjunta da variação dos atributos é importante para o melhor manejo do solo e das culturas, visando à sustentabilidade dos sistemas agrícolas, pois, a simples mensuração e a representação digital de um atributo isolado do solo, como resposta à prática de manejo, geralmente não é eficiente para estabelecer relação causa-efeito com a produtividade de culturas. Portanto, os métodos estatísticos univariados, elevam a dimensão do problema, além de onerar o processo, devido ao grande número de variáveis envolvidas. Assim, a utilização de análise multivariada, a qual inclui diversos procedimentos estatísticos, torna-se uma alternativa para investigar relações complexas, permitindo indicar diferenças e estabelecer relações entre os tratamentos e os atributos avaliados, tornando-se uma ferramenta importante na análise das informações obtidas (Cherubin et al., 2011; Cunha et al., 2012; Santi et al., 2012).

Além das técnicas multivariadas, entre os princípios mais utilizados no contexto do mapeamento digital do solo (MDS), encontra-se a geoestatística, capaz de evidenciar a relação da paisagem e classes pedológicas (McBratney et al., 2000). A geoestatística possui bases advinda da teoria de variáveis regionalizadas, que considera a variabilidade espacial de uma determinada variável do solo como uma função aleatória (ver Seção 3.4.1), sendo representada por um modelo estocástico (Lima et al., 2013). Nesse contexto, o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo se torna importante em áreas sob diferentes cultivos, uma vez que a geoestatística pode indicar alternativas de manejo, principalmente, para estimar respostas das culturas em função de determinadas práticas de manejo (Souza et al., 2001).

Em síntese, um semivariograma experimental é estimado das amostras obtidas e então utilizado no ajuste dos modelos teóricos que sejam funções admissíveis. O semivariograma

fornece uma medida do grau de dependência espacial entre amostras em uma direção e pode crescer até um valor constante (patamar) dentro de determinado intervalo, ou então, crescer continuamente sem apresentar evidências de atingir um patamar. Quanto maior a semivariância, mais dissimilares são as propriedades dos solos entre os locais (Carvalho et al., 2010).

Entretanto, quando o fenômeno em estudo revela diferentes padrões de dependência espacial, ou seja, apresenta uma variabilidade que não é a mesma em todas as direções, o fenômeno em estudo é chamado de anisotrópico. A anisotropia é ocasionada quando o semivariograma apresenta distintos padrões de dependência espacial em diferentes direções. Sua utilização permite uma maior precisão na construção de mapas temáticos que descrevem a variabilidade espacial dos atributos do solo (Guedes et al., 2013).

#### 3.4.1. *Geoestatística e modelagem anisotrópica de variáveis ambientais*

A precisão das pesquisas feitas sobre propriedades ambientais depende, em qualquer local, da quantidade de variação dentro da área amostrada. A estatística clássica assume que a média da unidade de amostragem é o valor esperado em toda a unidade, com um erro de estimativa expresso pela variação dentro da unidade. Essa abordagem pressupõe que a variabilidade da média é aleatória e contém referência à distribuição geográfica das diferenças dentro das unidades amostrais. No entanto, esse aspecto aleatório da variabilidade geralmente contém um componente que é espacialmente dependente (Campbell, 1978; Vieira et al., 1981).

Com o passar dos anos, métodos geoestatísticos desenvolvidos por Matheron (1963; 1971), fundamentados na teoria das variáveis regionalizadas, permitiram o uso de técnicas de interpolação para propriedades do solo com dependência espacial. Nesta teoria, a aleatoriedade é caracterizada através de parâmetros de distribuição, ou seja, uma variável regionalizada,  $Z(x)$ , é uma variável aleatória que pega diferentes valores de  $Z$  de acordo com a posição  $x$  na amostragem. Quando  $Z(x)$  apresenta o mesmo valor em todos os locais amostragem, então é dita como função estacionária de primeira ordem. A partir dos anos 1970, estes procedimentos foram denominados como *geoestatística* (Trangmar et al., 1985).

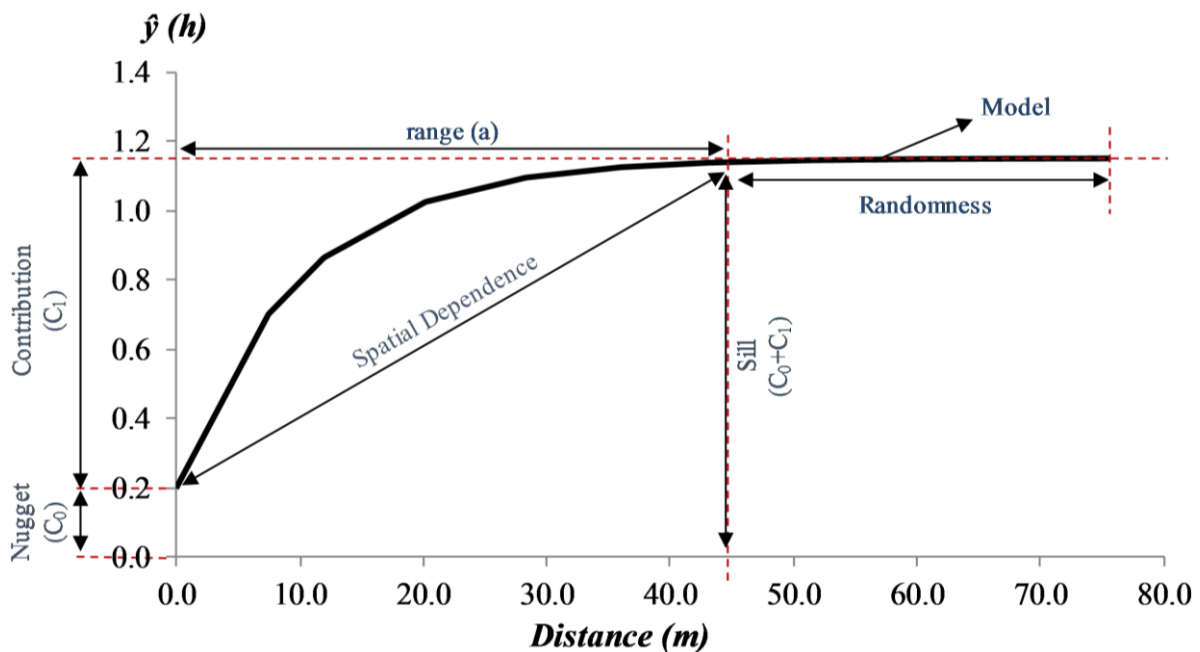
As técnicas de geoestatística são adequadas nos estudos de variabilidade espacial, por permitir a escolha da krigagem (Seção 3.4.2) como método de interpolação, quando aplicada (Valeriano & Prado, 2001). Geralmente, a geoestatística estrutura e quantifica a dependência espacial de variáveis ambientais supondo uma fraca estacionariedade para se ter autocorrelação entre pontos amostrais com uso de semivariogramas. Segundo Trangmar et al. (1985), o semivariograma é dependente da distância e direção de separação de dois ou mais pontos.

Assim, um semivariograma para cada par de combinação de pontos pode ser estimado para um dado volume de espaço tridimensional (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:  $\gamma(h)$  representa o valor da semivariância para uma distância  $h$ ;  $N(h)$  refere-se ao número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;  $Z(x_i)$  é o valor do atributo  $Z$  na posição  $x_i$ ; e  $Z(x_i + h)$  é o valor do atributo  $Z$  separado por uma distância  $h$  da posição  $x_i$ .

A partir do semivariograma calculado com dados do campo, são associados modelos teóricos, definidos pelos parâmetros: modelo (linear, esférico, gaussiano, exponencial), efeito pepita ( $C_0$ ), patamar ( $C_0+C$ ) e alcance ( $a$ ) (Figura 4).



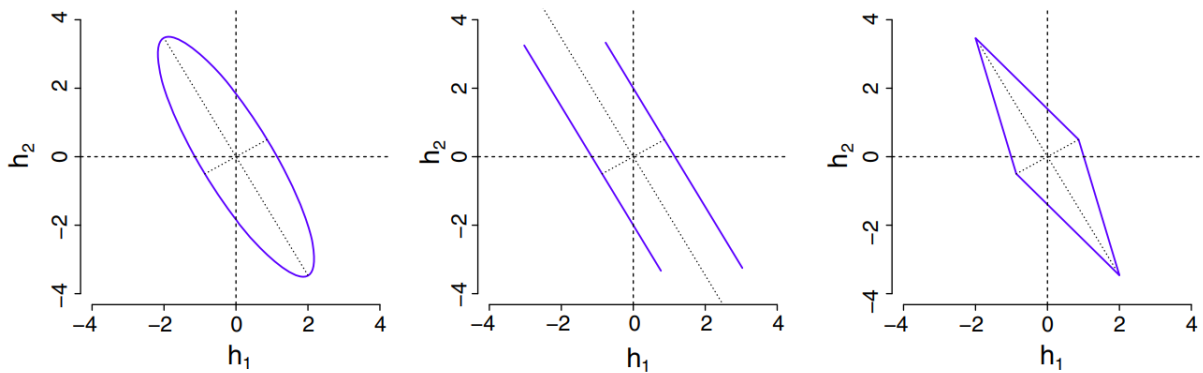
Fonte: O autor.

Figura 4: Componentes e modelo de um semivariograma experimental confeccionado em geoestatística.

O efeito pepita representa a descontinuidade na origem devido à variação microescalar, ou seja, a variância aleatória não explicada causada pela microvariabilidade de propriedades que não podem ser detectadas na escala de amostragem (Journel & Huijbregts, 1978). O patamar corresponde teoricamente à variância máxima dos dados. O alcance representa o alcance da dependência espacial, ou raio de influência, sendo indicado pela distância a partir da qual cessa o incremento da variância estimada, que atinge um valor de patamar (Valeriano & Prado, 2001).

Quando o valor do semivariograma depende apenas do comprimento do vetor  $h$ , então é dito ser isotrópico (unidirecional). Entretanto, quando depende tanto do vetor  $h$  como também

da direção do vetor, então o semivariograma é dito anisotrópico (Budrikaitė, 2005; Budrikaitė & Ducinkas, 2005). Conforme explicita Guedes et al. (2008), os principais tipos de anisotropia são: geométrica, zonal e combinada (Figura 5). A anisotropia geométrica ocorre quando há uma direção com maior continuidade espacial, isto é, maior valor de alcance ( $a$ ); a anisotropia zonal, quando existe uma direção com maior valor de patamar ( $C_0+C$ ) em relação às demais direções; e a anisotropia combinada, quando houver certas direções diferindo em alcance e patamar nos semivariogramas experimentais.



Fonte: Allard et al. (2015).

**Figura 5:** Exemplos de anisotropia geométrica (à esquerda), zonal (centro) e combinada (à direita).

Os modelos de variograma anisotrópicos são feitos para capturar desvios da isotropia, usando diferentes parâmetros de alcance num conjunto de instruções. O número de direções e os ângulos reais para os quais se modela são escolhidos arbitrariamente (Ecker & Gelfand, 2003). No entanto, as direções convencionais mais utilizadas para confecção destes semivariogramas são as estabelecidas por Isaaks & Srivastava (1989):  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ , com um raio de tolerância de  $22,5^\circ$ , seguindo o sistema de medição da direção do azimute, e tendo o norte como a direção  $0^\circ$ , variando as outras direções no sentido horário.

Existem poucas maneiras de modelar um semivariograma com anisotropia zonal (Budrikaitė, 2005), uma delas é expressá-lo como a soma individual dos modelos (Eq. 2):

$$\gamma(h_u, h_v) = \gamma_1(\sqrt{h_u^2 + h_v^2}) + \gamma_2(h_v) \quad (2)$$

em que:  $u$  e  $v$  representam as duas principais direções da anisotropia;  $\gamma_1(h_u)$  e  $\gamma_2(h_v)$  são os valores dos semivariogramas em direções mostrando a continuidade máxima e mínima.

Para a anisotropia geométrica, um semivariograma pode ser modelado alterando o modelo de variograma para um processo isotrópico (Budrikaitė & Ducinkas, 2005), transformando as coordenadas (Eq. 3):

$$\gamma(x_i - x_j) = \gamma(\|A(x_i - x_j)\|) \quad (3)$$

em que:  $A$  é uma matriz de transformação, que consiste de 4 passos básicos. O primeiro passo é identificar os eixos da anisotropia, através da geração de variogramas em direções distintas ( $\varphi = 0^\circ; 45^\circ; 90^\circ; 135^\circ$ , com um raio de tolerância  $\epsilon = 22,5^\circ$ ). Então cada grupo de ângulo ( $\alpha_i$ ) é definido como:  $\varphi - \epsilon/2 < \alpha_i < \varphi + \epsilon/2$ . Se a anisotropia existir, os alcances ou patamares dos dois variogramas irão diferir.

Detectada a anisotropia, o segundo passo é rotacionar os eixos dos dados para coincidir com os eixos da anisotropia, usando uma matriz de rotação (Eq. 4):

$$R = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \text{sen}(\varphi) \\ \text{sen}(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \quad (4)$$

em que:  $\varphi$  é o ângulo de  $y$  (direção norte) para o eixo principal da elipse.

O terceiro passo é a redução dos variogramas direcionais para um único variograma com alcance padrão de 1. A distância da transformação pode ser representada conforme Eq. 5:

$$T = \begin{pmatrix} 1/a_{max} & 0 \\ 0 & 1/a_{min} \end{pmatrix} \quad (5)$$

em que:  $a_{max}$  e  $a_{min}$  é o maior e menor alcance da elipse de anisotropia, respectivamente.

Por último, é necessário combinar a rotação com as matrizes de transformação da distância e escala, usando a matriz de transformação  $A = TR$ , obtendo-se o modelo geral para casos bidimensionais de anisotropia geométrica (Eq. 6):

$$\gamma(x_i - x_j) = \gamma(\|TR(x_i - x_j)\|) \quad (6)$$

Desta maneira, nota-se que as formas mais eficazes para detectar anisotropia consistem basicamente do cálculo de semivariogramas em várias direções, plotando-os num único gráfico, ou esboçando um gráfico de elipse, usando os alcances obtidos nas diferentes direções (Deutsch & Journel, 1992). A partir da sua identificação, seus valores devem incorporados no processo da caracterização da estrutura de dependência espacial, o que melhorará a precisão da estimativa espacial de variáveis para locais não amostrados, resultando na geração de mapas mais precisos da variabilidade espacial das variáveis em estudo (Guedes et al., 2008; 2013; 2018).

#### 3.4.2. Krigagem ordinária (KO)

A maioria das propriedades do solo pode ser medida em qualquer quantidade e lugar, mas na prática eles são medidos em um número muito pequeno, principalmente por razões de economia. Até o final do século passado, a determinação de propriedades do solo fora da grade de amostragem eram feitas por algoritmos de interpolação da variação do erro mínima (Goovaerts, 2000).

Atualmente, a predição dos valores fora da grade de amostragem ou em lugares adjacentes necessita apenas de uma amostragem georreferenciada representativa do local, devido ao desenvolvimento da técnica da Krigagem, a qual provê uma solução para o problema de estimação baseado em modelos contínuos de variação espacial estocástica. Esta técnica faz o melhor uso do conhecimento existente, levando em conta a maneira como uma propriedade varia no espaço através de modelos de variogramas (Webster & Oliver, 2007).

A KO objetiva estimar o valor de uma variável aleatória,  $Z$ , em um ou mais pontos sem amostragem ou em blocos, sem tendência e com variância mínima, a partir de dados de amostra mais ou menos esparsos em um determinado suporte, de forma que  $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_N)$ , nos pontos  $x_1, x_2, \dots, x_N$ . Assim, baseia-se no pressuposto que não conhecemos a média (Webster & Oliver, 2007). Desta forma, considerando uma estimativa pontual,  $Z$  é estimado no ponto  $x_0$  por  $\hat{Z}(x_0)$ , conforme Eq. 7:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (7)$$

em que:  $\lambda$  são os pesos. Para garantir uma estimativa imparcial, os pesos são feitos para somar 1, com erro esperado 0 (Eq. 8 e 9):

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

$$E[\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)] = 0 \quad (9)$$

Desta forma, minimiza-se a variância de predição e, se o modelo específico usado descrever bem a variação, o modelo em combinação com dados da amostra pode ser usado para previsão das propriedades do solo com confiança (Webster, 2000).

### 3.4.3. Análises de componentes principais

A análise de componentes principais (ACP) é um método estatístico introduzido pela primeira vez por Hotelling em 1933. As componentes principais (CP) são combinações lineares das variáveis originais com características ótimas: a primeira CP define a variância máxima entre todas as possíveis combinações lineares; a segunda CP define a variância máxima entre todas as combinações não correlacionadas com a primeira (Henrion & Henrion, 2001).

Cada CP explica uma proporção da variabilidade total e essa proporção pode ser calculada, mediante o quociente entre o valor original do autovalor e o traço da matriz de correlação. A definição do número de componentes a serem utilizados é feita por meio de dois critérios. O primeiro é o método gráfico, que considera a porcentagem de variação explicada pela componente nas ordenadas e os autovalores em ordem decrescente nas abscissas. O segundo consiste de métodos de adequação, dos quais o *KMO* (Kaiser-Meyer-Olkin = Measure



of Sampling Adequacy) é o mais utilizado, pois examina o ajuste de dados, tomando todas as variáveis simultaneamente e provê uma informação sintética sobre os mesmos (Lorena, 2005).

Poucos estudos têm sido realizados no norte do Brasil visando o emprego de análises anisotrópicas e multivariadas para estudos que visam a excelência de mapas que sustentam uma agricultura de precisão. Portanto, este trabalho representa uma oportunidade para avaliar a magnitude das transformações das propriedades intrínsecas do solo causadas pela transformação de áreas naturais para sistemas de exploração agrícolas no Amazonas.

#### 4. REFERÊNCIAS

- Aidona, E.; Grison, H.; Petrovsky, E. Kazakis, N.; Papadopoulou, L. & Voudouris, K. (2016). Magnetic characteristics and trace elements concentration in soils from Anthemountas River basin (North Greece): Discrimination of different sources of magnetic enhancement. **Environment Earth Sciences** 75(20):1375.
- Allard, D.; Senoussi, R. & Porcu, E. (2015). Anisotropy models for spatial data. **Mathematical Geosciences** 48(3):305–328.
- Almeida, C. X.; Centurion, J. F.; Jorge, R. F.; Barbosa, J. C. & Andrioli, I. (2012). Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo** 36(6):1745–1755.
- Amirian-Chakan, A.; Minasny, B.; Taghizadeh-Mehrjardi, R.; Akbarifazli, R.; Darvishpasand, Z. & Khordehbin, S. (2019). Some practical aspects of predicting texture data in digital soil mapping. **Soil and Tillage Research** 194:104289.
- Ayoubi, S. & Karami, M. (2019). Pedotransfer functions for predicting heavy metals in natural soils using magnetic measures and soil properties. **Journal of Geochemical Exploration** 197:212–219.
- Blumentritt, D. J. & Lascu, I. (2015). A comparison of magnetic susceptibility measurement techniques and ferrimagnetic component analysis from recent sediments in Lake Pepin (USA). In: Da Silva, A. C., Whalen, M. T. et al. (eds) **Magnetic Susceptibility Application – A Window onto Ancient Environments and Climatic Variations**. Geological Society, Special Publications, 414.
- Bouma, J. & van Lanen, H. A. J. (1987). Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. In: **Proceedings of the International Workshop on Quantified Land Evaluation Procedures, Washington, DC, USA, 1987** (Washington, 1987), 106–110.
- Bouma, J. (1989). Using Soil Survey Data for Quantitative Land Evaluation. **Advances in Soil Science** 9:177–213.
- Budrikaitė, L. & Ducinkas, K. (2005). Modelling of geometric anisotropic spatial variation. **Mathematical Modelling and Analysis** 361–366.
- Budrikaitė, L. (2005). Modeling of zonal anisotropic variograms. **Lietuvos Matematikos Rinkiny** 45:339–342.
- Burton, K. W. 2006. Global weathering variations inferred from marine radiogenic isotope records. **Journal of Geochemical Exploration** 88:262–265.

- Calvert, S. E. & Pedersen, T. F. (2007). Elemental proxies for palaeoclimatic and palaeoceanographic variability in marine sediments: interpretation and application. In: Claude, H. M. & Anne De, V. (eds) **Developments in Marine Geology** 1:567–644.
- Camargo, L. A.; Marques Jr, J.; Pereira, G. T.; Alleoni, L. R. F.; Bahia, A. S. R. S. & Teixeira, D. D. B. (2016). Pedotransfer functions to assess adsorbed phosphate using iron oxide content and magnetic susceptibility in an Oxisol. **Soil Use and Management** 32(2):172–182.
- Camêlo, D. L.; Carlos Ker, J.; Fontes, M. P. F.; Costa, A. C. S.; Corrêa, M. M. & Leopold, M. (2018). Mineralogy, magnetic susceptibility and geochemistry of Fe-rich Oxisols developed from several parent materials. **Scientia Agrícola** 75(5):410-419.
- Campbell, J. B. (1978). Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineations of two soil mapping units. **Soil Science Society of America Journal** 42(3):460–464.
- Carneiro, M. A. C.; Souza, E. D.; Reis, E. F.; Pereira, H. S. & Azevedo, A. R. (2009). Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:147-157.
- Carvalho, S. R. L.; Vilas Boas, G. S. & Fadigas, F. S. (2010). Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em solos originados nos sedimentos da formação Barreiras. **Cadernos de Geociências** 7(2):63-79.
- Castellini, M. & Iovino, M. (2019). Pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of Sicilian soils. **Archives of Agronomy and Soil Science** 65(10):1401–1416.
- Cherubin, M. R.; Santi, A. L.; Basso, C. J.; Eitelwein, M. T. & Vian, A. L. (2011). Caracterização e estratégias de manejo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo utilizando a análise dos componentes principais. **Enciclopédia Biosfera** 7(13):196-210.
- Cunha, E. Q.; Stone, L. F.; Ferreira, E. P. B.; Didonet, A. D. & Moreira, J. A. A. (2012). Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 16(1):56–63.
- Dai, Y.; Shangguan, W.; Wei, N.; Xin, Q.; Yuan, H.; Zhang, S. et al. (2019). A review of the global soil property maps for Earth system models. **Soil** 5(2):137–158.
- Dearing, J. A. (1999). **Environmental magnetic susceptibility using the Bartington MS2 system**. 2nd ed. Kenilworth: Chi Publishing, 54p.
- Deutsch, C.V. & Journel, A. G. **GSLIB: Geostatistical Software Library and user's guide**. New York, Oxford University Press, 1992. 339p.
- Devleeschouwer, X.; Petitclerc, E.; Spassov, S. & Prétat, A. (2010). The Givetian–Frasnian boundary at Nismes parastratotype (Belgium): the magnetic susceptibility signal controlled by ferromagnetic minerals. In: Silva, A. C. & Boulvain, F. (eds) **Magnetic Susceptibility, Correlations and Paleozoic Environments**. Geologica Belgica, 13:351–366.
- Devleeschouwer, X.; Riquier, L.; Babek, O.; De Vleeshouwer, D.; Petitclerc, E.; Sterckx, S. & Spassov, S. (2015). Magnetization carriers of grey to red deepwater limestones in the GSSP of the Givetian–Frasnian boundary (Puech de la Suque, France): signals influenced by moderate diagenetic overprinting. In: Silva, A. C.; Whalen, M. T. et al. (eds) **Magnetic Susceptibility Application – A Window onto Ancient Environments and Climatic Variations**. Geological Society, Special Publications, 414.

- Dopieralska, J.; Belka, Z. & Haack, U. (2006). Geochemical decoupling of water masses in the Variscan oceanic system during Late Devonian times. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 240:108–119.
- Ecker, M. D. & Gelfand, A. (2003). Spatial modeling and prediction under stationary non-geometric range anisotropy. **Environmental and Ecological Statistics** 10:165-178.
- Egli, R. (2003). Analysis of the field dependence of remanent magnetization curves. **Journal of Geophysical Research** 108:B2-2081.
- Ehrenberg, S. N. & Svana, T. A. (2001). Use of spectral gamma-ray signature to interpret stratigraphic surfaces in carbonate strata: an example from the Finn mark carbonate platform (Carboniferous–Permian), Barents Sea. **AAPG Bulletin** 85(2):295–308.
- Ellwood, B. B.; El Hassani, A.; Tomkin, J. H. & Bultynck, P. (2015). A climate-driven model and development of a floating-point timescale for the middle devonian Eifelian stage using time-series analysis of magnetic susceptibility ( $\chi$ ) data set. In: Silva, A. C.; Whalen, M. T. et al. (eds) **Magnetic Susceptibility Application – a Window onto Ancient Environments and Climatic Variations**. Geological Society, Special Publications, 414.
- Font, E.; Trinidad, R. I. F. & Nédélec, A. (2005). Detrital remagnetization in hematite-bearing Neoproterozoic Puga cap dolostone, Amazon craton: a rock magnetic and SEM study. **Geophysical Journal International** 163:491–500.
- Golden, N.; Morrison, L.; Gibson, P. J.; Potito, A. P. & Zhang, C. (2015). Spatial patterns of metal contamination and magnetic susceptibility of soils at an urban bonfire site. **Applied Geochemistry** 52:86–96.
- Goovaerts, P. (2000). Estimation or simulation of soil properties? An optimization problem with conflicting criteria. **Geoderma** 97:165–186.
- Grabowski, J.; Narkiewicz, M. & De Vleeschouwer, D. (2015). Forcing factors of the magnetic susceptibility signal in lagoonal and subtidal depositional cycles from the Zachełmie section (Eifelian, Holy Cross Mountains, Poland). In: Silva, A. C.; Whalen, M. T. et al. (eds) **Magnetic Susceptibility Application – A Window onto Ancient Environments and Climatic Variations**. Geological Society, Special Publications, 414.
- Guedes, L. P. C.; Uribe-Opazo, M. A. & Ribeiro Junior, P. J. (2013). Influence of incorporating geometric anisotropy on the construction of thematic maps of simulated data and chemical attributes of soil. **Chilean Journal of Agricultural Research** 73(4):414–423.
- Guedes, L. P. C.; Uribe-Opazo, M. A.; Johann, J. A. & Souza, E. G. (2008). Anisotropia no estudo da variabilidade espacial de algumas variáveis químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32(6):2217–2226.
- Guedes, L. P. C.; Uribe-Opazo, M. A.; Ribeiro J, P. J.; & Dalposso, G. H. (2018). Relationship between sample design and geometric anisotropy in the preparation of thematic maps of chemical soil attributes. **Engenharia Agrícola** 38(2):260–269.
- Hannam, J. A.; Van Dam, R. L. & Harmon, R. S. (2009). Soil magnetism research: State of the art and future directions. In: **Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2009**:520-526. Society of Exploration Geophysicists.
- Heider, F.; Zitzelsberger, A. & Fabian, K. (1996). Magnetic susceptibility and remanent coercive force in grown magnetite crystals from 0.1 mm to 6 mm. **Physical Earth Planetary International** 93:239–256.
- Henrion, R. & Henrion, G. (2001). Chemometrics. In: Günzler, H. & Williams, A. **Handbook of Analytical Techniques**. Wiley-VCH, 37–61.

- Hladil, J.; Koptíková, L.; Galle, A.; Sedláček, V.; Pruner, P.; Schnabl, P.; Langrová, A. et al. (2009). Early Middle Frasnian platform reef strata in the Moravian Karst interpreted as recording the atmospheric dust changes: the key to understanding perturbations in the punctata conodont zone. **Bulletin of Geosciences** 84(1):75–106.
- Isaaks, E. H. & Srivastava R. M. (1989). **An introduction to applied geostatistics**. New York, Oxford University Press, 560p.
- Jackson, M.; Rochette, P.; Fillion, G.; Banerjee, S. & Marvin, J. (1993). Rock magnetism of remagnetized Palaeozoic carbonates: low-temperature behavior and susceptibility characteristics. **Journal of Geophysical Research** 98:6217–6225.
- Journel, A. G. & Huijbregts, C. H. (1978). **Mining Geostatistics**. Academic Press, New York.
- Khaledian, Y.; Brevik, E. C.; Pereira, P.; Cerdà, A.; Fattah, M. A. & Tazikeh, H. (2017). Modeling soil cation exchange capacity in multiple countries. **Catena** 158:194–200.
- Khaledian, Y.; Quinton, J. N.; Brevik, E. C.; Pereira, P. & Zeraatpisheh, M. (2018). Developing global pedotransfer functions to estimate available soil phosphorus. **Science of the Total Environment** 644:1110–1116.
- Kitagawa, Y. & Möller, M. R. F. (1980). Kaolin minerals in the Amazon soils. **Soil Science and Plant Nutrition** 26(2):255-269.
- Koptíková, L.; Bábek, O.; Hladil, J.; Kalvoda, J. & Slavík, L. (2010). Stratigraphic significance and resolution of spectral reflectance logs in Lower Devonian carbonates of the Barrandian area, Czech Republic; a correlation with magnetic susceptibility and gamma-ray logs. **Sedimentary Geology** 225:83–98.
- Kozłowski, W. & Sobien, K. (2012). Mid-Ludfordian coeval carbon isotope, natural gamma ray and magnetic susceptibility excursions in the Mielnik IG-1 borehole (Eastern Poland) – dustiness as a possible link between global climate and the Silurian carbon isotope record. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 339–341:74–97.
- Kruiver, P. P.; Dekkers, M. J. & Heslop, D. (2001). Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetization. **Earth and Planetary Science Letters** 189(3-4):269–276.
- Lima, L. D. S.; Neumann, M. B.; Braga, A. D. S. & Roig, H. (2013). **Mapeamento de Solos: do tradicional ao digital**. Embrapa Cerrados-Documentos.
- Liu, Q.; Roberts, A. P.; Larrasoana, J. C.; Banerjee, S. K.; Guyodo, Y.; Tauxe, L. & Oldfield, F. (2012). Environmental magnetism: Principles and applications. **Reviews of Geophysics** 50:4002.
- Lorena, V. (2005). **Análise multivariada da teoria à prática** [Dissertação]. Universidade Federal de Santa Maria – RS, 215p.
- Lourente, E. R. P.; Mercante, F. M.; Alovisei, A. M. T.; Gomes, C. F. G.; Gasparini, A. S. & Nunes, C. M. (2011). Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 41(1):20–28.
- Lukens, W. E.; Nordt, L. C.; Stinchcomb, G. E.; Driese, S. G. & Tubbs, J. D. (2018). Reconstructing pH of Paleosols using geochemical proxies. **The Journal of Geology** 126(4):427–449.
- Mabille, C. & Boulvain, F. (2008). Les Monts de Baileux section: detailed sedimentology and magnetic susceptibility of Hanonet, Trois-Fontaines and Terres d’Hairs Formation (Eifelian/Givetian boundary and Lower Givetian, SW Belgium). **Geologica Belgica** 11:93–121.

- Maher, B. A. (1986). Characterization of soils by mineral magnetic measurements. **Physics of the Earth and Planetary Interiors** 42:76-91.
- Maher, B. A. (1988). Magnetic properties of some synthetic submicron magnetites. **Geophysical Journal** 94:83-96.
- Maia, M. A. M. & Marmos, J. L. (2010). **Geodiversidade do estado do Amazonas**. Manaus: CPRM. 275p.
- Malki, M.; González-Toril, E.; Sanz, J. L.; Gómez, F.; Rodríguez, N. & Amils, R. (2006). Importance of the iron cycle in biohydrometallurgy. **Hydrometallurgy** 83:223-228.
- Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. **Economic Geology** 58(8):1246-1266.
- Matheron, G. (1971). **The theory of regionalized variables and its applications**. Paris, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 211p.
- McBratney, A. B.; Minasny, B.; Cattle, S. R. & Vervoort, R. W. (2002). From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma** 109(1-2):41-73.
- McBratney, A. B.; Odeh, I. O. A.; Bishop, T. F. A.; Dunbar, M. S. & Shatar, T. M. (2000). An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma** 97:293-327.
- McBratney, A. G.; Santos, M. L. & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. **Geoderma** 117(1-2):3-52.
- Melo, T. R.; Machado, W.; Oliveira, J. F. & Tavares Filho, J. (2018). Predicting aggregate stability index in Ferralsols. **Soil Use and Management** 34(4):545-553.
- Minasny, B. & Hartemink, A. E. (2011). Predicting soil properties in the tropics. **Earth-Science Reviews** 106(1-2):52-62.
- Mwango, S. B.; Wickama, J.; Msanya, B. M.; Kimaro, D. N.; Mbogoni, J. D. & Meliyo, J. L. (2019). The use of pedotransfer functions for estimating soil organic carbon contents in maize cropland ecosystem in the Coastal Plains of Tanzania. **Catena** 172:163-169.
- Ostovari, Y.; Ghorbani-Dashtaki, S.; Kumar, L. & Shabani, F. (2019). Soil erodibility and its prediction in semi-arid regions. **Archives of Agronomy and Soil Science** 65(12):1688-1703.
- Pachepsky, Y. A. & van Genuchten, M. T. (2011). Pedotransfer Functions. **Encyclopedia of Earth Sciences Series** 556-561.
- Peluco, R. G.; Marques Jr, J.; Siqueira, D. S.; Cortez, L. A.; Pereira, G. T. (2013). Magnetic susceptibility in the prediction of soil attributes in two sugarcane harvesting management systems. **Engenharia Agrícola** 33(6):1134-1143.
- Peters, C. & Dekkers, M. J. (2003). Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size. **Physics and Chemistry of the Earth** 28(16-19):659-667.
- Pham, K.; Kim, D.; Yoon, Y. & Choi, H. (2019). Analysis of neural network based pedotransfer function for predicting soil water characteristic curve. **Geoderma** 351:92-102.
- Qiao, J.; Zhu, Y.; Jia, X.; Huang, L. & Shao, M. (2018). Development of pedotransfer functions for predicting the bulk density in the critical zone on the Loess Plateau, China. **Journal of Soils and Sediments** 19(1):366-372.
- Ramos, P. V. (2015). **Suscetibilidade magnética na estimativa de atributos do solo e identificação de compartimentos da paisagem em Latossolos de basalto no planalto do RS** [Dissertação]. Universidade Federal de Santa Maria – RS, 82p.

- Resende, M.; Santana, D. P.; Franzmeier, D. P. & Coey, J. M. D. (1988). Magnetic properties of Brazilian Oxisols. In **8 International Soil Classification Workshop**. Brasília: Embrapa-SNLCS/USDA-SCS/SMSS, 285p. Part 1: Papers, 78-108.
- Riquier, L.; Averbuch, O.; Devleeschouwer, X. & Tribovillard, N. (2010). Diagenetic v. detrital origin of the magnetic susceptibility variations in some carbonate Frasnian-Famennian boundary sections from Northern Africa and Western Europe: implications for paleo environmental reconstructions. **International Journal of Earth Sciences** 99:57–73.
- Rocha Junior, P. R.; Donagemma, G. K.; Andrade, F. V.; Passos, R. R.; Balieiro, F. C.; Mendonça, E. S. & Ruiz, H. A. (2014). Can soil organic carbon pools indicate the degradation levels of pastures in the Atlantic forest biome? **Journal of Agricultural Science** 6(1):84-95.
- Santi, A. L.; Amado, T. J. C.; Cherubin, M. R.; Martin, T. N.; Pires, J. L.; Flora, L. P. D.; & Basso, C. J. (2012). Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa agropecuária brasileira** 47(9):1346-1357.
- Schaap, M. G. (2004). Accuracy and uncertainty in PTF predictions. **Developments in Soil Science** 33–43.
- Schabes, M. E. & Bertram, H. N. (1988). Magnetization processes in ferromagnetic cubes. **Journal Applied Physics** 64:1347.
- Schaefer, C. E. G. R.; Lima, H. N.; Teixeira, W. G.; Vale Jr, J. R.; Souza, K. W.; Corrêa, G. R.; Mendonça, B. A. F. et al. (2017). Solos da Região Amazônica. In: Curi N.; Ker, J.C.; Novais, R.F.; Vidal-Torrado, P.; Schaefer, C. E. G. R. (editores). **Pedologia - Solos dos Biomas Brasileiros**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Shein, E. V.; & Arkhangel'skaya, T. A. (2006). Pedotransfer functions: State of the art, problems, and outlooks. **Eurasian Soil Science** 39(10):1089–1099.
- Silva, A. C.; Whalen, M. T.; Hladil, J.; Chadimova, L.; Chen, D.; Spassov, S.; Boulvain, F. et al. (2015). Magnetic susceptibility application: a window onto ancient environments and climatic variations: foreword. **Geological Society, Special Publications**, 414:1–13.
- Siqueira, D. S. (2010). **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar** [Dissertação]. Universidade Estadual Paulista – Jaboticabal, 75p.
- Siqueira, D. S.; Marques Jr, J.; Matias, S. S. R.; Barrón, V.; Torrent, J.; Baffa, O. & Oliveira, L. C. (2010b). Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management** 26(4):425–431.
- Siqueira, D. S.; Marques Jr, J.; Pereira, G. T.; Teixeira, D. B.; Vasconcelos, V.; Carvalho Jr, O. A. & Martins, E. S. (2015). Detailed mapping unit design based on soil–landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena** 135:149–162.
- Souza, Z. M.; Silva, M. L. S.; Guimarães, G. L.; Campos, D. T. S.; Carvalho, M. P. & Pereira, G. T. (2001). Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25(3):699-707.
- Tauxe, L. (2010). **Essentials of Paleomagnetism**, Univ. of Calif. Press, Berkeley.
- Thompson, R. & Oldfield, F. (1986). **Environmental magnetism**.
- Till, J. L.; Jackson, M. J.; Rosenbaum, J. G.; & Solheid, P. (2011). Magnetic properties in an ash flow tuff with continuous grain size variation: A natural reference for magnetic particle granulometry. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems** 12(7):1-10.

- Trangmar, B. B.; Yost, R. S. & Uehara, G. (1985). Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy** 38:45-94.
- Tribovillard, N.; Algeo, T. J.; Lyons, T. & Riboulleau, A. (2006). Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. **Chemical Geology** 232:12–32.
- Valeriano, M. M. & Prado, H. (2001). Técnicas de geoprocessamento e de amostragem para o mapeamento de atributos anisotrópicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25(4):997–1005.
- Vieira, S. R.; Nielsen, D. R. & Biggar, J. W. (1981). Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal** 45(6):1040–1048.
- Webster, R. & Oliver, M. A. (2007). **Geostatistics for environmental scientists. Statistics in practice**. 2nd edition, John Wiley & Sons, Ltd.
- Webster, R. (2000). Is soil variation random? **Geoderma** 97:149–163.
- Williams, W. & Dunlop, D. J. (1989). Three-dimensional micromagnetic modelling of ferromagnetic domain structure. **Nature** 337:634–637.
- Williams, W. & Dunlop, D. J. (1995). Simulation of magnetic hysteresis in pseudo-single-domain grains of magnetite. **Journal Geophysical Research** 100:3859–3871.
- Worm, H. U. (1998). On the superparamagnetic-stable single domain transition for magnetite, and frequency dependence of susceptibility. **Geophysical Journal International** 133(1):201–206.
- Zenero, M. D. O.; Silva, L. F. S.; Castilho, S. C. P.; Vidal, A.; Grimaldi, M. & Cooper, M. (2016). Characterization and classification of soils under forest and pasture in an agroextractivist project in eastern Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 40:e0160165.
- Zhou, L. P.; Oldfield, F.; Wintle, A. G.; Robinson, S. G. & Wang, J. T. (1990). Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess. **Nature** 346:737–739.

## 5. CAPÍTULO 1 – SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DE ARGISSOLOS SOB FLORESTA E CULTIVOS NO SUL DO AMAZONAS

### RESUMO

As ações antrópicas têm motivado inúmeras pesquisas acerca dos impactados solos naturalmente pobres da Amazônia brasileira, exigindo o uso de atributos diagnósticos cada vez mais específicos de cada mudança ambiental. O uso de *proxies* magnéticas inerentes do solo pode ser a chave para entender as alterações que ocorrem no solo e ambiente. Portanto, este estudo objetivou caracterizar o sinal e origem das propriedades magnéticas de Argissolos sob floresta e cultivos e estabelecer relações com atributos e tipos de uso do solo no sul do Amazonas, visando futuro monitoramento proxy ambiental. Três Argissolos sob cultivos e um sob floresta foram amostrados utilizando-se malhas sistemáticas em três camadas: 0,0-0,05; 0,05-0,1 e 0,1-0,2 m. Um total de 192 amostras / área foram submetidas a análises físicas, química e fertilidade, mineralógicas e de suscetibilidade magnética ( $\chi$ ), e aos resultados foram aplicadas análises estatísticas descritivas, uni e multivariadas. A conversão dos Argissolos naturais fisicamente bons e quimicamente pobres e ácidos para cultivos agrícolas, causou o aumento da densidade e amplitude do pH em água e  $Al^{3+}$  do solo, e a redução da macroporosidade, umidade gravimétrica, teores de fósforo disponíveis e ferro oxalato, e da incorporação de carbono orgânico em profundidade. Todos os Argissolos avaliados têm caracteristicamente baixa  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  devido à baixa concentração de óxidos de ferro com baixa  $\chi$ , e sofrem alto aprimoramento na  $\chi_{fd}$ , o que sugere-se ser decorrente dos processos pedogênicos, intemperismo intenso, clima favorável e alta presença de diamagnéticos que interferem na sua medida. A  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  em 0,0-0,05 m e  $\chi_{af}$  e  $\chi_{fd}$  % em 0,1-0,2 m foram altamente representativos dentro dos cultivos, caracterizando-se como uma *proxy* adequada ao monitoramento da fertilidade dos Argissolos no sul do Amazonas.

**Palavras-chave:** Conversão agrícola, óxidos de ferro, sinal magnético, *proxy*.

### CHAPTER 1 – MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF ARGISOLS UNDER FOREST AND CULTIVES IN SOUTH AMAZONAS

#### ABSTRACT

Anthropic actions have motivated numerous researches on the impacted naturally poor soils of the Brazilian Amazon, requiring the use of diagnostic attributes that are increasingly specific to each environmental change. The use of magnetic proxies inherent in the soil may be the key to understanding the changes that occur in the soil and the environment. Therefore, this study aimed to characterize the signal and origin of the magnetic properties of Argisols under forest and crops and to establish relationships with attributes and types of land use in southern Amazonas, aiming at future environmental proxy monitoring. Three Argisols under cultivation and one under forest were sampled using systematic meshes in three layers: 0.0-0.05; 0.05-0.1 and 0.1-0.2 m. A total of 192 samples / area were submitted to physical, chemical and fertility, mineralogical and magnetic susceptibility ( $\chi$ ) analyzes, and descriptive, univariate and multivariate statistical analyzes were applied to the results. The conversion of the physically good and chemically poor and acidic natural Argisols to agricultural crops, caused an increase in the density and amplitude of the pH in water and  $Al^{3+}$  of the soil, and a reduction in macroporosity, gravimetric humidity, available phosphorus and iron oxalate contents, and the



incorporation of organic carbon in depth. All evaluated Argisols have characteristically low  $\chi_{bf}$  and  $\chi_{af}$  due to the low concentration of iron oxides with low  $\chi$ , and undergo high enhancement in  $\chi_{fd}\%$ , which is suggested to be due to the pedogenic processes, intense weathering, favorable climate and high presence of diamagnetic that interfere with your measurement. The  $\chi_{bf}$  and  $\chi_{af}$  at 0.0-0.05 m and  $\chi_{af}$  and  $\chi_{fd}\%$  at 0.1-0.2m were highly representative within the crops, characterized as a good proxy for monitoring the fertility of the Argisols in the Amazon region. **Keywords:** Agricultural conversion, iron oxides, magnetic signal, proxy.

## 5.1. INTRODUÇÃO

A Amazônia brasileira possui mais de 5 milhões de km<sup>2</sup> e abrange o norte e algumas partes do nordeste e oeste do país. Somente no Amazonas, 45% da área é dominada por Argissolos e 26% por Latossolos, conhecidos por seu alto grau de intemperismo, solos ácidos, com baixa capacidade de trocar cátions e de disponibilizar água para as plantas (Ferreira et al., 2006; Teixeira et al., 2010; IBGE, 2014). Com a intensificação das atividades antrópicas, a floresta vem sendo desmatada para a expansão de áreas de cultivo, extração de madeira, mineração ou expansão de infraestrutura, levando à mudança da cobertura primária para pastagens e cultivos agrícolas, e sobretudo, à deterioração dos recursos naturais da bacia amazônica (Hartemink et al., 2008; Nascimento et al., 2018).

Vários estudos têm buscado entender os impactos causados pela conversão do uso da terra no ecossistema local, tanto para os atributos físicos (Souza et al., 2019), químicos (Souza Braz et al., 2013), hidráulicos (Zimmermann et al., 2006), dinâmica, estabilidade e estoque de C do solo (Araújo et al., 2011; van Straaten et al., 2015; Souza et al., 2020), como para as mudanças na: quantidade e qualidade da biomassa radicular (Lohbeck et al., 2015); emissão de gases de efeito estufa por queimadas (Fujisaki et al., 2015); atividade biológica do solo (Rodrigues et al., 2013; Cram et al., 2015); e redução dos serviços ecossistêmicos (Grimaldi et al., 2014).

No entanto, poucos estudos têm avaliado *proxies* nos ambientes terrestres (Minasny & Hartemink, 2011). *Proxies* são capazes de prever grande parte destas propriedades ambientais de forma mais simples, rápida e economicamente viável, dispensando parcialmente algumas etapas de trabalho de campo e de laboratório que normalmente são caros, trabalhosos e levam tempo para processar e adquirir as informações. Dentre algumas alternativas viáveis, está o uso de parâmetros magnéticos dos solos. As propriedades magnéticas fornecem diagnósticos ambientais sobre a concentração, estado do domínio e mineralogia do material, relacionadas a processos geológicos originais ou processos ambientais subsequentes (Dearing, 1999). Uma das propriedades magnéticas mais usadas é a suscetibilidade magnética –  $\chi$  (quando específica

de massa), ou  $\kappa$  (quando específica de volume). A  $\chi$  é definida como a razão de magnetização de um material quando aplicado um campo magnético (Thompson & Oldfield, 1986; Liu et al., 2012).

Os valores de  $\chi$  dos solos refletem principalmente as concentrações de magnetita e maghemita pois mesmo em baixa concentração são os minerais mais magnéticos. Estes minerais podem ser categorizados como magnetita litogênica, magnetita neoformada e maghemita pedogênica ou antropogênica (Grimley et al., 2004). As contribuições litogênicas para a SM são majoritariamente reflexo das concentrações de magnetita, mas os processos pedogênicos são dominantes nos sinais de SM, particularmente por neoformação de minerais magnéticos (Thompson & Morton, 1979; Singer et al., 1996; Hanesch et al., 2007). Entretanto, há fatores pedogênicos secundários como queima da cobertura vegetal e revolvimento do solo (Le Borgne, 1955; Mullins, 1977), concentração de minerais magnéticos por intempéries (Grimley, 1996) e ação bacteriana (Fassbinder et al., 1990; Byrne et al., 2016) que também podem afetá-la.

Já os fatores antropogênicos que afetam a SM do solo incluem poluição de estradas (Hoffman et al., 1999), aumento da erosão superficial do solo (Thompson & Oldfield, 1986), distúrbios físicos (Grimley et al., 2004), poluição atmosférica (Sapkota & Cioppa, 2012; Grimley et al., 2017) e acúmulo de metais pesados (Magiera et al., 2006; Cervi et al., 2014). Assim, a assinatura magnética do solo é consequência não apenas do material de origem, propriedades físico-químicas, idade, temperatura, processos biogênicos e pedogênicos, mas também das atividades humanas (Bouhsane & Bouhlassa, 2018).

Então, sabendo-se que as medições de  $\chi$  são bastante sensíveis às variações ambientais, há maior facilidade na obtenção de conhecimento a respeito dos fatores que influenciam o ambiente, como e. g. mudanças nos processos de formação (Singer et al., 1998), drenagem (Mathe & Leveque, 2003) e remanejamento do solo (Rahimi et al., 2013), mapeamento da contaminação do solo por metais pesados (Martin et al., 2018), entre outros. Aliado a isto, as medições de  $\chi$  são simples, rápidas, não destrutivas e baratas (Dearing, 1999), revelando ser uma excelente *proxy* para o preenchimento das lacunas existentes acerca dos processos que decorrem da conversão de áreas naturais (florestadas) para cultivos agrícolas e os impactos causados ao ambiente.

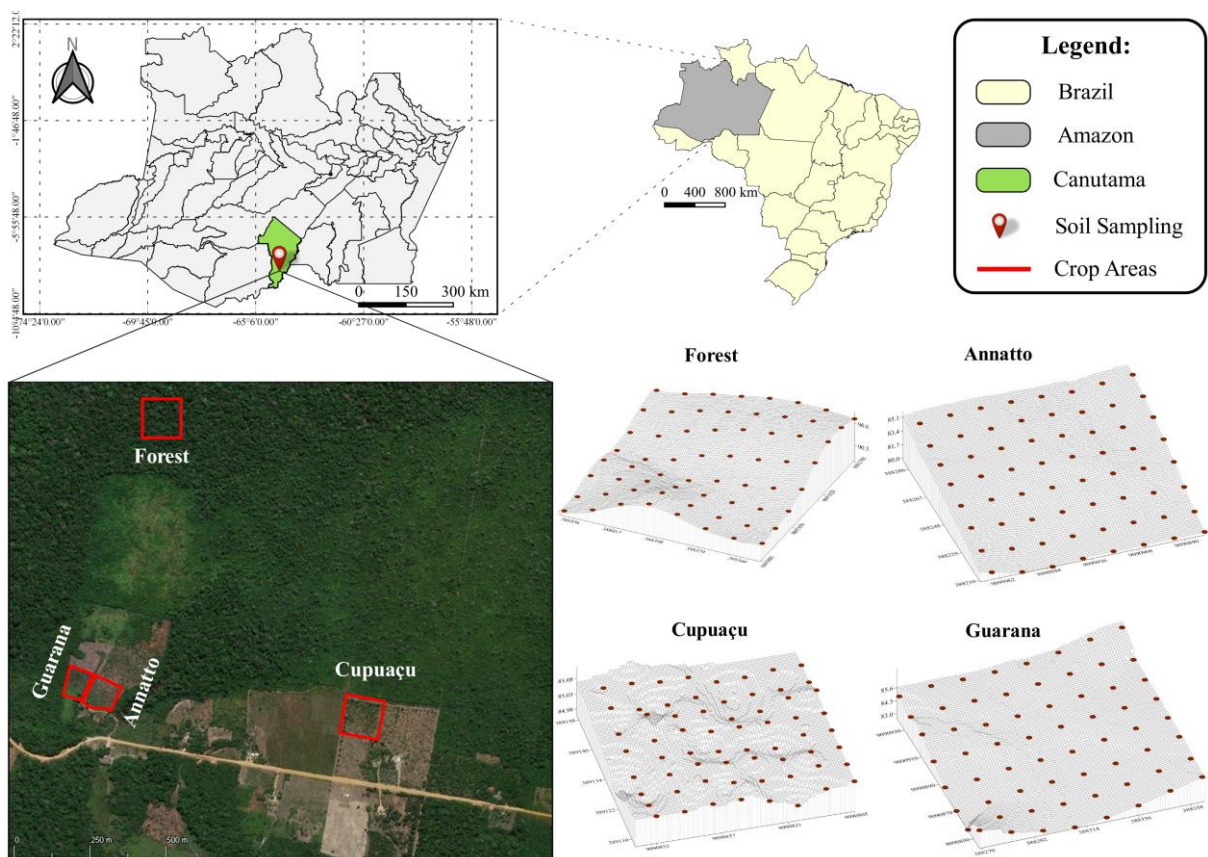
No entanto, pouco se sabe sobre o magnetismo em solos tropicais (Hannam et al., 2009), particularmente no Amazonas, onde há um único registro a respeito da variabilidade e densidade amostral da  $\chi$  (Oliveira et al., 2015). Portanto, este estudo objetiva caracterizar o sinal e origem da  $\chi$  de Argissolos sob floresta e cultivos, bem como ampliar o conhecimento acerca

de seu comportamento, relações e interdependências com atributos e tipos de uso do solo no sul do Amazonas. Concomitantemente, fornecer subsídios na construção de um banco de dados das propriedades magnéticas do solo para futuras calibrações como uma ferramenta proxy ambiental.

## 5.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.2.1. Descrição e histórico de uso das áreas

O estudo foi desenvolvido em duas propriedades rurais que fazem parte do Assentamento São Francisco dentro do município de Canutama-AM, Brasil. As coordenadas geográficas de referência são 8° 13' 23'' S e 64° 00' 50'' W, e 8° 13' 25'' S e 64° 00' 23'' W, para ambas propriedades. Foram selecionadas quatro áreas para estudo, sendo um sob floresta nativa (Floresta tropical ombrófila densa) e três sob cultivos agrícolas, os quais são Urucum (*Bixa orellana*), Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), e Guaraná (*Paullinia cupana*) (Figura 6).



**Figura 6:** Localização, vista aérea e relevo das áreas de estudo no município de Canutama, sul do Amazonas.

O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018), ou um Haplic Alisol de acordo com a Base de Referência Mundial (WRB, 2015), para todas as áreas. Em todo o

estado, os Argissolos são predominantes e compreendem 45% da área, os quais são, dentro da localização do estudo, oriundos de sedimentos das coberturas fanerozóicas da bacia do Solimões, que engloba o vasto interflúvio entre os rios Javari/Juruá/Purus e Madeira (Reis et al., 2006). O clima característico da região, segundo a classificação de Köppen, é Tropical Chuvoso, subtipo climático Am (chuvas do tipo monção), com período seco de pequena duração, temperatura média anual entre 25° e 27°C e pluviosidade variando de 2.800 mm a 3.100mm ao ano (Alvares et al., 2013).

**Tabela 1:** Histórico de uso e manejo das áreas selecionadas para estudo.

Uso	Manejo
Urucum e Guaraná	3 anos de efetivo cultivo. Oriunda de derrubada e queima da floresta, com consequente realização de destoca manual para limpeza da área no primeiro ano de cultivo. Sem histórico de adubação e calagem. As práticas culturais realizadas são apenas o controle das plantas daninhas com utilização de roçadeira motorizada, além de pulverização com herbicida glifosato para controle do sapé ( <i>Imperata brasiliensis</i> ). Declividade média de 3%.
Cupuaçu	7 anos de efetivo cultivo. Oriunda de derrubada e queima da floresta, com consequente realização de destoca manual para limpeza da área no primeiro ano de cultivo. Sem histórico de adubação e calagem. As práticas culturais realizadas são apenas o controle das plantas daninhas com utilização de roçadeira motorizada, além de pulverização com herbicida glifosato para controle do sapé ( <i>Imperata brasiliensis</i> ). Área plana.
Floresta	Tropical ombrófila densa, cuja vegetação é perenifólia, constituída por árvores adensadas e multiestratificadas entre 20 a 50 m de altura.

### 5.2.2. Metodologia de campo

Para a amostragem, foram estabelecidas malhas de acordo com as dimensões de cada sítio, conforme descrito na Tabela 2. As amostras foram coletadas em três camadas: 0,00-0,05 m; 0,05-0,10 m; e 0,10-0,20 m, somando 192 amostras por área e 768 amostras no total.

**Tabela 2:** Malhas amostrais dimensionadas de acordo com os espaçamentos das culturas.

Uso	Pontos coletados	Tamanho da malha	Espaçamento entre pontos
Guaraná e Floresta	64	70 x 70 m	10 x 10 m
Cupuaçu	64	42 x 42 m	6 x 6 m
Urucum	64	70 x 56 m	10 x 8 m

As amostras coletadas foram do tipo deformada (em bloco) e indeformadas (cilindros). Cada bloco foi seco à sombra e levemente destorroado de forma manual, passando-se parte em

peneira de malha de 2,00 mm, compondo a fração terra fina seca ao ar (TFSA), necessário para execução de análises de química e fertilidade e de granulometria do solo. A outra parte foi passado em peneira de 9,51 mm para 4,76 mm de malha para a análise de estabilidade de agregados do solo. As amostras indeformadas foram coletadas em cilindros com volume médio de 81,7 cm<sup>3</sup> para realização das demais análises físicas, conforme Teixeira et al. (2017).

### 5.2.3. Metodologia laboratorial

#### 5.2.3.1. Análises físicas

Foram realizadas as seguintes análises físicas: granulometria, macroporosidade (MaP), microporosidade (MiP), porosidade total (PT), umidade gravimétrica (Ug), densidade do solo (Ds), resistência à penetração (RP) e estabilidade de agregados do solo. A granulometria foi determinada com solução de NaOH a 0,1 mol L<sup>-1</sup> como dispersante químico sob descanso de 16 horas, seguida de agitação da suspensão em copos metálicos acoplados com água em agitador elétrico tipo Stirrer a 12.000 RPM por 15 minutos (Teixeira et al., 2017). A fração argila e silte foram separadas pelo método da pipeta e a fração areia obtida por tamisação.

Para as determinações da MaP, MiP, PT e Ug, os anéis volumétricos coletados foram colocados em mesa de tensão (Teixeira et al., 2017). Inicialmente, as amostras foram preparadas retirando-se o excesso de solo de suas extremidades, e em seguida, saturadas em uma lâmina de água em bandeja de alumínio, até atingir 2/3 da altura dos anéis. Em seguida, a PT foi determinada pelo método da saturação (Eq. 10). A MaP foi quantificada a partir do equilíbrio do conjunto (anel-solo), após aplicada a tensão de 6 kPa em mesa de tensão (Eq. 11). A MiP foi obtida após subtração do peso do conjunto anel-solo equilibrados à 6 kPa e o seu respectivo peso seco em estufa a 105 °C (Eq. 12). A Ug foi calculada pela diferença da massa do solo úmido e seco (Eq. 13). A determinação da Ds foi realizada na sequência, conforme descrito em Grossman & Reinsch (2002), em que o solo contido no anel volumétrico foi seco em estufa à 105°C, até peso constante (Eq. 14).

$$PT = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{solo}}} = \frac{V_{\text{sat}}}{V_{\text{solo}}} \quad (10)$$

$$MaP = \frac{V_{\text{macro}}}{V_{\text{solo}}} = \frac{(\text{peso solo saturado} - \text{peso equilibrado} - 1 \text{ kPa})}{V_{\text{solo}}} \quad (11)$$

$$MiP = \frac{V_{\text{micro}}}{V_{\text{solo}}} = \frac{(\text{peso equilibrado a} - 6 \text{ kPa} - \text{peso equilibrado a } 105^{\circ}\text{C})}{V_{\text{solo}}} \quad (12)$$

$$Ug = \frac{S_{\text{úmido}} - S_{\text{seco}}}{S_{\text{seco}}} \quad (13)$$

$$\text{Densidade} = \frac{S_{\text{seco}}}{V_{\text{anel}}} \quad (14)$$

A RP foi medida em laboratório nas mesmas amostras coletadas com os anéis volumétricos, mas utilizando um penetrômetro eletrônico modelo MA-933, marca Marconi, com velocidade constante de  $0,1667 \text{ mm s}^{-1}$ , equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semiângulo de  $30^\circ$ , com receptor e interface acoplados a um microcomputador, para registro das leituras por meio de um software próprio do equipamento (Dalchiavon et al., 2011).

A determinação da estabilidade dos agregados do solo foi realizada pelo método de peneiramento úmido, segundo método de Kemper & Rosenau (1986), com modificações nas seguintes classes de diâmetro: 4,76-2,0 mm; 2,0-1,0 mm; 1,0-0,50 mm; 0,50-0,25 mm; 0,25-0,125; 0,125-0,063 mm. Os agregados provenientes da peneira de 4,76 mm foram colocados no equipamento yoder a base d'água (tamizador Yoder 'Solotest') sobre a peneira cimeira do conjunto, em 32 oscilações por minuto, durante 15 minutos. A massa do material retido em cada peneira (2; 1; 0,5; 0,25; 0,125 e 0,063 mm) foi colocada em estufa a  $105^\circ\text{C}$  até atingir peso constante e a seguir pesados. Os resultados foram expressos em: diâmetro médio geométrico (DMG) (Schaller & Stockinger, 1953), e diâmetro médio ponderado (DMP) (Castro Filho et al., 1998), de acordo com as Eq. 15 e 16:

$$DMG = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \log D_i}{\sum n_i} \times 10 \quad (15)$$

$$DMP = \frac{\sum_{i=1}^n n_i D_i}{\sum n_i} \quad (16)$$

em que:  $n_i$  é a % de agregados retidos em determinada peneira;  $D_i$  é o diâmetro médio de determinada peneira;  $N$  é o número de classes de peneiras.

### 5.2.3.2. Análises de química e fertilidade

Para realização das análises de química e fertilidade utilizou-se a fração TFSA das amostras. A acidez potencial (H+Al) foi determinada volumetricamente por meio da titulação de NaOH  $0,025 \text{ mol L}^{-1}$  em acetato de cálcio a pH 7,0 como extrator, além da adição de fenolftaleína como indicador (Teixeira et al., 2017). Da mesma forma, o alumínio trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) foi obtido utilizando-se KCl  $1 \text{ mol L}^{-1}$  como extrator e NaOH  $0,025 \text{ mol L}^{-1}$  como titulante em presença de azul de bromotimol como indicador colorimétrico (Teixeira et al., 2017). Já o pH em água foi determinado em pHmetro, utilizando-se relação 1:2,5 de solo em água.

O carbono orgânico (CO) do solo foi determinado pelo método via úmida de Walkley & Black (1934), modificado por Teixeira et al. (2017). Também foram determinadas as concentrações de fósforo (P), potássio ( $\text{K}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), todos extraídos

pelo método da resina trocadora de íons. Com base nos resultados das bases trocáveis e acidez potencial foram calculados: capacidade de troca de cátions efetiva ( $CTC_e$ ) e potencial ( $CTC_T$ ); soma de bases (SB), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m).

O ferro foi extraído através de dissolução seletiva de óxidos de ferro pedogênicos. Os teores de ferro livre ( $Fe_d$ ) foram extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Mehra & Jackson, 1958). Já os teores de ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ) foram extraídos com oxalato ácido de amônio (pH 3,0) no escuro (McKeague & Day, 1966). Após extração, os teores foram determinados por colorimetria (Teixeira et al., 2017).

### 5.2.3.3. Difratomia de raio-X e suscetibilidade magnética

A fração argila obtida pelo método da pipeta, seguida de sifonação (Teixeira et al., 2017), foi utilizada para quantificar, pelo método do pó, os teores de hematita (Hm), goethita (Gt) e maghemita (Mh) por difratometria de raio-X (DRX). Os óxidos de ferro da fração argila foram concentrados por ebulição em NaOH 5 mol L<sup>-1</sup> (Kämpf & Schwertmann, 1982), e difratados com espectrômetro Mini-Flex Rigaku II (20mA, 30 Kv, radiação CuK $\alpha$ ) a uma taxa de varredura de 1° 2 $\theta$  min<sup>-1</sup>. Os teores de Hm e Gt da fração argila foram calculadas alocando-se a diferença entre teor de ferro livre ( $Fe_d$ ) e de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ) a estes óxidos. As áreas para os picos Hm (012) e Mh (220) foram multiplicadas por um fator de 3,5. A área total foi considerada como a combinação de (110), 3,5 vezes (012) e 3,5 vezes (220) (Eqs 17 a 19).

$$Gt (\%) = \left( \frac{\text{área } Gt(110)}{\text{área total}} \right) \times 100 \quad (17)$$

$$Hm (\%) = \left( \frac{\text{área } Hm(012) \times 3,5}{\text{área total}} \right) \times 100 \quad (18)$$

$$Mh (\%) = \left( \frac{\text{área } Mh(220) \times 3,5}{\text{área total}} \right) \times 100 \quad (19)$$

A suscetibilidade magnética volumétrica ( $\kappa$ , adimensional) foi medida em aparelho Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B, utilizando 10 gramas de TFSA previamente diluída em material inerte (sacarose) para completar o volume necessário à leitura (Dearing, 1999). As leituras foram feitas em baixa (0,47 kHz;  $\kappa_{bf}$ ) e alta (4,7 kHz;  $\kappa_{af}$ ) frequência. A densidade aparente ( $\rho$ ) de cada amostra foi obtida dividindo-se massa por volume. Então, a susceptibilidade magnética específica de massa ( $\chi$ ) medida em baixa ( $\chi_{bf}$ ) e alta frequência ( $\chi_{af}$ ) foram calculadas conforme as Eq. 20 e 21, respectivamente:

$$\chi_{bf} (m^3 \cdot Kg^{-1}) = \kappa_{bf} / \rho \quad (20)$$

$$\chi_{af} (m^3 \cdot Kg^{-1}) = \kappa_{af} / \rho \quad (21)$$

A partir destas expressões obteve-se a  $\chi$  de perda percentual, denominada suscetibilidade magnética dependente de frequência percentual ( $\chi_{fd} \%$ ), conforme Eq. 22:

$$\chi_{fd} (\%) = \left( \frac{\chi_{bf} - \chi_{af}}{\chi_{bf}} \right) * 100 \quad (22)$$

#### 5.2.4. Análises estatísticas

Os dados foram avaliados primeiramente calculando-se a média, coeficiente de variação e hipótese de normalidade dos dados (teste de Kolmogorov-Smirnov à 5% e 1%). Depois, foi realizada uma análise de variância univariada (ANOVA) para verificar se existe diferença significativa entre os atributos do solo das diferentes áreas, por meio do teste de Tukey a 5 % de probabilidade. Tanto a estatística descritiva como a ANOVA foram executadas no software SPSS 25.0 (IBM Corp., 2017).

Em seguida, foi aplicada uma análise fatorial (AF) extraída por componentes principais (ACP) a fim de encontrar significância estatística que caracterizem os atributos que sofrem maior influência sobre o uso do solo, suas relações e influências com  $\chi$  e com os ambientes analisados. A adequabilidade da análise foi apurada pelo teste de Bartlett (que aceita ou rejeita as igualdades entre as matrizes correlação e identidade), KMO (que avalia as correlações simples e parciais das variáveis) e Kaiser (que incorpora somente fatores com autovalores  $> 1,0$ ), conforme descrito por Mingoti (2007). Na extração dos fatores, foram permitidas as CP em que as variáveis apresentaram comunalidades  $\geq 5$ . Após extração, o gráfico de dispersão incluído de apenas 2 CP que explicam  $\geq 70$  % da variância das variáveis foram rotacionados e os escores padronizados com média zero e a distância entre si medida pelo desvio padrão. Assim, pôde-se obter um gráfico em plano bidimensional fácil de interpretar e de discriminar os atributos do solo em cada CP. Esta análise foi executada no software Statistica 10 (StatSoft Inc., 2011).

### 5.3. RESULTADOS

#### 5.3.1. Atributos físicos e químicos dos Argissolos

Os resultados mostram que as áreas de floresta e de cultivos apresentaram textura média (Tabela 3), com variação de classe textural de franco-siltosa a franco-argilosa entre as camadas de floresta e de cupuaçu, franca a franca-argilosa em urucum e classe franca em área de guaraná. A densidade do solo (Ds) variou de 0,93 a 1,18 g cm<sup>-3</sup> para os Argissolos cultivados, com nítida diferença estatística para o cultivo de guaraná e para a subsuperfície da área de cupuaçu. Em contraste, o Argissolo sob floresta possui Ds variando de 0,89 a 1,02 g cm<sup>-3</sup> entre camadas, revelando que o ambiente natural detém a menor Ds.



**Tabela 3:** Teste de médias (Tukey;  $p < 0,05$ ) para atributos físicos, químicos e de fertilidade de Argissolos sob diferentes usos no sul do Amazonas.

Propriedades	Camada 0,00 – 0,05 m				Camada 0,05 – 0,10 m				Camada 0,10 – 0,20 m			
	Cupuaçu	Floresta	Guaraná	Urucum	Cupuaçu	Floresta	Guaraná	Urucum	Cupuaçu	Floresta	Guaraná	Urucum
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	281,80 b	250,44 b	387,80 a	391,15 a	294,73 c	227,88 d	351,31 b	374,22 a	286,73 c	235,89 d	367,88 b	373,80 a
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	513,00 a	534,89 a	400,42 c	446,72 b	399,62 b	480,42 a	415,67 b	317,03 c	454,40 c	459,38 a	434,45 b	406,15 c
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	205,20 a	214,66 a	205,27 a	172,65 b	305,64 ab	267,70 b	236,84 c	313,09 a	287,86 a	304,72 a	203,63 b	210,40 b
RP (MPa)	0,37 c	0,37 c	0,82 a	0,58 b	0,52 b	0,74 b	1,03 a	1,05 a	0,67 a	0,65 a	0,69 a	0,75 a
Ds (g cm <sup>-3</sup> )	0,93 c	0,89 c	1,10 a	0,99 b	1,18 a	0,96 c	1,12 a	1,05 b	1,14 a	1,02 b	1,12 a	1,06 b
DMG (mm)	2,62 b	2,87 a	2,82 a	2,81 a	2,58 b	2,53 b	2,65 b	2,81 a	2,34 b	2,12 b	2,06 b	2,71 a
DMP (mm)	3,11 b	3,19 a	3,17 a	3,20 a	3,03 b	2,96 b	3,09 b	3,16 a	2,85 c	2,71 b	2,68 bc	3,10 a
Macro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	16,47 a	16,15 a	8,62 b	15,16 a	13,16 b	16,99 a	8,86 c	10,16 c	13,57 b	15,85 a	11,75 bc	10,92 c
Micro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	26,19 c	36,51 b	37,97 a	33,97 b	22,97 c	35,96 ab	36,29 a	34,13 b	11,45 c	33,44 b	37,72 a	32,20 b
PT (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	40,66 b	50,53 a	46,60 a	48,08 a	34,02 c	50,83 a	45,15 b	47,22 b	45,43 a	47,88 a	47,29 a	42,71 b
UmG (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	27,99 c	40,63 a	34,59 b	35,34 b	19,39 c	37,40 a	32,26 b	32,60 b	29,83 b	32,18 ab	32,69 a	30,76 b
pH (H <sub>2</sub> O)	3,67 ab	3,61 c	3,73 b	3,83 a	3,92 a	3,71 b	3,91 a	3,93 a	3,97 a	3,91 b	3,89 a	3,91 ab
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,20 a	4,92 b	4,72 bc	4,52 c	5,00 b	5,51 ab	5,69 a	4,64 b	4,75 b	5,10 a	4,52 c	4,34 c
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	13,40 a	12,83 a	8,76 a	10,17 a	8,40 b	9,37 b	10,83 a	9,39 b	9,21 b	8,45 b	10,95 a	9,49 b
P (mg dm <sup>-3</sup> )	3,04 d	10,71 a	5,87 c	7,21 b	2,59 d	7,39 a	5,18 c	6,26 b	3,24 b	4,38 a	4,32 a	4,83 a
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,05 c	0,12 b	0,10 b	0,13 a	0,05 b	0,07 b	0,08 b	0,10 a	0,06 a	0,07 a	0,06 a	0,10 a
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,11 b	0,59 c	0,96 b	1,80 a	0,97 b	0,38 c	0,96 b	1,67 a	0,66 b	1,52 a	0,86 b	0,88 b
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,27 c	0,19 c	0,36 b	0,71 a	0,18 c	0,12 c	0,28 b	0,55 a	0,14 b	0,36 a	0,25 b	0,19 b
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,44 b	0,91 c	1,42 b	2,64 a	1,19 b	0,58 c	1,31 b	2,32 a	0,86 b	1,96 a	1,18 b	1,18 b
CTC <sub>e</sub> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	7,64 a	5,83 c	6,14 bc	7,16 ab	6,19 bc	6,09 c	7,01 b	6,97 a	5,61 b	7,06 a	5,70 c	5,52 bc
CTC <sub>T</sub> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	14,84 a	13,74 a	10,18 a	12,81 a	9,60 b	9,95 b	12,15 a	11,71 a	10,07 b	10,41 b	12,13 a	10,66 ab
V (%)	9,68 c	6,55 d	14,13 b	20,91 a	12,61 b	5,84 c	11,03 b	19,68 a	8,43 b	18,81 a	9,87 b	11,06 b
m (%)	81,28 b	85,31 a	77,38 b	62,95 c	81,12 b	90,88 a	81,05 b	67,23 c	84,93 a	72,23 c	79,56 ab	78,58 bc
CO (g kg <sup>-1</sup> )	23,83 a	20,26 b	15,61 c	15,87 b	22,66 a	12,97 c	12,92 c	17,23 b	8,52 c	12,62 a	10,84 b	7,39 c

Médias seguidas de letras iguais na mesma linha e camada não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade. RP: resistência à penetração; Ds: Densidade do solo; DMG: diâmetro médio geométrico; DMP: diâmetro médio ponderado; PT: porosidade total; UmG: umidade gravimétrica; Al<sup>3+</sup>: acidez trocável; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; CTC<sub>e</sub>: capacidade de troca catiônica efetiva; CTC<sub>T</sub>: capacidade de troca catiônica potencial; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; CO: carbono orgânico.

A resistência mecânica à penetração de raízes (RP) apresentou um aumento gradativo na seguinte ordem: cupuaçu > floresta > urucum > guaraná, as quais mostraram valores médios entre as camadas de 0,52; 0,58; 0,79 e 0,84 MPa, respectivamente (Tabela 3). Quanto aos agregados estáveis em água, a área de urucum mostrou manter os agregados mais estáveis, com significância estatística visível a partir dos 0,05 m de profundidade, onde foram obtidos valores de diâmetro médio geométrico (DMG) variando entre 2,71 a 2,81 mm, e valores de diâmetro médio ponderado (DMP) entre 3,10 a 3,16 mm. Mas de maneira geral, todos os Argissolos apresentam agregados bem estáveis, conforme os seus altos valores de carbono orgânico (CO) evidenciam (Tabela 3). O Argissolo sob floresta exibiu os maiores valores de macroporosidade (MaP) e porosidade total (PT) em relação aos cultivados, com valor médio em 0,0-0,2 m de 16,33 e 49,7 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente. Esta maior MaP e PT na floresta acarretou numa maior umidade gravimétrica (UmG) do solo, com valores variando de 32,18 a 40,63 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> entre camadas.

Quanto às características químicas, para todos os tipos de cobertura a acidez do solo está muito elevada (pH < 4,5 – Ribeiro et al. (1999)). Os Argissolos cultivados mostraram valores de pH em água variando de 3,67 a 3,97 e o Argissolo sob floresta natural de 3,61 a 3,91, entre camadas (Tabela 3). Apesar da estreita faixa entre seus valores, o teste de médias estratificado por camadas mostra claramente que a floresta detém valores estatisticamente inferiores (p≤0,05) em relação aos cultivados. Por outro lado, se constata que a acidez trocável (Al<sup>3+</sup>) também está muito alta (Al<sup>3+</sup> > 2,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> – Ribeiro et al. (1999)) para todos os tipos de uso, com valores entre 4,34 a 6,20 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> nos Argissolos cultivados e de 4,92 a 5,51 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> no Argissolo natural. Já a acidez potencial (H+Al) mostrou resultados que não diferem na superfície dos ambientes. Enquanto o ambiente natural mostrou H+Al decrescendo em profundidade (12,83-8,45 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), os Argissolos cultivados mostraram valores mais discrepantes (13,40 a 8,40 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>).

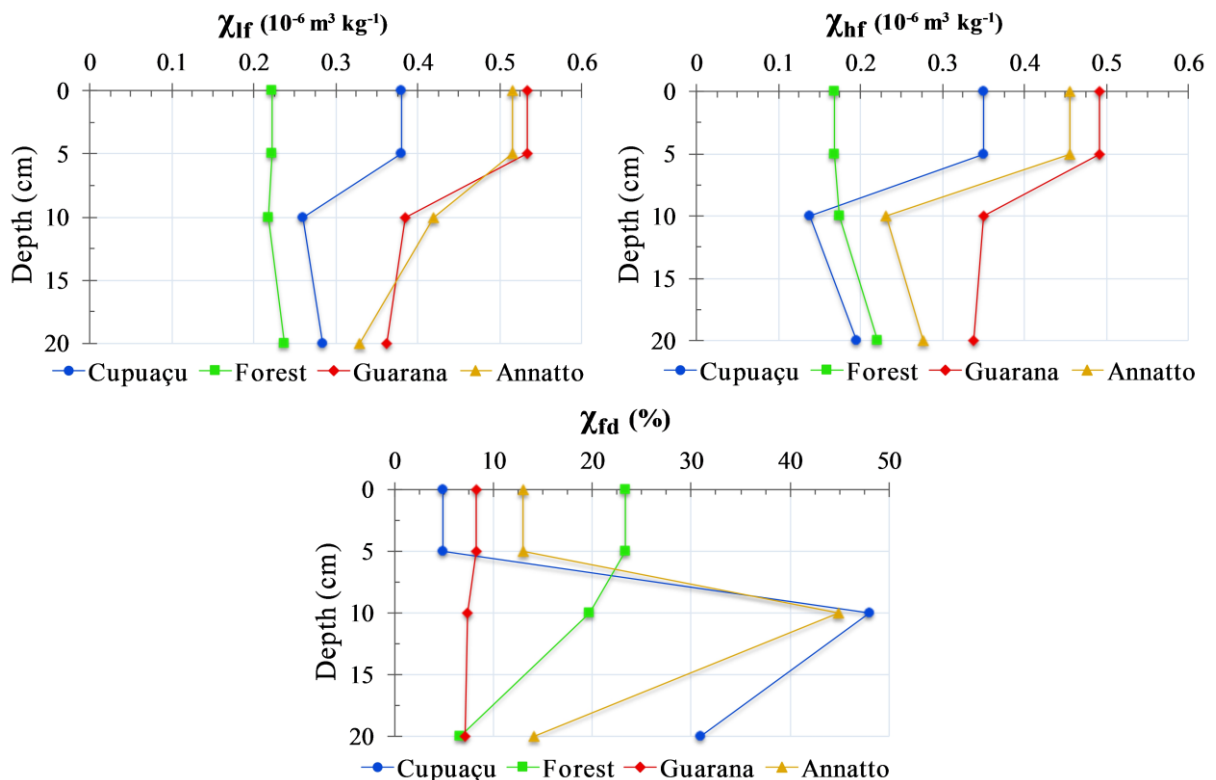
Os teores de P disponível encontrados são baixos em todos os solos, dos quais a floresta exibiu o maior teor em superfície, seguido de decaimento em profundidade (10,71 para 4,34 mg dm<sup>-3</sup>). No entanto, esses teores são estatisticamente superiores aos encontrados para os Argissolos cultivados (variação de 7,21 a 2,59 mg dm<sup>-3</sup>), o que reflete a sua baixa mobilidade e solubilidade em solos de natureza ácida. Já os teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> decaem da superfície para subsuperfície nos Argissolos cultivados, com valores superiores na área de urucum até os 0,1 m, mas não decrescem no perfil da floresta, a qual exibiu os teores mais elevados em subsuperfície. A área de urucum também possui os maiores teores de K<sup>+</sup>, mas não há uma

distinção entre os valores das áreas cultivadas para a floresta, principalmente na camada de 0,1-0,2 m onde não houve diferenças estatísticas entre nenhum ambiente.

Ambas as capacidades de troca catiônica efetiva ( $CTC_e$ ) e potencial ( $CTC_T$ ) exibiram valores dentro de uma faixa considerada como boa (4,61-8,00 para  $CTC_e$  e 8,61-15,00 para  $CTC_T$ ) (Ribeiro et al., 1999). Porém, a saturação por bases (V%) não ultrapassou um valor de 20% entre os ambientes, o que significa valores muito baixos (< 25%) pela classificação de Fageria & Gheyi (1999), e a saturação por alumínio (m%) variou de 62,95 a 84,93% nas áreas cultivadas, podendo chegar a valores extremamente altos no ambiente natural (90,88%).

### 5.3.2. Suscetibilidade magnética específica de massa ( $\chi$ ) e óxidos de ferro

A suscetibilidade magnética específica de massa ( $\chi$ ) medida em baixa frequência ( $\chi_{bf}$ ) decresceu em profundidade para os Argissolos cultivados, com valores entre 0,53 a 0,26 x 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> (Figura 7), indicando um aprimoramento do sinal magnético em superfície. Para o Argissolo natural, esse aprimoramento só foi visto para a  $\chi$  de frequência dependente ( $\chi_{fd}$ ), em que os valores decrescem a partir da superfície de 23,3 para 6,6%. Entre 0,05-0,15 m de profundidade, a  $\chi_{fd}$  também apresentou um pico anômalo de crescimento com valores alcançando até 48% para as áreas cultivadas (cupuaçu e urucum).



**Figura 7:** Variação da suscetibilidade magnética em profundidade em solos sob diferentes cultivos no sul do Amazonas.

Para analisar a representatividade dos dados amostrais obtidos de suas respectivas áreas, ambas medições de  $\chi_{bf}$ ,  $\chi_{af}$ ,  $\chi_{fd}$  e teores de ferro cristalinos ( $Fe_d$ ) e mal cristalizados ( $Fe_o$ ) foram submetidos a análises de dispersão, avaliada através do coeficiente de variação (CV%), e de análises não-paramétricas (teste de Kolmogorov-Smirnov). Um padrão de média variabilidade na distribuição dos dados de  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  foi visto para os Argissolos cultivados, em que os valores de CV variam entre 12 e 60% (Warrick & Nielsen, 1980) em todas as camadas amostradas (Tabela 4). Já o Argissolo florestado apresenta  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  com distribuição de dados de baixa a média variabilidade (CV < 60%) entre camadas. Em oposição, a  $\chi_{fd}$  revela uma maior variabilidade na distribuição dos dados amostrais para todos os Argissolos estudados, principalmente na subsuperfície, onde os valores de CV ultrapassaram 60% (exceção para área de cupuaçu). Essa maior variabilidade na distribuição dos dados de  $\chi_{fd}$  reflete a natureza estimatória da variável.

Por outro lado, os teores de  $Fe_d$  e  $Fe_o$  mostraram uma distribuição ao longo da área homogênea (CV < 12%) entre camadas dos Argissolos cultivados, e majoritariamente média no Argissolo natural. Através do teste de Kolmogorov-Smirnov, o qual julga a normalidade da distribuição dos dados obtidos em relação à uma distribuição gaussiana normal (Lopes et al., 2012), percebe-se que a maioria das medidas de  $\chi$  e dos teores de  $Fe_d$  e  $Fe_o$  estão normais ao nível de 5 e 1% de probabilidade. Algumas exceções de não-normalidades devem ser mencionadas, como ocorreu para a  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  na camada superficial das áreas cultivadas, e os teores de  $Fe_d$  e  $Fe_o$  na subsuperfície da floresta, indicando que essas variáveis exibem distribuição de dados assimétrica e valores de mediana distantes da média.

Quanto às características individuais, não foi encontrada diferença significativa nos teores de livre ( $Fe_d$ ) entre os Argissolos natural e cultivados, os quais registraram uma variação de 20,7 a 25,5 g kg<sup>-1</sup> em Argissolo sob floresta, e de 12,8 a 24,7 g kg<sup>-1</sup> nos Argissolos cultivados. Mas os teores de  $Fe_o$  difere dentre os ambientes, sendo o natural o detentor dos maiores teores tanto em superfície (0,29 g kg<sup>-1</sup>) como em subsuperfície (1,87 g kg<sup>-1</sup>). A aplicação da difratometria de raios-X para os teores dos óxidos de ferro das amostras constatou a presença dos óxidos de ferro goethita ( $\alpha$ -FeOOH) e hematita ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) na fração argila de todos os Argissolos, e uma baixa quantidade (3 g kg<sup>-1</sup>) de maghemita (Mh) pedogênica ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) para a área de urucum.

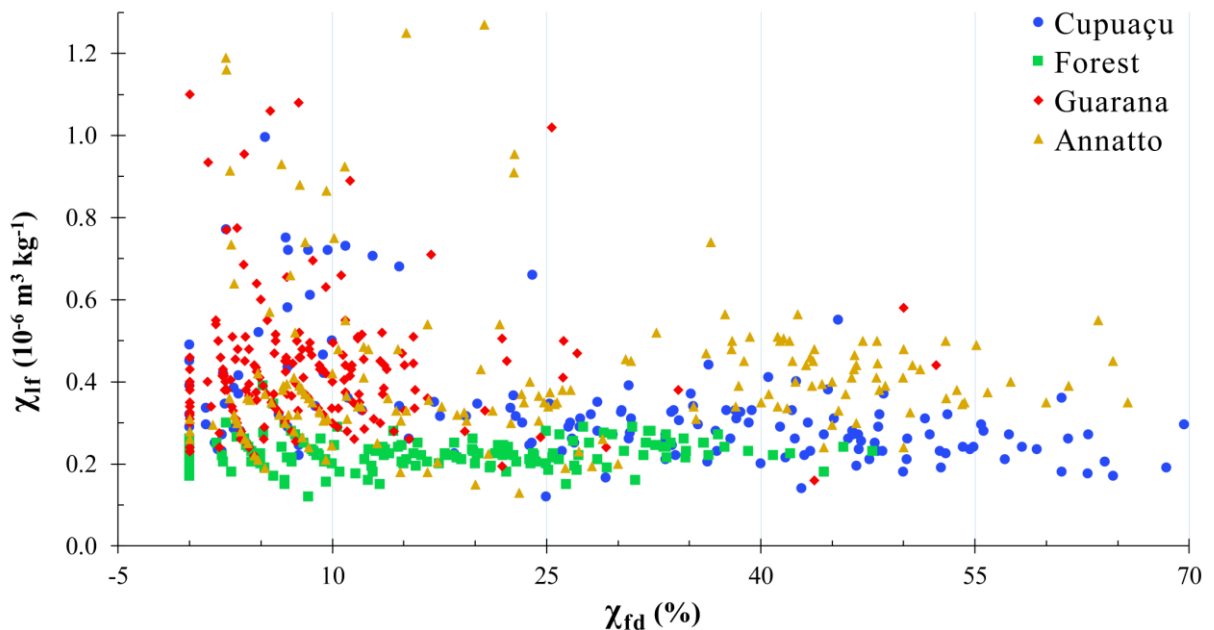
**Tabela 4:** Suscetibilidade magnética e teores de ferro pedogênicos de Argissolos sob diferentes usos em Canutama, Amazonas.

Estatística Descritiva	Cupuaçu			Floresta			Guaraná			Urucum		
	Média	<sup>1</sup> CV%	<sup>2</sup> K-S	Média	<sup>1</sup> CV%	<sup>2</sup> K-S	Média	<sup>1</sup> CV%	<sup>2</sup> K-S	Média	<sup>1</sup> CV%	<sup>2</sup> K-S
<b>0,00 – 0,05 m</b>												
<sup>3</sup> χ <sub>bf</sub> (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	0,38 <b>b</b>	43,78	0,17 <sup>ns</sup>	0,22 <b>c</b>	11,52	0,12 <sup>**</sup>	0,53 <b>a</b>	35,86	0,20 <sup>ns</sup>	0,51 <b>a</b>	55,92	0,17 <sup>ns</sup>
<sup>4</sup> χ <sub>af</sub> (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	0,35 <b>b</b>	41,32	0,19 <sup>ns</sup>	0,17 <b>c</b>	11,81	0,10 <sup>**</sup>	0,49 <b>a</b>	37,63	0,20 <sup>ns</sup>	0,45 <b>ab</b>	58,46	0,19 <sup>ns</sup>
<sup>5</sup> χ <sub>fd</sub> (%)	4,87 <b>c</b>	89,37	0,13 <sup>**</sup>	23,31 <b>a</b>	49,13	0,15 <sup>ns</sup>	8,26 <b>c</b>	53,20	0,09 <sup>**</sup>	12,98 <b>b</b>	63,13	0,14 <sup>ns</sup>
<sup>6</sup> Fe <sub>d</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	21,32 <b>a</b>	9,52	0,13 <sup>*</sup>	20,74 <b>a</b>	10,12	0,08 <sup>*</sup>	21,43 <b>a</b>	6,35	0,11 <sup>*</sup>	12,88 <b>b</b>	12,28	0,19 <sup>ns</sup>
<sup>7</sup> Fe <sub>o</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	0,13 <b>b</b>	8,38	0,15 <sup>*</sup>	0,29 <b>a</b>	15,56	0,10 <sup>*</sup>	0,13 <b>b</b>	12,58	0,15 <sup>*</sup>	0,03 <b>c</b>	21,10	0,11 <sup>*</sup>
<b>0,05 – 0,10 m</b>												
<sup>3</sup> χ <sub>bf</sub> (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	0,26 <b>c</b>	17,39	0,12 <sup>**</sup>	0,21 <b>d</b>	10,64	0,13 <sup>**</sup>	0,38 <b>b</b>	18,55	0,12 <sup>**</sup>	0,42 <b>a</b>	15,02	0,09 <sup>**</sup>
<sup>4</sup> χ <sub>af</sub> (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	0,14 <b>d</b>	28,42	0,12 <sup>**</sup>	0,17 <b>c</b>	12,28	0,14 <sup>ns</sup>	0,35 <b>a</b>	17,85	0,08 <sup>**</sup>	0,23 <b>b</b>	21,48	0,08 <sup>**</sup>
<sup>5</sup> χ <sub>fd</sub> (%)	48,02 <b>a</b>	19,28	0,09 <sup>**</sup>	19,78 <b>b</b>	34,98	0,10 <sup>**</sup>	7,37 <b>c</b>	64,23	0,08 <sup>**</sup>	44,85 <b>a</b>	18,03	0,06 <sup>**</sup>
<sup>6</sup> Fe <sub>d</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	18,41 <b>b</b>	8,72	0,16 <sup>*</sup>	23,75 <b>a</b>	12,03	0,16 <sup>*</sup>	23,26 <b>a</b>	8,57	0,17 <sup>*</sup>	17,39 <b>b</b>	8,74	0,12 <sup>*</sup>
<sup>7</sup> Fe <sub>o</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	0,08 <b>c</b>	10,72	0,28 <sup>ns</sup>	0,91 <b>a</b>	27,39	0,25 <sup>ns</sup>	0,26 <b>b</b>	6,44	0,10 <sup>*</sup>	0,03 <b>c</b>	11,97	0,08 <sup>*</sup>
<b>0,10 – 0,20 m</b>												
<sup>3</sup> χ <sub>bf</sub> (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	0,28 <b>c</b>	15,51	0,14 <sup>ns</sup>	0,23 <b>d</b>	10,27	0,12 <sup>**</sup>	0,36 <b>a</b>	17,20	0,09 <sup>**</sup>	0,33 <b>b</b>	16,00	0,12 <sup>**</sup>
<sup>4</sup> χ <sub>af</sub> (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	0,19 <b>d</b>	19,78	0,07 <sup>**</sup>	0,22 <b>c</b>	12,03	0,09 <sup>**</sup>	0,34 <b>a</b>	18,96	0,12 <sup>**</sup>	0,27 <b>b</b>	17,27	0,12 <sup>**</sup>
<sup>5</sup> χ <sub>fd</sub> (%)	31,00 <b>a</b>	22,96	0,11 <sup>**</sup>	6,60 <b>c</b>	77,15	0,11 <sup>**</sup>	7,19 <b>c</b>	81,59	0,16 <sup>ns</sup>	14,13 <b>b</b>	74,67	0,20 <sup>ns</sup>
<sup>6</sup> Fe <sub>d</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	16,00 <b>c</b>	14,75	0,09 <sup>*</sup>	25,56 <b>a</b>	18,15	0,18 <sup>ns</sup>	24,72 <b>a</b>	9,08	0,15 <sup>*</sup>	22,43 <b>b</b>	12,83	0,09 <sup>*</sup>
<sup>7</sup> Fe <sub>o</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	0,02 <b>c</b>	21,92	0,33 <sup>ns</sup>	1,87 <b>a</b>	9,41	0,23 <sup>ns</sup>	0,38 <b>b</b>	15,32	0,13 <sup>*</sup>	0,03 <b>c</b>	17,71	0,07 <sup>*</sup>
	<b>Cupuaçu</b>			<b>Floresta</b>			<b>Guaraná</b>			<b>Urucum</b>		
<sup>8</sup> Mh (g kg <sup>-1</sup> )	-			0			-			3		
<sup>9</sup> Gt (g kg <sup>-1</sup> )	22			17			33			12		
<sup>10</sup> Hm (g kg <sup>-1</sup> )	11			14			1			3		

Médias seguidas de letras iguais na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade. <sup>1</sup>CV%: coeficiente de variação; <sup>2</sup>K-S: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov; <sup>3</sup>χ<sub>bf</sub>: SM medida em baixa frequência; <sup>4</sup>χ<sub>af</sub>: SM medida em alta frequência; <sup>5</sup>χ<sub>fd</sub>: SM de frequência dependente; <sup>6</sup>Fe<sub>d</sub>: ferro extraído por ditionito-bicarbonato-citrato de sódio; <sup>7</sup>Fe<sub>o</sub>: ferro extraído por oxalato ácido de amônio; <sup>8</sup>Mh: maghemita; <sup>9</sup>Gt: goethita; <sup>10</sup>Hm: hematita; \*: significativo ao nível de 5% de probabilidade; \*\*: significativo ao nível de 1% de probabilidade; ns: não significativo.

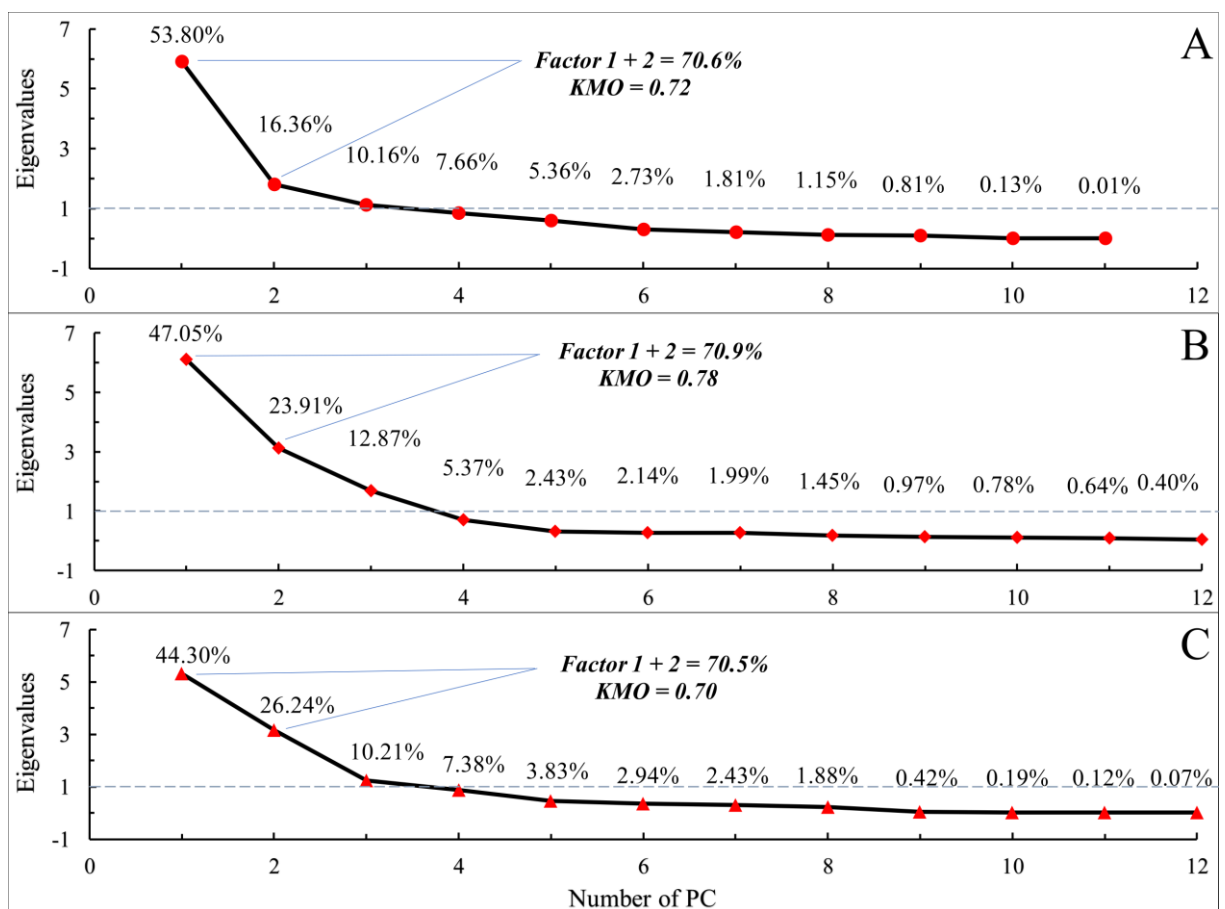
Para as medidas de  $\chi$ , o teste de médias de Tukey relevou diferenças significativas para todas as frequências entre todas as camadas dos Argissolos. Os valores médios de  $\chi_{bf}$  obtidos entre camadas para os cultivos de cupuaçu, guaraná e urucum são de 0,30; 0,42 e 0,42  $\times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , respectivamente, e de 0,22  $\times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  para a floresta. A  $\chi_{af}$  apresenta valores médios entre camadas semelhantes: 0,22; 0,39 e 0,31  $\times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  respectivamente para os cultivos de cupuaçu, guaraná e urucum, e de 0,18  $\times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  para a floresta. A maior perca percentual de  $\chi$  foi encontrada na área de cupuaçu, com valor médio de 28%, enquanto a menor foi observada para o cultivo de guaraná, com valor médio 7%.

Estes baixos valores de  $\chi_{bf}$  revelam a baixa concentração de cristais multidomínios (MD; diâmetro  $> 110\mu\text{m}$ ) e de pseudo-simples domínio (PSD;  $110\mu\text{m} < d < 0,2\mu\text{m}$ ) em todos os ambientes. O cruzamento das informações obtidas de  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{fd}$ , as quais fornecem a distinção das proporções das frações magnéticas e seus respectivos estados de domínio, é mostrado na Figura 7. Constatou-se que em uma pequena faixa da  $\chi_{bf}$  ( $0,1-0,6 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ), houve uma perca percentual de  $\chi$  variando majoritariamente entre 0-10% em cultivo de guaraná, de 10-30% em área florestada, e mais amplamente nos demais Argissolos. Portanto, considerando a classificação de Dearing (1994), misturas ultrafinas de grãos superparamagnéticos (SP;  $d < 0,02\mu\text{m}$ ) com simples domínio (SD;  $d < 0,2\mu\text{m}$ ) à MD dominam a assembleia na área de guaraná, enquanto que mais de 75% da  $\chi$  do solo da floresta provém unicamente de cristais SP. Já as áreas de cupuaçu e urucum possuem conduta magnética rara, errônea ou com anisotropias.



**Figura 8:** Gráfico de dispersão da suscetibilidade magnética de massa específica em baixa frequência versus frequência dependente para camada arável (0,0-0,2 m) de Argissolos sob diferentes usos no sul do Amazonas.

Após avaliação descritiva, as relações entre atributos e usos do solo com a propriedade da  $\chi$  também foi avaliada por estatística multivariada. Especificamente, aplicou-se uma análise fatorial (AF) e análise de clusters (AC). Na AF, se estabeleceu 2 fatores extraídos por componentes principais (CP), em que o teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) indicou que os resultados de correlação entre variáveis se adequam para todas as profundidades avaliadas, com valores de 0,72; 0,78 e 0,70 ( $p < 0,05$ ) respectivamente, para cada camada avaliada (Figura 9). Então, a construção de 2 CP sob 2 fatores reduziram o número de variáveis com autovalores  $> 1$  sem grande perda de informação.



**Figura 9:** Extração de fatores por componentes principais em atributos de Argissolos estratificados em 3 camadas [0,0-0,05 m (A); 0,05-0,1 m (B); e 0,1-0,2 m (C)], para diferentes usos no sul do Amazonas.

Esses fatores foram utilizados para a confecção do plano fatorial bidimensional que simplificam a inferência das relações e influências de com os atributos de acordo com a cobertura do solo. Assim, o plano fatorial decomposto por camada retornou que, das 29 variáveis originais, as 2 CP possibilitaram explicar 70,6% da variância em 0,0-0,05 m (Figura 9A); 70,9% da variância em 0,05-0,1 m (Figura 9B); e 70,54% da variância em 0,1-0,2 m (Figura 9C).

## 5.4. DISCUSSÕES

### 5.4.1. Caracterização física e química dos Argissolos

A textura do solo, medida como frações de tamanho de partícula, é a composição mais bem conhecida em ciência do solo por ser um atributo chave que afeta muitas propriedades e processos físicos e químicos do solo (Amirian-Chakan et al., 2019). A maior proporção da fração silte encontrada superficialmente neste estudo provavelmente está associada às contribuições geológicas oriundas de materiais do pacote terciário sobreposto aos sedimentos siltíticos da formação Solimões (Lima et al., 2006; Salimon et al., 2007).

A textura normalmente é relacionada com a Ds e crescimento radicular, pois em certas condições a Ds se torna tão elevada que aumenta a resistência do solo à penetração de raízes, causando prejuízos econômicos. Contudo, os resultados aferem condições propícias ao crescimento radicular (Tabela 3), sabendo-se que solos de textura média apresentam Ds crítica a partir  $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$  (Reichert et al., 2013), o qual está acima dos valores encontrados para todos os usos do solo. De forma similar, Reinert et al. (2008) definem que, em Argissolo Vermelho, valores de Ds são críticos somente a partir  $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ , a partir do qual há ocorrências de deformações significativas, com engrossamento das raízes e desvios no crescimento vertical das culturas.

Conforme Andrade et al. (2013), os quais trabalharam com solos do cerrado brasileiro, solos com  $RP \geq 1,9 \text{ MPa}$  estão compactados e, com  $RP \leq 1,2 \text{ MPa}$  não possuem restrição ao crescimento radicular. Especificamente para Argissolo Vermelho, a RP torna-se crítica acima de  $1,7 \text{ MPa}$  para o cultivo de leguminosas, a partir do qual haverá perda de produtividade devido a alterações no crescimento e morfologia do sistema radicular das plantas (Lima et al., 2010). Nesse contexto, percebe-se que os baixos valores de RP corroboram com os baixos valores de Ds, indicando que o solo não apresenta problemas físicos que limitem o crescimento radicular.

A superioridade dos valores de DMP em relação aos de DMG em todos os Argissolos obviamente ocorreram pelo fato do DMP se elevar conforme há aumento nas classes de agregados de maior tamanho, enquanto que o DMG apenas representa uma estimativa das classes de agregados de maior ocorrência (Hickmann et al., 2011). Apesar de o CO ser o principal agente de formação e estabilização dos agregados (Wendling et al., 2005), não houve uma relação direta entre os valores de CO que pudessem explicar a variação dos valores de DMG e DMP. De acordo com os resultados, a explicação plausível encontrada para esse fato está na relação indireta entre a porosidade dos agregados com o teor de CO.

Especificamente, foi encontrado que o maior teor de CO influi com significância estatística nos menores valores de MiP e PT da superfície até os 0,1 m de profundidade. Isso



ocorre porque o sistema de grupo de poros (poros fechados, poros de retenção de água e de ar) se relacionam positivamente com os agregados estáveis em água, conforme a proporção da matéria orgânica, e geram seus próprios ciclos biogeoquímicos localizados em poro-escala (Dexter, 1988; Menon et al., 2020). Assim, pode-se dizer que o CO regula os parâmetros de avaliação da estrutura do solo (DMG e DMP) com a sua porosidade.

Por outro lado, a MaP não parece estar associada ao CO, e seus valores estão mais uniformes entre a superfície das áreas, diferindo estatisticamente apenas para o cultivo de guaraná, que mostrou valores abaixo do estabelecido como limitante ( $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) ao crescimento radicular (Dexter, 1988) até os 0,1 m de profundidade. Os demais Argissolos possuem MaP em condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas, principalmente o natural (florestado), detentor dos maiores valores (média de  $16,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  entre camadas). Apesar da floresta exibir a maior UmG, os ambientes cultivados não mostraram baixa UmG se comparado, e.g. com a pesquisa de Mion et al. (2012) com Argissolo Amarelo de textura areia franca, os quais encontram valores de 6,43 a  $7,85 \text{ g g}^{-1}$  nos primeiros 0,3 m da superfície do solo. A predominância da fração fina (silte) nestas áreas provavelmente é a causa da menor infiltração e percolação e, conseqüentemente, maior permanência da água no perfil do solo.

Quanto aos atributos químicos, a elevada acidez vista para todos os usos do solo comprova que realmente nunca houve uma correção do solo antes ou após a implantação das culturas. No entanto, a produtividade anual obtida pelo produtor está na média regional dos pequenos produtores do estado, o que é intrigante. Normalmente essa acidez do solo é avaliada em termos das concentrações de hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) e alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ), mas quando se trata da produção agrícola, a acidez é complexa e envolve deficiências e toxicidade de nutrientes capazes de provocar a redução do crescimento das raízes e da retenção de água, e a maior suscetibilidade à compactação e à erosão hídrica (Fageria & Baligar, 2003).

Assim, os resultados indicam que, tanto para a acidez ativa como para a trocável, a alta concentração de  $\text{H}^+$  advém da predominância dos íons  $\text{Al}^{3+}$  que reagem com a água na solução do solo, e resultam na liberação de  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$  e  $\text{H}^+$  (Fageria & Baligar, 2008). Por conseguinte, o baixo pH em água (<5,5) causa a solubilização do Al, que é a fonte primária de toxidez às plantas (Bohn et al., 2001). Essas características corroboram com Schaefer et al. (2017), os quais descrevem que os Argissolos da bacia do Alto Amazonas possuem caráter alítico generalizado, numa combinação de argila de alta atividade com elevados teores de  $\text{Al}^{3+}$ , e forte acidez superficial.

Por outro lado, a acidez potencial é a acidez que representa a necessidade de calcário necessário para neutralizar a acidez (em  $\text{t ha}^{-1}$  e considerando  $d = 1 \text{ kg dm}^{-3}$  na camada arável)

e elevá-la até o pH em água selecionado (Kaminski et al., 2002). Seus altos valores sem diferenças estatísticas entre as áreas evidenciam a baixa disponibilidade de bases trocáveis para as plantas, porém, o vigor das culturas observado em campo aponta que isto não foi um fator de impedimento no seu crescimento e desenvolvimento, assim como se observou para as características de diversidade de espécies arbóreas da floresta.

Uma interpretação da fertilidade do solo (Ribeiro et al., 1999) mostra que os teores das bases trocáveis  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e P disponível estão classificados como muito baixo à médios teores, o que conseqüentemente carrega a mesma situação para a soma de bases (SB). A baixa quantidade de bases juntamente com a alta acidez ativa e trocável implica que o complexo de troca está preenchido por  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  adsorvido mesmo apesar da boa CTC<sub>T</sub> (Fageria & Baligar, 2008), ocasionando no surgimento de sintomas de deficiência nutricional nas culturas devido a indisponibilidade de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ , com conseqüente baixa produtividade.

Os efeitos do elevado acúmulo superficial de biomassa observado em campo na área de cupuaçu foram visualizados nos maiores teores de CO até os 0,1 m de profundidade, com valores decrescendo de 2,38% a 2,26%, porém, houve baixa incorporação para além desta camada. Valores similares (2,36%) foram encontrados por Lima et al. (2006) em todo horizonte A de um Argissolo Amarelo da Amazônia ocidental. Na subsuperfície (0,1-0,2 m), o Argissolo florestado mostrou o maior teor (1,26%) e o cultivado com urucum, o menor (0,74%). Segundo Müller et al. (2012), este tipo de cultivo oriundo de corte manual da vegetação nativa, seguido de queima e cultivo de culturas nos primeiros 2 anos, reduz os níveis de CO no solo. Da mesma forma, percebe-se que os cultivos avaliados possuem valores similares ao ambiente natural até 0,1 m de profundidade, evidenciando certa restauração nos teores de CO após 7 anos de cultivo (urucum apenas 3 anos). No entanto, esse tempo não foi suficiente para recompor seus teores em profundidade, revelando que a conversão de Argissolos florestados para cultivos reduz os teores de CO em subsuperfície mesmo após sucessivos anos de cultivo.

Portanto, os Argissolos estudados possuem, em geral, textura média (com exceção para a camada 0-0,05 m em floresta e cupuaçu que mostraram a fração silte > 50%) e condições físicas adequadas de estrutura, porosidade, umidade e densidade. As condições químicas são críticas, com elevada acidez ativa ( $\text{pH} < 4$ ) e trocável ( $\text{Al}^{3+} > 4,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), são dessaturados ( $V \leq 20\%$ ), com baixos teores de bases trocáveis, adequados níveis de CTC devido aos altos teores de CO (0,7-2,3%) que condicionam as cargas do solo (Siqueira Neto et al., 2009), e possuem caráter alítico ( $m \geq 62\%$ ), corroborando com literaturas da mesma região (Lima et al., 2006; Martins et al., 2006; Salimon et al., 2007; Campos et al., 2012; Schaefer et al., 2017).

#### 5.4.2. Óxidos de ferro e $\chi$ nos Argissolos natural e cultivados

A aplicação da DRX apenas aos óxidos de ferro se deve ao conhecimento que na Formação Solimões, sul do Amazonas, predomina na fração argila o mineral caulinita e oxihidróxidos de ferro (goethita e hematita) (Teixeira et al., 2010), além de caulinita também na fração areia de Argissolos com horizonte A (Campos et al., 2011). Em particular, a caulinita ( $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ) é um mineral 1:1 classificado como diamagnético que possui  $\chi_{\text{bf}}$  negativa,  $-0,019 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  e, portanto, praticamente não contribui na assinatura magnética do solo (Dearing, 1999).

Os baixos teores de Gt e Hm encontrados na fração argila, juntamente com os baixos teores de ferro livre e de baixa cristalinidade confirmam a baixa concentração de  $\text{Fe}^{3+}$  dissolvidos a partir de grãos finos dos óxidos (Mehra & Jackson, 1958). Essa característica pode estar associada à pobreza do material de origem e a maior mobilidade do Fe, sobretudo, nos ambientes cultivados. Por outro lado, o maior teor de  $\text{Fe}_o$  encontrado em floresta (média de  $1,0 \text{ g kg}^{-1}$  em toda 0,0-0,2 m), evidencia maior quantidade de oxihidróxidos mal cristalizados em relação às áreas cultivadas. No entanto, uma simples divisão entre  $\text{Fe}_o$  por  $\text{Fe}_d$  expõe uma baixa relação, com valores abaixo de 0,05 em todos os Argissolos, indicando que, apesar da presença de oxihidróxidos mal cristalizados (e.g. ferrihidrita) em maior peso na floresta, os óxidos de Fe cristalinos prevalecem em grande parte nestes solos (Kämpf & Schwertmann, 1983).

De acordo com Kämpf & Schwertmann (1983), altas temperaturas favorecem a formação de Hm, enquanto que o excesso de umidade, o elevado teor de CO e o baixo pH favorecem a Gt, corroborando com os resultados encontrados. Por isso, acredita-se que a predominância de Gt e Hm nos Argissolos estudados provém da pobreza do material de origem e do avançado estágio de intemperismo aliado as condições climáticas favoráveis – alta temperatura e umidade. Já a Mh na área de urucum, por outro lado, provavelmente é um produto da queima da floresta antes da implantação da cultura.

Durante a queima da floresta Amazônica, conforme há aumento na temperatura do solo ocorrem modificações na sua mineralogia. Alcançando  $250^\circ\text{C}$  ocorre a transformação de Gt em Hm por desidroxilação (Costa & Bigham, 2009). Chegando aos  $500^\circ\text{C}$  na presença de MO, a Hm é convertida para Mh por desidratação e, finalmente, próximos aos  $600^\circ\text{C}$  a Gt também leva a formação de Mh ultrafina, diminuindo os teores de Gt e Hm do solo (Ketterings et al., 2000; Costa & Bigham, 2009). Este raciocínio faz sentido ao notar que a mesma área com o traço de Mh possui baixo teor de Hm e o menor teor de Gt dentre os usos do solo (Tabela 4).

Como o estudo trata de amostras naturais, esses óxidos de ferro estão misturados com diferentes minerais magnéticos que diferem em origem e tamanho, os quais devem ser

desmistificados em massa para identificar suas ligações causais a processos ambientais específicos (Liu et al., 2012). Neste sentido, é seguro dizer que há aprimoramento SP, entretanto, grande parte deste aprimoramento SP encontrado na área de floresta e dos valores demasiados de  $\chi_{fd}$  nas áreas cultivadas provavelmente foram ocasionados pelo elevado teor de CO e de caulinita nestes solos (Figura 8, Tabela 4), que por serem diamagnéticos elevam a medida de  $\chi_{fd}$  a valores exorbitantes (Dearing, 1999).

Por isso, acredita-se que essa alta proporção de partículas SP também seja resultante da pedogênese de processos geoquímicos e bacterianos (Maher & Taylor, 1988), e que seu incremento resulta no aumento da  $\chi_{fd}$  como resultado do relaxamento de grãos SP, que causam um decaimento temporal da magnetização denominado viscosidade magnética (Néel, 1949). Nesse contexto, a Gt apresenta constante de anisotropia baixa para o relaxamento SP, causando constantes flutuações SP à temperatura ambiente. Apesar que não ocorrem flutuações SP à temperatura ambiente para a Hm, da mesma forma como na Gt, a indução de um campo magnético alinha momentos magnéticos atômicos em direções opostas, de modo que adquira uma fraca magnetização remanente, caracterizando-as como minerais antiferromagnéticos (Coey, 1988; Costa & Bigham, 2009). Por isso, atribui-se a dominância da  $\chi_{fd}$  nas frações SP / SD no Argissolo sob cupuaçu à avançada pedogênese – alto acúmulo de CO, baixa concentração de óxidos de Fe encontrados *in situ* e suas  $\chi_{bf}$  inerentes.

Em contraste, a Mh é um mineral ferrimagnético com ~72% de Fe em sua estrutura, que porta geralmente um comportamento de SD, podendo passar a MD através de substituição isomórfica, com forte magnetização remanente isotérmica (IRM) abaixo da temperatura Curie (600°C). Assim, a indução de um campo magnético em grãos SD de Mh alinha 2 a cada 3 momentos magnéticos de cada elétron dos átomos que compõem a cela unitária, fazendo com que sua  $\chi_{bf}$  seja centenas de vezes mais magnética que a  $\chi_{bf}$  da Gt e Hm (Thompson & Oldfield, 1986; Coey, 1988; Dearing, 1999; Costa & Bigham, 2009; Poggere et al., 2018).

Contudo, a baixa concentração de Mh *in situ* levanta suspeitas sobre sua presença não elevar os valores de  $\chi_{bf}$  em comparação aos demais Argissolos, podendo ser considerada tanto como um resquício dos processos do intemperismo ou pedogênicos. O esclarecimento da redução-oxidação da Mh nesses ambientes ajuda a perceber algumas mudanças ambientais, como a neoformação de Mh superficial no solo como grãos SP ou ligeiramente maior que SD que exibem alta  $\chi$  e IRM (Zhou et al., 1990; Liu et al., 2004). Para isso, várias teorias têm postulado os processos pedogênicos que levam ao aprimoramento do sinal ferrimagnético do solo. Para Dearing et al. (1996) a magnetita é oxidada à maghemita via liberação de Fe do material de origem por hidrólise e subsequente dissolução por bactérias Fe-redutoras. Para

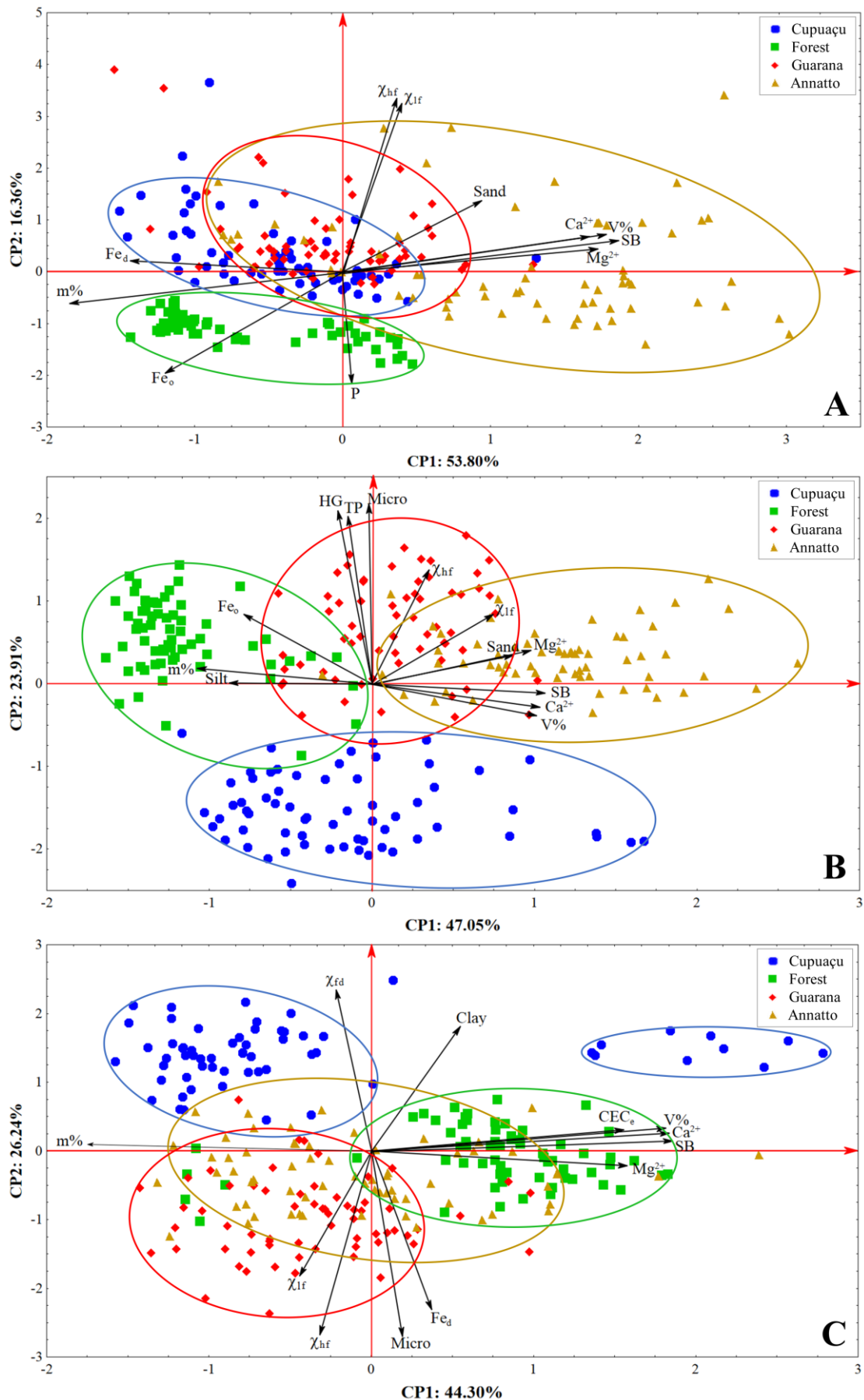
Torrent et al. (2006), o aprimoramento pedogênico de minerais ferrimagnéticos em solos tropicais também ocorre em conjunto com a formação de Hm pedogênica. Seu modelo sugere que a transformação ocorre em etapas intermediárias que produzem minerais ferrimagnéticos: ferrihidrita – Mh SP – Mh SD – Hm.

É importante considerar também que o sistema de implantação das culturas adotado pelo produtor local segue o sistema de queima, seguido de destoca e implantação da cultura. A queima durante o processo de limpeza na área de urucum pode ter provocado a combustão de compostos orgânicos superficial no solo, causando elevação da temperatura (até 800° C) e a produção de uma atmosfera redutora de poros no solo. Consequentemente, ocorreu a oxidação de compostos não-ferrimagnéticos em ferrimagnéticos pedogênicos (Scheffer et al., 1959) que possuem tamanhos menores que os ferrimagnéticos litogênicos e com maiores valores de  $\chi_{fd}$  (Fine et al., 1989; Jong et al., 2000). Segundo Dearing et al. (1996) e Dearing (1999), a queima da vegetação é um fator mais impactante do que a atividade de bactérias Fe-redutoras para o magnetismo do solo, ao ser capaz de produzir partículas SP em massa e mais alguma evidência de SSD.

Seguindo esse raciocínio, sugere-se que a Mh encontrada na área de urucum seja um resíduo relacionado fortemente à queima da vegetação nativa para limpeza da área antes da implantação da cultura, e que possíveis traços pedogênicos de Mh foram completamente oxidados à Hm na área de cupuaçu. Então, o conjunto aprimoramento SP + presença de diamagnéticos (CO e provável caulinita) elevaram altamente os valores de  $\chi_{fd}$ , conforme mostra-se os resultados. A queima da vegetação também tem implicação direta na elevação temporária do pH e da disponibilidade de nutrientes, e no aprimoramento permanente de  $\chi_{fd}$ , principalmente a partir da incorporação de cinzas de plantas C4, as quais são capazes de elevar a  $\chi_{bf}$  em  $5,32 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  (Lu et al., 2000). A MO residual também pode ter contribuído no aprimoramento através de sua mobilização, que estimula o metabolismo microbiano de Fe, levando ao incremento do sinal magnético (Porsch et al., 2014).

#### **5.4.3. Relações e influências de $\chi$ com atributos e tipos de uso do solo**

A aplicação da AF para os atributos analisados expôs as características discriminativas de cada tipo de cobertura em relação a  $\chi$  e aos demais atributos do solo. Assim, através do plano fatorial composto de 2 CP por camada se observou que, do percentual de cada CP, em 0,0-0,05 m (Figura 10A), a CP1 explica que 53,8% da variância comportamental dos atributos do solo se deve ao teor de areia,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , SB, V%, m%,  $\text{Fe}_d$  e  $\text{Fe}_o$ , enquanto que a CP2 indica que mais 16,36% dessa variação se deve às influências  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$ , e do teor de P.



**Figura 10:** Plano fatorial e componentes principais discriminativas entre ambientes e atributos estratificados em 3 camadas [0,0-0,05 m (A); 0,05-0,1 m (B); e 0,1-0,2 m (C)] de Argissolos sob diferentes usos no sul do Amazonas.

Por outro lado, a CP1 em 0,05-0,01 m (Figura 10B) é explicada (47,05%) pelas variáveis areia, silte,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , SB, V%, m%,  $\text{Fe}_o$  e  $\chi_{bf}$ , enquanto que a CP2 tem maior influência nessa profundidade, indicando que 23,91% da variância é devido a maior microporosidade, porosidade total, umidade gravimétrica e a  $\chi_{af}$ . Em contraste, a CP1 em 0,1-0,2 m (Figura 10C) mostra que 44,30% da situação atual desses ambientes decorre das influências dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , SB,  $\text{CTC}_e$ , V% e m%. Já a CP2 diz que mais 26,24% da variância faltante é atribuída pela presença de argila, microporosidade,  $\text{Fe}_d$ ,  $\chi_{bf}$ ,  $\chi_{af}$  e  $\chi_{fd}$ .

Em 0,0-0,05 m (Figura 10A), a  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  foram as variáveis mais distantes do ponto de origem, significando que representam melhor os ambientes aos quais estão correlacionados do que qualquer outro atributo. Percebe-se que a  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  estão fortemente relacionados aos atributos  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , areia e SB, os quais estão associados em maior peso para o cultivo de urucum, seguido de guaraná. No entanto, apresentam correlação negativa (quadrantes opostos) com a floresta, a qual sofre mais influência dos altos teores de P,  $\text{Fe}_o$  e m%.

Em contraste, constata-se grupos mais bem distintos em 0,05-0,1 m (Figura 10B), em que  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  influenciam mais intensamente os ambientes de urucum e guaraná. No entanto, o que melhor definem essas áreas são seus altos valores de UmG, microporosidade e PT. Novamente,  $\text{Fe}_o$  e m%, além de silte, mostram correlação negativa com  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$ , representando melhor a condição da floresta. Já a área de cupuaçu apresentou comportamento indiferente em relação aos demais Argissolos, podendo-se dizer que a característica mais marcante dessa área são os altos valores de  $\text{Ca}^{2+}$ , SB, V% e  $\chi_{fd}\%$  (Tabela 4). Assim, a melhor condição física e química parece ser obtida nos locais onde há maiores valores de  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$ .

Por outro lado, houve um ligeiro incremento nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{CTC}_e$  e, conseqüentemente, na SB dentro da área de floresta (Figura 10C), o que provocou a divergência do m% encontrado superficialmente. Entretanto, também há um ponto de convergência entre floresta, urucum e guaraná causado pela influência dos altos teores de  $\text{Fe}_d$  e microporosidade. Um destaque marcante visto nessa camada foi a subdivisão amostral da área de cupuaçu em 2 grupos desiguais, definidos pelos elevados teores de  $\chi_{fd}$  e associados, em parte, pelo alto teor de argila em comum. Assim como visto em todo 0-0,1 m, a  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  representam melhor as áreas de guaraná e urucum, as quais possuem correlação negativa com a  $\chi_{fd}$  de cupuaçu. Porém, a área de urucum possui um comportamento intermediário entre todos os Argissolos, sendo influenciado tanto pelos altos valores de  $\chi_{bf}$ ,  $\chi_{af}$ ,  $\chi_{fd}$  e m%, como pelas melhorias nas condições químicas encontradas na floresta.

## 5.5. CONCLUSÕES

Todos os Argissolos avaliados possuem propícias condições físicas de estrutura, porosidade, umidade e densidade do solo ao crescimento das plantas e, apesar dos severos teores de acidez ativa e trocável e baixa saturação por bases, o desenvolvimento das culturas não foram afetados em virtude dos altos níveis de matéria orgânica. No entanto, a conversão da floresta para cultivos agrícolas causou o aumento da densidade do solo e da amplitude dos valores de pH e  $Al^{3+}$ , e a redução da macroporosidade, da umidade gravimétrica, dos teores de fósforo e de ferro oxalato, e da incorporação de carbono orgânico em profundidade.

Todos os Argissolos estudados mostram baixa  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$ , e alta  $\chi_{fd}$ . Contudo, os resultados sugerem que >75% da origem do sinal magnético no Argissolo natural provém de cristais superparamagnéticos de óxidos de hematita e goethita. O Argissolo sob floresta e o cultivado com guaraná mostraram um mesclado de superparamagnéticos, de simples e multidomínios. Já as áreas cultivadas com cupuaçu e urucum têm uma fonte de comportamento magnético anômalo com altos valores de  $\chi_{fd}$  de difícil identificação devido a interferentes nas amostras (alto teor de carbono orgânico e provável caulinita). Portanto, sugerimos que a origem da alta  $\chi_{fd}$  desses ambientes sejam decorrentes dos processos pedogênicos (queimada), intemperismo intenso, clima favorável e alta presença de diamagnéticos.

A  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  em 0,0-0,05 m e  $\chi_{af}$  e  $\chi_{fd}\%$  em 0,1-0,2 m são altamente representativos nos ambientes de Argissolos cultivados, mostrando forte relação principalmente com atributos como areia, argila e bases trocáveis, caracterizando-se como uma *proxy* adequada ao monitoramento da fertilidade dos solos do sul do Amazonas.

## 5.6. REFERÊNCIAS

- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M. & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22(6):711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Amirian-Chakan, A.; Minasny, B.; Taghizadeh-Mehrjardi, R.; Akbarifazli, R.; Darvishpasand, Z. & Khordehbin, S. (2019). Some practical aspects of predicting texture data in digital soil mapping. **Soil and Tillage Research** 194:104289. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.06.006>
- Andrade, R. D. S.; Stone, L. F. & Godoy, S. G. D. (2013). Estimativa da resistência do solo à penetração baseada no índice S e no estresse efetivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 17(9):932-937. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662013000900004>
- Araújo, E. A. D.; Ker, J. C.; Mendonça, E. D. S.; Silva, I. R. D. & Oliveira, E. K. (2011). Impacto da conversão floresta-pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e



- substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta Amazônica** 41(1):103-114. <https://doi.org/10.1590/s0044-59672011000100012>
- Bohn, H.; McNeal, B. L. & O'Connor, G. A. (2001). **Soil Chemistry**. 3rd edition. John Wiley & Sons, New York.
- Bouhsane, N. & Bouhlassa, S. (2018). Assessing magnetic susceptibility profiles of Topsoils under different occupations. **International Journal of Geophysics** 2018:1-8. <https://doi.org/10.1155/2018/9481405>
- Byrne, J. M.; Van Der Laan, G.; Figueroa, A. I.; Qafoku, O.; Wang, C.; Pearce, C. I.; ... & Kappler, A. (2016). Size dependent microbial oxidation and reduction of magnetite nano- and micro-particles. **Scientific Reports** 6(1):1-13. <https://doi.org/10.1038/srep30969>
- Campos, M. C. C.; Ribeiro, M. R.; Souza Júnior, V. S. D.; Ribeiro Filho, M. R. & Almeida, M. C. (2012). Topossequência de solos na transição Campos Naturais-Floresta na região de Humaitá, Amazonas. **Acta Amazonica** 42(3):387-398. <https://doi.org/10.1590/s0044-59672012000300011>
- Campos, M. C. C.; Ribeiro, M. R.; Souza Júnior, V. S.; Ribeiro Filho, M. R.; Souza, R. V. C. C. & Almeida, M. D. C. (2011). Características mineralógicas de Latossolos e Argissolos na região sul do Amazonas. **Revista Acadêmica Ciência Animal** 9(1):11-18. <https://doi.org/10.7213/cienciaanimal.v9i1.11048>
- Castro Filho, C.; Muzilli, O. & Podanoschi, A. L. (1998). Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 22(3):527-538. <https://doi.org/10.1590/s0100-06831998000300019>
- Cervi, E. C.; Costa, A. C. S. & Souza Junior, I. G. (2014). Magnetic susceptibility and the spatial variability of heavy metals in soils developed on basalt. **Journal of Applied Geophysics** 111:377-383. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.10.024>
- Coe, J. M. D. (1988). Magnetic properties of iron in soil iron oxides and clay minerals. In: **Iron in soils and clay minerals**. Springer, Dordrecht. p.397-466. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-4007-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-94-009-4007-9_14)
- Costa, A. C. S. & Bigam, J. M. (2009). Óxidos de ferro. In: Mello, V. F. & Alleoni, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo, Parte 1 – Conceitos Básicos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.695-572.
- Cram, S.; Sommer, I.; Fernández, P.; Galicia, L.; Ríos, C. & Barois, I. (2015). Soil natural capital modification through land use and cover change in a tropical forest landscape: implications for management. **Journal of Tropical Forest Science** 27(2):189-201.
- Dalchiavon, F. C.; Carvalho, M. P.; Nogueira, D. C.; Romano, D.; Abrantes, F. L.; Assis, J. T. & Oliveira, M. S. (2011). Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 41:8-19. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i1.8351>
- Dearing, J. A. (1994). **Environmental magnetic susceptibility: using the Bartington MS2 system**. Kenilworth, Chi Pub. 104p.
- Dearing, J. A. (1999). **Environmental magnetic susceptibility using the Bartington MS2 system**. 2nd edition. Kenilworth: Chi Publishing, 54p.
- Dearing, J. A.; Hay, K. L.; Baban, S. M.; Huddleston, A. S.; Wellington, E. M. & Loveland, P. (1996). Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a

- national data set. **Geophysical Journal International** 127(3):728-734. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1996.tb04051.x>
- Dexter, A. R. (1988). Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research** 11(3-4):199-238. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90002-5)
- Fageria, N. K. & Baligar, V. C. (2003). Fertility management of tropical acid soils for sustainable crop production. **Handbook of soil acidity** p.359-385. <https://doi.org/10.1201/9780203912317.ch13>
- Fageria, N. K. & Gheyi, H. R. (1999). **Efficient Crop Production**. Campina Grande: UFPB.
- Fageria, N. K. & Baligar, V. C. (2008). Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. **Advances in agronomy** 99:345-399. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(08)00407-0)
- Fassbinder, J. W. E.; Stanjekt, H. & Vali, H. (1990). Occurrence of magnetic bacteria in soil. **Nature** 343(6254):161-163. <https://doi.org/10.1038/343161a0>
- Ferreira, S. J. F.; Luizão, F. J.; Miranda, S. A. F.; Silva, M. S. R. & Vital, A. R. T. (2006). Nutrientes na solução do solo em floresta de terra firme na Amazônia central submetida à extração seletiva de madeira. **Acta Amazonica** 36(1):59-68. <https://doi.org/10.1590/s0044-59672006000100008>
- Fine, P.; Singer, M. J.; La Ven, R.; Verosub, K. & Southard, R. J. (1989). Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two California chronosequences. **Geoderma** 44(4):287-306. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(89\)90037-2](https://doi.org/10.1016/0016-7061(89)90037-2)
- Fujisaki, K.; Perrin, A. S.; Desjardins, T.; Bernoux, M.; Balbino, L. C. & Brossard, M. (2015). From forest to cropland and pasture systems: a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. **Global Change Biology** 21(7):2773-2786. <https://doi.org/10.1111/gcb.12906>
- Grimaldi, M.; Oszwald, J.; Dolédec, S.; del Pilar Hurtado, M.; Souza Miranda, I.; De Sartre, X. A.; ... & Guevara, E. (2014). Ecosystem services of regulation and support in Amazonian pioneer fronts: searching for landscape drivers. **Landscape Ecology** 29(2):311-328. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9981-y>
- Grimley, D. A. (1996). **Stratigraphy, magnetic susceptibility, and mineralogy of loess – paleosol sequences in southwestern Illinois and eastern Missouri**. PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign. Champaign, Illinois.
- Grimley, D. A.; Anders, A. M.; Bettis, E. A.; Bates, B. L.; Wang, J. J.; Butler, S. K. & Huot, S. (2017). Using magnetic fly ash to identify post-settlement alluvium and its record of atmospheric pollution, central USA. **Anthropocene** 17:84-98. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.02.001>
- Grimley, D. A.; Arruda, N. K. & Bramstedt, M. W. (2004). Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the Midwestern USA. **Catena** 58(2):183-213. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2004.03.001>
- Grossman, R. B. & Reinsch, T. G. (2002). Bulk density and linear extensibility. In: Dane, J. H. & Topp, C. (eds) **Methods of soil analysis: Physical methods**. Madison, Soil Science of Society of America p.201-228. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c9>
- Hanesch, M.; Rantitsch, G.; Hemetsberger, S. & Scholger, R. (2007). Lithological and pedological influences on the magnetic susceptibility of soil: Their consideration in magnetic pollution mapping. **Science of the Total Environment** 382(2-3):351-363. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.04.007>

- Hannam, J. A.; Van Dam, R. L. & Harmon, R. S. (2009). Soil magnetism research: State of the art and future directions. In: **Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems** p.520-526. <https://doi.org/10.4133/1.3176737>
- Hartemink, A. E.; Veldkamp, T. & Bai, Z. (2008). Land cover change and soil fertility decline in tropical regions. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry** 32(3):195-213.
- Hickmann, C.; Costa, L. M. D.; Schaefer, C. E. G. & Fernandes, R. B. A. (2011). Morfologia e estabilidade de agregados superficiais de um Argissolo Vermelho-amarelo sob diferentes manejos de longa duração e mata atlântica secundária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35(6):2191-2198. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832011000600034>
- Hoffman, V.; Knab, M. & Appel, E. (1999). Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution. **Journal of Geochemical Exploration** 66(1-2):313-326. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(99\)00014-x](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(99)00014-x)
- IBM Corp. Released. (2017). **IBM SPSS Statistics for Windows**, Version 25.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2014). <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15819-amazonia-legal.html>. Accessed 24 February 2020.
- Jong, E. D.; Kozak, L. M. & Rostad, H. P. W. (2000). Effects of parent material and climate on the magnetic susceptibility of Saskatchewan soils. **Canadian Journal of Soil Science** 80(1):135-142. <https://doi.org/10.4141/s99-051>
- Kaminski, J.; Gatiboni, L. C.; Rheinheimer, D. S.; Martins, J. R.; Santos, E. J. S. & Tissot, C. A. (2002). Estimativa da acidez potencial em solos e sua implicação no cálculo da necessidade de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 26(4):1107-1113. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832002000400029>
- Kämpf, N. & Schwertmann, U. (1982). The 5-M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. **Clays and clay Minerals** 30(6):401-408. <https://doi.org/10.1346/ccmn.1982.0300601>
- Kämpf, N. & Schwertmann, U. (1983). Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils. **Geoderma** 29(1):27-39. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(83\)90028-9](https://doi.org/10.1016/0016-7061(83)90028-9)
- Kemper, W. D. & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. In: **KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis**. 2nd edition. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America p.425-441.
- Ketterings, Q. M.; Bigham, J. M. & Laperche, V. (2000). Changes in soil mineralogy and texture caused by slash-and-burn fires in Sumatra, Indonesia. **Soil Science Society of America Journal** 64(3):1108-1117. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431108x>
- Le Borgne, E. (1955). Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. In: **Annales de géophysique** 11:399-419.
- Lima, C. L. R. D.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M. & Suzuki, L. E. A. S. (2010). Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 45(1):89-98. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2010000100012>
- Lima, H. N.; Mello, J. W. V. D.; Schaefer, C. E. G.; Ker, J. C. & Lima, A. M. N. (2006). Mineralogia e química de três solos de uma toposequência da bacia sedimentar do Alto

- Solimões, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 30(1):59-68. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832006000100007>
- Liu, Q.; Roberts, A. P.; Larrasoana, J. C.; Banerjee, S. K.; Guyodo, Y.; Tauxe, L. & Oldfield, F. (2012). Environmental magnetism: Principles and applications. **Reviews of Geophysics** 50(4). <https://doi.org/10.1029/2012rg000393>
- Liu, Q.; Torrent, J.; Yu, Y. & Deng, C. (2004). Mechanism of the parasitic remanence of aluminous goethite [ $\alpha$ -(Fe,Al)OOH]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth** 109(B12). <https://doi.org/10.1029/2004jb003352>
- Lohbeck, M.; Poorter, L.; Martínez-Ramos, M. & Bongers, F. (2015). Biomass is the main driver of changes in ecosystem process rates during tropical forest succession. **Ecology** 96(5):1242-1252. <https://doi.org/10.1890/14-0472.1>
- Lopes, M. M.; Branco, V. T. F. C. & Soares, J. B. (2013). Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. **Transportes** 21(1):59-66. <https://doi.org/10.4237/transportes.v21i1.566>
- Lu, H.; Liu, T.; Gu, Z.; Liu, B.; Zhou, L.; Han, J. & Wu, N. (2000). Effect of burning C3 and C4 plants on the magnetic susceptibility signal in soils. **Geophysical Research Letters** 27(13):2013-2016. <https://doi.org/10.1029/2000gl011459>
- Magiera, T.; Strzyszcz, Z.; Kapička, A.; Petrovský, E. & MAGPROX TEAM (2006). Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. **Geoderma** 130(3-4):299-311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.02.002>
- Maher, B. A. & Taylor, R. M. (1988). Formation of ultrafine-grained magnetite in soils. **Nature** 336(6197):368-370. <https://doi.org/10.1038/336368a0>
- Martin, A. P.; Ohneiser, C.; Turnbull, R. E.; Strong, D. T. & Demler, S. (2018). Soil magnetic susceptibility mapping as a pollution and provenance tool: an example from southern New Zealand. **Geophysical Journal International** 212(2):1225-1236. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx484>
- Martins, G. C.; Ferreira, M. M.; Curi, N.; Vitorino, A. C. T. & Silva, M. L. N. (2006). Campos nativos e matas adjacentes da região de Humaitá (AM): atributos diferenciais dos solos. **Ciência e Agrotecnologia** 30(2):221-227. <https://doi.org/10.1590/s1413-70542006000200005>
- Mathé, V. & Lévêque, F. (2003). High resolution magnetic survey for soil monitoring: detection of drainage and soil tillage effects. **Earth and Planetary Science Letters** 212(1-2):241-251. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00241-3](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00241-3)
- McKeague, J. & Day, J. (1966). Dithionite-and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal of Soil Science** 46(1):13-22. <https://doi.org/10.4141/cjss66-003>
- Mehra, O. P. & Jackson, M. L. (1958). Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals** 7(1):317-327. <https://doi.org/10.1346/ccmn.1958.0070122>
- Menon, M.; Mawodza, T.; Rabbani, A.; Blaud, A.; Lair, G. J.; Babaei, M.; ... & Banwart, S. (2020). Pore system characteristics of soil aggregates and their relevance to aggregate stability. **Geoderma** 366:114259. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114259>
- Minasny, B. & Hartemink, A. E. (2011). Predicting soil properties in the tropics. **Earth-Science Reviews** 106(1-2):52-62. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.005>

- Mingoti, S. A. (2007). **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada**. Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 295p.
- Mion, R. L.; Nascimento, E. M. S.; Lima Sales, F. A.; Silva, S. F.; Duarte, J. M. L. & Sousa, B. M. (2012). Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo Amarelo. **Semina: Ciências Agrárias** 33(6):2057-2066. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n6p2057>
- Müller, C. B.; Weber, O. L. D. S. & Scaramuzza, J. F. (2012). Oxidizable fraction of organic carbon in an Argisol under different land use systems. **Cerne** 18(2):215-222. <https://doi.org/10.1590/s0104-77602012000200005>
- Mullins, C. E. (1977). Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science – A review. **Journal of Soil Science** 28(2):223-246. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1977.tb02232.x>
- Nascimento, C. W. A.; Lima, L. H. V.; Silva, F. L.; Biondi, C. M. & Campos, M. C. C. (2018). Natural concentrations and reference values of heavy metals in sedimentary soils in the Brazilian Amazon. **Environmental Monitoring and Assessment** 190(10):606. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6989-4>
- Néel, L. (1949). Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites. **Annals of Geophysics** 5:99-136.
- Oliveira, I. A. D.; Marques Junior, J.; Campos, M. C. C.; Aquino, R. E. D.; Freitas, L. D.; Siqueira, D. S. & Cunha, J. M. D. (2015). Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39(3):668-681. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20140496>
- Poggere, G. C.; Inda, A. V.; Barrón, V.; Kämpf, N.; Brito, A. D. B.; Barbosa, J. Z. & Curi, N. (2018). Maghemite quantification and magnetic signature of Brazilian soils with contrasting parent materials. **Applied Clay Science** 161:385-394. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.05.014>
- Porsch, K.; Rijal, M. L.; Borch, T.; Troyer, L. D.; Behrens, S.; Wehland, F.; ... & Kappler, A. (2014). Impact of organic carbon and iron bioavailability on the magnetic susceptibility of soils. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 128:44-57. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.12.001>
- Rahimi, M. R.; Ayoubi, S. & Abdi, M. R. (2013). Magnetic susceptibility and Cs-137 inventory variability as influenced by land use change and slope positions in a hilly, semiarid region of west-central Iran. **Journal of Applied Geophysics** 89:68-75. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.11.009>
- Reichert, J. M.; Reinert, D. J. & Braida, J. A. (2003). Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente** 27:29-48.
- Reinert, D. J.; Albuquerque, J. A.; Reichert, J. M.; Aita, C. & Andrada, M. M. C. (2008). Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32(5):1805-1816. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832008000500002>
- Reis, N. J.; Almeida, M. E.; Riker, S. L. & Ferreira, A. L. (2006). **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas**. 1ª edição, Manaus: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 125p.

- Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G. & Alvarez, V. H. (1999). Comissão de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG, Brasil.
- Rodrigues, J. L.; Pellizari, V. H.; Mueller, R.; Baek, K.; Jesus, E. D. C.; Paula, F. S.; ... & Tiedje, J. M. (2013). Conversion of the Amazon rainforest to agriculture results in biotic homogenization of soil bacterial communities. **Proceedings of the National Academy of Sciences** 110(3):988-993. <https://doi.org/10.1073/pnas.1220608110>
- Salimon, C. I.; Wadt, P. G. S. & Melo, A. W. F. (2007). Dinâmica do carbono na conversão de floresta para pastagens em Argissolos da formação geológica Solimões, no sudoeste da Amazônia. **Revista de Biologia e Ciências da Terra** 7(1):29-38.
- Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A.; Lumbrreras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A. ... & Cunha, T. J. F. (2018). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª edição, rev. e ampl. – Brasília: Embrapa, 365p.
- Sapkota, B. & Cioppa, M. T. (2012). Using magnetic and chemical measurements to detect atmospherically-derived metal pollution in artificial soils and metal uptake in plants. **Environmental Pollution** 170:131-144. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.06.010>
- Schaefer, C. E. G. R.; Lima, H. N.; Teixeira, W. G.; Vale Jr, J. R.; Souza, K. W.; Corrêa, G. R.; Mendonça, B. A. F.; ... & Ruivo, M. L. P. (2017). Solos da Região Amazônica. In: Curi N.; Ker, J. C.; Novais, R. F.; Vidal-Torrado, P.; Schaefer, C. E. G. R. (eds) **Pedologia - Solos dos Biomas Brasileiros**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.75-111.
- Schaller, F. W. & Stockinger, K. R. (1953). A comparison of five methods for expressing aggregation data1. **Soil Science Society of America Journal** 17(4):310-313. <https://doi.org/10.2136/sssaj1953.03615995001700040002x>
- Scheffer, F.; Meyer, B. & Babel, U. (1959). Magnetic measurements as aids in the determination of iron oxide in the soil. **Beiträge zur Mineralogie und Petrographie** 6:371-387.
- Singer, A.; Schwertmann, U. & Friedl, J. (1998). Iron oxide mineralogy of Terre Rosse and Rendzinas in relation to their moisture and temperature regimes. **European Journal of Soil Science** 49(3):385-395. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.4930385.x>
- Singer, M. J.; Verosub, K. L.; Fine, P. & TenPas, J. (1996). A conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils. **Quaternary international** 34-36:243-248. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(95\)00089-5](https://doi.org/10.1016/1040-6182(95)00089-5)
- Siqueira Neto, M.; Piccolo, M. D. C.; Scopel, E.; Costa Junior, C. D.; Cerri, C. C. & Bernoux, M. (2009). Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. **Acta Scientiarum. Agronomy** 31(4):709-717. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v31i4.792>
- Souza Braz, A. M.; Fernandes, A. R. & Alleoni, L. R. F. (2013). Soil attributes after the conversion from forest to pasture in Amazon. **Land Degradation & Development** 24(1):33-38. <https://doi.org/10.1002/ldr.1100>
- Souza, F. G.; Campos, M. C. C.; Brito Filho, E. G.; Cunha, J. M.; Lima, A. F. L.; Sales, M. C. G. & Santos, L. A. C. (2019). Physical attributes of soil under amazon forest conversion for different crop systems in southern Amazonas, Brazil. **Canadian Journal of Soil Science** 99(4):563-574. <https://doi.org/10.1139/cjss-2019-0070>
- Souza, F. G. D.; Campos, M. C. C.; Pinheiro, E. N.; Lima, A. F. L. D.; Brito Filho, E. G.; Cunha, J. M. D.; ... & Brito, W. B. M. (2020). Aggregate stability and carbon stocks in

- forest conversion to different cropping systems in Southern Amazonas, Brazil. **Carbon Management** 11(1):81-96. <https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1694355>
- StatSoft, Inc. (2011). **STATISTICA (data analysis software system)**, version 10. Available at: [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com)
- Teixeira, P. C.; Donagema, G. K.; Ademir, F. & Teixeira, W. G. (2017). **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª edição, rev. e ampl. – Brasília: Embrapa, 573p.
- Teixeira, W. G.; Arruda, W.; Shinzato, E.; Macedo, R. S.; Martins, G. C.; Lima, H. N. & Rodrigues, T. E. (2010). Solos. In: Maia, M. A. M. & Marmos, J. L. (eds.). **Geodiversidade do estado do Amazonas**. Manaus: CPRM, 275p.
- Thompson, R. & Morton, D. J. (1979). Magnetic susceptibility and particle-size distribution in recent sediments of the Loch Lomond Drainage Basin, Scotland. **Journal of Sedimentary Petrology** 49(3):801-812. <https://doi.org/10.1306/212f7851-2b24-11d7-8648000102c1865d>
- Thompson, R. & Oldfield, F. (1986). **Environmental magnetism**.
- Torrent, J.; Barrón, V. & Liu, Q. (2006). Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation in aerobic soil. **Geophysical Research Letters** 33(2). <https://doi.org/10.1029/2005gl024818>
- van Straaten, O.; Corre, M. D.; Wolf, K.; Tchienkoua, M.; Cuellar, E.; Matthews, R. B. & Veldkamp, E. (2015). Conversion of lowland tropical forests to tree cash crop plantations loses up to one-half of stored soil organic carbon. **Proceedings of the National Academy of Sciences** 112(32):9956-9960. <https://doi.org/10.1073/pnas.1504628112>
- Walkley, A. & Black, I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science** 37(1):29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Warrick, A. W. & Nielsen, D. R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (ed) **Applications of soil physics**. New York, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-348580-9.50018-3>
- Wendling, B.; Jucksch, I.; Mendonça, E. S. & Neves, J. L. N. (2005). Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 40(5):487-494. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2005000500010>
- WRB (World reference base for soil resources). (2014, update 2015). International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports N°. 106. FAO, Rome, Italia.
- Zhou, L. P.; Oldfield, F.; Wintle, A. G.; Robinson, S. G. & Wang, J. T. (1990). Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess. **Nature** 346(6286):737-739. <https://doi.org/10.1038/346737a0>
- Zimmermann, B.; Elsenbeer, H. & Moraes, J. M. (2006). The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: implications for runoff generation. **Forest ecology and management** 222(1-3):29-38. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.070>

## 6. CAPÍTULO 2 – PADRÕES ESPACIAIS DA SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DE ARGISSOLOS CULTIVADOS E SOB FLORESTA OTIMIZADOS POR CORREÇÃO ANISOTRÓPICA NO ESTADO DO AMAZONAS, BRASIL

### RESUMO

As mudanças da cobertura primária para cultivos agrícolas no Amazonas têm influenciado diretamente o fenômeno da variabilidade espacial dos atributos do solo. Este fenômeno geralmente é estudado supondo que os dados espaciais são isotrópicos, o que nem sempre representa os reais padrões de variabilidade espacial dos atributos do solo. Portanto, objetivou-se estudar padrões espaciais da suscetibilidade magnética (SM ou  $\chi$ ) de Argissolos cultivados e sob floresta otimizados por correção anisotrópica no sul do Amazonas. Três áreas de cultivos (cupuaçu, guaraná e urucum) e uma sob floresta nativa (referência) classificadas como Argissolo Vermelho-Amarelo foram georreferenciadas e amostradas por sistema de malha. As amostras foram submetidas a análises textural, difratometria de raio-X e de suscetibilidade magnética de massa específica ( $\chi$ ). Aos dados tabulados aplicou-se análises de estatística clássica e geoestatística supondo isotropia e anisotropia. Os resultados da estatística clássica mostram que os Argissolos possuem textura média com presença principalmente de goethita e hematita, mas também há um traço de maghemita no cultivo de urucum como possível produto da queima da floresta antes da implantação da cultura. Todas as frequências de  $\chi$  mostraram ser espacialmente dependentes, satisfazendo a hipótese de isotropia. Com isso, a aplicação da análise anisotrópica foi capaz de confirmar a presença de todos os tipos de anisotropia nos Argissolos cultivados e sob floresta. A correção anisotrópica forneceu melhoria dos modelos que se adequam às tendências direcionais dentro das áreas, e forneceram a redução do efeito pepita e aumento dos alcances de correlação. Assim, os mapas de krigagem gerados aprimoraram as manchas de tendências zonais de maior ou menor  $\chi$  que se destacam a nível de sub-regiões. Essas zonas devem, portanto, serem utilizadas como indicadoras da variabilidade, tomando atenção especial durante o seu manejo, principalmente em pesquisas relacionadas à delimitação de zonas de manejo específico.

**Palavras-chave:** Conversão agrícola; variabilidade; isotropia; krigagem.

## CHAPTER 2 – SPATIAL PATTERNS OF THE MAGNETIC SUSCETIBILITY OF CULTIVATED ARGISOLS AND UNDER FOREST OPTIMIZED BY ANISOTROPIC CORRECTION IN THE STATE OF AMAZON, BRAZIL

### ABSTRACT

Changes in primary coverage for agricultural crops in Amazonas have directly influenced the phenomenon of spatial variability in soil attributes. This phenomenon is usually studied assuming that the spatial data is isotropic, which does not always represent the real spatial variability patterns of soil attributes. Therefore, the objective was to study spatial patterns of magnetic susceptibility (SM or  $\chi$ ) of Argissolos cultivated and under forest optimized by anisotropic correction in southern Amazonas. Three cultivated Argisols (cupuaçu, guarana and annatto) and one under native forest (reference) were georeferenced and sampled by mesh system. The samples were subjected to textural analysis, X-ray diffraction and specific mass



magnetic susceptibility ( $\chi$ ). Classical and geostatistical analyzes were applied to the tabulated data, assuming isotropy and anisotropy. The results of the classical statistics show that the Argisols have a medium texture with the presence mainly of goethite and hematite, but there is also a trace of maghemite in the annatto cultivation as a possible product of burning the forest before the implantation of the crop. All  $\chi$  frequencies were shown to be spatially dependent, satisfying the isotropy hypothesis. With that, the application of anisotropic analysis was able to confirm the presence of all types of anisotropy in the cultivated Argisols and under forest. Anisotropic correction provided an improvement in models that fit the directional trends within the areas, and provided a reduction in the nugget effect and an increase in the correlation ranges. Thus, the generated kriging maps improved the patches of zonal trends of greater or lesser  $\chi$  that stand out at the level of sub-regions. These zones should, therefore, be used as indicators of variability, paying special attention during their management, especially in research related to the delimitation of specific management zones.

**Keywords:** Agricultural conversion; variability; isotropy; kriging.

## 6.1. INTRODUÇÃO

A expansão e intensificação agrícola com consequente mudança da cobertura primária tem levado à deterioração dos recursos naturais da bacia amazônica (Hartemink et al., 2008; Nascimento et al., 2018). Algumas pesquisas têm quantificado as mudanças nas propriedades físicas (Souza et al., 2019), químicas (Silva Júnior et al., 2012), físico-químicas (Souza Braz et al., 2011), hidráulicas (Zimmermann et al., 2006) e na produção de sedimentos (Maeda et al., 2008) que tem sido causada pela conversão do tipo de cobertura vegetal na região. As mudanças encontradas requerem informações e mapas cada vez mais detalhadas sobre planejamentos, riscos e tomada de decisão agrícola para o adequado manejo da variabilidade do solo (Li & Heap, 2014; Brevik et al., 2016).

No entanto, a grande extensão territorial do estado e a carência de pesquisadores são fatores que dificultam estudos centrados no mapeamento digital do solo (MDS) (Oliveira et al., 2015), implicando na busca por métodos alternativos de investigação. Um método econômico, rápido, eficiente e não destrutivo surgiu com o uso de medidas de suscetibilidade magnética (SM) do solo (Dearing, 1999). A origem do magnetismo no solo é inerente ao teor de ferro na estrutura dos minerais, devido a presença de orbitais 3d incompletos envolvidos na transição de elétrons entre orbitais que produzem um momento magnético (Thompson & Oldfield, 1986; Liu et al., 2012). As variações do sinal da SM podem ser ligadas aos processos pedogênicos e diagênicos, constituindo uma ferramenta promissora na avaliação e monitoração de propriedades do solo e do ambiente por correlações ou como *proxies* (Silva et al., 2015).

Assim, a combinação entre medidas de SM e técnicas de MDS podem suprir as demandas por informações dos solos do Amazonas. Dentre as técnicas mais comuns do MDS está o uso da geoestatística de Matheron (1963, 1965). Esta estatística foi altamente

desenvolvida e seus protocolos permitem a interpolação dos dados por krigagem para o mapeamento de propriedades espacialmente correlacionadas (Minasny & McBratney, 2016). O seu emprego já tem sido capaz de esclarecer a relação entre propriedades do solo e produtividade agrícola e animal com sucesso (White & Zasoski, 1999; Siqueira et al., 2016), além de ser essencial na agricultura de precisão (Oliver, 2010) e no planejamento e otimização de designs amostrais (Montanari et al., 2012; Siqueira et al., 2014; Teixeira et al., 2017a).

Com isso, a geoestatística tem sido atualmente integrada à análise da SM para caracterizar sua variabilidade espacial (Zawadzki et al., 2012; Dankoub et al., 2012; Vagapov et al., 2013; Magiera et al., 2015; Oliveira et al., 2015; Yang et al., 2016). Esta integração permitiu a construção de novos modelos de correlações e *proxies* para caracterizar a variabilidade espacial das propriedades do solo (Marques Júnior et al., 2014), identificar solos contaminados por metais pesados (Cervi et al., 2014; Golden et al., 2015; Zawadzki et al., 2015), detalhar unidades de mapeamento (Siqueira et al., 2015) e caracterizar os padrões de redistribuição do solo por erosão (Jordanova et al., 2014; Liu et al., 2015; Yu et al., 2017; Ding et al., 2020).

No entanto, a quase totalidade dos numerosos mapeamentos usando modelagem geoestatística advém de semivariogramas experimentais imbuídos de modelos teóricos supondo que os dados são estatisticamente isotrópicos. A isotropia implica que a correlação espacial depende somente da distância euclidiana, mas não da direção do vetor lag (Kanevski & Maignan, 2004). Com isso, estudos incipientes têm mostrado que as propriedades do solo geralmente exibem correlação espacial anisotrópica, isto é, dependem não só da distância, mas também da direção do vetor no espaço (Crawford & Hergert, 1997; Valeriano & Prado, 2001; Guedes et al., 2008, 2013, 2018; Boisvert et al., 2009; Facas et al., 2010; Mucha & Wasilewska-Błaszczyk, 2012; Barbosa et al., 2019). As incongruências com a isotropia são significantes no processo de krigagem (Facas et al., 2010), e quando presente, devem ser corrigidas até obtenção de um modelo com parâmetros comuns em todas as direções, antes da interpolação dos dados e conseqüente geração de mapas temáticos (Yamamoto & Landim, 2015).

A correção anisotrópica em um sistema de coordenadas 2D requer duas etapas principais: a subdivisão direcional dos semivariogramas isotrópicos e o conhecimento dos parâmetros alcance ( $a$ ) e patamar ( $C_0+C$ ). O número de direções e os ângulos reais para os quais se modela são escolhidos arbitrariamente (Ecker & Gelfand, 2003), entretanto, as direções estabelecidas por Isaaks & Srivastava (1989) são as mais convencionais ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ , com um raio de tolerância de  $22,5^\circ$ ). Se a subdivisão direcional de um semivariograma isotrópico mostrar diferentes  $a$  em um mesmo  $C_0+C$ , a variável revela ter anisotropia

geométrica. Então, uma simples transformação do sistema de coordenadas tornará a dependência espacial isotrópica no novo sistema (Oliver & Webster, 2014). Mas se ao invés do  $a$ , o  $C_0+C$  variar com a direção, a anisotropia é zonal, então o alinhamento do grid com a direção da anisotropia zonal melhor reproduz um processo isotrópico (Deutsch & Journel, 1997).

Desta maneira, a anisotropia passa a ser caracterizada por dois novos parâmetros –  $R$  e  $\theta$ .  $R$  representa a razão dos comprimentos de correlação ao longo dos eixos principais da anisotropia, e  $\theta$  o ângulo de rotação entre o sistema de coordenadas principais e o sistema de amostragem (Chorti & Hristopulos, 2008). A incorporação destes parâmetros na etapa de interpolação por krigagem permite a construção de mapas temáticos mais precisos, além de otimizar e facilitar o planejamento de designs de amostragens em estudos adicionais da variabilidade espacial do atributo na área de estudo (Guedes et al., 2013, 2018).

Portanto, este trabalho parte da hipótese que, em modelagem geoestatística, correções anisotrópicas em medidas de SM otimizam os mapas interpolados por krigagem que melhor representam os aspectos espaciais da sua variabilidade no campo, contribuindo no processo de caracterização das propriedades do solo. Logo, objetiva-se aqui, o estudo de padrões espaciais da SM de Argissolos cultivados e sob floresta otimizados por correção anisotrópica, o que fornecerá subsídios para planejamentos e tomadas de decisões agrícolas para o melhor manejo de solos influenciados pela conversão das áreas naturais para agrícolas no sul do estado do Amazonas, Brasil.

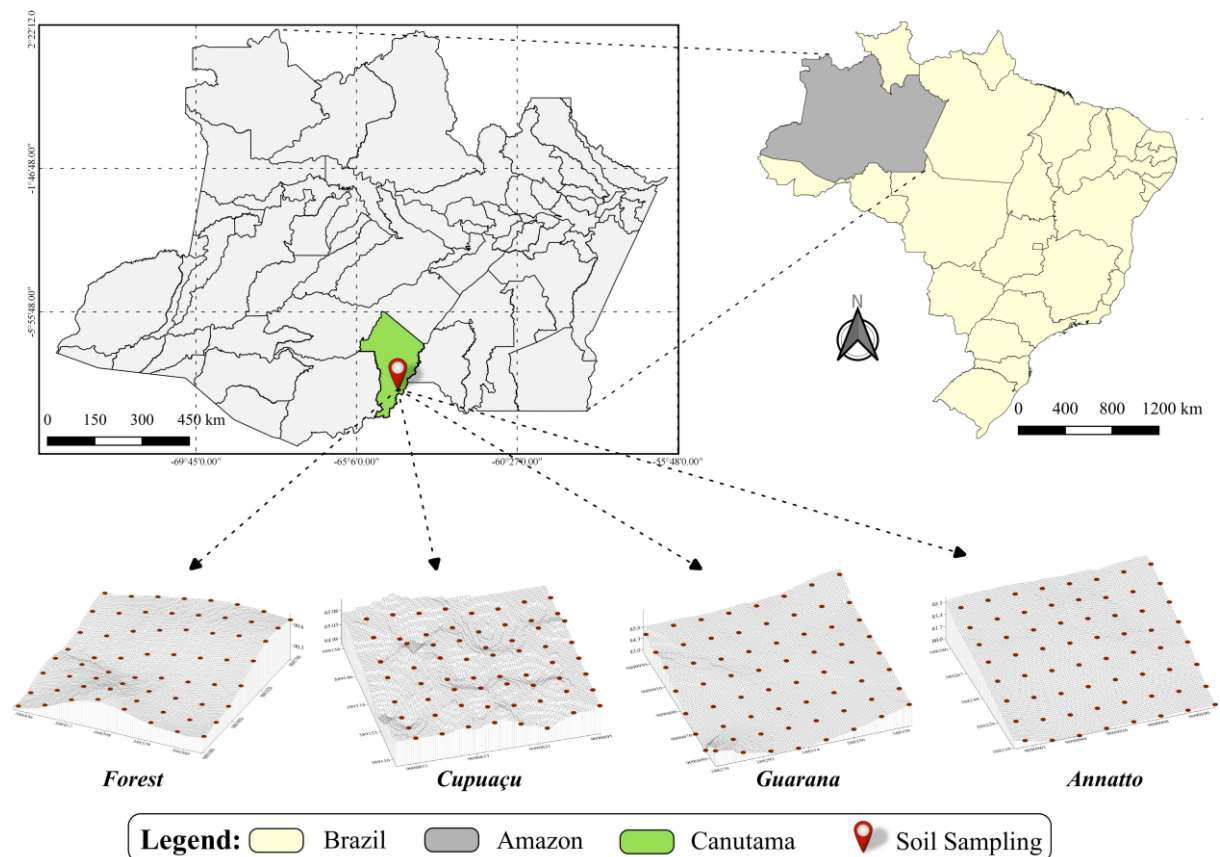
## **6.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **6.2.1. Localização e caracterização das áreas de estudo**

O estudo foi desenvolvido em duas propriedades rurais que fazem parte do Assentamento São Francisco dentro do município de Canutama-AM, Brasil. Nestas propriedades, quatro áreas foram selecionadas, uma de referência com Floresta nativa e outras três cultivadas com Urucum (*Bixa orellana*), Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) e Guaraná (*Paullinia cupana*) (Figura 11). Cada tipo de uso do solo foi georreferenciado e encontram-se sob nas seguintes coordenadas geográficas – Floresta: 64° 0' 46.625" W e 8° 12' 53.108" S; Cupuaçu: 64° 0' 24.488" W e 8° 13' 25.060" S; Guaraná: 64° 0' 49.384" W e 8° 13' 23.942" S; e Urucum: 64° 0' 53.068" O e 8° 13' 23.447" S.

O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico pelo SiBCS (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos; Santos et al., 2018) ou como Haplic Alisol pelo WRB (World Reference Base for soil resources; WRB, 2015) para todas as áreas. Em todo o estado, os Argissolos são predominantes e compreendem 45% da área, os quais são, dentro

da localização do estudo, oriundos de sedimentos das coberturas fanerozóicas da bacia do Solimões, que engloba o vasto interflúvio entre os rios Javari/Juruá/Purus e Madeira (Reis et al., 2006). O clima característico da região, segundo a classificação de Köppen, é Tropical Chuvoso, subtipo climático Am (chuvas do tipo monção), com período seco de pequena duração, temperatura média anual entre 25° e 27°C e pluviosidade variando de 2.800 mm a 3.100mm ao ano (Alvares et al., 2013).



**Figura 6:** Localização e modelo de elevação digital das áreas de estudo em Canutama, região sul do Amazonas.

Exceto pelo tempo de cultivo, as áreas cultivadas possuem um mesmo histórico de implantação. Guaraná e cupuaçu são cultivados há 7 anos, enquanto que a área de urucum é mais recente (3 anos). Todas são oriundas de uma floresta nativa com declive médio de 3% que foi derrubada, queimada e destocada manualmente para limpeza da área, seguida de implantação das culturas. Desde então, nunca houve qualquer prática de queima, calagem ou fertilização do solo, mas durante o período chuvoso as plantas daninhas são controladas à base de glifosato e de roçadeira motorizada. Em particular, durante o período de coleta pode-se observar na área de cupuaçu alto volume de biomassa sobre a superfície do solo. Já a floresta é nativa da área e não sofre interferência antrópica, sendo classificada como floresta tropical

ombrófila densa, a cobertura desta área é constituída por árvores adensadas e multiestratificadas entre 20 a 50 metros de altura.

### **6.2.2. Metodologia de campo**

Malhas amostrais foram estabelecidas de acordo com as dimensões do cultivo. Em área de guaraná e floresta, a malha mede 70 x 70 m, com espaçamento entre pontos de 10 x 10 m. Em cultivo de cupuaçu, a malha mede 42 x 42 m, com espaçamento regular de 6 x 6 m e, no urucum, a malha mede 70 x 56 m, com espaçamento entre pontos de 10 x 8 m. As amostras foram coletadas nos pontos de cruzamento das malhas, perfazendo 64 pontos amostrais em cada área, das quais foram amostradas três profundidades: 0,00-0,05; 0,05-0,10; e 0,10-0,20 m, conferindo-lhes 192 amostras por área, e totalizando 768 amostras. Os pontos foram georreferenciados com um equipamento de GPS Garmin modelo Etrex (*Datum South American '69*). As amostras, coletadas em forma de torrão, foram secas à sombra e levemente destorroado de forma manual, seguida de peneiramento em malha de 2,0 mm de diâmetro, compondo a fração terra fina seca ao ar (TFSA) necessárias às análises laboratoriais.

### **6.2.3. Metodologia laboratorial**

A granulometria foi determinada com solução de NaOH a 0,1 mol L<sup>-1</sup> como dispersante químico sob descanso de 16 horas, seguida de agitação da suspensão em copos metálicos acoplados com água em agitador elétrico tipo Stirrer a 12.000 RPM por 15 minutos. A fração argila e silte foram separadas pelo método da pipeta e a fração areia obtida por tamisação (Teixeira et al., 2017b). Os óxidos de ferro pedogênicos foram quantificados por dissolução seletiva. Os teores de ferro livre (Fe<sub>d</sub>) foram extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Mehra & Jackson, 1958). Já os teores de ferro de baixa cristalinidade (Fe<sub>o</sub>) foram extraídos com oxalato ácido de amônio (pH 3,0) no escuro (McKeague & Day, 1966). Após extração, os teores foram determinados por colorimetria.

Com a obtenção das frações, a fração argila foi utilizada para quantificar, pelo método do pó, os teores de hematita (Hm), goethita (Gt) e maghemita (Mh) por difratometria de raio-X (DRX). Os óxidos de ferro da fração argila foram concentrados por ebulição em NaOH 5 mol L<sup>-1</sup> (Kämpf & Schwertmann, 1982), e difratados com espectrômetro Mini-Flex Rigaku II (20mA, 30 Kv, radiação CuK $\alpha$ ) a uma taxa de varredura de 1° 2 $\theta$  min<sup>-1</sup>. Os teores de Hm e Gt da fração argila foram calculadas alocando-se a diferença entre teor de ferro livre (Fe<sub>d</sub>) e de baixa cristalinidade (Fe<sub>o</sub>) a estes óxidos. As áreas para os picos Hm (012) e Mh (220) foram

multiplicadas por um fator de 3,5. A área total foi considerada como a combinação de (110), 3,5 vezes (012) e 3,5 vezes (220) (Eq 17, 18 e 19).

$$Gt (\%) = \left( \frac{\text{área } Gt (110)}{\text{área total}} \right) \times 100 \quad (17)$$

$$Hm (\%) = \left( \frac{\text{área } Hm (012) \times 3.5}{\text{área total}} \right) \times 100 \quad (18)$$

$$Mh (\%) = \left( \frac{\text{área } Mh (220) \times 3.5}{\text{área total}} \right) \times 100 \quad (19)$$

A suscetibilidade magnética volumétrica ( $\kappa$ , adimensional) foi medida em aparelho Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B, utilizando 10 gramas de TFSA previamente diluída em material inerte (sacarose) para completar o volume necessário à leitura (Dearing, 1999). As leituras foram feitas em baixa (0,47 kHz;  $\kappa_{bf}$ ) e alta (4,7 kHz;  $\kappa_{af}$ ) frequência. A densidade aparente ( $\rho$ ) de cada amostra foi obtida dividindo-se massa por volume. Então, a susceptibilidade magnética específica de massa ( $\chi$ ) medida em baixa ( $\chi_{bf}$ ) e alta frequência ( $\chi_{af}$ ) foram calculadas conforme as Eq. 23 e 24, respectivamente:

$$\chi_{bf} (m^3 kg^{-1}) = \kappa_{bf} / \rho \quad (23)$$

$$\chi_{af} (m^3 kg^{-1}) = \kappa_{af} / \rho \quad (24)$$

A partir destas expressões obteve-se a  $\chi$  de perda percentual, denominada suscetibilidade magnética dependente de frequência percentual ( $\chi_{fd}$  %), conforme Eq. 25:

$$\chi_{fd} (\%) = \left( \frac{\chi_{bf} - \chi_{af}}{\chi_{bf}} \right) * 100 \quad (25)$$

#### 6.2.4. Análises estatísticas

Os dados foram avaliados primeiramente pela análise exploratória da estatística descritiva, calculando-se a média, coeficiente de variação e teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov a 5%. Em seguida, aplicou-se uma análise de variância univariada (ANOVA) para verificar se existe diferença entre as áreas estudadas e saber quais são diferentes umas das outras por comparação das médias dos atributos, utilizando o teste de Tukey a 5 % de probabilidade. Toda a descritiva e ANOVA foram executadas no software SPSS 25.0 (IBM Corp., 2017).

Em seguida, aplicou-se uma análise geoestatística com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca das variáveis. Para as medidas de  $\chi$  em que a hipótese foi satisfeita, a semivariância do espaço tridimensional das áreas pôde ser estimada através de um semivariograma experimental que utiliza os pares de pontos das coordenadas amostrais, considerando que a dependência é igual para todas as direções (isotrópico), conforme Eq. 26.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (26)$$

em que:  $\hat{\gamma}(h)$  representa o valor da semivariância para uma distância  $h$ ;  $N(h)$  refere-se ao número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;  $Z(x_i)$  é o valor do atributo  $Z$  na posição  $x_i$ ; e  $Z(x_i + h)$  é o valor do atributo  $Z$  separado por uma distância  $h$  da posição  $x_i$ .

Então, para cada semivariograma experimental foram ajustadas funções teóricas por mínimos quadrados ponderados (WLS) e refinadas por sentimento até obter o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Os parâmetros que definem as funções são: modelo (linear, esférico, gaussiano, exponencial), efeito pepita ( $C_0$ ), patamar ou máxima semivariância ( $C_0+C$ ) e alcance ( $a$ ). O efeito pepita representa a variação não correlacionada na escala de amostragem; o patamar estima a variância do processo aleatório e corresponde à variância máxima dos dados; e o alcance representa o limite da correlação espacial (Oliver & Webster, 2014).

Posteriormente, identificou-se a presença ou ausência de anisotropias por subdivisão direcional das variáveis com estrutura de dependência espacial, com a finalidade de corrigi-las e obter um processo isotrópico com parâmetros comuns. Os eixos de anisotropia (maior e menor alcance) foram identificados plotando variogramas em 4 direções:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ , com raio de tolerância padrão de  $30^\circ$ . Para correção da anisotropia geométrica aplicou-se o método da transformação linear das coordenadas espaciais (TLCE) (Webster & Oliver, 2007), conforme Eq. 27. A anisotropia zonal foi corrigida seguindo os passos descritos em Yamamoto & Landim (2015). Já a anisotropia combinada foi corrigida separando-se a anisotropia geométrica da zonal, e modelando-as por partes.

$$\hat{\gamma}(\theta) = \{A^2 \cos^2(\theta - \varphi) + B^2 \sin^2(\theta - \varphi)\}^{1/2} \quad (27)$$

em que:  $\hat{\gamma}(\theta)$  define a anisotropia na direção  $\theta$  e distância de separação  $h$ ;  $A$  e  $B$  são os parâmetros de distância de maior e menor continuidade, respectivamente;  $\theta$  é a direção do lag;  $\varphi$  é o ângulo de máxima continuidade.

Após correção, usou-se o critério da validação cruzada (VC) na escolha dos melhores parâmetros anisotrópicos do modelo. Então, as medições da  $\chi$  foram interpoladas e puderam ser estimadas com boa suavidade também para locais não amostrados ( $x_i$ ) dentro da área amostral pelo método da krigagem pontual (Oliver & Webster, 2014). Com isso, a densidade mínima amostral ( $N$ ) pôde ser determinada com base nas informações obtidas dos semivariogramas corrigidos. Para isso, utilizou-se da expressão de Oliveira et al. (2015):  $N = [A / (a^2 / 10000)]$ , em que  $N$  é o número mínimo de amostras;  $A$  é a área total em ha; e  $a$  é o alcance do semivariograma em metros (Oliveira et al., 2015). Toda a análise geoestatística e krigagem foram aplicadas dentro do software Surfer<sup>®</sup> 17.1 (Golden Software, LLC).

## 6.3. RESULTADOS

### 6.3.1. Características gerais dos Argissolos

A análise granulométrica mostrou que todas as áreas possuem textura média, mas as médias superiores da fração silte e argila em cupuaçu e floresta apontam a existência de diferentes classes texturais (Tabela 5). A classe textural variou de franco-siltosa a franco-argilosa entre as camadas de floresta e de cupuaçu, franca a franca-argilosa em urucum e classe franca em área de guaraná. Diferenças significativas também foram encontradas nos teores de carbono orgânico (CO) do solo, com superioridade no cultivo de cupuaçu, onde já havia sido observado um acúmulo de biomassa superficial em campo. Nesta área, um teor maior que 2% de CO foram encontrados nos primeiros 10cm superficiais, mas com baixa incorporação para além desta camada (0,8%). Por outro lado, o Argissolo natural apresentou maior uniformidade ao longo do perfil, com valor médio entre camadas de 1,5% de CO. Os demais Argissolos mostram valores de CO entre camadas variando de 1,5 a 1% e 1,7 a 0,7%, respectivamente, em guaraná e urucum.

Para os teores de ferro livre ( $Fe_d$ ), nota-se que a floresta e guaraná se sobressaem com os maiores teores em relação às demais áreas, com valores médios entre camadas de 23,35 e 23,13  $g\ kg^{-1}$ , respectivamente (Tabela 5). Em contraste, as formas de ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ) são encontradas em maior teor somente no Argissolo sob floresta, alcançando 0,29  $g\ kg^{-1}$  na superfície e 1,87  $g\ kg^{-1}$  na subsuperfície. Quanto aos óxidos de ferro presentes na fração argila, constatou-se por DRX a presença de goethita (Gt), hematita (Hm) e maghemita (Mh) pedogênica. No entanto, a Mh só foi encontrada no Argissolo cultivado com urucum e sob baixa concentração (3  $g\ kg^{-1}$ ). Por outro lado, a área de guaraná alcança até 33  $g\ kg^{-1}$  de Gt enquanto a floresta contém até 14  $g\ kg^{-1}$  de Hm.

Os resultados obtidos estão normais ao nível de 5% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, com poucas exceções, como foi o caso dos teores de  $Fe_d$  e  $Fe_o$  na subsuperfície da floresta e  $Fe_o$  na subsuperfície da área de cupuaçu, indicando que essas variáveis exibem distribuição de dados assimétrica e valores de mediana distantes da média. Por outro lado, seguindo a classificação de Warrick & Nielsen (1980), o baixo coeficiente de variação ( $CV < 12\%$ ) obtido para as frações granulométricas e teores de  $Fe_d$  e  $Fe_o$ , e moderada variabilidade para o CO ( $12\% < CV < 60\%$ ) revelam que as amostragens em malha foram suficientes em representar as áreas e há boa homogeneidade espacial dos atributos ao longo da área amostral.



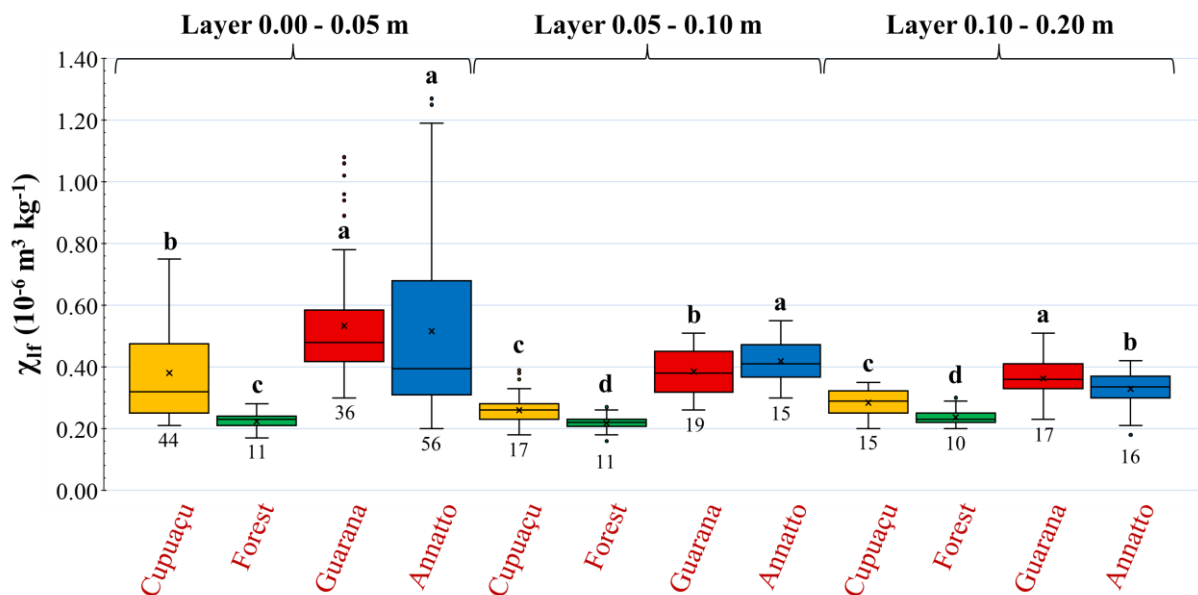
**Tabela 5:** Textura, óxidos e teores de ferro livre e de baixa cristalinidade de Argissolos sob diferentes usos em Canutama, Amazonas.

Estatística Descritiva	Cupuaçu			Floresta			Guaraná			Urucum		
	Média	<sup>1</sup> CV%	<sup>2</sup> K-S	Média	CV%	K-S	Média	CV%	K-S	Média	CV%	K-S
<b>0,00 – 0,05 m</b>												
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	281,80 b	7,14	0,10*	250,44 b	6,71	0,09*	387,80 a	10,47	0,08*	391,15 a	10,59	0,08*
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	513,00 a	4,21	0,07*	534,89 a	5,98	0,08*	400,42 c	6,77	0,08*	446,72 b	12,53	0,13*
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	205,20 a	4,35	0,18 <sup>ns</sup>	214,66 a	11,41	0,15*	205,27 a	6,72	0,13*	172,65 b	14,23	0,12*
<sup>3</sup> Fe <sub>d</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	21,32 a	9,52	0,13*	20,74 a	10,12	0,08*	21,43 a	6,35	0,11*	12,88 b	12,28	0,19 <sup>ns</sup>
<sup>4</sup> Fe <sub>o</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	0,13 b	8,38	0,15*	0,29 a	15,56	0,10*	0,13 b	12,58	0,15*	0,03 c	21,10	0,11*
<sup>5</sup> CO (g kg <sup>-1</sup> )	23,83 a	20,68	0,09*	20,26 b	15,08	0,11*	15,61 c	14,32	0,12*	15,87 b	19,49	0,13*
<b>0,05 – 0,10 m</b>												
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	294,73 c	6,87	0,08*	227,88 d	8,27	0,05*	351,31 b	7,43	0,08*	374,22 a	9,30	0,11*
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	399,62 b	8,30	0,09*	480,42 a	7,84	0,09*	415,67 b	7,61	0,09*	317,03 c	7,92	0,10*
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	305,64 ab	10,08	0,11*	267,70 b	13,46	0,11*	236,84 c	13,89	0,08*	313,09 a	10,53	0,11*
<sup>3</sup> Fe <sub>d</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	18,41 b	8,72	0,16*	23,75 a	12,03	0,16*	23,26 a	8,57	0,17*	17,39 b	8,74	0,12*
<sup>4</sup> Fe <sub>o</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	0,08 c	10,72	0,28 <sup>ns</sup>	0,91 a	27,39	0,25 <sup>ns</sup>	0,26 b	6,44	0,10*	0,03 c	11,97	0,08*
<sup>5</sup> CO (g kg <sup>-1</sup> )	22,66 a	11,53	0,08*	12,97 c	18,64	0,06*	12,92 c	26,25	0,14*	17,23 b	11,34	0,09*
<b>0,10 – 0,20 m</b>												
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	286,73 c	9,60	0,07*	235,89 d	6,08	0,08*	367,88 b	7,08	0,06*	373,80 a	9,48	0,06*
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	454,40 c	6,83	0,06*	459,38 a	3,19	0,08*	434,45 b	4,24	0,08*	406,15 c	10,86	0,10*
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	287,86 a	11,24	0,14*	304,72 a	4,46	0,13*	203,63 b	16,44	0,09*	210,40 b	23,54	0,14*
<sup>3</sup> Fe <sub>d</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	16,00 c	14,75	0,09*	25,56 a	18,15	0,18 <sup>ns</sup>	24,72 a	9,08	0,15*	22,43 b	12,83	0,09*
<sup>4</sup> Fe <sub>o</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	0,02 c	21,92	0,33 <sup>ns</sup>	1,87 a	9,41	0,23 <sup>ns</sup>	0,38 b	15,32	0,13*	0,03 c	17,71	0,07*
<sup>5</sup> CO (g kg <sup>-1</sup> )	8,52 c	50,15	0,13*	12,62 a	16,50	0,11*	10,84 b	15,27	0,07*	7,39 c	20,23	0,10*
<b>Cupuaçu Floresta Guaraná Urucum</b>												
<sup>6</sup> Mh (g kg <sup>-1</sup> )	-			0			-			3		
<sup>7</sup> Gt (g kg <sup>-1</sup> )	22			17			33			12		
<sup>8</sup> Hm (g kg <sup>-1</sup> )	11			14			1			3		

Médias seguidas de letras iguais na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade. <sup>1</sup>CV%: coeficiente de variação; <sup>2</sup>K-S: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov; <sup>3</sup>Fe<sub>d</sub>: ferro extraído por ditionito-bicarbonato-citrato de sódio; <sup>4</sup>Fe<sub>o</sub>: ferro extraído por oxalato ácido de amônio; <sup>5</sup>CO: Carbono orgânico do solo; <sup>6</sup>Mh: maghemita; <sup>7</sup>Gt: goethita; <sup>8</sup>Hm: hematita; \*: significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns: não significativo.

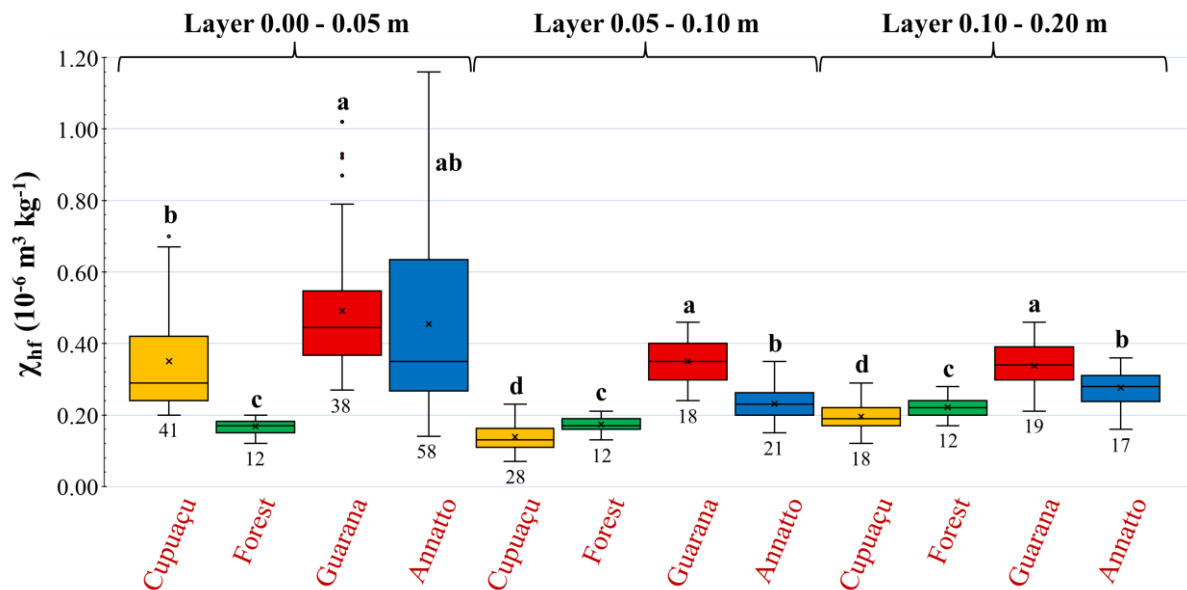
### 6.3.2. Características gerais da suscetibilidade magnética de massa específica ( $\chi$ )

A  $\chi$  medida em baixa frequência ( $\chi_{bf}$ ) diferiu significativamente dentre os Argissolos, a qual foi maior nas áreas de guaraná e urucum e menor na área de floresta (Figura 12). As médias de  $0,51, 0,38$  e  $0,36 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  em guaraná,  $0,51, 0,42$  e  $0,33 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  em urucum, e de  $0,22, 0,21$  e  $0,23 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  em floresta indicam claramente que as áreas agrícolas diferem da natural por um aprimoramento magnético superficial seguido de decaimento em profundidade. Esse aprimoramento logicamente é acompanhado de maior variabilidade comparado a área natural. Enquanto a floresta mantém uma variação horizontal e vertical uniforme, com valores de  $CV$  abaixo de 12%, as áreas agrícolas concentram uma variabilidade horizontal e vertical moderada ( $12\% < CV < 60\%$ ).

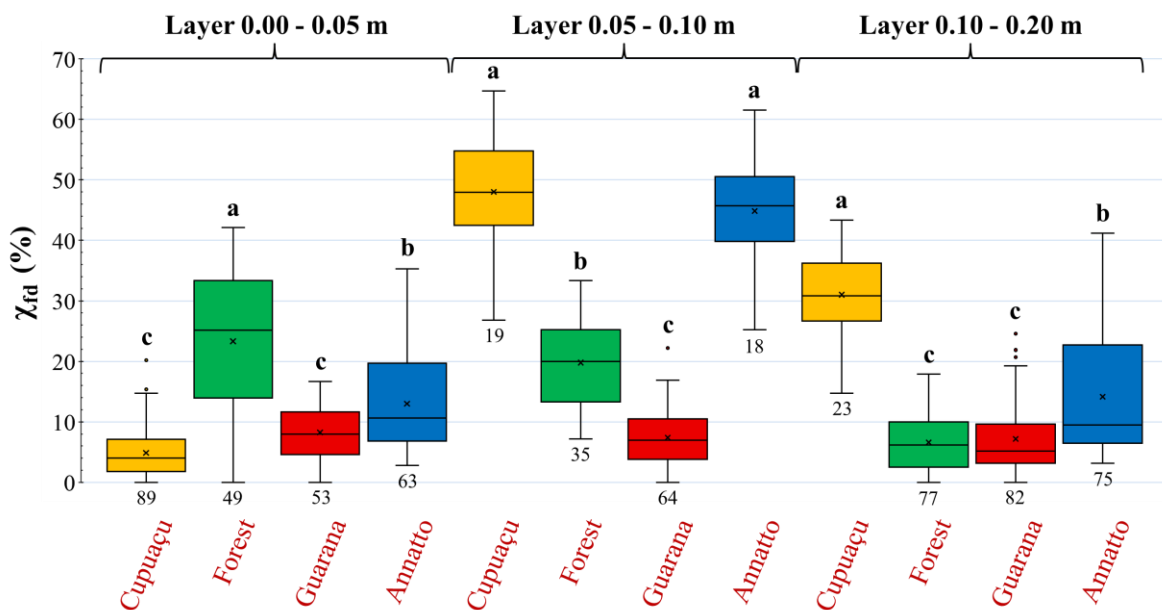


**Figura 7:** Box Plot de suscetibilidade magnética específica de massa medida em baixa frequência para diferentes usos e camadas dos solos de Canutama, região sul do Amazonas. As letras plotadas correspondem ao teste de Tukey a 5%, e os valores, ao coeficiente de variação ( $CV\%$ ).

A  $\chi$  de alta frequência ( $\chi_{af}$ ), semelhantemente à  $\chi_{bf}$ , reforça que a área de guaraná tem a maior suscetibilidade, enquanto a floresta possui a menor. No entanto, a  $\chi_{af}$  variou de  $0,07$  a  $1,16 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  (Figura 13), com médias entre camadas de  $0,22, 0,39$  e  $0,31 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  respectivamente para os cultivos de cupuaçu, guaraná e urucum, e de  $0,18 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  em floresta, expressivamente menores que as encontradas para  $\chi_{bf}$ . A  $\chi_{af}$  também mostrou o mesmo padrão de variabilidade da  $\chi_{bf}$ , em que os  $CV\%$  na superfície das áreas cultivadas são pelo menos 3 vezes maiores que o da área florestada. Essa variação das áreas cultivadas decai verticalmente, chegando a mostrar uniformidade similar à da floresta a partir dos  $0,1-0,2 \text{ m}$ .



**Figura 8:** Box Plot de suscetibilidade magnética específica de massa medida em alta frequência para diferentes usos e camadas dos solos de Canutama, região sul do Amazonas. As letras plotadas correspondem ao teste de Tukey a 5%, e os valores, ao coeficiente de variação (CV%).

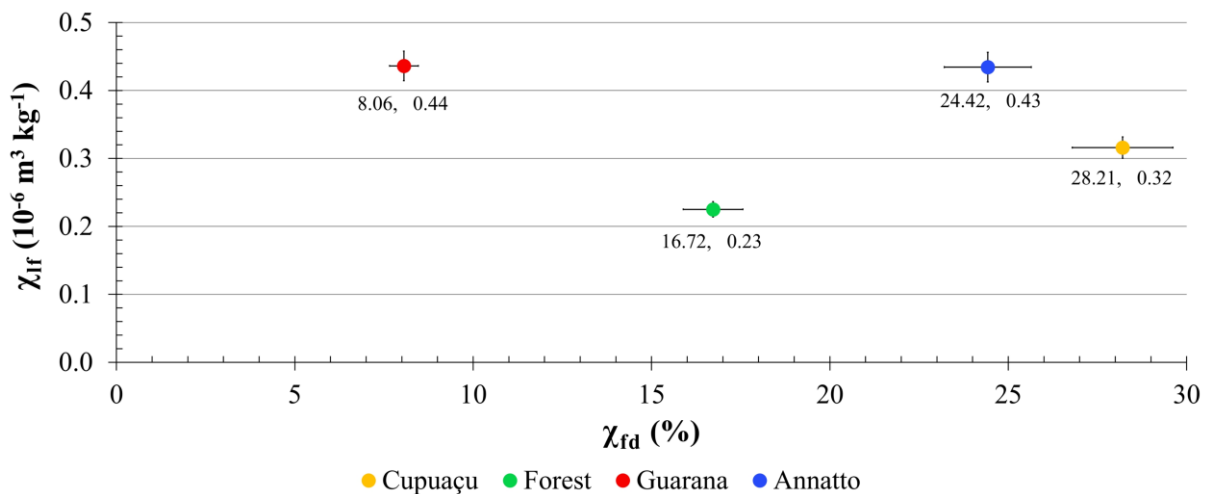


**Figura 9:** Box Plot de suscetibilidade magnética específica de massa medida em frequência dependente para diferentes usos e camadas dos solos de Canutama, região sul do Amazonas. As letras plotadas correspondem ao teste de Tukey a 5%, e os valores, ao coeficiente de variação (CV%).

A  $\chi$  de frequência dependente ( $\chi_{fd}$ ) apresentou valores altos para todos os Argissolos, variando de 6,6 a 23,3% na floresta e de 4,8 a 48,0% nas áreas cultivadas (Figura 14). Não houve um aprimoramento magnético como visto para a  $\chi_{bf}$  nas áreas cultivadas, mas a floresta mostra um padrão de decaimento em profundidade que reflete significativamente nas suas médias, passando da maior para menor perda percentual dentre as áreas. Em contraste, nas áreas

de cupuaçu e urucum há maior perda percentual em subsuperfície. A natureza da variável revela uma moderada ( $12 < CV\% < 60$ ) a alta variação espacial ( $> 60\%$ ) para todas as áreas e camadas.

Conhecendo as principais características da  $\chi$ , pôde-se então obter a proporção dos tamanhos relativos das partículas magnéticas que corresponde aos comportamentos magnéticos e seus respectivos estados de domínio. Essas frações magnéticas foram obtidas por cruzamento das informações entre  $\chi_{bf}$  com  $\chi_{fd}$  e usando da classificação de Dearing (1999) (Figura 15).



**Figura 15:** Gráfico de dispersão média da suscetibilidade magnética de massa específica em baixa frequência versus frequência dependente para camada de 0,0-0,2 m de Argissolos sob diferentes usos no sul do Amazonas.

As áreas mostram diferentes variações nos tamanhos dos cristais mesmo entre os cultivos e, de modo geral, os valores de  $\chi_{fd}$  são altos. Em um pequeno intervalo de valores da  $\chi_{bf}$ , a  $\chi_{fd}$  da área de guaraná varia em torno de 7,5 a 8,5%, indicando que misturas de grãos ultrafinos superparamagnéticos (SP,  $d < 0,02\mu\text{m}$ ) com grãos mais grosseiros, variando de simples domínio (SD;  $d < 0,2\mu\text{m}$ ) a multidomínios (MD; diâmetro  $> 110\mu\text{m}$ ), dominam a assembleia granulométrica da área. Em contraste, todos os demais Argissolos apresentam  $\chi_{fd}$  acima de 14%, revelando um avançado estágio do aprimoramento ferrimagnético, em que provavelmente toda a assembleia dessas áreas são provenientes de cristais SP.

### 6.3.3. Continuidade da $\chi$ espacialmente correlacionada e dependente

Além da estatística clássica, a real aquisição da distribuição e correlação espacial da  $\chi$  foram obtidas por análise geoestatística considerando um comportamento isotrópico dos dados, isto é, supondo que a dependência é a mesma em qualquer direção no campo. Assim, o comportamento foi avaliado através de semivariogramas experimentais com modelos teóricos plotados na direção  $0^\circ$  (norte) com uma tolerância angular de  $90^\circ$ . Um ajuste rigoroso dos

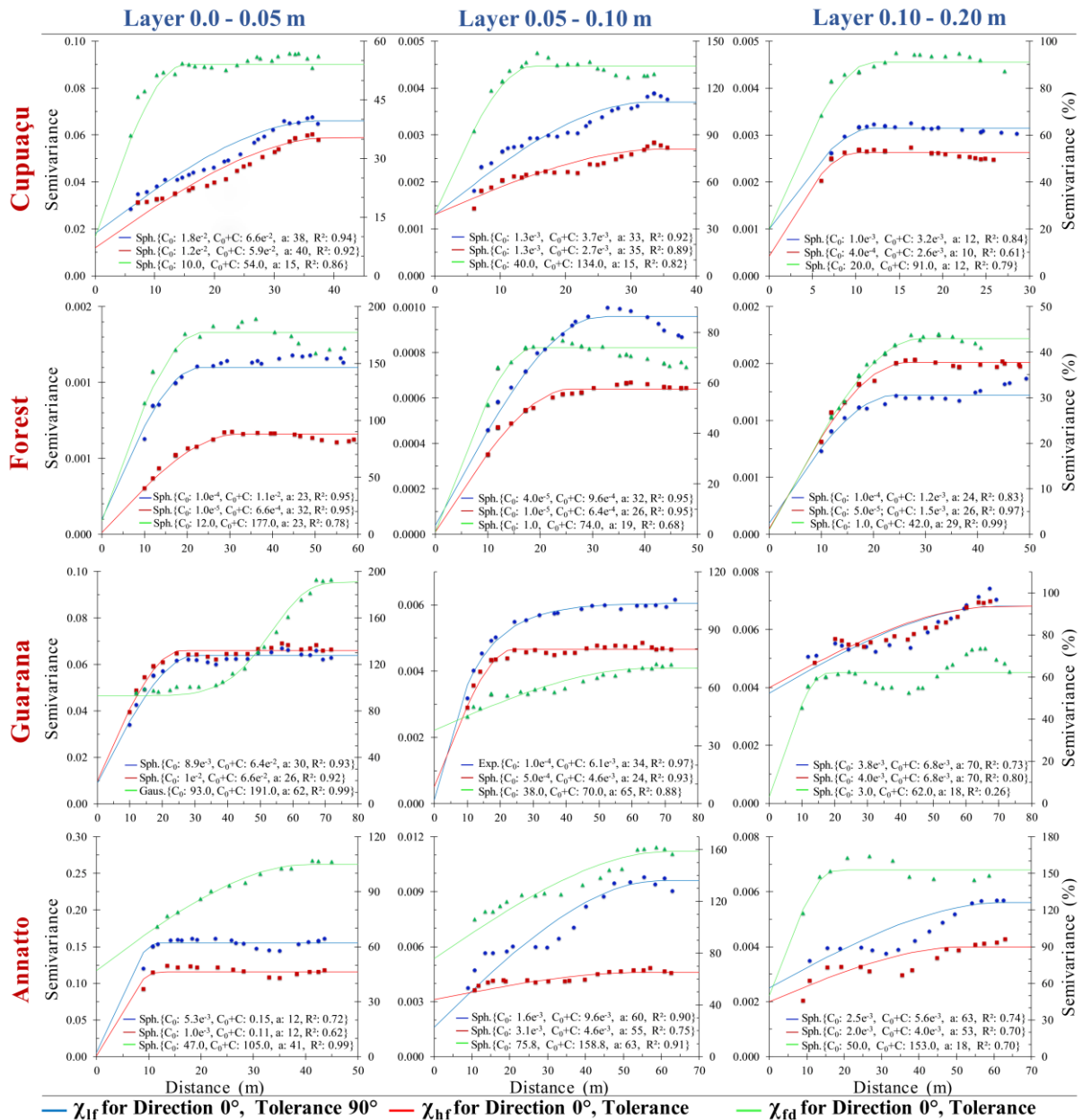
modelos teóricos e sua plotagem num mesmo plano permitiram a visualização das características que definem o comportamento espacial de forma conjunta para dado uso e camada do solo. A plotagem foi feita sob a condição da inserção de dois eixos de semivariância (eixo y) devido as diferentes unidades entre  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  ( $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ; eixo à esquerda) e  $\chi_{fd}$  (%; eixo à direita).

Os resultados mostram que todas as frequências de medição da  $\chi$  têm estrutura de dependência espacial em todos os usos do solo e camadas avaliadas (Figura 16), com correlações maiores que a menor distância de amostragem utilizada. Apesar de alguns modelos exibirem baixa correlação espacial, não houve independência espacial. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) alcançado para os modelos teóricos de cada frequência de  $\chi$  conseguem explicar de: 61 a 94% da variação espacial do Argissolo sob cupuaçu, 69 a 99% da floresta, 73 a 99% de guaraná, e de 62 a 99% do urucum.

A dominância do modelo esférico na obtenção destes  $R^2$  mostram sua habilidade de adequação aos espalhamentos dos pares de pontos para a maioria das medições de  $\chi$ , com exceção para  $\chi_{fd}$  na superfície e  $\chi_{bf}$  em subsuperfície da área de guaraná, onde o modelo gaussiano e exponencial adequaram-se melhor aos seus ajustes. Ainda, a  $\chi_{fd}$  em 0,1-0,2 m em guaraná exibiu um efeito “hole” em que os pares de pontos oscilam periodicamente a distâncias variáveis, acarretando na não-estacionariedade de  $Z(x)$  e no baixo desempenho do modelo ( $R^2 = 26\%$ ). Por conseguinte, o processo obedece somente ao critério da hipótese intrínseca de 1ª ordem. Neste caso, há correlação somente para o primeiro lag de  $Z [Z_{(x+h)} - Z_{(x)}]$  e o uso de modelos menos comuns (e.g. “sine wave”) se tornam preferíveis na busca por maiores  $R^2$ .

A máxima semivariância ( $C_0+C$ ) encontrada variou de 0,0032 a 0,15 para a  $\chi_{bf}$  nos Argissolos cultivados e de 0,00096 a 0,012 para a  $\chi_{bf}$  da floresta; de 0,0026 a 0,11 para  $\chi_{af}$  nos cultivos e de 0,00064 a 0,0015 para  $\chi_{af}$  na floresta; e de 62 a 191 para  $\chi_{fd}$  nos cultivos e de 42 a 177 para  $\chi_{fd}$  na floresta. Percebe-se que as semivariâncias se inverteram do ambiente cultivado para o de floresta. Enquanto a  $C_0+C$  da  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  parece decair em profundidade nos cultivos, a  $C_0+C$  da floresta se eleva. O comportamento oposto foi encontrado para a  $\chi_{fd}$  dentre os cultivos.

As semivariâncias encontradas exibem comportamento próximo à origem distintos, a grande maioria são descontínuos e com efeito pepita ( $C_0$ ) para as áreas cultivadas e contínuos com abordagem linear na floresta (Figura 16). A abordagem linear (próxima de 0) na floresta evidencia ausência de microvariabilidade não controlada pela escala de amostragem ou de análise errática.



**Figura 1610:** Semivariogramas isotrópicos ajustados à suscetibilidade magnética medida em baixa, alta e de frequência dependente (sem correção anisotrópica) para solos sob diferentes usos em Canutama-AM.

Por outro lado, as demais frequências nas demais áreas apresentam  $C_0$  considerável. Da  $C_0+C$  encontrada para  $\chi_{fd}$  nas 3 camadas de solo sob cupuaçu (54, 134 e 91), o  $C_0$  representa de 18 a 30% de sua variação, implicando em descontinuidade de  $Z(x)$  a curtas distâncias. Para  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  desta mesma área, o  $C_0$  pode ainda alcançar de 27 até 35% da  $C_0+C$ , evidenciando a existência de considerável microvariabilidade para distâncias em que inexistem estimativas de  $\hat{y}(h)$  ( $< 6 \times 6$  m), e indicando que se deve adensar mais pontos no estudo da variabilidade espacial da  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$ .

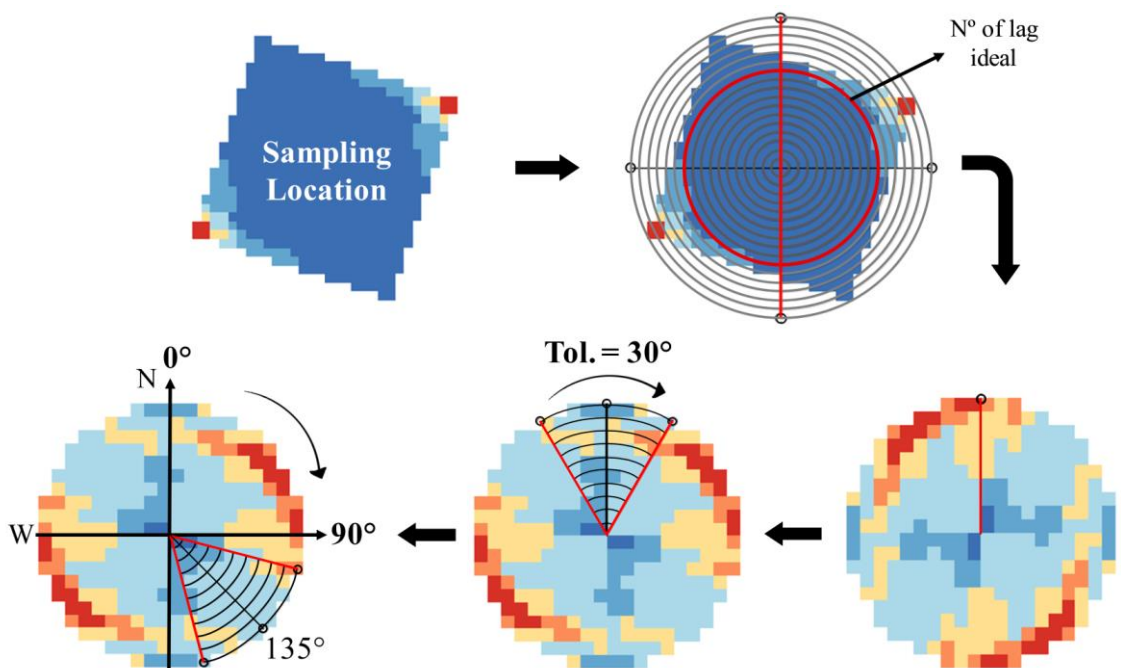
Os limites de dependência espacial ( $a$ ) para a  $\chi_{bf}$  foram de 38 m em cupuaçu, 70 m em guaraná, 63 m em urucum e de 32 m na floresta. Para a  $\chi_{af}$  esse limite foi de 40 m em cupuaçu,

70 m em guaraná, 55 m em urucum e de 32 m na floresta. Para a  $\chi_{fd}$  as maiores correlações obtidas foram de 15 m em cupuaçu, 65 m em guaraná, 63 m em urucum e de 29 m na floresta (Figura 16). Assim como a  $C_{0+C}$  na floresta, a  $\chi_{fd}$  desta área natural têm distâncias de correlação elevando-se em profundidade, enquanto que as áreas cultivadas possuem maior variabilidade do que a floresta, entretanto, suas variabilidades reduzem substancialmente nas camadas inferiores. Por outro lado, com exceção de cupuaçu, as correlações máximas da  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  nas áreas cultivadas manifestam aumento da variabilidade com o aprofundamento do solo, as quais são maiores que as correlações espaciais da área natural.

#### **6.3.4. Padrões espaciais anisotrópicos da $\chi$**

Sabendo-se que a  $\chi$  é espacialmente dependente, realizou-se uma visualização mais apurada no intuito de constatar anisotropias, isto é, verificar se a continuidade espacial é realmente igual para qualquer direção. Isto foi feito através da análise de ambos gráficos de semivariância anisotrópica e de semivariogramas direcionais. Os gráficos de semivariância foram ajustados as medidas de cada malha amostral para análise de tendências direcionais, sendo o centro a origem do variograma [ $\hat{\gamma}(h) = 0$ ], conforme esquematizado na Figura 17. Os semivariogramas direcionais foram confeccionados de modo semelhante aos semivariogramas isotrópicos, mas ausentes de modelos teóricos e alinhados às direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$  com uma tolerância angular de  $30^\circ$ , para análise da semivariância anisotrópica.

Além da direção e tolerância, os ajustes que definiram ambos gráficos de anisotropia se referem ao tamanho e quantidade de lags utilizados em cada área. Em cada malha localizou-se os menores espaçamentos em que há estimativas de  $\hat{\gamma}(h)$  para explorar a variabilidade ao máximo sem haver perda de informação na interpolação por krigagem. Então, foram padronizados um total de 10, 11, 11 e 10 lags espaçados a 3,9; 6,3; 6,4; e 6,0 m entre si, para as áreas de cupuaçu, floresta, guaraná e urucum, respectivamente. Essa configuração a intervalos menores que o espaçamento de amostragem permitiu um mínimo de 30 pares de pontos no cálculo da semivariância média de cada lag que constitui um semivariograma.

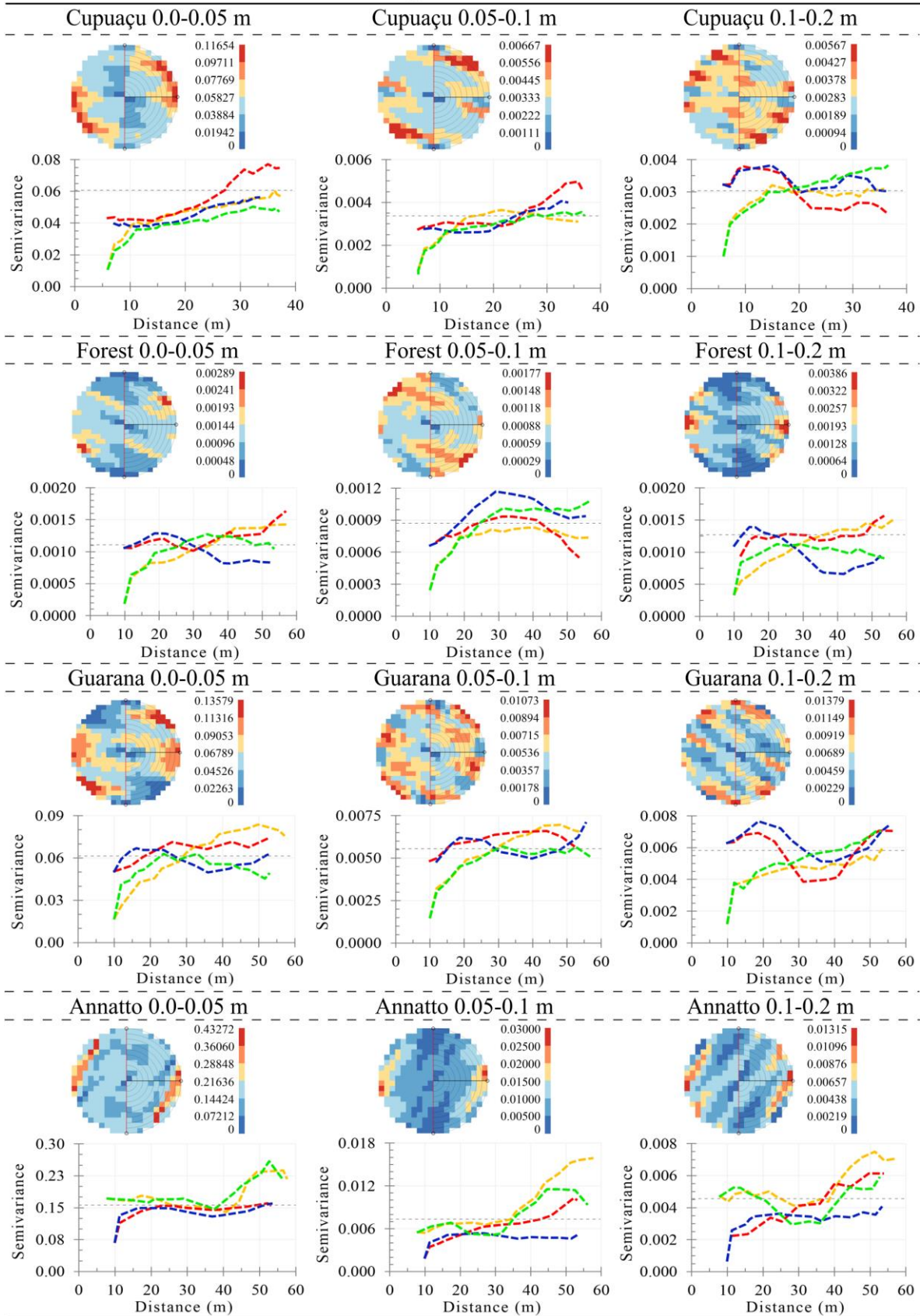


**Figura 17:** Esquema construtivo do gráfico de semivariância anisotrópica e verificação de direções privilegiadas. Há 5 passos essenciais na verificação direcional: 1º) assimilação das medidas da malha amostral; 2º) escolha do número de lags mais representativo. Idealmente o intervalo dos lags deve ser igual ou menor ao espaçamento de amostragem e o lag de máxima distância não exceda o comprimento ou largura da malha; 3º) recorte circular rente ao lag de máxima distância; 4º) delimitação angular de deslocamento do vetor direção ( $h$ ) em ambos lados do eixo  $y$  ou norte (aqui adotado  $30^\circ$  como padrão); 5º) Rotação do vetor em sentido horário para visualização da semivariância em cada direção angular e identificação dos eixos de anisotropia (se apresentar).

A  $\chi$  apresenta semivariâncias distintas de acordo com a direção, e de modo geral, as tendências direcionais são uniformes e bem definidas. No entanto, também ocorrem áreas com pequenas flutuações nas semivariâncias que são insuficientes para caracterizar uma anisotropia. Especificamente, a  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  nas áreas de cupuaçu, floresta e guaraná exibem um leque mais uniforme de menores semivariâncias fluando entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$  (exceção para as camadas 0,1-0,2 m em cupuaçu e 0,05-0,1 m da floresta), causando tendências direcionais (Figura 18 e 19). Logo, as direções  $0^\circ$  e  $135^\circ$  dos semivariogramas manifestam comportamentos próximo à origem mais bem definidos e próximos de 0, seguindo um crescimento estacionário que pode ser representado por um processo esférico, exponencial ou um aninhamento destes. Em contraste, elevadas semivariâncias desuniformes são encontradas entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  destas mesmas áreas, distorcendo os semivariogramas direcionados a  $45^\circ$  e  $90^\circ$  a um comportamento na origem distante de 0, evidenciando alto  $C_0$  e uma não-estacionariedade com o aumento de  $h$ .

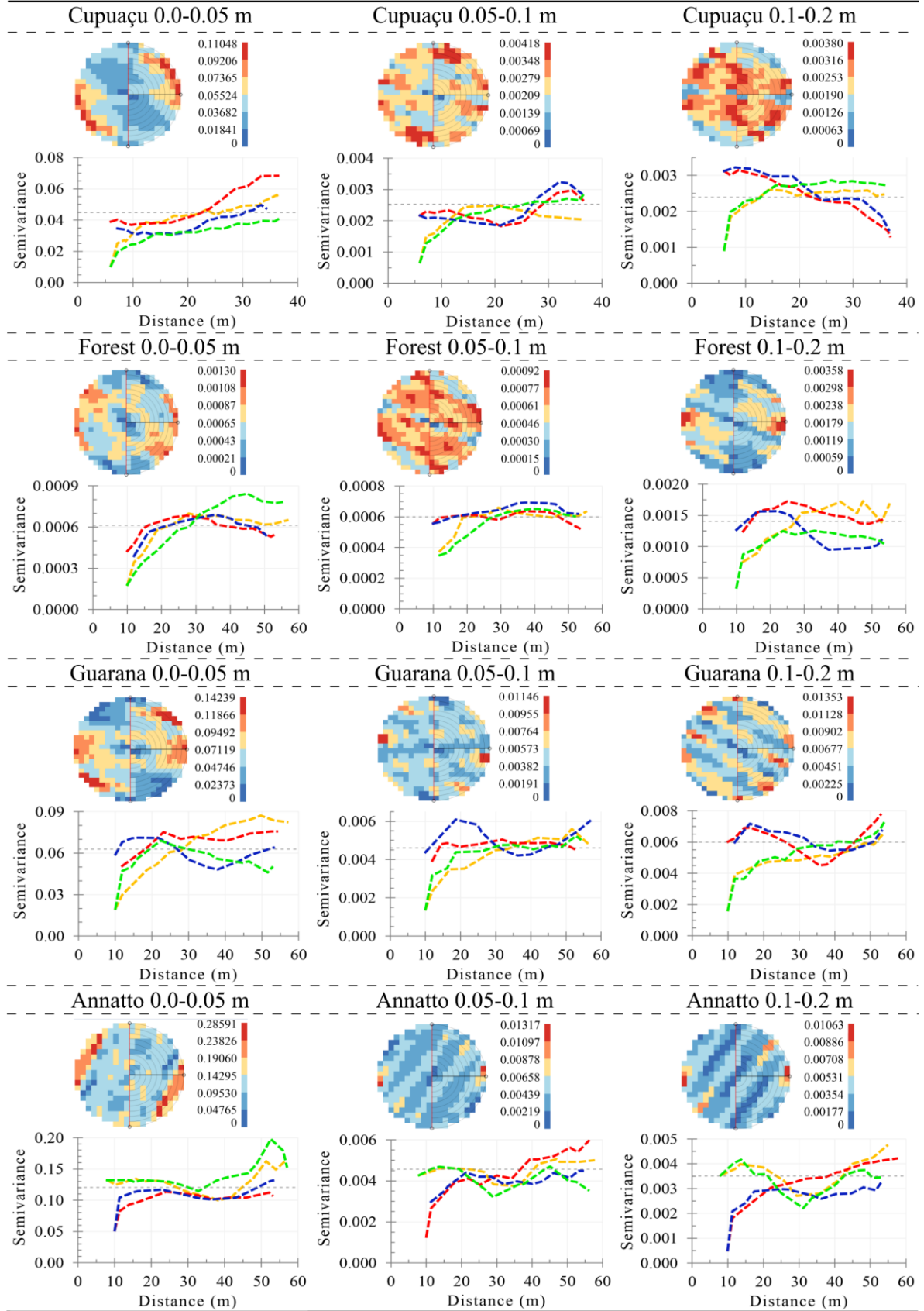


$\chi_{lf}$  ( $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ )



**Figura 1811:** Semivariogramas direcionais e de semivariância de anisotropia. Linhas tracejadas de cores laranja, vermelho, azul e verde correspondem às direções de 0°; 45°; 90° e 135°, respectivamente, sob 30° de tolerância.

$\chi_{hf}$  ( $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ )

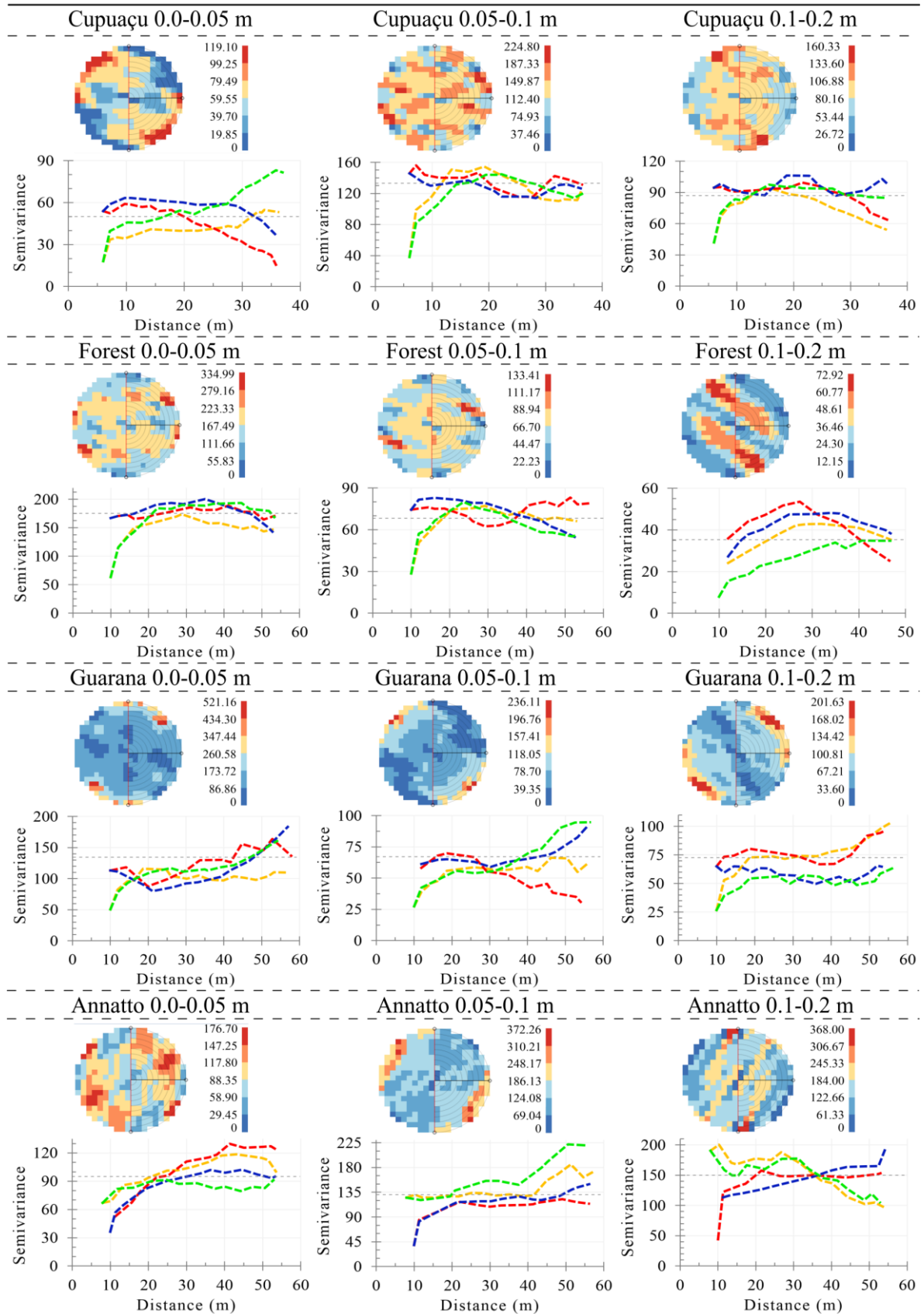


**Figura 19:** Semivariogramas direcionais e de semivariância de anisotropia. Linhas tracejadas de cores laranja, vermelho, azul e verde correspondem às direções de 0°; 45°; 90° e 135°, respectivamente, sob 30° de tolerância.

Cada área exibiu particularidades no comportamento da  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$ . A superfície da área de cupuaçu, por exemplo, mostrou alta continuidade nas direções 45° e 90° e provavelmente apenas um modelo com alcance que se estabilize apenas assintoticamente (e.g. gaussiano) forneceria os melhores ajustes para explicar sua variabilidade espacial. Já a área de guaraná revelou que a maior aleatoriedade de semivariância das direções 45° e 90° são responsáveis pelo efeito *hole* visto no semivariograma isotrópico (Figura 16), e que este efeito não só estava presente na subsuperfície, como também na superfície da área. Por outro lado, a discrepante semivariância tendendo à direção 135° na superfície da floresta permitiu identificar visualmente uma anisotropia combinada para a  $\chi_{af}$  (Figura 19), comprovada através da alta semivariância e distância em que o processo passa a ser estacionário em relação às semivariâncias das demais direções.

Em contraste, a  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  na área de urucum apresentou pequenas flutuações na semivariância situadas entre 0° e 80°, mas com ligeiro aumento desuniforme a partir do 8° lag (50 m) entre 80° a 135°, caracterizando possíveis zonas tendenciosas (Figura 18 e 19). Essas tendências direcionais causaram o efeito contrário visto nas demais áreas: as direções 0° e 135° apresentam comportamento próximo à origem distante de 0 e mais espalhado conforme o aumento de  $h$ , enquanto que as direções 45° e 90° são mais representativas de um processo estacionário de segunda ordem.

A  $\chi_{fd}$  apresentou padrões espaciais anisotrópicos diferentes para cada área e camada avaliada. A princípio, a subsuperfície de cupuaçu aparenta ausência de anisotropia, mas a superfície mostra diferentes semivariâncias para cada direção (Figura 20). A superfície das áreas de floresta e guaraná mostram que a semivariância a 90° da  $\chi_{fd}$  está mediana entre as outras direções, evidenciando ausência de anisotropia zonal. No entanto, a subsuperfície destas áreas exibem claras tendências zonais no sentido transversal W-N a E-S (325°-135°) que implicam em diferentes semivariâncias de acordo com a direção. Em contraste, a  $\chi_{fd}$  na área de urucum manifesta características diferentes para cada camada, de modo que, na superfície parece não haver anisotropias, em 0,05-0,1 m há o surgimento de anisotropias aos 50 m de distância da origem e, em 0,1-0,2 m os semivariogramas direcionados à 0° e 135° convergem com os direcionados à 45° e 90° anulando a hipótese de anisotropias.

$\chi_{fd}$  (%)

**Figura 20:** Semivariogramas direcionais e de semivariância de anisotropia. Linhas tracejadas de cores laranja, vermelho, azul e verde correspondem às direções de 0°; 45°; 90° e 135°, respectivamente, sob 30% de tolerância.

### 6.3.5. Correção anisotrópica e densidade amostral da $\chi$

A modelagem de cada plot direcional dos semivariogramas isotrópicos revelou cada tipo de anisotropia presente nas medidas de  $\chi$  para os Argissolos natural e cultivados no Amazonas (Tabela 6). Uma combinação da anisotropia zonal e geométrica é a principal forma de anisotropia encontrada nos Argissolos, mas há áreas que mostram apenas anisotropia zonal ou geométrica dependendo da camada avaliada. Em 0,1-0,2 m da área de urucum, a  $\chi_{fd}$  não manifestou anisotropia.

**Tabela 6:** Tipos de anisotropia espacial encontrada para a  $\chi$  de Argissolos no sul do Amazonas.

Áreas	Camada 0,00 – 0,05 m			Camada 0,05 – 0,1 m			Camada 0,1 – 0,2 m		
	$\chi_{bf}$	$\chi_{af}$	$\chi_{fd}$	$\chi_{bf}$	$\chi_{af}$	$\chi_{fd}$	$\chi_{bf}$	$\chi_{af}$	$\chi_{fd}$
Cupuaçu	Z	C	C	C	G	G	C	C	C
Floresta	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Guaraná	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Urucum	C	C	Z	C	Z	C	C	C	A

$\chi_{bf}$ : SM de baixa frequência;  $\chi_{af}$ : SM de alta frequência;  $\chi_{fd}$ : SM de frequência dependente; Z: Zonal; G: Geométrica; C: combinada; A: Ausente.

Dessa maneira, a procedência à correção e ajuste de um modelo anisotrópico esférico mostrou parâmetros com valores diferentes dos encontrados para os modelos isotrópicos, de modo que se tornam mais desiguais de acordo com a severidade da anisotropia (Tabela 7 e Figura 16). Os resultados da  $R$  e  $\theta$  mostraram que não há presença de anisotropia severa ( $R > 4,0$ ), mas o seu ajuste na faixa de 2,0 indica que a força da anisotropia da  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{fd}$  é mediana na maioria das áreas. No entanto, áreas como a de urucum em que as frequências de  $\chi$  mostram valores de  $R$  e  $\theta$  próximos de 1,0 e  $90^\circ$ , respectivamente, revelam que a anisotropia fracamente afeta o processo de krigagem.

**Tabela 7:** Parâmetros do modelo esférico ajustados aos semivariogramas experimentais omnidirecionais após correção anisotrópica da SM para cada uso do solo e camada avaliada.

	Camada 0,00 – 0,05 m				Camada 0,05 – 0,1 m				Camada 0,1 – 0,2 m			
	Cup	Flor	Guar	Uruc	Cup	Flor	Guar	Uruc	Cup	Flor	Guar	Uruc
	$\chi_{bf}$											
$C_0$	$8e^{-3}$	$1e^{-4}$	$1e^{-3}$	$1e^{-3}$	$1e^{-4}$	$1e^{-5}$	$1e^{-3}$	$1e^{-4}$	$1e^{-4}$	$1e^{-5}$	$1e^{-4}$	$1e^{-4}$
$C_0+C$	$5,6e^{-2}$	$1,0e^{-3}$	$9,3e^{-2}$	$1,6e^{-2}$	$3,7e^{-3}$	$9,0e^{-4}$	$1,2e^{-2}$	$7,4e^{-3}$	$3,2e^{-3}$	$1,4e^{-3}$	$7,2e^{-3}$	$4,5e^{-3}$
$a$	57,0	51,1	80,0	28,0	35,0	45,0	70,0	47,5	22,2	40,0	80,0	43,0
$R$	2,0	2,0	2,0	1,3	1,5	1,9	2,2	2,0	2,0	2,3	2,0	1,2
$\theta$	117	193	115	57	123	106	90	84	128	205	104	117
	$\chi_{af}$											

$C_0$	$1e^{-2}$	$1e^{-5}$	$1e^{-3}$	$2e^{-3}$	$1e^{-4}$	$1e^{-5}$	$1e^{-4}$	$1e^{-4}$	$1e^{-4}$	$1e^{-4}$	$1e^{-4}$	$1e^{-4}$
$C_0+C$	$4,5e^{-2}$	$6,5e^{-4}$	$8,8e^{-2}$	0,12	$2,4e^{-3}$	$6,2e^{-4}$	$7,5e^{-3}$	$4,2e^{-3}$	$2,5e^{-3}$	$1,4e^{-3}$	$7,7e^{-3}$	$3,2e^{-3}$
$a$	55,0	44,5	55,0	29,1	25,0	42,7	82,0	56,5	18,5	47,9	80,0	25,0
$R$	1,7	1,6	2,0	1,4	2,0	2,0	2,0	1,4	2,0	1,5	2,0	1,2
$\theta$	120	96	206	35	125	115	112	100	130	113	102	80
$\chi_{fd}$												
$C_0$	2,6	5,0	10,0	1,0	5,0	5,0	1,0	14,0	1,0	5,0	1,0	120
$C_0+C$	55,0	170,0	132,5	98,7	133,2	63,0	72,8	126,0	88,0	36,0	65,9	30
$a$	29,5	28,0	67,5	40,0	30,0	36,7	49,2	49,2	15,0	50,0	43,5	35,0
$R$	2,0	2,0	1,7	1,3	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	1,2	1,0
$\theta$	5	115	185	30	130	186	128	89	203	105	95	0

Cup: Cupuaçu; Flor: Floresta; Guar: Guaraná; Uru: Urucum.  $\chi_{bf}$ : SM de baixa frequência;  $\chi_{af}$ : SM de alta frequência;  $\chi_{fd}$ : SM de frequência dependente.  $C_0$ : efeito pepita;  $C_0+C$ : patamar;  $a$ : alcance;  $R$ : razão de anisotropia (adimensional);  $\theta$ : ângulo de anisotropia (em graus).

Os alcances de correlação espacial aumentaram com a correção, de modo que, em cupuaçu, a  $\chi_{bf}$  passou a ter  $a$  de variando de 22,2 m a 57 m; em floresta, o  $a$  variou de 40 m a 51,1 m; em guaraná, de 70 m a 80 m; e em urucum, de 28 m a 47,5 m (Tabela 7). Valores de  $a$  expressivamente maiores também foram observados para a  $\chi_{af}$  e  $\chi_{fd}$ . Em contraste, os valores do efeito pepita  $C_0$  diminuíram, e passaram a representar menor porcentagem da variação total ( $C_0+C$ ) dos modelos corrigidos em comparação aos modelos isotrópicos.

Dessa maneira, a correção anisotrópica se mostrou eficiente na melhoria da representação espacial da  $\chi$ , permitindo que os valores de correlação obtidos possam ser usados para estimar a densidade amostral mínima (DAM) necessária para determinar cada frequência da  $\chi$  nos Argissolos (Tabela 8). Assim, a DAM determinada para a  $\chi_{bf}$ ,  $\chi_{af}$  e  $\chi_{fd}$  em toda a camada de 0,0-0,2 m, foi respectivamente de: 20, 29 e 45 pontos  $ha^{-1}$  em cultivo de cupuaçu; 6, 6 e 13 pontos  $ha^{-1}$  na área de floresta; 2, 3 e 5 pontos  $ha^{-1}$  na área de guaraná; e de 13, 16 e 8 pontos  $ha^{-1}$  na área cultivada com urucum.

**Tabela 8:** Densidade amostral mínima baseada no alcance da correlação espacial corrigida para a suscetibilidade magnética de Argissolos natural e agrícolas em Canutama, Amazonas.

Propriedades	Cupuaçu		Floresta		Guaraná		Urucum	
	Alcance (m)	Nº pontos (ha)	Alcance (m)	Nº pontos (ha)	Alcance (m)	Nº pontos (ha)	Alcance (m)	Nº pontos (ha)
<b>0,00 – 0,05 m</b>								
$\chi_{bf}$	57,0	3	51,1	4	80,0	2	28,0	13
$\chi_{af}$	55,0	3	44,5	5	55,0	3	29,1	12
$\chi_{fd}$	29,5	12	28,0	13	67,5	2	40,0	6
<b>0,05 – 0,10 m</b>								
$\chi_{bf}$	35,0	8	45,0	5	70,0	2	47,5	5

$\chi_{af}$	25,0	16	42,7	6	82,0	2	56,5	3
$\chi_{fd}$	30,0	11	36,7	8	49,2	4	49,2	4
<b>0,10 – 0,20 m</b>								
$\chi_{bf}$	22,2	20	40,0	6	80,0	2	43,0	6
$\chi_{af}$	18,5	29	47,9	4	80,0	2	25,0	16
$\chi_{fd}$	15,0	45	50,0	4	43,5	5	35,0	8

$\chi_{bf}$ : SM de baixa frequência;  $\chi_{af}$ : SM de alta frequência;  $\chi_{fd}$ : SM de frequência dependente.

## 6.4. DISCUSSÕES

### 6.4.1. Textura magnética nos Argissolos

Os parâmetros magnéticos além de fornecer a concentração total das partículas com algum tipo de comportamentos magnético, também nos expõe sua mineralogia, estado de domínio e os tipos de processos ambientais decorrentes (Liu et al., 2012). Os valores encontrados para a  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{af}$  são determinados pelo material de origem, redistribuição do solo e processos pedogênicos, tendendo a serem elevados na superfície para solos originados a partir de materiais fracamente magnéticos (Yu et al., 2017). Assim, o aprimoramento superficial encontrado nas áreas cultivadas, assim como a ausência de magnetita litogênica, indicam a predominância dos processos pedogênicos atuando sobre os materiais originários fracamente magnéticos dos Argissolos. Esses processos produzem minerais magnéticos de grão fino que registram as informações das condições climáticas e ambientais presentes durante a formação do solo (Maxbauer et al., 2017).

Os valores de  $\chi_{bf}$  abrangendo de 0,26 a  $0,53 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  estão próximos aos encontrados por Santos et al. (2012) no Brasil, e são similares com pesquisas voltadas também para solos cultivados e pastejados (Yu et al., 2017; Liu et al., 2018; Ding et al., 2020). No entanto, os valores de  $\chi_{fd}$  estão demasiadamente altos, o que deve ter sido ocasionado pela presença de materiais diamagnéticos que elevam a  $\chi_{fd}$  a valores errôneos. Então, provavelmente os altos teores de CO (1-2%), o qual é um componente diamagnético, contribuíram em peso para a elevação dos valores lidos. Ainda, pensa-se que o mineral caulinita característico da região e presente em abundância (Teixeira et al., 2010), o qual é diamagnético ( $\chi_{bf} = -0,019 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ), também é outro componente responsável pelo elevado aprimoramento SP encontrado neste estudo (Figura 15).

Todavia, as evidências pedogênicas são evidentes nos Argissolos, como a presença de Mh pedogênica ( $3 \text{ g kg}^{-1}$ ) encontrada na área de urucum, a qual manifesta alta  $\chi$ . Esse traço de Mh pode ser possivelmente um produto da queima da floresta antes da implantação da cultura. Durante a queima da floresta Amazônica, dependendo da duração e intensidade do fogo, a

temperatura do solo pode chegar a 600°C (Soares, 1977). Conforme há aumento na temperatura do solo, ocorrem modificações na sua mineralogia. Alcançando 250°C ocorre a transformação de Gt em Hm por desidroxilação (Costa & Bigham, 2009). A partir dos 400°C, a argila colapsa por desidratação e quebra do seu lattice estrutural (Neary et al., 2008). Chegando aos 500°C na presença de MO, a Hm é convertida para Mh por desidratação e, finalmente, próximos aos 600°C a Gt também leva a formação de Mh ultrafina, diminuindo os teores de Gt e Hm do solo (Ketterings et al., 2000; Costa & Bigham, 2009). Este raciocínio faz sentido ao notar que a mesma área com a presença da Mh possui baixo teor de Hm e o menor teor de Gt dentre as demais áreas (Tabela 5).

#### **6.4.2. Comportamento espacial anisotrópico e densidade amostral da $\chi$**

Os semivariogramas direcionais juntamente com os gráficos de semivariância anisotrópica indicaram a presença de anisotropias, as quais devem ser corrigidas para um processo circular radial (isotrópico), principalmente em pesquisas com reduzida quantidade amostral (Guedes et al., 2013). A correção e o ajuste de um modelo teórico para o novo semivariograma omnidirecional fornece melhores acurácias dos mapas de variabilidade espacial, o que trará vantagens econômicas ao poder traçar designs amostrais otimizados para posteriores estudos da variabilidade espacial na área (Guedes et al., 2008).

A predominância das duas formas de anisotropia evidenciou a alta variabilidade direcional da  $\chi$ , o que implica em diferentes desvios no alcance e na máxima semivariância dos dados. Exceto em 0,0-0,1 m de cupuaçu e 0,0-0,05 m e urucum, essa forma de anisotropia ocorrente para a  $\chi_{bf}$  e  $\chi_{fd}$  nas áreas reforça a necessidade da correção das tendências espaciais geométricas e zonais no ajuste dos modelos. Incorporar essas tendências aos mapas temáticos é necessária mais ainda para valores de razão de anisotropia ( $R$ ) maior que 2, porque indica que a anisotropia passa a influenciar mais fortemente a precisão da interpolação por krigagem (Guedes et al., 2013).

Por outro lado, a proporção relativa dos parâmetros do novo modelo omnidirecional, principalmente o  $C_0$  e o  $C_0+C$ , os quais expõem a aleatoriedade e grau de dependência espacial da variável, são essenciais na decisão da aceitação ou negação do mapeamento da variável pela interpolação por krigagem. De acordo com Mucha & Wasilewska-Błaszczuk (2012), a estimativa por interpolação só é eficaz se a componente aleatória ( $C_0$ ) representar menos que 50% da variabilidade geral da variável. Nesse contexto, a representatividade da componente aleatória com uso dos modelos isotrópicos já estava dentro do limite aceitável, mas a aplicação da correção para, e somente se, as variáveis com algum tipo de anisotropia, levaram à



diminuição da variabilidade não controlada pela escala de amostragem (microvariabilidade) para quase todas as frequências da  $\chi$ .

Por exemplo, o modelo isotrópico da área de cupuaçu mostrou que a  $\chi_{bf}$  possui um  $C_0$  representando de 27 a 35% do  $C_0+C$ , e que o  $C_0$  da  $\chi_{fd}$  representou de 18 a 30% do  $C_0+C$  na mesma área (Figura 16). No novo modelo omnidirecional, a componente aleatória do modelo não influencia mais do que 14% de toda a semivariância da  $\chi_{bf}$ , e não representa nem 5% do  $C_0+C$  da  $\chi_{fd}$  no mesmo local (Tabela 7). Em contraste, a correção para a  $\chi_{fd}$  na camada de 0,1-0,2 m de urucum, a qual não manifesta anisotropia, levou a uma estimativa errônea da variável, em que a sua variação ao acaso foi 4 vezes maior que a própria variabilidade geral.

Por outro lado, a correção também foi efetiva em aumentar os alcances ( $a$ ) de correlação em relação aos obtidos por isotropia. Esse aumento acarreta diretamente no aumento da variabilidade espacial da variável, o que é essencial para a redução do número de amostragens em pesquisas relacionadas com otimização de designs amostrais (Souza et al., 2009). Contudo, se observou lacunas a respeito da aplicação dos conceitos teóricos na prática em si, apesar da modelagem anisotrópica já ser bem documentada em teoria. Segundo Vieira (1995), a anisotropia não altera o tipo de hipótese satisfeita da dependência espacial. No entanto, dependendo do número de pontos, diferenças mínimas entre os parâmetros dos modelos isotrópicos e direcionais detectam anisotropia, mas não afetam a precisão da krigagem. Um exemplo deste caso aconteceu com Barbosa et al. (2019), os quais verificaram a presença de anisotropia geométrica em uma área cultivada com soja e utilizaram pacotes de algoritmos do software R para delimitar zonas de manejo, mas os mapas gerados com e sem correção anisotrópica não mostraram diferença estatística.

Esse momento crítico na escolha de aplicar ou não a correção por causa das diferenças mínimas ainda não foi bem elucidado na literatura, e só é possível ter certeza após todo o processo de correção e modelagem em que se obtém os valores de  $R$  e  $\theta$ , o que demanda de tempo para todo o procedimento. Neste estudo, os gráficos de semivariância foram utilizados como indicadores da presença de anisotropia, mas todas as direções foram modeladas independentemente da sua presença, seguido da correção e ajuste do novo modelo omnidirecional. Com isso, pôde-se observar que o desvio padrão do  $C_0$ ,  $C_0+C$  e  $a$  dos semivariogramas direcionais pode ser usado como indicador do poder da anisotropia antes mesmo de aplicar a correção. Por exemplo, se uma dada variável possui um alcance de 80 m, mas ao subdividir o modelo em 4 direções distintas, o  $a$  retornou valores de 77, 83, 85 e 85 m, o desvio padrão do  $a$  é de 3,78. Então, as direções 3 e 4 (85 e 85 m) que extrapolaram os limites do desvio padrão em relação aos 80 m obtido no modelo isotrópico são indicadores que a

correção geométrica mostrará valores de  $R$  acima de 1,0, ou seja, a força da anisotropia geométrica seria o suficiente para afetar a precisão da krigagem.

Todavia, os resultados encontrados neste estudo são positivos, o que permitiu utilizar os alcances de correlação otimizados para o determinar o número mínimo de amostras necessárias para a determinação da  $\chi$  em cada tipo de uso do solo (Tabela 8). Os resultados são consistentes com os encontrados por Oliveira et al. (2015) para áreas de floresta e pastagem no Amazonas, em que a elevada distância de correlação acarretou em reduzida densidade amostral por hectare. Assim, 20 amostras por hectare são suficientes para a determinação da  $\chi_{bf}$  em condições de estudo semelhante até uma profundidade de 20 cm com boa representatividade para qualquer uso do solo. Para a  $\chi_{fd}$ , ao menos 45 pontos por ha são requeridos para o seu estudo sob qualquer manejo do solo.

Positivamente, esses resultados possibilitam ainda utilizar a “regra geral da metade do alcance do variograma” para outros estudos baseados em malha em condições de manejo semelhante (Oliver, 2010). Isso quer dizer que se pode usar a metade do alcance de dependência espacial obtido em cada frequência da  $\chi$  como o limite de intervalo de amostragem sem que haja super ou subamostragem e, ao mesmo tempo, assegure a correlação espacial em estudos futuros. Assim, com exceção do Argissolo cultivado com cupuaçu, estudos com malhas ainda maiores em tamanho e espaçamento que as usadas neste trabalho podem ser utilizadas sem risco da perda de correlação espacial. No entanto, vale ressaltar que pontos mais adensados garantem a maior representatividade das condições do campo e, conseqüentemente, maior precisão durante a interpolação dos dados, o que deve ser levado em conta principalmente na delimitação de zonas de manejo.

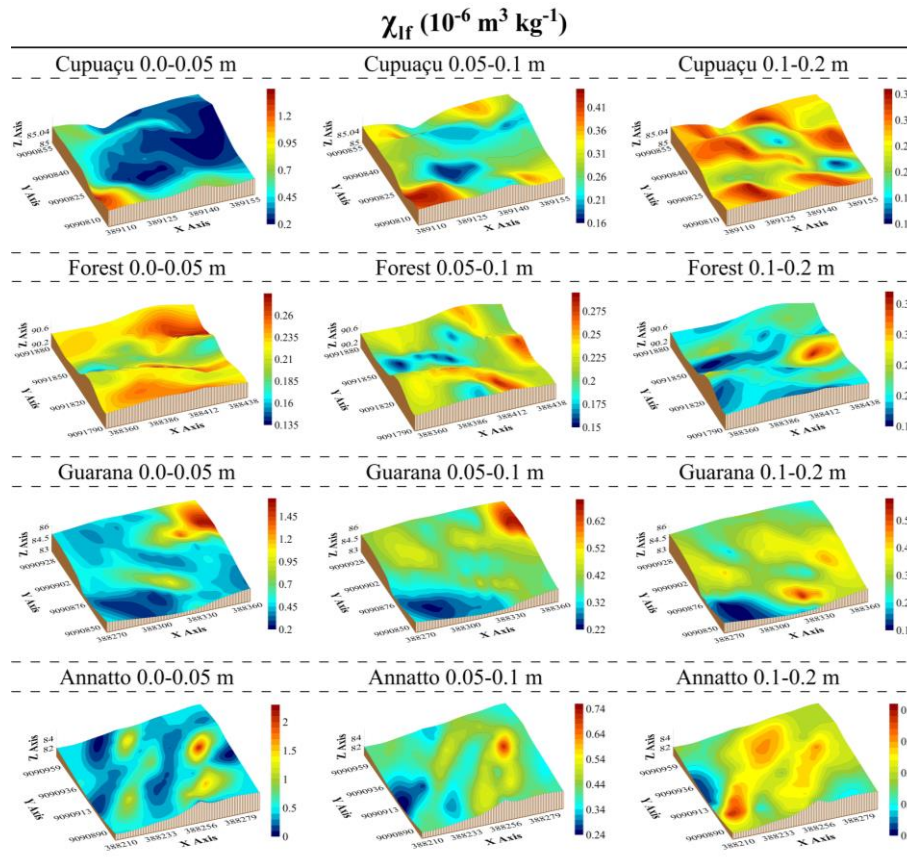
#### **6.4.3. Traços anisotrópicos na distribuição espacial da $\chi$**

Modelos anisotrópicos descrevem características espaciais com maior nível de detalhes da região amostrada, porque consideram a presença de pequenos desvios direcionais. Esses modelos geralmente requerem o uso da krigagem para descrever a complicada dependência espacial direcional encontrada na prática (Crawford & Hergert, 1997). Isto porque a krigagem prevê o processo espacial  $Z(x_i)$  em locais arbitrários  $x_i$ , por mínimos quadrados, fornecendo as melhores previsões imparciais não lineares no sentido de variação mínima. Sua implantação requer apenas o conhecimento do semivariograma e os valores dos parâmetros ajustados ao seu modelo (Facas et al., 2010; Oliver & Webster, 2014).

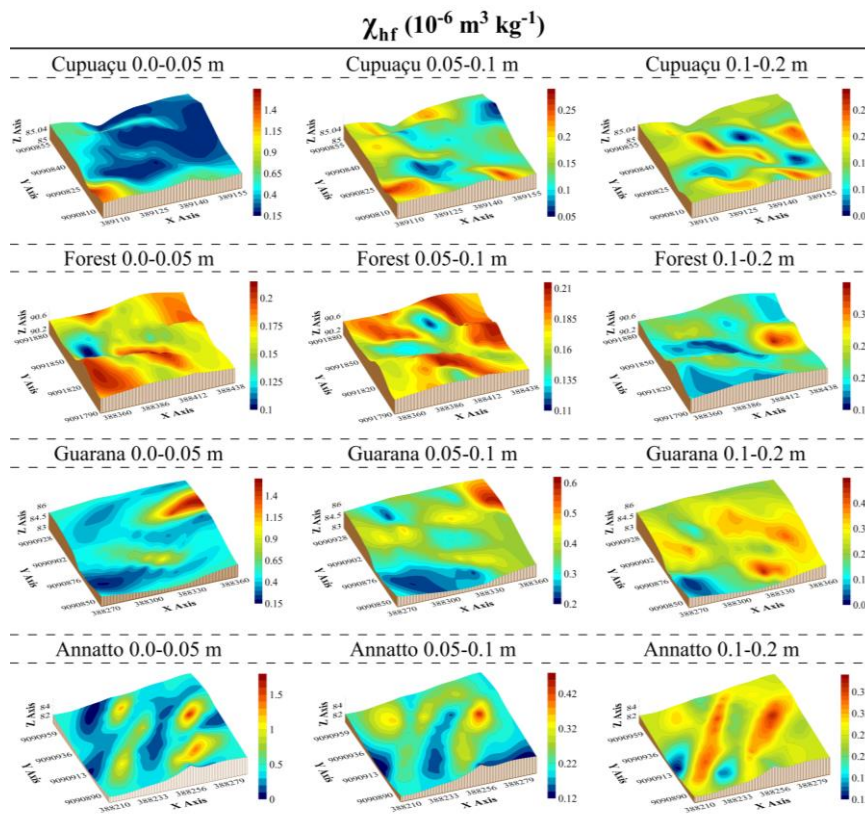
A funcionalidade da incorporação da tendência geométrica dentro da área de previsão redimensionou os mapas em uma forma isotrópica através dos valores de  $R$ , o qual reescalou

os dados espaciais na direção do menor alcance de correlação. Já o alinhamento da anisotropia zonal com a direção do grid serviu para indicar como as tendências direcionais afetam o processo isotrópico, e como necessitam de atenção especial durante o manejo da variabilidade espacial da variável. Desta forma, os mapas confeccionados mostram claramente os padrões da variabilidade considerando os aspectos zonais (Figura 21, 22 e 23), em que as manchas de maior e menor  $\chi$  em cada frequência medida dentro dos Argissolos refletem as tendências direcionais da semivariância anisotrópica mostrada nas Figuras 18, 19 e 20.

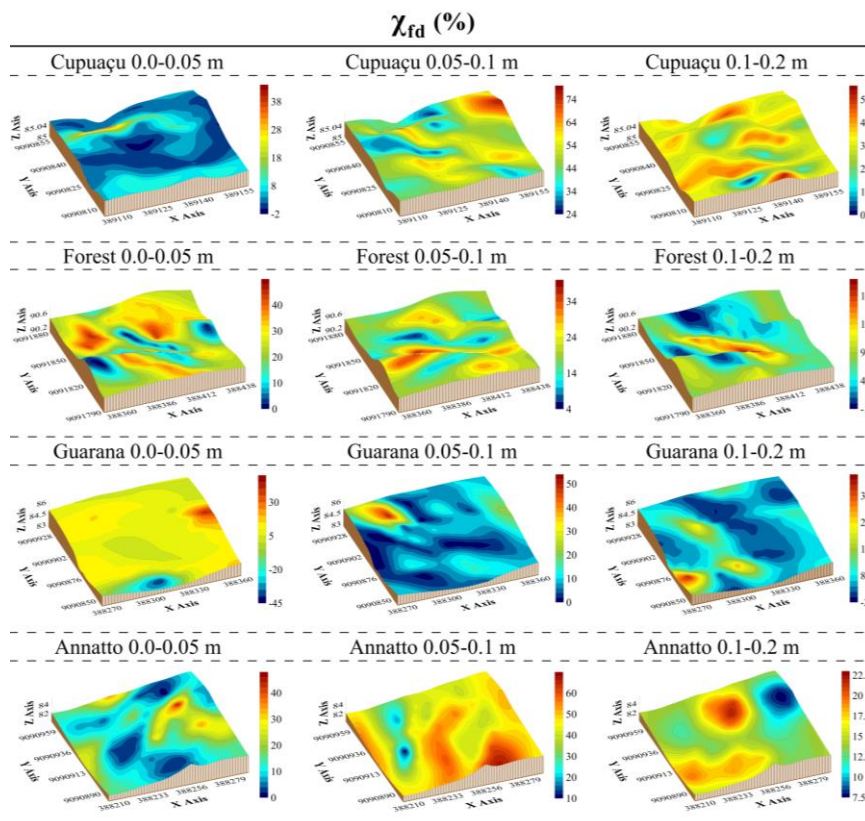
Assim como previsto pela estatística clássica (Figura 12), as zonas mais suscetíveis à  $\chi_{bf}$  nas áreas cultivadas diferem da área de floresta por um aprimoramento magnético na superfície que decai em profundidade. Na superfície das áreas de guaraná e urucum, houve manchas zonais em que a escala de  $\chi_{bf}$  alcança de 0,2 a 1,5 e de 0,0 a 2,0, respectivamente. As zonas de menor  $\chi_{bf}$  parecem “escoar em sulcos” para as partes mais baixas do terreno, onde apresentam-se depositadas. Já nas suas subsuperfície, as zonas mais suscetíveis atingem no máximo uma escala de 0,5 (Figura 21). Em contraste, os locais mais suscetíveis na área natural atingem uma faixa escalar de 0,3, sem grandes variações com o aprofundamento do solo, o que foi bastante semelhante aos comportamentos observados nos mapas da  $\chi_{af}$  (Figura 22).



**Figura 12:** Linhas de tendência média da suscetibilidade magnética de massa específica em baixa frequência versus frequência dependente para camada de 0,0-0,2 m de Argissolos.



**Figura 13:** Linhas de tendência média da suscetibilidade magnética de massa específica em baixa frequência versus frequência dependente para camada de 0,0-0,2 m de Argissolos.



**Figura 14:** Linhas de tendência média da suscetibilidade magnética de massa específica em baixa frequência versus frequência dependente para camada de 0,0-0,2 m de Argissolos.

Por outro lado, o aprimoramento da  $\chi_{fd}$  com um padrão espacial altamente heterogêneo predomina na superfície da floresta, mas decai drasticamente em profundidade, diferentemente da área cultivada com cupuaçu, a qual tende a aumentar a  $\chi_{fd}$  em subsuperfície (Figura 23). Algumas peculiaridades são encontradas na superfície da área de guaraná, a qual mostrou alta homogeneidade do padrão espacial da  $\chi_{fd}$  ao longo da área amostra. Na área de urucum, os traços de anisotropia são pequenos na superfície, mas em 0,1-0,2 m onde não houve presença de anisotropia se percebe um processo radial de variabilidade representando perfeitamente um processo isotrópico. Essas diferenças entre os mapas anisotrópicos e o isotrópico expressam traços característicos, em que os modelos anisotrópicos se destacam principalmente no nível de detalhe das sub-regiões, representando melhor os efeitos da distância e direção dos padrões espaciais das variáveis.

## 6.5. CONCLUSÕES

A medidas de  $\chi$  evidenciaram a dominância dos processos pedogênicos sobre os Argissolos, com predominância de partículas superparamagnéticas. No entanto, a real porcentagem dos tamanhos de cada fração magnética não pôde ser quantificada devido à presença considerável de componentes diamagnéticos no solo, os quais elevaram a  $\chi_{fd}$  a valores extremamente altos.

A análise anisotrópica confirmou a presença de todos os tipos de anisotropia nos Argissolos cultivados e sob floresta, as quais foram submetidas à correção. Os novos modelos omnidirecionais mostraram se adequar as tendências direcionais dentro das áreas, além fornecer a redução do efeito pepita e aumento dos alcances de correlação. No entanto, os resultados mostram que a correção só deve ser feita para áreas com real presença de anisotropia, ou os modelos retornarão parâmetros com valores errôneos.

Os mapas de krigagem gerados a partir da correção anisotrópica fornecem as manchas de tendências zonais de maior ou menor  $\chi$ , que se destacam a nível de sub-regiões. Assim, essas zonas devem ser utilizadas como indicadoras da variabilidade do solo, em que se deve tomar atenção especial durante o seu manejo, principalmente em pesquisas relacionadas à delimitação de zonas de manejo específico. Portanto, mediante os ganhos benéficos aos modelos ajustados e ao aumento da precisão dos mapas temáticos, recomenda-se fortemente a aplicação da correção anisotrópica em estudos geoestatísticos envolvendo variáveis ambientais.

## 6.6. REFERÊNCIAS

- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M. & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22(6):711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Barbosa, D. P.; Bottega, E. L.; Valente, D. S. M.; Santos, N. T.; Guimarães, W. D. & Ferreira, M. D. P. (2019). Influence geometric anisotropy in management zones delineation. **Revista Ciência Agronômica** 50(4):543-551. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190064>
- Boisvert, J. B.; Manchuk, J. G. & Deutsch, C. V. (2009). Kriging in the presence of locally varying anisotropy using non-Euclidean distances. **Mathematical Geosciences** 41(5):585-601. <https://doi.org/10.1007/s11004-009-9229-1>
- Brevik, E. C.; Calzolari, C.; Miller, B. A.; Pereira, P.; Kabala, C.; Baumgarten, A. & Jordán, A. (2016). Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. **Geoderma** 264:256-274. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.05.017>
- Cervi, E. C.; Costa, A. C. S. & Souza Junior, I. G. (2014). Magnetic susceptibility and the spatial variability of heavy metals in soils developed on basalt. **Journal of Applied Geophysics** 111:377-383. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.10.024>
- Chorti, A. & Hristopoulos, D. T. (2008). Nonparametric identification of anisotropic (elliptic) correlations in spatially distributed data sets. **IEEE Transactions on signal processing** 56(10):4738-4751. <https://doi.org/10.1109/tsp.2008.924144>
- Costa, A. C. S. & Bigham, J. M. (2009). Óxidos de ferro. In: Mello, V. F. & Alleoni, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo, Parte 1 – Conceitos Básicos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.695-572.
- Crawford, C. A. G. & Hergert, G. W. (1997). Incorporating spatial trends and anisotropy in geostatistical mapping of soil properties. **Soil Science Society of America Journal** 61(1):298-309. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010043x>
- Dankoub, Z.; Ayoubi, S.; Khademi, H. & Lu, S. G. (2012). Spatial distribution of magnetic properties and selected heavy metals in calcareous soils as affected by land use in the Isfahan region, Central Iran. **Pedosphere** 22(1):33-47. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(11\)60189-6](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(11)60189-6)
- Dearing, J. A. (1999). **Environmental magnetic susceptibility: using the Bartington MS2 system**. 2nd ed. Kenilworth: Chi Publishing, 54p.
- Deutsch, C. V. & Journel, A. G. (1997). **GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide**. 2nd ed. Oxford University Press, New York.
- Ding, Z.; Zhang, Z.; Li, Y.; Zhang, L. & Zhang, K. (2020). Characteristics of magnetic susceptibility on cropland and pastureland slopes in an area influenced by both wind and water erosion and implications for soil redistribution patterns. **Soil and Tillage Research** 199:104568. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104568>
- Ecker, M. D. & Gelfand, A. E. (2003). Spatial modeling and prediction under stationary non-geometric range anisotropy. **Environmental and Ecological Statistics** 10(2):165-178. <https://doi.org/10.1023/A:1023600123559>
- Facas, N. W.; Mooney, M. A. & Furrer, R. (2010). Anisotropy in the spatial distribution of roller-measured soil stiffness. **International Journal of Geomechanics** 10(4):129-135. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000053](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000053)
- Golden Software, LLC. 809 14th Street, Golden, Colorado 80401, U.S.A.

- Golden, N.; Morrison, L.; Gibson, P. J.; Potito, A. P. & Zhang, C. (2015). Spatial patterns of metal contamination and magnetic susceptibility of soils at an urban bonfire site. **Applied Geochemistry** 52:86-96. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.11.004>
- Guedes, L. P. C.; Uribe-Opazo, M. A. & Ribeiro Junior, P. J. (2013). Influence of incorporating geometric anisotropy on the construction of thematic maps of simulated data and chemical attributes of soil. **Chilean Journal of Agricultural Research** 73(4):414-423. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392013000400013>
- Guedes, L. P. C.; Uribe-Opazo, M. A.; Johann, J. A. & Souza, E. G. de. (2008). Anisotropia no estudo da variabilidade espacial de algumas variáveis químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo** 32(6):2217-2226. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832008000600001>
- Guedes, L. P.; Uribe-Opazo, M. A.; Ribeiro Junior, P. J. & Dalposso, G. H. (2018). Relationship between sample design and geometric anisotropy in the preparation of thematic maps of chemical soil attributes. **Engenharia Agrícola** 38(2):260-269. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n2p260-269/2018>
- Hartemink, A. E.; Veldkamp, T. & Bai, Z. (2008). Land cover change and soil fertility decline in tropical regions. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry** 32(3):195-213. Retrieved from: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tbtkagriculture/issue/11609/138357>
- IBM Corp. Released. (2017). **IBM SPSS Statistics for Windows**, Version 25.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- Isaaks, E. H. & Srivastava R. M. (1989). **An introduction to applied geostatistics**. Oxford University Press, New York.
- Jordanova, D.; Jordanova, N. & Petrov, P. (2014). Pattern of cumulative soil erosion and redistribution pinpointed through magnetic signature of Chernozem soils. **Catena** 120:46-56. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.03.020>
- Kämpf, N. & Schwertmann, U. (1982). The 5-M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. **Clays and clay Minerals** 30(6):401-408. <https://doi.org/10.1346/ccmn.1982.0300601>
- Kanevski, M. & Maignan, M. (2004). **Analysis and modelling of spatial environmental data**. Switzerland: EPFL Press, Lausanne.
- Ketterings, Q. M.; Bigham, J. M. & Laperche, V. (2000). Changes in soil mineralogy and texture caused by slash-and-burn fires in Sumatra, Indonesia. **Soil Science Society of America Journal** 64(3):1108-1117. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431108x>
- Li, J. & Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. **Environmental Modelling & Software** 53:173-189. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- Liu, L.; Zhang, K.; Zhang, Z. & Qiu, Q. (2015). Identifying soil redistribution patterns by magnetic susceptibility on the black soil farmland in Northeast China. **Catena** 129:103-111. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.03.003>
- Liu, L.; Zhang, Z.; Zhang, K.; Liu, H. & Fu, S. (2018). Magnetic susceptibility characteristics of surface soils in the Xilingele grassland and their implication for soil redistribution in wind-dominated landscapes: A preliminary study. **Catena** 163:33-41. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.009>
- Liu, Q.; Roberts, A. P.; Larrasoana, J. C.; Banerjee, S. K.; Guyodo, Y.; Tauxe, L. & Oldfield, F. (2012). Environmental magnetism: principles and applications. **Reviews of Geophysics** 50(4). <https://doi.org/10.1029/2012RG000393>

- Maeda, E. E.; Formaggio, A. R. & Shimabukuro, Y. E. (2008). Impacts of land use and land cover changes on sediment yield in a Brazilian Amazon drainage basin. **GIScience & Remote Sensing** 45(4):443-453. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.45.4.443>
- Magiera, T.; Parzentny, H.; Róg, L.; Chybiorz, R. & Wawer, M. (2015). Spatial variation of soil magnetic susceptibility in relation to different emission sources in southern Poland. **Geoderma** 255:94-103. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.028>
- Marques Jr, J.; Siqueira, D. S.; Camargo, L. A.; Teixeira, D. D. B.; Barrón, V. & Torrent, J. (2014). Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma** 219:63-71. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.007>
- Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. **Economic Geology** 58(8):1246-1266. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>
- Matheron, G. (1965). **Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature**. Masson et CIE.
- Maxbauer, D. P.; Feinberg, J. M.; Fox, D. L. & Nater, E. A. (2017). Response of pedogenic magnetite to changing vegetation in soils developed under uniform climate, topography, and parent material. **Scientific reports** 7(1):1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17722-2>
- McKeague, J. & Day, J. (1966). Dithionite-and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal of Soil Science** 46(1):13-22. <https://doi.org/10.4141/cjss66-003>
- Mehra, O. P. & Jackson, M. L. (1958). Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals** 7(1):317-327. <https://doi.org/10.1346/ccmn.1958.0070122>
- Minasny, B. & McBratney, A. B. (2016). Digital soil mapping: A brief history and some lessons. **Geoderma** 264:301-311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>
- Montanari, R.; Souza, G. S. A.; Pereira, G. T.; Marques, J.; Siqueira, D. S. & Siqueira, G. M. (2012). The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture** 13(5):542-552. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-012-9265-6>
- Mucha, J. & Wasilewska-Błaszczyk, M. (2012). Variability anisotropy of mineral deposits parameters and its impact on resources estimation – a geostatistical approach. **Gospodarka Surowcami Mineralnymi** 28(4):113-135. <https://doi.org/10.2478/v10269-012-0037-8>
- Nascimento, C. W. A.; Lima, L. H. V.; Silva, F. L.; Biondi, C. M. & Campos, M. C. C. (2018). Natural concentrations and reference values of heavy metals in sedimentary soils in the Brazilian Amazon. **Environmental Monitoring and Assessment** 190(10):606. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6989-4>
- Neary, D. G.; Ryan, K. C. & DeBano, L. F. (2005, revised 2008). Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. **Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol.4. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.** 250 p. <https://doi.org/10.2737/rmrs-gtr-42-v4>
- Oliveira, I. A. D.; Marques Junior, J.; Campos, M. C. C.; Aquino, R. E. D.; Freitas, L. D.; Siqueira, D. S. & Cunha, J. M. D. (2015). Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39(3):668-681. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140496>



- Oliver, M. A. & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena** 113:56-69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
- Oliver, M. A. (2010). **Geostatistical applications for precision agriculture**. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9133-8>
- Reis, N. J.; Almeida, M. E.; Riker, S. L. & Ferreira, A. L. (2006). **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas**. Manaus: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 125p.
- Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A.; Lumbrreras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A. et al. (2018). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília: Embrapa.**
- Santos, H. L.; Marques Júnior, J.; Matias, S. S.; Siqueira, D. S. & Martins Filho, M. V. (2013). Erosion factors and magnetic susceptibility in different compartments of a slope in Gilbués-PI, Brazil. **Engenharia Agrícola** 33(1):64-74. <https://doi.org/10.1590/s0100-69162013000100008>
- Silva Junior, C. A.; Bochat, C. L. & Carvalho, L. A. de. (2012). Change in soil fertility in Amazonian forest conversion for different systems in the northern state of Para, Brazil. **Bioscience Journal** 28(4):566-572. Retrieved from: <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/13640>
- Silva, A. C.; Whalen, M. T.; Hladil, J.; Chadimova, L.; Chen, D.; Spassov, S.; ... & Devleeschouwer, X. (2015). Magnetic susceptibility application: a window onto ancient environments and climatic variations: foreword. **Geological Society, London, Special Publications** 414(1):1-13. <https://doi.org/10.1144/sp414.0>
- Siqueira, D. S.; Marques Jr, J.; Pereira, G. T.; Barbosa, R. S.; Teixeira, D. B. & Peluco, R. G. (2014). Sampling density and proportion for the characterization of the variability of Oxisol attributes on different materials. **Geoderma** 232-234:172-182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.037>
- Siqueira, D. S.; Marques Jr, J.; Pereira, G. T.; Teixeira, D. B.; Vasconcelos, V.; Júnior, O. C. & Martins, E. D. S. (2015). Detailed mapping unit design based on soil–landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena** 135:149-162. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.07.010>
- Siqueira, D. S.; Marques Júnior, J.; Teixeira, D. D. B.; Matias, S. S. R.; Camargo, L. A. & Pereira, G. T. (2016). Magnetic susceptibility for characterizing areas with different potentials for sugarcane production. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51(9):1349-1358. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900034>.
- Soares, R. V. (1977). **The use of prescribed fire in forest management in the state of Paraná, Brazil**. PhD Thesis, University of Washington, Washington, DC. 203pp.
- Souza Braz, A. M.; Fernandes, A. R. & Alleoni, L. R. F. (2011). Soil attributes after the conversion from forest to pasture in Amazon. **Land Degradation & Development** 24(1):33-38. <https://doi.org/10.1002/ldr.1100>
- Souza, F. G.; Campos, M. C. C.; Brito Filho, E. G.; Cunha, J. M.; Lima, A. F. L.; Sales, M. C. G. & Santos, L. A. C. (2019). Physical attributes of soil under amazon forest conversion for different crop systems in southern Amazonas, Brazil. **Canadian Journal of Soil Science** 99(4):563-574. <https://doi.org/10.1139/cjss-2019-0070>
- Souza, Z. M. D.; Marques Júnior, J. & Pereira, G. T. (2009). Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural** 40(1):48-56. <https://doi.org/10.1590/s0103-84782009005000243>

- Teixeira, D. D.; Marques Jr, J.; Siqueira, D. S.; Vasconcelos, V.; Carvalho Jr, O. A.; Martins, É. S. & Pereira, G. T. (2017a). Sample planning for quantifying and mapping magnetic susceptibility, clay content, and base saturation using auxiliary information. **Geoderma** 305:208-218. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.001>
- Teixeira, P. C.; Donagema, G. K.; Ademir, F.; Teixeira, W. G. (2017b). **Manual de métodos de análise de solo**. – 3. ed., rev. e ampl. – Brasília: Embrapa, 573p.
- Teixeira, W. G.; Arruda, W.; Shinzato, E.; Macedo, R. S.; Martins, G. C.; Lima, H. N. & Rodrigues, T. E. (2010). Solos. In: Maia, M. A. M. & Marmos, J. L. (eds.). **Geodiversidade do estado do Amazonas**. Manaus: CPRM, 275p.
- Thompson, R. & Oldfield, F. (1986). **Environmental magnetism**.
- Vagapov, I. M.; Gugalinskaya, L. A. & Alifanov, V. M. (2013). Spatial variations of the magnetic susceptibility in the profiles of paleocryomorphic soils. **Eurasian Soil Science** 46(3):291-296. <https://doi.org/10.1134/s1064229313030113>
- Valeriano, M. M. & Prado, H. (2001). Técnicas de geoprocessamento e de amostragem para o mapeamento de atributos anisotrópicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo** 25(4):997-1005. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832001000400022>
- Vieira, S. R. (1995). Curso de atualização em conservação do solo - Uso de geoestatística. **Campinas, IAC**, 1 e 2.
- Warrick, A. W. & Nielsen, D. R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. **Applications of Soil Physics** 319-344. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-348580-9.50018-3>
- Webster, R. & Oliver, M. A. (2007). **Geostatistics for environmental scientists**. John Wiley & Sons.
- White, J. G. & Zasoski, R. J. (1999). Mapping soil micronutrients. **Field crops research** 60(1-2):11-26. [https://doi.org/10.1016/s0378-4290\(98\)00130-0](https://doi.org/10.1016/s0378-4290(98)00130-0)
- WRB (World reference base for soil resources). (2014, update 2015). International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **World Soil Resources Reports N° 106**. FAO, Rome, Italia.
- Yamamoto, J. K. & Landim, P. M. B. (2015). **Geoestatística: conceitos e aplicações**. Oficina de textos.
- Yang, P.; Byrne, J. M. & Yang, M. (2016). Spatial variability of soil magnetic susceptibility, organic carbon and total nitrogen from farmland in northern China. **Catena** 145:92-98. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.025>
- Yu, Y.; Zhang, K. & Liu, L. (2017). Evaluation of the influence of cultivation period on soil redistribution in northeastern China using magnetic susceptibility. **Soil and Tillage Research** 174:14-23. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.05.006>
- Zawadzki, J.; Fabijańczyk, P.; Magiera, T. & Rachwał, M. (2015). Geostatistical microscale study of magnetic susceptibility in soil profile and magnetic indicators of potential soil pollution. **Water, Air, & Soil Pollution** 226(5):142. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2395-5>
- Zawadzki, J.; Magiera, T.; Fabijańczyk, P. & Kusza, G. (2012). Geostatistical 3-dimensional integration of measurements of soil magnetic susceptibility. **Environmental monitoring and assessment** 184(5):3267-3278. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2187-3>
- Zimmermann, B.; Elsenbeer, H. & Moraes, J. M. (2006). The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: implications for runoff generation. **Forest ecology and management** 222(1-3):29-38. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.070>