

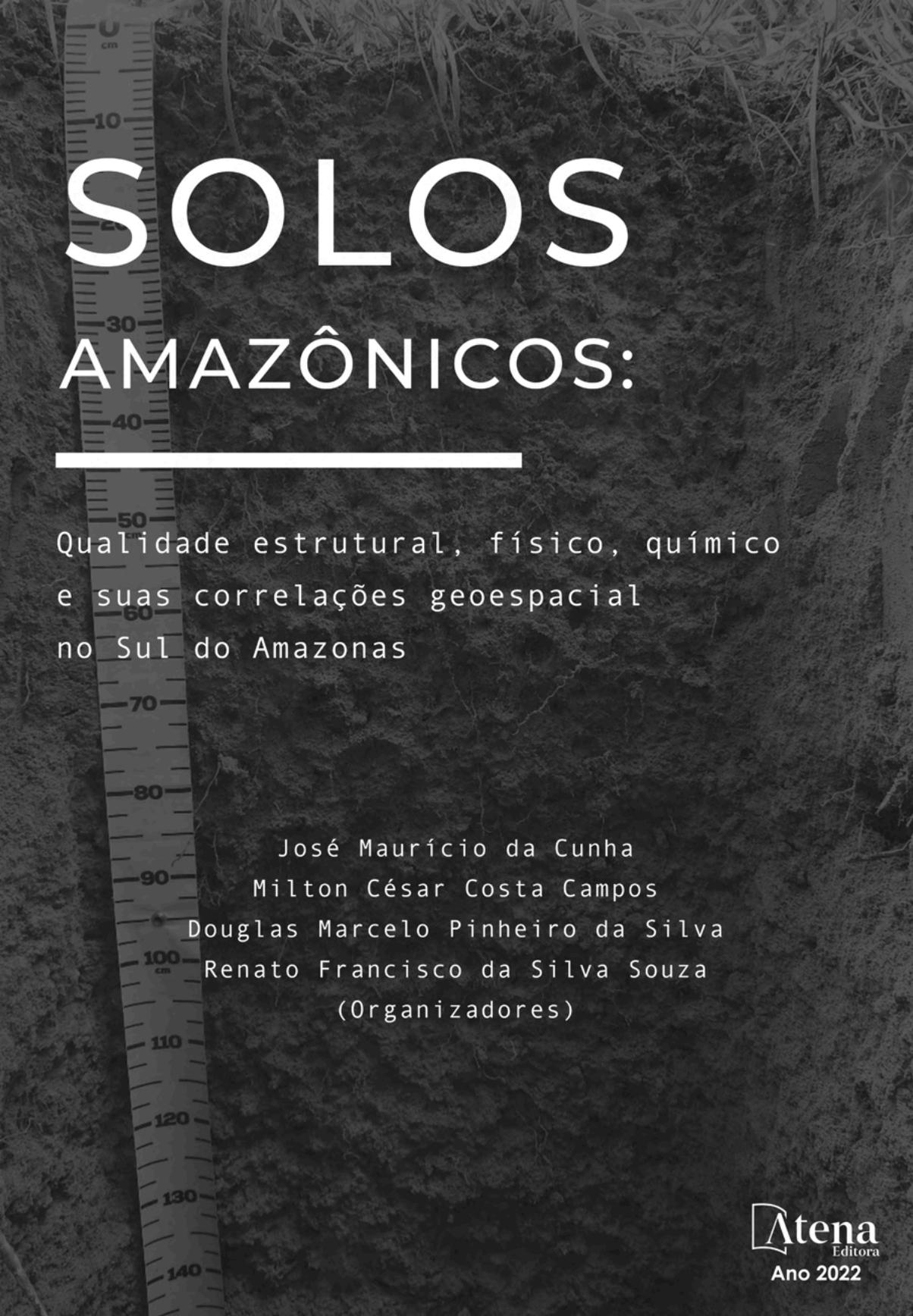


# SOLOS AMAZÔNICOS:

---

Qualidade estrutural, físico, químico  
e suas correlações geoespacial  
no Sul do Amazonas

José Maurício da Cunha  
Milton César Costa Campos  
Douglas Marcelo Pinheiro da Silva  
Renato Francisco da Silva Souza  
(Organizadores)



# SOLOS AMAZÔNICOS:

---

Qualidade estrutural, físico, químico  
e suas correlações geoespacial  
no Sul do Amazonas

José Maurício da Cunha  
Milton César Costa Campos  
Douglas Marcelo Pinheiro da Silva  
Renato Francisco da Silva Souza  
(Organizadores)

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

José Maurício da Cunha

Milton César Costa Campos

Douglas Marcelo Pinheiro da Silva

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano

Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras

Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Universidade do Estado de Mato Grosso



Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará  
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados  
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Dr. Edevaldo de Castro Monteiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Renato Jaqueto Goes – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas



# Solos Amazônicos: atributos físicos, químicos, erodibilidade e suscetibilidade magnética

**Diagramação:** Natália Sandrini de Azevedo  
**Correção:** Mariane Aparecida Freitas  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadores:** José Maurício da Cunha  
Milton César Costa Campos  
Douglas Marcelo Pinheiro da Silva  
Renato Francisco da Silva Souza

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S689 Solos Amazônicos: atributos físicos, químicos, erodibilidade e suscetibilidade magnética / Organizadores José Maurício da Cunha, Milton César Costa Campos, Douglas Marcelo Pinheiro da Silva, et al. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Outro organizador  
Renato Francisco da Silva Souza

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
Modo de acesso: World Wide Web  
Inclui bibliografia  
ISBN 978-65-258-0247-3  
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.473221905>

1. Solo - Uso - Amazônia. I. José Maurício da Cunha (Organizador). II. Milton César Costa Campos (Organizador). III. Douglas Marcelo Pinheiro da Silva (Organizador). IV. Título.

CDD 333.75130981

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)



**Atena**  
Editora  
Ano 2022

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## APRESENTAÇÃO

Os estudos sobre solos da Amazônia, especialmente no Sul-sudeste do Amazonas iniciaram-se com a criação do Grupo de Pesquisa “Solos e Ambiente Amazônico” em 2009 com a implantação do Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente da Universidade Federal do Amazonas em Humaitá, naquela ocasião conseguiu-se congregiar um pequeno grupo de estudantes e professores com trabalhos voltados para estudar as relações entre Solos e Ambiente.

O grupo Solos e Ambiente Amazônico foi crescendo e se consolidando à medida que os Projetos foram sendo aprovados (FAPEAM e CNPq), aqui destaca-se que o projeto intitulado “Impactos no solo da conversão floresta-uso agropecuário na região Sul do Amazonas” aprovado junto ao Edital - FAPESP/FAPEAM em 2009, possibilitou a criação de infraestrutura necessária a pesquisa. Em 2013 duas Dissertações de Mestrado foram defendidas junto ao Programa de Pós-graduação em Agronomia Tropical, a saber: i) Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em Cambissolo e Argissolo na região de Humaitá, AM (Leandro Coutinho Alho); ii) Atributos do solo e emissão de CO<sub>2</sub> em uma área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau na região de Apuí, AM (Douglas Marcelo Pinheiro da Silva) com total suporte da infraestrutura adquirida.

Os projetos de pesquisa aprovados auxiliaram/auxiliam o Grupo de Pesquisa a prover de equipamentos o Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas e o Laboratório de Fitotecnia, o que possibilitou a realização de diversas análises vinculados a Projetos de Iniciação Científica, Trabalhos de Conclusão de Curso de Graduação, Dissertações de Mestrado e Teses de Doutorado favorecendo a geração de conhecimento e formação de recursos humanos altamente qualificadas no interior da Amazônia. Além disso, o grupo de pesquisa também realizou Eventos Científicos e de Popularização da Ciência e publicação de Livros.

Atualmente o grupo de pesquisa coordena diversos Projetos de Pesquisa e de Popularização da Ciência, bem como orientação de trabalhos em nível de Graduação e Mestrado. Dessa forma é possível apresentar esta **Coletânea de Trabalhos em Solos e Ambiente Amazônico** oriundo de várias Dissertações de Mestrado e Tese de Doutorado. Além disso, foi possível fazer parcerias e trazer para este material iniciativas em outras regiões e instituições para colaborar com este trabalho.

O material apresentado está relacionado a duas áreas da Ciência do Solo, a primeira referente aos estudos de Solo no Tempo e no Espaço e a segunda relacionada a Processos e Propriedades do Solo. Importante destacar que no primeiro caso há investigações nos diferentes tipos de material de origem, relevo e suas influencias nos distintos tipos de solos existentes na Amazônia. E no segundo caso estudou-se as interferências das mudanças da

cobertura vegetal (usos e manejos) nos atributos físicos e químicos do solo.

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) que apoiou a realização do **III Simpósio de Ciência do Solo da Amazônia Ocidental**, sendo possível apresentar o material intitulado: **"Solos Amazônicos: atributos físicos, químicos, erodibilidade e suscetibilidade magnética"**.

Milton César Costa Campos.

José Maurício do Lencó

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL ERODIBILITY IN PASTURES AND FOREST AREAS IN THE MUNICIPALITY OF PORTO VELHO, RONDÔNIA

Lucivânia Izidoro da Silva  
Milton César Costa Campos  
Wildson Benedito Mendes Brito  
José Maurício da Cunha  
Alan Ferreira Leite de Lima  
Abdul Luís Hassane

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4732219051>

### **CAPÍTULO 2..... 31**

ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS SOB AMBIENTES NATURAIS E ANTROPIZADOS NA REGIÃO DE HUMAITÁ-AM

Half Weinberg Corrêa Jordão  
Milton César Costa Campos  
José César Frozzi  
Bruno Campos Mantovanelli  
José Maurício da Cunha  
Douglas Marcelo Pinheiro da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4732219052>

### **CAPÍTULO 3..... 69**

SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DE ARGISSOLOS SOB FLORESTA E CULTIVADOS NO SUL DO AMAZONAS

Wildson Benedito Mendes Brito  
Milton César Costa Campos  
Fernando Gomes de Souza  
Alan Ferreira Leite de Lima  
Thalita Silva Martins  
José Maurício da Cunha

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4732219053>

### **CAPÍTULO 4..... 102**

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM ÁREAS SOB CONVERSÃO FLORESTA/PASTAGEM NO NORTE DE RONDÔNIA, BRASIL

Alan Ferreira Leite de Lima  
Milton César Costa Campos  
Bruna Firmino Enck  
Wener da Silva Simões  
Raquel Manhuary de Araújo  
José Maurício da Cunha

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4732219054>

**CAPÍTULO 5..... 142**

**INFLUÊNCIA DO MANEJO E RELEVO NOS ATRIBUTOS DO SOLO E ACÚMULO DE BIOMASSA EM ÁREAS CONVERTIDAS EM PASTAGENS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

Alan Ferreira Leite de Lima  
Milton César Costa Campos  
Thalita Silva Martins  
Wildson Benedito de Mendes Brito  
Lucivânia Izidoro da Silva  
Erika Micheilla Brasil de Paula

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4732219055>

**CAPÍTULO 6..... 164**

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO SOB CONVERSÃO DE FLORESTA AMAZÔNICA PARA DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO NO SUL DO AMAZONAS, BRASIL**

Fernando Gomes de Souza  
Milton César Costa Campos  
José Maurício da Cunha  
Elilson Gomes de Brito Filho  
Elyenayra Nogueira Pinheiro  
Wildson Benedito de Mendes Brito  
Alan Ferreira Leite de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4732219056>

**CAPÍTULO 7..... 188**

**ESTABILIDADE DE AGREGADOS E ESTOQUE DE CARBONO SOB CONVERSÃO DE FLORESTA PARA DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO NO SUL DO AMAZONAS, BRASIL**

Fernando Gomes de Souza  
Milton César Costa Campos  
José Maurício da Cunha  
Thalita Silva Martins  
Alan Ferreira Leite de Lima  
Wildson Benedito de Mendes Brito

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4732219057>

**SOBRE OS ORGANIZADORES ..... 213**

## SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DE ARGISSOLOS SOB FLORESTA E CULTIVADOS NO SUL DO AMAZONAS

*Data de aceite: 01/04/2022*

*Data de submissão: 03/03/2022*

### **Wildson Benedito Mendes Brito**

Mestre em Agronomia Tropical - Universidade Federal do Amazonas

### **Milton César Costa Campos**

Doutor em Ciência do Solo – Universidade Federal da Paraíba

### **Fernando Gomes de Souza**

Doutor em Agronomia Tropical- Universidade Federal de Roraima

### **Alan Ferreira Leite de Lima**

Mestre em Agronomia Tropical - Universidade Federal do Amazonas

### **Thalita Silva Martins**

Graduada em Agronomia - Universidade Federal do Amazonas

### **José Maurício da Cunha**

Doutor em Física Ambiental - Universidade Federal 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 objetiva caracterizar e ampliar o

conhecimento a respeito do sinal e origem das propriedades magnéticas da classe dominante de solos (Argissolos) do Amazonas para futuro monitoramento proxy ambiental. Um Argissolo natural e três cultivados 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, químicas, 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<sup>3+</sup> 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.

## MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF ARGISOLS UNDER FOREST AND CULTIVATED IN SOUTH AMAZON

**ABSTRACT:** Anthropogenic 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 aims to characterize and expand the knowledge about the signal and origin of the magnetic properties of the dominant class of soils (Argisols) of Amazonas for future environmental proxy monitoring. One natural and three cultivated Argisol 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, 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.

### 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., 2019a), 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., 2019b), 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 revolvimento e queima 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 natural e agrícolas, 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.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

### 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 as propriedades. Na referida área, foram selecionados quatro sítios para estudo, sendo um sob floresta nativa (sítio de referência) e três sob cultivos agrícolas, os quais são Urucum (*Bixa orellana*), Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), e Guaraná (*Paullinia cupana*) (Figura 6).

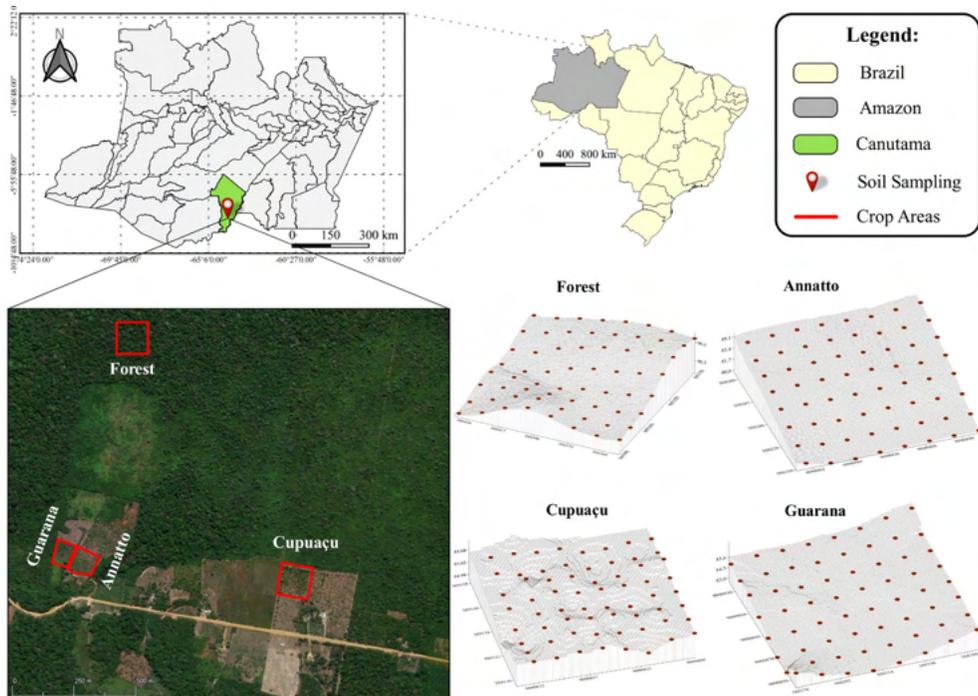


Figura 6: Localização, vista aérea e relevo das áreas de estudo no município de Canutama, sul do Amazonas.

O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico para todas as áreas de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018). 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).

Quanto ao histórico de uso das áreas, guaraná, cupuaçu e urucum são cultivados há 7, 7 e 3 anos, respectivamente, em um terreno com declive médio de 3%. Estas áreas cultivadas são oriundas de uma floresta nativa que foi derrubada, queimada e destocada manualmente para limpeza da área, seguida de implantação das culturas. Desde a implantação das culturas, nunca houve qualquer prática de queima, calagem ou fertilização do solo. Mas, durante o período chuvoso, as plantas daninhas são controladas com glifosato e roçadeira motorizada. Por ocasião da coleta das amostras, observou-se no sítio de cupuaçu um alto volume de biomassa sobre a superfície do solo, provavelmente ocasionado pela ausência de tratos culturais e acúmulo de folhas e de seu relevo mais

plano. Já a floresta é nativa da área e não sofre interferência antrópica, sua cobertura é constituída por árvores adensadas e multiestratificadas entre 20 a 50 metros de altura, sendo classificada como Floresta tropical ombrófila densa.

## 2.2 Metodologia de campo

Para a amostragem, foram estabelecidas malhas de acordo com as dimensões de cada sítio, conforme discriminada a seguir: guaraná e floresta, 70 m x 70 m, com espaçamento entre pontos de 10 m x 10 m; cupuaçu, 42 x 42 m, com espaçamento entre pontos de 6 m x 6 m; urucum, 70 m x 56 m, com espaçamento entre pontos de 10 m 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 camadas: 0,00-0,05 m; 0,05-0,10 m; e 0,10-0,20 m, somando 192 amostras por sítio e 768 amostras no total.

As amostras coletadas foram do tipo deformada (em forma de torrão) e indeformadas. Cada torrão foi seco à sombra e levemente destorroado de forma manual, passando-se metade em peneira de malha de 2,00 mm, compondo a fração terra fina seca ao ar (TFSA), necessário para execução de análises químicas e granulométrica do solo. A outra metade 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 anéis cilíndricos com volume médio de 81,7 cm<sup>3</sup> para realização das demais análises físicas (Teixeira et al., 2017).

## 2.3 Metodologia laboratorial

### 2.3.1 Análises Físicas

Foram realizadas análises 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 inseridos em mesa de tensão (Teixeira et al., 2017). Primeiramente as amostras foram preparadas retirando-se o excesso de solo de suas extremidades, para depois serem saturadas em uma lâmina de água numa 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  $U_g$  foi calculada pela diferença da massa do solo úmido e seco (Eq. 13). A determinação da  $D_s$  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).

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

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

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

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

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

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 mm s<sup>-1</sup>, equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semiângulo de 30°, 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°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.

### 2.3.2 Análises Químicas

Para realização das análises químicas utilizou-se a fração TFSA das amostras. A

acidez potencial (H+Al) foi determinada volumetricamente por meio da titulação de NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup> 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 (Al<sup>3+</sup>) foi obtido utilizando-se KCl 1 mol L<sup>-1</sup> como extrator e NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup> 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 (K<sup>+</sup>), cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e magnésio (Mg<sup>2+</sup>), 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<sub>e</sub>) e potencial (CTC<sub>p</sub>); 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<sub>l</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 (Teixeira et al., 2017).

### 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 CuKα) a uma taxa de varredura de 1° 2θ 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>l</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) (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 (κ, 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:

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

### 2.3.4 Análises estatísticas

Os dados foram avaliados primeiramente pela análise exploratória da estatística descritiva, calculando-se a média, coeficiente de variação e hipótese de normalidade dos dados (teste de Kolmogorov-Smirnov à 5% e 1%). Depois, foi feita 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.

Por fim, foi executada uma análise de agrupamento hierárquico, utilizando da distância euclidiana para medir os acessos do conjunto de variáveis correlacionadas pela ACP, e traçando-se uma linha paralela ao eixo horizontal, onde se encontram as maiores distâncias em que os grupos são formados. O resultado da análise foi representado em forma de dendrograma para facilitar a identificação dos agrupamentos entre atributos em função da  $\chi$ . Ambas AF-CP e análise de agrupamentos foram executadas no software

### 3 I RESULTADOS

#### 3.1 Atributos físicos e químicos dos Argissolos

Os resultados mostram que as áreas de floresta e de cultivos apresentaram textura média (Tabela 1), 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.

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.

Tabela 1: Teste de médias (Tukey; p<0,05) para os atributos físicos e químicos de Argissolos sob diferentes usos em Canutama, Amazonas.

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 1). 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 1). O Argissolo natural 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 1). Apesar da estreita faixa entre seus valores, o teste de médias estratificado por camadas mostra claramente que a floresta detém valores estatisticamente inferiores ( $p \leq 0,05$ ) em relação aos cultivos. Por outro lado, se constata que a acidez trocável ( $Al^{3+}$ ) também está muito alta ( $Al^{3+} > 2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  – Ribeiro et al. (1999)) para todos os tipos de uso, com valores entre 4,34 a 6,20  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  nos Argissolos cultivados e de 4,92 a 5,51  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  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  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), os Argissolos cultivados mostraram valores mais discrepantes (13,40 a 8,40  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ).

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  $\text{mg dm}^{-3}$ ). No entanto, esses teores são estatisticamente superiores aos encontrados para os Argissolos cultivados (variação de 7,21 a 2,59  $\text{mg dm}^{-3}$ ), o que reflete a sua baixa mobilidade e solubilidade em solos de natureza ácida. Já os teores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  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  $K^+$ , 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 ( $CTC_p$ ) exibiram valores dentro de uma faixa considerada como boa (4,61-8,00 para  $CTC_e$  e 8,61-15,00 para  $CTC_p$ ) (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%).

### 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  $\times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  (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).

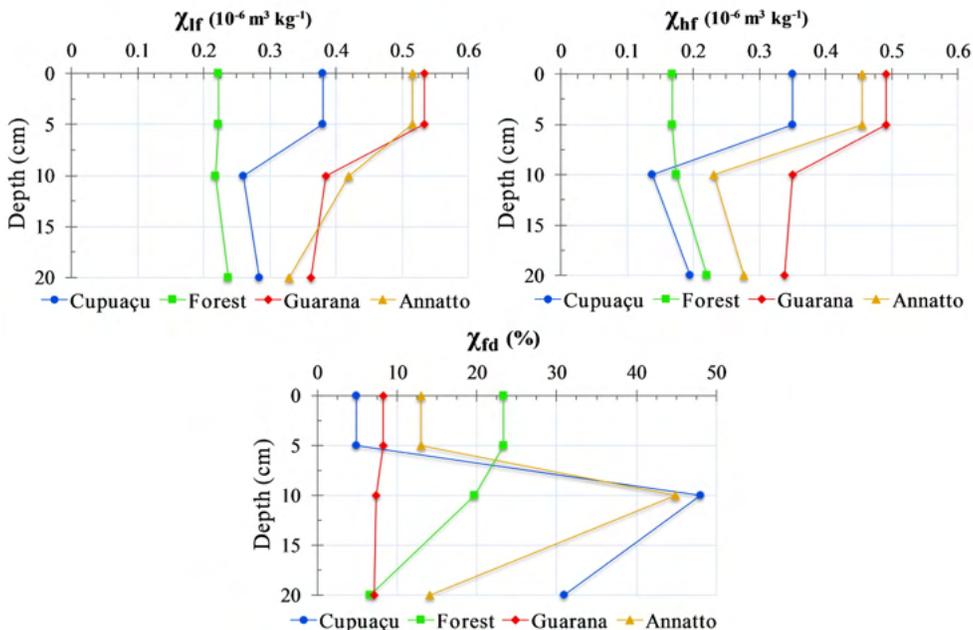


Figura 7: Variação da suscetibilidade magnética em profundidade em solos sob diferentes cultivos no sul do Amazonas.

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 ( $\text{Fe}_c$ ) e mal cristalizados ( $\text{Fe}_o$ ) 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 2). 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  $\text{Fe}_c$  e  $\text{Fe}_o$  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  $\text{Fe}_c$  e  $\text{Fe}_o$  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  $kg^{-1}$  em Argissolo sob floresta, e de 12,8 a 24,7 g  $kg^{-1}$  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  $kg^{-1}$ ) como em subsuperfície (1,87 g  $kg^{-1}$ ). 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 ( $\alpha$ - $Fe_2O_3$ ) na fração argila de todos os Argissolos, e uma baixa quantidade (3 g  $kg^{-1}$ ) de maghemita (Mh) pedogênica ( $\gamma$ - $Fe_2O_3$ ) para a área de urucum.

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

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> $\chi_{bf}$ : SM medida em baixa frequência; <sup>4</sup> $\chi_{af}$ : SM medida em alta frequência; <sup>5</sup> $\chi_{fd}$ : 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.

Tabela 2: Suscetibilidade magnética e teores de ferro pedogênicos de Argissolos sob diferentes usos em Canutama, Amazonas.

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 x 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>, respectivamente, e de 0,22 x 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> para a floresta. A  $\chi_{af}$  apresenta valores médios entre camadas semelhantes: 0,22; 0,39 e 0,31 x 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> respectivamente para os cultivos de cupuaçu, guaraná e urucum, e de 0,18 x 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> para a floresta. A maior perda 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 $\mu$ m) e de pseudo-simples domínio (PSD; 110 $\mu$ m < d < 0,2 $\mu$ 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 8. Constatou-se que em uma pequena faixa da  $\chi_{bf}$  (0,1-0,6 x 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>), houve uma perda 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 $\mu$ m) com simples domínio (SD; d < 0,2 $\mu$ 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.

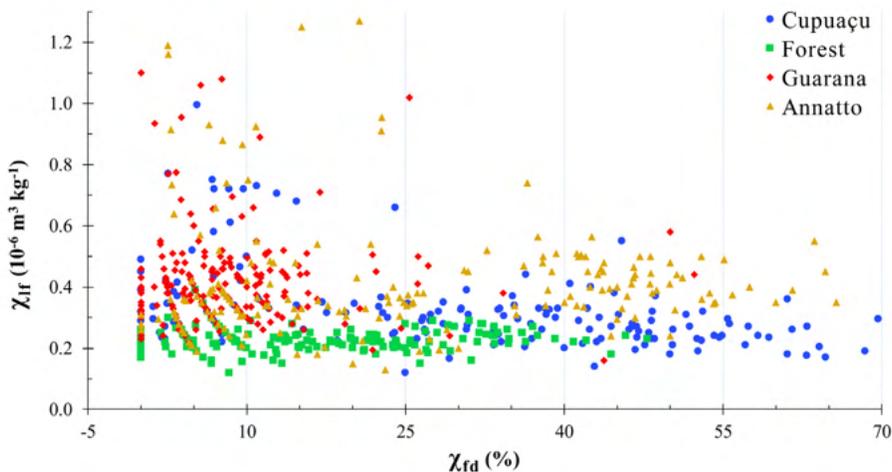


Figura 8: Gráfico de dispersão da suscetibilidade magnética de massa específica em baixa frequência versus frequência dependente para camada arável (0,0-0,2 m) de Argissolos sob diferentes usos no sul do Amazonas.

Após avaliação descritiva, as relações entre atributos e usos do solo com a propriedade da 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.

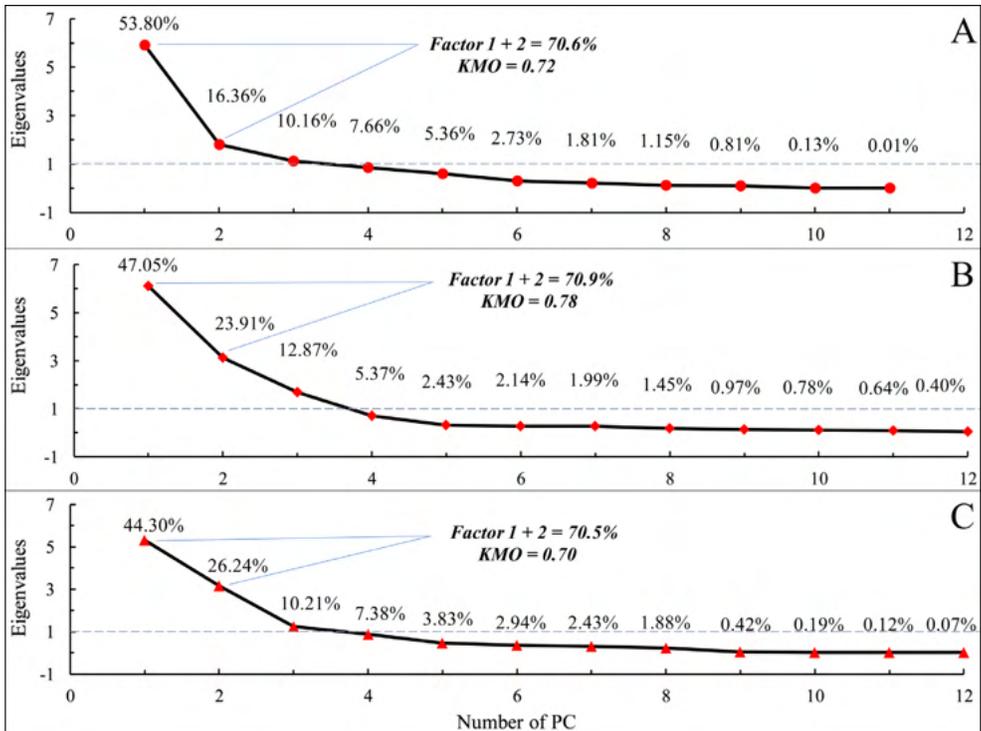


Figura 9: Extração de fatores por componentes principais em atributos de Argissolos estratificados em 3 camadas [0,0-0,05 m (A); 0,05-0,1 m (B); e 0,1-0,2 m (C)], para diferentes usos no sul do Amazonas.

Esses fatores foram utilizados para a confecção do plano fatorial bidimensional que simplificam a inferência da 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).

## 4 | DISCUSSÕES

### 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 1), 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 g g<sup>-1</sup> 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. Normalmente essa acidez do solo é avaliada em termos das concentrações de hidrogênio (H<sup>+</sup>) e alumínio (Al<sup>3+</sup>), 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 H<sup>+</sup> advém da predominância dos íons Al<sup>3+</sup> que reagem com a água na solução do solo, e resultam na liberação de Al(OH)<sup>2+</sup> e H<sup>+</sup> (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 Al<sup>3+</sup>, 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 t ha<sup>-1</sup> e considerando d = 1 kg dm<sup>-3</sup> 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 base Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> trocáveis e P disponível estão classificados como muito baixo à médios teores, o que conseqüentemente carregou 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 H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup> 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 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup>, 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 de 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 outras literaturas da mesma região (Lima et al., 2006; Martins et al., 2006; Salimon et al., 2007; Campos et al., 2012; Schaefer et al., 2017).

## 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  $\chi_{\text{br}}$  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  $\text{Fe}_c$  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°C ocorre a transformação de Gt em Hm por desidroxilação (Costa & Bigham, 2009). 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 o traço de Mh possui baixo teor de Hm e o menor teor de Gt dentre os usos do solo (Tabela 2).

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 1), 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  $\chi_{br}$

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. Conseqüentemente, 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).

### 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.

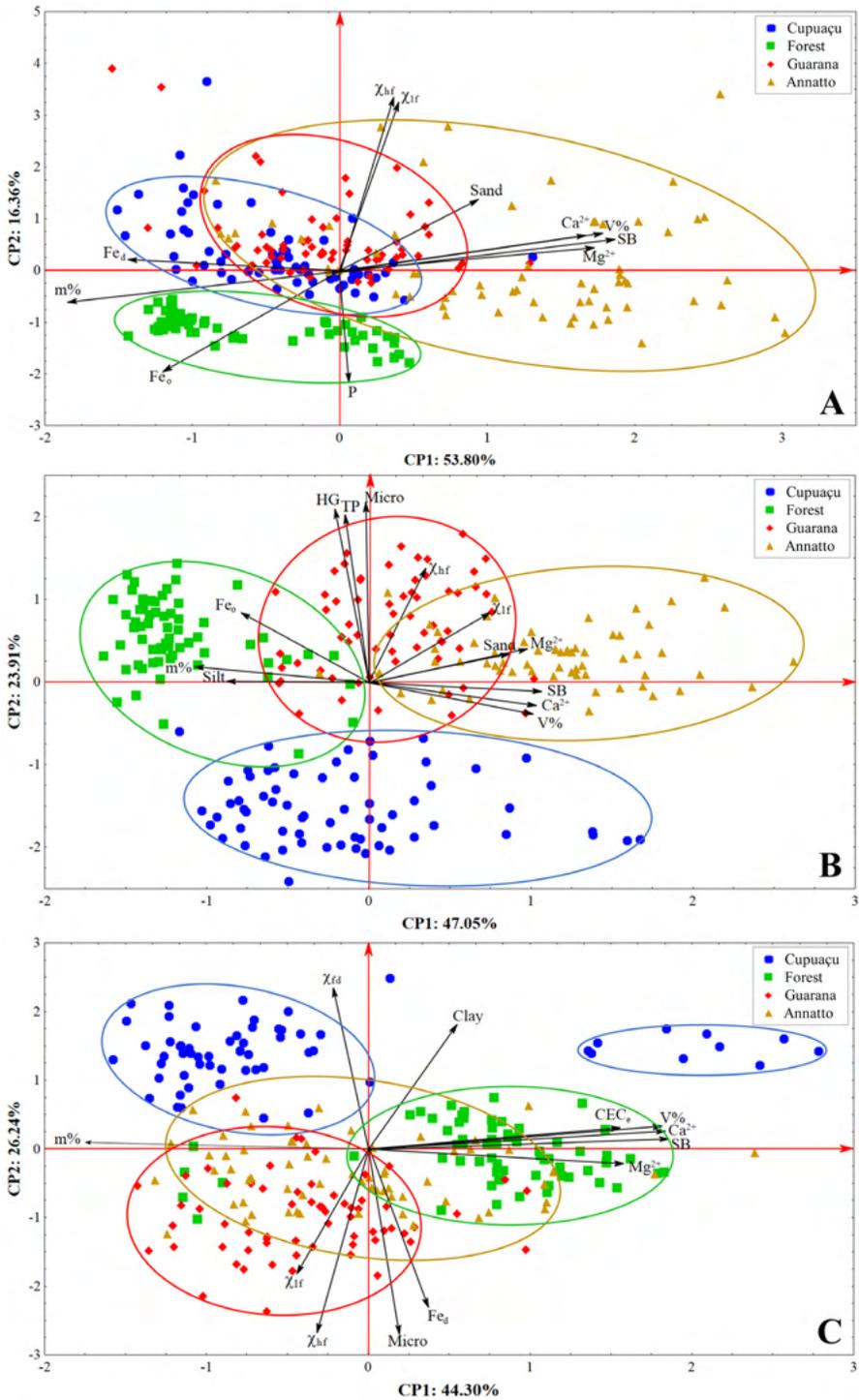


Figura 10: Plano fatorial e componentes principais discriminativas entre ambientes e atributos estratificados em 3 camadas [0,0-0,05 m (A); 0,05-0,1 m (B); e 0,1-0,2 m (C)] de Argissolos sob diferentes usos no sul do Amazonas.

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  $\chi_{\text{bf}}$ , 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  $\chi_{\text{af}}$ . 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,  $\text{Fe}_d$ ,  $\chi_{\text{bf}}$ ,  $\chi_{\text{af}}$  e  $\chi_{\text{fd}}$ .

Em 0,0-0,05 m (Figura 10A), a  $\chi_{\text{bf}}$  e  $\chi_{\text{af}}$  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  $\chi_{\text{bf}}$  e  $\chi_{\text{af}}$  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  $\chi_{\text{bf}}$  e  $\chi_{\text{af}}$  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  $\chi_{\text{bf}}$  e  $\chi_{\text{af}}$ , 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  $\chi_{\text{fd}}$ % (Tabela 2). Assim, a melhor condição física e química parece ser obtida nos locais onde há maiores valores de  $\chi_{\text{bf}}$  e  $\chi_{\text{af}}$ .

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  $\chi_{\text{fd}}$  e associados, em parte, pelo alto teor de argila em comum. Assim como visto em todo 0-0,1 m, a  $\chi_{\text{bf}}$  e  $\chi_{\text{af}}$  representam melhor as áreas de guaraná e urucum, as quais possuem correlação negativa com a  $\chi_{\text{fd}}$  de cupuaçu. Porém, a área de urucum possui um comportamento intermediário entre todos os Argissolos, sendo influenciado tanto pelos altos valores de  $\chi_{\text{bf}}$ ,  $\chi_{\text{af}}$ ,  $\chi_{\text{fd}}$  e m%, como pelas melhorias nas condições químicas encontradas na floresta.

## 5 I 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  $\chi_{br}$  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 natural cultivado com guaraná já mostra 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  $\chi_{br}$  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.

## 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.

Amirian-Chakan, A.; Minasnay, 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.

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.

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.

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.

- 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.
- Campos, M. C. C.; Ribeiro, M. R.; Souza Júnior, V. S. D.; Ribeiro Filho, M. R. & Almeida, M. C. (2012). Toposequência de solos na transição Campos Naturais-Floresta na região de Humaitá, Amazonas. *Acta Amazonica* 42(3):387-398.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Couceiro, P. R. D. C. & Santana, G. P. (1999). Caulinita em solo da Amazônia: caracterização e permutabilidade. *Acta Amazonica* 29(2):267-275.
- 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* 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.
- 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.
- Dexter, A. R. (1988). Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research* 11(3):199-238.

Fageria, N. K. & Baligar, V. C. (2003). Fertility management of tropical acid soils for sustainable crop production. *Handbook of soil acidity* 359-385.

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.

Fassbinder, J. W. E.; Stanjekt, H. & Vali, H. (1990). Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature* 343(6254):161-163.

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.

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.

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.

Grimaldi, M.; Oszward, 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.
- Hoffman, V.; Knab, M. & Appel, E. (1999). Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution. *Journal of Geochemical Exploration* 66(1-2):313-326.
- 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.
- 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.
- Kämpf, N. & Schwertmann, U. (1982). The 5-M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. *Clays and clay Minerals* 30(6):401-408.
- 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.
- 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.
- Kitagawa, Y. & Möller, M. R. F. (1980). Kaolin minerals in the Amazon soils. *Soil Science and Plant Nutrition* 26(2):255-269.
- Le Borgne, E. (1955). Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. In: *Annales de géophysique* 11:399.
- 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.
- 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 topossequência da bacia sedimentar do Alto Solimões, Amazônia Ocidental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30(1):59-68.
- 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.
- 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).

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.

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.

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.

Magiera, T.; Strzyszczyński, 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.

Maher, B. A. & Taylor, R. M. (1988). Formation of ultrafine-grained magnetite in soils. *Nature* 336(6197):368-370.

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.

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.

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.

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.

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* 7:317-327.

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.

Minasny, B. & Hartemink, A. E. (2011). Predicting soil properties in the tropics. *Earth-Science Reviews* 106(1-2):52-62.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.; Lumberras, 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.

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.

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.

Singer, M. J.; Verosub, K. L.; Fine, P. & TenPas, J. (1996). A conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils. *Quaternary international* 34:243-248.

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.

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.

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. (2019a). 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.

Souza, F. G.; Campos, M. C. C.; Pinheiro, E. N.; Lima, A. F. L.; Brito Filho, E. G.; Cunha, J. M.; Santos, E. A. N. & Brito, W. B. M. (2019b). Aggregate stability and carbon stocks in forest conversion to different cropping systems in Southern Amazonas, Brazil. *Carbon Management* 1–16.

StatSoft, Inc. (2011). *STATISTICA* (data analysis software system), version 10. [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.

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).

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.

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.

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.

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.

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.

Zimmermann, B.; Eisenbeer, 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.



# SOLOS AMAZÔNICOS:

---

Qualidade estrutural, físico, químico  
e suas correlações geoespacial  
no Sul do Amazonas

-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
-  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

# SOLOS AMAZÔNICOS:

---

Qualidade estrutural, físico, químico  
e suas correlações geoespacial  
no Sul do Amazonas

-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
-  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)