

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Funcionamento físico-hídrico do solo em duas topossequências sob floresta  
e pastagem em sistema agroextrativista na Amazônia Oriental**

**Mariana Nascimento Delgado Oliveira**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em  
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de  
Plantas

**Piracicaba  
2014**

Mariana Nascimento Delgado Oliveira  
Engenheira Agrônoma

**Funcionamento físico-hídrico do solo em duas toposequências sob floresta e pastagem  
em sistema agroextrativista na Amazônia Oriental**  
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **MIGUEL COOPER**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em  
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de  
Plantas

**Piracicaba**  
**2014**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Oliveira, Mariana Nascimento Delgado

Funcionamento físico-hídrico do solo em duas toposequências sob floresta e pastagem em sistema agroextrativista na Amazônia Oriental / Mariana Nascimento Delgado Oliveira.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014.

168 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Morfologia do solo 2. Análises físico-hídricas do solo 3. Hidroestrutura do solo  
4. Análise multivariada I. Título

CDD 631.44  
O48f

**"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte -O autor"**

## **DEDICATÓRIA**

Aos agricultores do Projeto de Assentamento Agroextrativista Praia Alta Piranha

Em especial a José Claudio e Maria do Espírito Santo

*(In memoriam)*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, aos meus pais Alcides e Ivete pelo amor, confiança e orações cotidianas; e aos meus irmãos George e Marta pelas brincadeiras mesmo à distância. Amo vocês!

À Universidade de São Paulo e à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” por me aceitarem como discente de doutorado.

Ao CNPq e à CAPES pela bolsa concedida durante o doutorado no Brasil e no exterior.

Ao meu orientador Miguel Cooper, um agradecimento especial por acreditar em mim. Obrigada também pela amizade, cooperação e alegria.

À Michel Grimaldi, meu orientador francês, pelos oito anos de convivência. Obrigada por todos os ensinamentos, profissionais e pessoais. Foram muitos os momentos de alegria e decepção que passamos...Obrigada por sempre estar do meu lado.

À José Rondon e Laisa Santos, pela coragem e disponibilidade. À Seu Jurandir e Dona Nina por sempre nos receber com alegria.

Aos amigos da UFPA Fernando Micheloti, Mauro Silva por todo apoio e logística no trabalho de campo.

À Seu Nonato, nosso fiel motorista, presente em todas as visitas de campo, e Seu Deurival, exemplo de força e vivência amazônica.

À Pablo Vidal-Torrado pelo ‘sim’ inicial e pela amizade...obrigada!

Aos componentes da minha banca de qualificação: Antonio Carlos Azevedo, Jarbas Honorio de Miranda e Osny Oliveira Santos Bacchi, pelas pertinentes aguições e críticas ao trabalho.

Aos demais professores pelos ensinamentos e formação profissional: Carlos Eduardo Cerri, Cenira Lupinacci, Quirijn de Jong van Lier, Paulo Leonel Libardi, Sônia de Stefano e Carlos Tadeu Dias.

Um agradecimento especial à Rodrigo Oliveira Zenero, meu companheiro de todas as horas, que desde os primeiros momentos me apoiou, sorriu e se inquietou comigo, obrigada! Também a toda família Oliveira Zenero, que me trataram como membro da família... e à preocupação materna de Dona Ester, sempre cuidando dos mínimos detalhes...Obrigada.

À minha “irmã piracicabana”, amiga de doutorado e da vida! Juntas literalmente sorrimos e choramos... Obrigada Suzinha!

Aos meus ‘maninhos e maninhas’, amazônicas: Laura Simões e Selene Castilho vocês foram de fundamental importância neste trabalho, e juntas o continuaremos; Renata Bovi, Raul Shiso Toma, Edison Mome, Renata Momoli, João Medeiros, Jaqueline Dalla Rosa, Thalita Oliveira, Tatiana Rittl, pelas conversas e risadas... Aos técnicos Sonia Moraes e José Luis (Chiquinho)... Aos estagiários Alix Vidal, Mateus Macul, Isabela Soares, Camila Carvalho, pelo apoio nas análises laboratoriais... Família Cooper, um abraço gigante!

Aos demais colegas de pós-graduação os quais fizeram os dias mais agradáveis: Eduardo Mariano, Osvaldinho, Samalita, Lorena, Sara, Helio, Renato, Suzana, Getulio, Jean, Cybelle, Rodrigo Yes, Zé Ricardo, Ingrid, Sabrina baiana querida, Bruna, Carolzinha, Edilan, Anderson Velha, Neilo, Akenya, Helon, Cristiane, Dirceu, Marcos, Roque, Verena Moranguinho, Acácio...

Agradeço ao Dr. Álvaro Pires pelo empréstimo do laboratório de Física, também aos técnicos Leandro Góia, Jair Ferreira, Reginaldo Nogueira (Rossi), Dorival Grisotto e Luís Silva.

Aos demais funcionários do departamento que participam ativamente de nossas vidas: Celia Regina Natalio, Martinha dos Santos, Ângela, Marta Sueli de Campos, Francisco Bernardo Dias, Nelson Rabastik (Juruna), Moisés Ruiz e Luis Carlos Matias... Muito obrigada!

À Rodrigo Zenero, Aparecida Mourão Brasil, Lucas Sartor (Mateus), Cristiano Della Picolla, Paula Colletti e Laura Simões, pelo apoio na finalização do trabalho.

Aos amigos que cuidaram de minha parte física e espiritual: Sentinelas da Manhã, às meninas, Vania e Vanise Calisto, Nilza Lima, Beatriz Jardim (Bia Helena), Priscila Martiniano, Rosângela Santos, e à Fábio Clementino, vocês são uns amores.

Aos amigos de sempre, que apesar da distância nunca se ausentaram da minha vida: Jadiel Mendes, Sannah Birani, Cindy Moreira...

Aos meus tios e primos que também sempre estenderam suas bênçãos à distância...beijos.

Só tenho mesmo muito a agradecer a todo apoio que tive de várias pessoas, seja em Piracicaba, Marabá, de amigos espalhados pelo Brasil e também por outros países... Sempre preocupados comigo e questionando sobre meu trabalho. Acredite, cada um de vocês tem parte especial em minha vida. Muito obrigada.

## REMERCIEMENTS

Je remercie M. Michel Grimaldi, mon directeur de thèse Français, pour partager ses connaissances avec l'amitié et générosité; pour se soucier tous les jours de la qualité de mon séjour en France, dans les moindres détails depuis mon arrivée. Merci aussi pour le partage des bons moments avec sa famille.

Je remercie la CAPES pour le soutien financier pendant cette période en France.

Mes remerciements vont aussi à l'Institut de Recherche pour le Développement – IRD, spécialement au Centre IRD France-Nord Bondy, pour le soutien technique, scientifique et personnel reçu. C'était expérience enrichissante.

Je remercie à Mme Corinne Rouland-Lefevre, directrice du Centre IRD de Bondy, et M. Christian Valentin, directeur-adjoint de l'unité BIOEMCO de m'avoir recue.

Merci au Dr. Gaghik Hovhannissian, un grand maître, qui avec tout patience m'a accordé son temps pour m'expliquer les methodologies, et m'a vraiment aidée pour tout ce que je devais effectuer au laboratoire. Vous êtes très bonne personne!

Je remercie aussi les collègues IRDiens de l'UMR BIOEMCO : Thierry Desjardins, Anne Pando, Pascal Podwojewski, Mark Lointier, Christian Hartmann, Michele Bouchez, Jocelyne Roman, Charlène Heiniger, David Carmignac, Lotfi Smaili, Sandrine Rieu, Gael Caro, Jérôme Mathieu, Florence Dubs, ainsi que de l'UMR L'OCEAN: Mercedes Mendez, Hugues Boucher, Sandrine Caquineau, Claire Lazareth. De la partie administratif du Centre, du service de documentation et d'autres services: Annabelle Mellot, Laurence Goury, Naznine Kalfane, Edith Torel, Annick Aing, Isabelle Lecubin, Silvia Poli, Julien Sortais, Rolande Altemaire, M. Terach, sans oublier les personnes du restaurant et du pavillon d'accueil, particulièrement à Joanna et Fatima. Merci beaucoup pour l'attention, la sympathie et la confiance en tout moment.

Un merci tout special à mes grands amis du Groupe Jeunes Adultes d'Aulnay-sous-Bois, pour toute camaraderie; ils étaient vraiment mes frères; en spécialement Francis Pegas et Moïse Itoua de m'aider à résoudre des problèmes, même après le retour au Brésil! Un grand merci aussi pour toutes mes copains et copines françaises, brésiliens et d'autres nationalités que j'ai connus pendant cette année. Vous avez tous rendu mes jours plus joyeux en France!

L'expérience d'une autre culture, d'une autre langue, de nouvelles études, des personnes différentes, fut un grand enrichissement personnel et professionnel. Je suis sûr d'avoir beaucoup appris avec les autres et sur moi-même. Le changement des quatre saisons



m'a aidé à réaliser que la capacité d'adaptation est la meilleure qualité humaine... J'ai vécu de grands jours et, si je le pouvais, je vivrais tout de nouveau !

Merci beaucoup...

*“...então, tem pessoas que dizem que isso (a luta pela preservação da floresta) não vale a pena, ‘pra’ mim vale a pena (...) a primeira coisa importante é a ousadia, ela é uma coisa que alimenta... é o que alimenta a vida (...) a maior fraqueza do ser humano é a omissão...”*

Maria do Espírito Santo

(1960 – † 24/05/2011)

*“...eu tenho medo, mas no mesmo instante que eu tenho medo, eu tenho a obrigação como cidadão (de preservar a floresta)...o impulso que eu tenho quando eu vejo uma injustiça, me tira o medo, porque o homem é o que ele é... Então se você tem coragem de lutar, lute! Porque ‘mais ante’ você morrer tentando, do que morrer omissos!”*

José Claudio Ribeiro da Silva

(1959 – † 24/05/2011)



**“(...) Mas é preciso ter manha**

**É preciso ter graça**

**É preciso ter sonho sempre**

**Quem traz na pele essa marca**

**Possui a estranha mania**

**De ter fé na vida.”**

Maria, Maria – Milton Nascimento



## SUMÁRIO

RESUMO .....	15
ABSTRACT .....	17
LISTA DE FIGURAS .....	19
1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Contexto Geral.....	23
1.2 Contextualização do problema .....	24
1.2.1 Breve histórico da ocupação das terras e o desmatamento na região Sudeste do Pará ...	25
1.2.2 Projeto de Assentamento Agroextrativista (PAE): uma nova opção para o Sudeste Paraense .....	27
1.2.2.1 Dinâmica do uso da terra no Projeto Agroextrativista Praia Alta Piranha.....	27
1.2.3 Declínio da qualidade do solo: por que é interessante estudar? .....	28
Referências .....	30
2 ANÁLISE ESTRUTURAL DE SOLOS EM DUAS TOPOSSEQUÊNCIAS SOB FLORESTA E PASTAGEM NA AMAZÔNIA ORIENTAL .....	35
Resumo .....	35
Abstract.....	35
2.1 Introdução.....	36
2.2 Material e Métodos .....	37
2.2.1 O meio físico .....	37
2.2.2 Breve histórico da área .....	39
2.2.3 Metodologia de coleta de amostras e análises laboratoriais .....	39
2.2.4 Caracterização mineralógica da fração argila.....	41
2.2.4.1 Remoção de matéria orgânica.....	41
2.2.4.2 Remoção de óxidos de ferro .....	41
2.2.4.3 Separação de areia e silte e saturação de argila a K 25°C .....	42
2.2.5 Extração de óxidos de ferro .....	43
2.2.5.1 Método do Citrato-Ditionito-Bicarbonato (CDB) .....	43
2.2.5.2 Método do Oxalato .....	43
2.2.6 Caracterização química.....	44
2.2.6.1 Determinação do pH em CaCl <sub>2</sub> 0,01 mol L <sup>-1</sup> , KCl e água.....	44
2.2.6.2 Determinação da Acidez Trocável (Al <sup>3+</sup> ).....	45

2.2.6.3 Determinação do Potássio – Mehlich 1.....	46
2.2.6.4 Determinação do Fósforo.....	46
2.2.6.5 Determinação da Matéria Orgânica.....	46
2.2.6.6 Determinação do Cálcio e Magnésio.....	47
2.2.6.7 Acidez potencial (H + Al) (mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ).....	48
2.2.6.8 CTC total.....	48
2.2.6.9 Soma de bases trocáveis (SB).....	49
2.2.6.10 Saturação por bases (V%).....	49
2.2.7 Caracterização Física.....	49
2.2.7.1 Granulometria.....	49
2.2.7.2 Densidade do solo e de partículas.....	50
2.3 Resultados e Discussões.....	50
2.3.1 Caracterização dos solos.....	50
2.3.1.1 Distribuição dos solos.....	50
2.3.1.2 Caracterização morfológica dos horizontes.....	56
2.3.1.3 Características analíticas dos horizontes.....	63
2.3.2 Interpretações sobre a organização e os atributos dos solos.....	68
2.4 Conclusões.....	69
Referências.....	70
3 ANÁLISE MICROMORFOMÉTRICA DA ESTRUTURA E ATRIBUTOS HÍDRICOS DE SOLOS SOB FLORESTA E PASTAGEM NO SUDESTE PARAENSE.....	75
Resumo.....	75
Abstract.....	75
3.1 Introdução.....	76
3.2 Material e Métodos.....	77
3.2.1 O meio físico.....	77
3.2.2 Local de estudo e amostragem dos solos.....	78
3.2.3 Análise física do solo.....	79
3.2.4 Análise micromorfométrica do solo.....	80
3.2.4.1 Preparação das amostras.....	80
3.2.4.2 Análise micromorfométrica.....	81
3.2.4.3 Análises estatísticas dos dados.....	83
3.2.5 Análise físico-hídrica do solo.....	84

3.2.5.1 Curva característica de retenção de água no solo .....	84
3.2.5.2 Condutividade Hidráulica.....	85
3.3 Resultados e Discussões .....	87
3.3.1 Características físicas dos solos.....	87
3.3.2 Micromorfometria por análise de imagens dos solos estudados .....	91
3.3.2.1 Quantificação de macro e mesoporosidade .....	91
3.3.2.2 Tamanho e formato dos poros .....	95
3.3.3 Dinâmica físico-hídrica dos solos estudados.....	99
3.3.3.1 Condutividade hidráulica de alguns horizontes.....	99
3.3.3.2 Curva característica de retenção de água no solo .....	102
3.4 Conclusões.....	107
Referências .....	108
4 CURVAS DE RETRAÇÃO EM SOLOS SOB FLORESTA E PASTAGEM NA AMAZÔNIA ORIENTAL .....	113
Resumo .....	113
Abstract.....	113
4.1 Introdução.....	114
4.1.1 A Pedoestrutura .....	115
4.1.1.1 Os agregados primários e porosidade do solo .....	115
4.1.1.2 Classes de água: expansão e condensação.....	117
4.1.1.3 Os diferentes pontos de umidade na pedoestrutura - Embasamento teórico .....	120
4.1.1.4 Relações entre as propriedades e os parâmetros pedoestruturais .....	122
4.2 Material e Métodos .....	123
4.2.1 Descrição da área de estudo e coleta das amostras de solo .....	123
4.2.2 Preparação das amostras indeformadas (cilindros) .....	123
4.2.3 Medidas de retração.....	124
4.3 Resultados e Discussão.....	128
4.3.1 Curvas de retração .....	128
4.3.2 Classes de água do solo e suas proporções em amostras de solo .....	131
4.3.3 Determinação da fase de retração linear básica, K <sub>bs</sub> .....	133
4.3.4 Relação entre os parâmetros da curva de retração e alguns atributos do solo.....	134
4.4 Conclusões.....	135

5 RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS DAS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E DE RETRAÇÃO DO SOLO EM UMA TOPOSSEQUÊNCIA SOB FLORESTA E PASTAGEM .....	137
Resumo.....	137
Abstract .....	137
5.1 Introdução .....	138
5.2 Material e Métodos .....	139
5.2.1 Localização e considerações gerais.....	139
5.2.2 Protocolo de amostragem.....	140
5.2.3 Curva de retenção de água no solo.....	141
5.2.4 Curva de retração de água no solo .....	141
5.2.5 Análise estatística.....	142
5.3 Resultados e Discussões.....	142
5.3.1 Análise em Componentes Principais (ACP) e Análise Discriminante (AD) em curvas de retenção de água no solo .....	142
5.3.2 Análise em Componentes Principais (ACP) e Análise Discriminante em curvas de retração do solo .....	146
5.4 Conclusões .....	150
Referências.....	151
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	153
ANEXOS .....	155

## RESUMO

### **Funcionamento físico-hídrico do solo em duas toposequências sob floresta e pastagem em sistema agroextrativista na Amazônia Oriental**

A agricultura familiar da região Sudeste do Pará tem sido apontada como uma das grandes modificadoras da cobertura vegetal amazônica, isso ocorre devido a intensidade de suas práticas e o manejo inadequado dos solos. Esses pequenos estabelecimentos familiares têm apresentado problemas com a disponibilidade dos recursos hídricos, qualidade dos solos, conseqüentemente, baixa produção vegetal. Perante esta problemática, o objetivo desta tese foi o de conhecer o solo a partir de caracterização morfológica, química e físico-hídrica de duas toposequências, uma com vegetação nativa e outra com pastagens em área de agricultura familiar. A fim de alcançar o objetivo, a presente pesquisa foi composta das seguintes etapas: (i) caracterização morfológica, química e física dos solos em duas toposequências e tipologia dos horizontes com utilização da análise estrutural; (ii) estudos físico-hídricos dos solos, curva de retenção de água no solo e condutividade hidráulica, a partir dos compartimentos encontrados pela análise estrutural; (iii) análises hidroestruturais dos solos, a partir de metodologia ainda não aplicada em solos amazônicos, as curvas de retração; e (iv) relação de parâmetros físico-hídricos e hidroestruturais dos solos com uso de análise multivariada. Os resultados obtidos permitiram a visualização dos solos em diferentes escalas, partindo de uma escala macro, onde foi observado a presença de 7 compartimentos diferenciados a partir dos atributos morfológicos, físicos e hídricos dos horizontes, até uma escala micro, de compreensão da porosidade do solo, e mudança de volume do solo quando o mesmo perde água. Observou-se um incremento de argila em profundidade que foi importante para as principais diferenciações encontradas. A curva de retenção de água no solo e a curva de retração do solo mostraram que a textura foi o atributo que mais contribuiu aos resultados encontrados. Na curva de retenção de água no solo, os parâmetros  $\alpha$  e  $n$ , foram sensíveis ao teor de argila e porosidade do solo, respectivamente. A curva de retração, apresentou sensibilidade à estrutura do solo, granular e em blocos subangulares, mais comuns nestes solos, relacionados também ao teor de argila. A oscilação do lençol freático contribuiu com o aparecimento de mosqueados, e indicou a deficiência de drenagem dos perfis, principalmente nos horizontes com maiores teores de argila. Espera-se que este estudo contribua ao entendimento do comportamento do solo, sob floresta e pastagem, bem como a nível mais geral, seja uma base de dados para futuros trabalho de modelagem e simulação de novos cenários de uso do solo em áreas de agricultura familiar.

Palavras-chave: Morfologia do solo; Análises físico-hídricas do solo; Hidroestrutura do solo; Análise multivariada





## ABSTRACT

### **Physical-hydric soil functioning in two toposquences under forest and pasture in agroextractivist system in eastern Amazonia**

Family agriculture has been identified as a major modifier of Amazonian vegetation cover, this is due to the intensity of their practices and inadequate soil management. These small family establishments have had problems with the availability of water resources, soil quality, consequently, low crop production. Faced with this problem, the main objective of this thesis was to know the soil from morphological, chemical and physical water characterization, of topossequences two, one with native vegetation and other with pastures in the area of family farming. To achieve the objective, the present research consisted of the following steps: (i) morphological and physical characterization of soils in two topossequences and typology of horizons with the use of structural analysis; (ii) hydrophysical, from soil water retention curve and hydraulic conductivity, with soil studies of the seven main compartments found by structural analysis; (iii) hydrostructural soil analysis in Amazonian soils, and (iv) the relations of soil hydrophysical and hydrostructural data using multivariate analysis. The results confirmed the presence of 7 compartments differentiated by their morphological, physical and hydraulic properties, to a micro scale, the understanding of and volume change soil when it loses water. There was an increase in depth of clay that was important for the major differences found. The soil water retention curve and soil shrinkage curve showed that the soil texture was determined its parameters and the slopes of their curves. The parameters  $\alpha$  and  $n$ , were sensitive to clay content and soil porosity, respectively. The shrinkage curve showed a sensitivity to the structure of the soil, subangular blocks and granular more common these soils, also related to the clay content. The fluctuation of the water table contributed to the appearance of mottling, and indicated a deficiency of drainage profiles, especially in horizons with higher clay. This study contributes to the understanding of the relations between the soils studied along the topossequence, and contributes with data that will be the basis for simulating new land use scenarios in areas of family agriculture.

Keywords: Soil morphology; Hydrophysical analysis; Soil hydrostructure; Multivariate analysis



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Projeto de Assentamento Agroextrativista Praialta Piranheira no município de Nova Ipixuna/Pará, localidade de Maçaranduba II e localização da área de estudo ..... 37
- Figura 2.2 - Esquema da topossequência sob floresta e pastagem e localização dos perfis analisados no Projeto de Assentamento Agroextrativista Praialta Piranheira, município de Nova Ipixuna/Pará, localidade de Maçaranduba II..... 40
- Figura 2.3 - Determinação das análises químicas de rotina nos solos analisados para: A) Filtração de solução de solo para determinação de  $Al^{3+}$ ; B) Leitura de elementos por fotômetro de chama; C) Titulação da matéria orgânica; D) Solução com difenilamina, após o ponto de viragem; E) Análise de P e a curva de calibração 44
- Figura 2.4 - Classificação dos perfis estudados na topossequência, sob floresta (F) e sob pastagem (P), na sequência: 1 – Montante, 2 – Intermediária, 3 – Jusante ..... 53
- Figura 2.5 - Distribuição dos horizontes na topossequência indicando os perfis de solo descritos (fotografias). P = Perfil sob pastagem; F = Perfil sob floresta; Tr = Tradagens realizadas, os números representam a sequência de tradagens ..... 55
- Figura 2.6 - Análise granulométrica em Argissolo (A, C) e Cambissolo (E) sob floresta; e Argissolo (B, D) e Plintossolo (F) sob pastagem, à montante, na parte intermediária e à jusante do relevo. AMG: Areia Muito Grossa; AG: Areia Grossa; AM: Areia Média; AF: Areia Fina ..... 64
- Figura 2.7 - Calhaus + cascalho nos perfis de solos estudados, sob floresta (A) e sob pastagem (B) ..... 65
- Figura 2.8 - Densidade do solo nos perfis de solos estudados, sob floresta (A) e sob pastagem (B) ..... 66
- Figura 2.9 - Difractogramas da fração argila da topossequência estudada. Exemplos em alguns perfis e profundidades analisadas. Ct: Caulinita; Il: Ilita; Gb: Gibsita; Qz: Quartzo ..... 67
- Figura 3.1 - Esquema de coleta e amostragem do solo para análises em laboratório ..... 79
- Figura 3.2 - Preparação dos blocos para análise micromorfométrica. A. Impregnação dos blocos pela solução com resina, em bombas de vácuo. B. Bloco de solo impregnado e endurecido. C. Aparelho com serra de diamante que corta os blocos

	de solo depois de endurecidos. D. Disco rotatório que lixa o bloco após cortado. Fotos: Alix Vidal.....	81
Figura 3.3 -	Material para realização da análise micromorfológica. A. Captura de imagem e identificação dos poros. B. Câmera digital, localizada na parte superior e posterior da lupa binocular. Fotos: Alix Vidal.....	83
Figura 3.4 -	Diagrama do infiltrômetro (a) e o infiltrômetro de mini-disco montado em laboratório (b), com o contato entre o equipamento e o solo (c) .....	86
Figura 3.5 -	Boxplot de macro e mesoporosidade do solo nos horizontes dos diferentes perfis sob floresta e pastagem. Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, quanto os horizontes, a 5% de probabilidade pelo teste ( <i>Kruskal-Wallis</i> ) .....	94
Figura 3.6 -	Distribuição da porosidade do solo total (ATP), segundo a forma e o tamanho dos poróides de cada horizonte dos perfis F1 (Floresta) e P1 (Pastagem), e imagens binárias correspondentes (os poróides aparecem em branco e a fase sólida em preto). Arred = arredondados, Along = alongados, Compl = complexos .....	96
Figura 3.7 -	Distribuição da porosidade do solo total (ATP), segundo a forma e o tamanho dos poróides de cada horizonte dos perfis F2 (Floresta) e P2 (Pastagem), e imagens binárias correspondentes (os poróides aparecem em branco e a fase sólida em preto). Arred = arredondados, Along = alongados, Compl = complexos .....	97
Figura 3.8 -	Distribuição da porosidade do solo total (ATP), segundo a forma e o tamanho dos poróides de cada horizonte dos perfis F3 (Floresta) e P3 (Pastagem), e imagens binárias correspondentes (os poróides aparecem em branco e a fase sólida em preto). Arred = arredondados, Along = alongados, Compl = complexos .....	98
Figura 3.9 -	Condutividade hidráulica da água em solos sob floresta e pastagem .....	102
Figura 3.10 -	Curvas de retenção de água no solo sob floresta e pastagem.....	105
Figura 4.1 -	Representação esquemática dos quatro níveis de organização funcionais de um <i>pedon</i> : o horizonte, a pedoestrutura, os agregados primários e as partículas primárias.....	116
Figura 4.2 -	Curva de retração medida com nomenclatura usada para as fases de retração (de inclinação $K_s$ ), pontos característicos e pontos de umidades associadas ( $w_s$ ), indicando as fases de retração do solo. ....	118

- Figura 4.3 - Representação esquemática dos locais de expansão e condensação nos dois sistemas de porosidade do solo: entre as partículas de argila e entre os agregados ..... 121
- Figura 4.4 - Etapas de construção do cilindro de solo para análise de retração. A – Umedecimento do bloco de solo; B – Escolha do local para retirada da amostra; C – Início da amostragem; D – Cilindro quase finalizado para análise de retração; E – Processo final de escultura do cilindro no bloco de solo ..... 123
- Figura 4.5 - Etapas de saturação e organização das amostras para entrada no equipamento. A – Início da saturação da amostra; B – Bateria de amostras para saturação; C – Adição de água para saturação da amostra; D – Amostra saturada pronta para análise ..... 124
- Figura 4.6 - Medida da curva de retração. A - Amostras no interior do retratômetro, localizadas na plataforma giratória; B - Registro da massa de solo na balança eletrônica; C - Posicionamento do laser de altura (acima); D - Cilindro metálico de calibração e na lateral, spot do laser que mede a variação de largura da amostra de solo ..... 125
- Figura 4.7 - Telas de comandos do Labview para funcionamento do retratômetro. A – Tela central do programa, onde os comandos são ativados; B, C – Tela de identificação das amostras nos lugares que ocuparão na plataforma giratória; D – Curvas feitas pelo programa durante a edição da retração do solo, a curva amarela mede a altura, a azul mede a variação de massa e as duas (vermelha e amarela) medem a largura ..... 126
- Figura 4.8 - Planilha de caracterização dos primeiros 0,05 m de solo sob pastagem em P2, exprimindo a variação do teor de água em todas as variáveis descritivas nos estados hidroestruturais do solo ..... 127
- Figura 4.9 - Curvas de retração representativas de cada horizonte dos perfis de solo analisados. Os símbolos são as curvas ajustadas, a linha contínua são as curvas medidas. As curvas medidas não podem ser distinguidas nos gráficos. L. Sat: Linha de saturação. .... 130
- Figura 4.10 - Curvas de retração (medida e ajustada) e os quatro conteúdos de água, em dois horizontes de solo: A – P3 a 0,45 m de profundidade; B – F3 a 0,80 m de profundidade. Teor de água - wbs: água básica; wip: água interpedal; wst: água estrutural; wre: água residual. .... 131

- Figura 4.11 - Área de abrangência das principais umidades encontradas em dois horizontes de solo: A – P3 a 0,45 m de profundidade; B – F3 a 0,80 m de profundidade ..... 132
- Figura 4.12 - Área de abrangência das principais umidades encontradas em dois horizontes de solo: A – P3 a 0,45 m de profundidade; B – F3 a 0,80 m de profundidade ..... 133
- Figura 5.1 - Localização do município de Nova Ipixuna..... 140
- Figura 5.2 - Análise em Componentes Principais normalizadas dos parâmetros de van Genuchten gerado a partir da curva de retenção de água no solo ( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$  e  $n$ ), nos perfis de solo em floresta e pastagem. Círculo de correlações e posições dos parâmetros (A) em relação aos componentes principais. Posições dos pontos de observações agrupados por posições no relevo (B), tipo de vegetação (C) e horizontes (D)..... 143
- Figura 5.3 - ACP dos parâmetros de van Genuchten e suas relações com os parâmetros da CRA (argila, PorTot, macro, micro CAD 6 e 10 kPa) ..... 144
- Figura 5.4 - ACP inter-classes apresentando a relação dos parâmetros da CRA ( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$  e  $n$ ) e os principais horizontes encontrados nas topossequências (A, AB, B1, B2, BC e C)..... 145
- Figura 5.5 - Análise discriminante dos parâmetros da CRA ( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$  e  $n$ ) e as relações com os principais horizontes encontrados nas topossequências (A, AB, B1, B2, BC e C) ..... 146
- Figura 5.6 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos parâmetros de retração do solo, nos perfis estudados. Círculo de correlações (A) e os perfis de observações e suas posições no relevo (B) com montante – F1 e P1, parte intermediária – F2 e P2, e jusante – F3 e P3, e o tipo de vegetação existente na topossequência: floresta e pastagem, (C) com os horizontes classificados em A, B, BC e C, para estas análises ..... 147
- Figura 5.7 - Análise em Componentes Principais (ACP) inter-classes dos parâmetros de retração do solo, nos quatro horizontes estudados. Círculo de correlações (A) e observações nos horizontes classificados em A, B, BC e C (B) ..... 148
- Figura 5.8 - Análise discriminante dos parâmetros da curva de retração do solo ( $Sat$ ,  $WM$ ,  $WN$  e  $V_0$ ) e as relações com os principais horizontes encontrados nas topossequências (A, B, BC e C)..... 150

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto Geral

A importância do solo e seu uso já eram reconhecidos desde as primeiras civilizações, porém estudos pioneiros sobre a caracterização e classificação do solo foram realizados no final do século XIX, pelo russo Dokuchaev, considerado o pai da pedologia. Após investigações e relações feitas em campo, o cientista afirmou que o solo era um corpo natural, distinto das rochas e sedimentos, originário de uma rocha-mãe (material de origem), com influência do clima, organismos, relevo e tempo. Nascia então a pedologia, que passou a ser um novo ramo da ciência, com várias interpretações, oriundas de diferentes lugares e escolas (ESPÍNDOLA, 2008; LEPSCH, 2011). Muitos conceitos surgiram e ganharam espaço. Huggett (1975), em um enfoque pedológico e geomorfológico, destaca o solo como importante componente da paisagem, e começa a representá-lo em três dimensões para compreender melhor seu comportamento lateral (BIRKELAND, 1999; BOCKEIM et al., 2005).

Considerando este enfoque mais prático e amplo, o solo pode ser definido como um meio organizado e estruturado vertical e lateralmente, com morfologia própria e pode ser descrito em diferentes escalas. O solo é um meio contínuo, dinâmico, capaz de realizar importantes transferências de materiais sólidos, líquidos, gasosos, biológicos em nível local e da paisagem (RUELLAN; DOSSO, 1993).

O estudo dos solos das regiões intertropicais, feito por pedólogos franceses, veio a ser realizado a partir da década de 1940. A primeira etapa (1945-1960) foi marcada pelos grandes inventários em escala do continente e cartografias de pequenas escalas. Esta etapa foi importante para identificar paisagens e suas relações com o clima e coberturas vegetais, corroborando com a compreensão do comportamento, fertilidade e da fragilidade destes solos (RUELLAN; DOSSO, 1993).

Na segunda etapa (1960-1990) iniciaram-se os estudos mais detalhados, em escalas macro. As cartografias detalhadas trazem a complexidade dos solos nas regiões intertropicais, e contribuíram para a formulação de duas hipóteses, que ajudam a compreender que as zonas climáticas e as rochas profundas estão intimamente ligadas ao relevo. A primeira hipótese é a de que existe uma diferenciação lateral; o solo é resultado de movimentos laterais de materiais, e não somente de migrações verticais de soluções e materiais. A segunda é de que o



fator tempo e história dos solos e paisagens tem importância. Por exemplo, em uma paisagem os solos nem sempre têm a mesma idade, e é essa diferença de idade que vai explicar parte de suas diferenças e distribuições (RUELLAN; DOSSO, 1993).

Os pedólogos relacionam metodologias que utilizam escalas minuciosas. Estudos feitos em escala de bacias hidrográficas, analisando a distribuição de perfis, horizontes, suas características morfológicas, juntamente aos estudos de microestruturas, foi grande passo para evidenciar e relacionar os diferentes níveis de observação do solo (constituintes, agregados, nódulos, horizontes...), importantes para prever o comportamento dos solos em função de diversos tipos possíveis de utilização (BULLOCK et al., 1985; RUELLAN; DOSSO, 1993; CASTRO et al., 2003).

Mesmo com o advento destas metodologias em várias partes do mundo, ainda existem muitos ambientes sem estudos detalhados. As informações sobre a distribuição e o comportamento dos solos relacionados à disposição do relevo, fazendo uma conexão entre os solos e a expressão da paisagem são ainda escassas na Amazônia (CAMPOS et al., 2012). Algumas pesquisas foram desenvolvidas na região Norte do Brasil enfocando a relação solo-paisagem (DEMATTE et al., 1994; ANDRADE et al., 1997; CAMPOS et al., 2012). No entanto, ainda há muito a ser realizado nesta região do país, visto que é uma fronteira agrícola e sustenta um dos maiores biomas do mundo, fazendo importante utilização do solo nos mais diversos tipos de atividades: agropecuária, mineração, exploração madeireira.

A análise estrutural, proposta por René Boulet (1982a, 1982b, 1982c), tornou compreensível a distribuição dos solos nas paisagens e vertentes, sua disposição e os processos ligados a essa organização. Esse método modificou consideravelmente a visão do homem sobre o solo, trazendo, por um lado, elementos fundamentais sobre sua organização, gênese e a dinâmica do solo, e por outro, um método expressivo de análise e representação (BOULET et al., 1982a, 1982b, 1982c).

Essa análise, em conjunto com as convencionais (mineralogia, química e física) de reconhecimento do solo, suas características e propriedades, contribui para maior conhecimento sobre seu funcionamento.

## **1.2 Contextualização do problema**

Estudos da USP/MDA/FAO (STEEG et al., 2003) mostram que a região Norte apresenta a maior limitação para uso dos solos quando comparados à média nacional, sendo

que 64% dos projetos de assentamentos (PAs) se concentram em solos com restrita profundidade de enraizamento, capacidade de retenção de água, disponibilidade de nutrientes e susceptibilidade à erosão. É evidente que há pouca escolha de localização dos PAs em função de tipos e qualidades do solo. Grande parte dos assentamentos rurais se situa em áreas de elevada restrição do solo.

No Sudeste do Pará, a agricultura familiar é apontada como uma das grandes modificadoras da cobertura vegetal amazônica. Embora os pequenos agricultores sejam responsáveis por apenas 30% do desmatamento, a intensidade das práticas nas áreas ocupadas por estes, é maior que a dos fazendeiros (FEARNSIDE, 1994; HURTIENNE, 2005). Conseqüentemente, esses pequenos estabelecimentos têm apresentado grandes problemas com utilização do solo, disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos, e produção vegetal.

As regiões sul e sudeste do Pará concentravam no ano de 2006, 443 assentamentos agrários (NAVEGANTES-ALVES, 2007). Isto contribuiu com a exploração, fragmentação e conversão de florestas primárias em áreas de uso agrícolas (BROWN; LUGO, 1990). A concentração de pequenos produtores e suas atividades econômicas exerce pressão sobre os recursos naturais amazônicos, aumentando a taxa de desmatamento e a utilização destes recursos. A atual situação econômica, ecológica, política e até mesmo cultural da região se deve ao contexto histórico onde se encontram estes assentamentos.

### **1.2.1 Breve histórico da ocupação das terras e o desmatamento na região Sudeste do Pará**

A região Sudeste do Pará teve três grandes momentos históricos de ocupação, conforme Michelotti (2009): o primeiro período se caracteriza pela existência de “frente de expansão da castanha e pecuária”; o segundo, pela existência de uma “frente de expansão agrícola – posseira”; o terceiro, pela luta dos “sem terra”.

No primeiro período, a exploração da castanha-do-pará teve como mola propulsora a queda do extrativismo da borracha. Essa nova atividade econômica contribuiu com a vinda sazonal de muitos migrantes, crescimento do comércio, e também a implantação das primeiras pastagens para as tropas de animais que faziam o transporte da castanha das florestas até os rios. Até a década de 1960, com a exploração de castanha mais consolidada, aumentaram-se as pastagens artificiais, mas a produção de carne bovina era apenas para alimentação local. Já na década de 1970, a produção de carne tomou maiores proporções, havendo significativa

substituição dos castanhais por pastagens, pois a pecuária não era uma atividade sazonal. Houve o estabelecimento de um fluxo migratório que explorava a floresta e vivia de uma agricultura de subsistência. A partir de então esses agricultores sentiram a necessidade de permanecer na propriedade, sendo donos de suas áreas para desenvolverem atividades agropecuárias. A transformação de comportamento e as mudanças de atividades econômicas, constituíram o segundo período.

A necessidade de permanência e posse da terra muitas vezes acontecia na ilegalidade, sem reconhecimento do governo, fator contribuinte para o crescimento de um clima de resistência e violência. Pereira (2007) ressalta que o fato dessa luta pela terra empreendida pelo posseiro, seja na resistência à expulsão, seja na ocupação de novas áreas, contribuiu para o estabelecimento de relativo isolamento em pequenos grupos, cujo principal objetivo era a conquista da propriedade pelo enfrentamento direto do fazendeiro-grileiro que o ameaçava. Nisto então se consistiu o terceiro período a partir de 1990 (MICHELOTTI, 2009). A posse de terra teve influências nesta transformação do espaço (FEARNSIDE, 2001; CARRERO, 2009).

Juntamente com todos esses momentos citados, houve também a chegada dos grandes projetos que levaram essa região à contínua alteração da paisagem. A migração oriunda principalmente do nordeste e centro-oeste do país, e a chegada da mão-de-obra barata, resultou em importantes transformações na forma de exploração da terra.

Neste contexto, o Plano de Desenvolvimento do Sudeste do Pará situa a região sudeste do Pará em um complexo contexto sociocultural e uma das mais importantes fronteiras agrícolas da Amazônia. O Sudeste do Pará, possui uma dinâmica onde ocorreram e ocorrem transformações econômicas, que contribuem significativamente para o dinamismo da paisagem (COSTA, 2008). Associado a esse dinamismo, o desmatamento das frondosas florestas dá espaço à chegada de novas atividades econômicas. Essa região tem a maior parte da sua área já desmatada e, é apontada como uma região onde os processos de ocupação foram mais intensos a partir da década de 1970. Localizada na “fronteira consolidada do desmatamento”, conhecido como arco do desmatamento, essa região do Pará faz parte da maior participação na faixa de desmatamento acima de 50% (RIVERO et al., 1999).

## 1.2.2 Projeto de Assentamento Agroextrativista (PAE): uma nova opção para o Sudeste Paraense

“...tanta coisa bonita que se viu falar... o Agroextrativista foi um modelo em 97...depois...ah, é uma árvorezinha...uma madeirinha ali, tudo é ‘pequeninin’, mas o rombo na floresta fica imenso, é irreparável...”

Maria do Espírito Santo (ex-moradora do PAE)

Agricultores familiares da região Sudeste do Pará, no ano de 1997, decidiram criar o único assentamento de caráter agroextrativista conhecido como Projeto de Assentamento Agroextrativista Praialta Piranheira (PAE), que, partindo do projeto inicial, se tornaria referência pela forma ecológica e econômica de se produzir.

O objetivo do sistema de produção adotado no PAE é valorizar o uso e agregar valor aos recursos naturais, principalmente das espécies nativas como o cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), açai (*Euterpe oleracea*), castanha-do-brasil (*Bertolletia excelsa*) e andiroba (*Carapa guianensis*). Dessa forma, existe contribuição para a economia local, pois o mercado cada vez mais tem se voltado para utilização dos produtos florestais, mantendo a floresta e os recursos que dela dependem.

Porém, ao longo dos anos se observou a expansão da pecuária, tornando-se a principal atividade econômica do assentamento, igualando-se à mesma dinâmica de uso do solo dos demais assentamentos: mudança da cobertura vegetal de floresta com posterior implantação da roça e após pastagem, ou ainda diretamente para pastagem (CERRI et al., 1985; BINSWANGER, 1991; FEARNSSIDE, 2001; BARRETO; SILVA, 2009).

### 1.2.2.1 Dinâmica do uso da terra no Projeto Agroextrativista Praialta Piranheira

Neste projeto de assentamento, metade dos agricultores tiveram acesso à financiamento do governo federal (MENEZES, 2002). Este fato contribuiu com a mudança de uso da terra de exploração extrativista florestal, para aumento de áreas agrícolas que posteriormente viriam a se tornar pastagem, ou que diretamente se tornaram áreas para pecuária, geralmente bovina.

Os sistemas de produção agrícola são desenvolvidos com baixa diversificação e baixo nível tecnológico, em propriedades de pequenas dimensões, concentradas entre 25 e 75

hectares (MENEZES, 2002; WATRIN et al., 2005). Assim sendo, o uso do fogo ainda se torna a principal forma de limpeza da área.

Após a derrubada da floresta, queima e limpeza parcial da área, para a formação da roça, roças consorciadas de arroz, milho e mandioca eram implantadas, as culturas mais ocorrentes no assentamento, que serviam tanto para consumo do estabelecimento agrícola (família, alimentação de pequenos animais, troca de favores), como para comercialização local. Depois do primeiro ano agrícola, caso o agricultor tivesse interesse em formar pastagem no segundo ano, juntamente às culturas citadas anteriormente, implantava braquiária, pois após a colheita, a pastagem já estaria quase formada, e com implantação de mais sementes, no próximo período chuvoso, a pastagem já estava pronta para entrada dos animais.

Essa dinâmica é adotada pela maioria dos agricultores do Agroextrativista, visto que são poucos os que possuem plantio de perenes, ou se dedicam a outras atividades agropecuárias no local.

Este tipo de sucessão de sistemas agrícolas que adotam a pastagem como principal atividade levam à rápida degradação se o manejo não for adequado. Os pequenos agricultores tendem a implantar a pastagem como sucessão da floresta, e/ou da roça, e utilizam, em sua maioria, o fogo para limpeza. O problema é que com a precariedade das condições química e física dos solos, com o estabelecimento de pequena dimensão para fazer rotação do gado, com a deficiência de insumos de qualidade e com a cobertura deficiente da superfície do solo, há queda rápida da produtividade (THOMAZ, 2007).

Associada à degradação das pastagens, a dos solos implica na diminuição da sua capacidade produtiva pelo uso intensivo, que leva à mudanças adversas em suas propriedades. Os processos que provocam a degradação de solos podem ser físicos, químicos, ou biológicos. Entre estes fatores está o declínio da estrutura do solo, a redução da capacidade de infiltração, a depleção de matéria orgânica, a redução da biomassa de carbono e o aumento de patógenos do solo. A taxa de degradação do solo por diferentes processos é acentuada pela má utilização da terra e por métodos de manejo inviáveis do solo e das culturas (AHN, 1968; ALEGRE; CASSEL, 1996).

O estresse do pisoteamento causa impactos negativos nas propriedades hidrológicas que reduz a infiltração e aumentam o *runoff*, a erosão e a densidade, havendo destruição de poros e compactação do solo (MARTÍNEZ; ZINCK, 2004; HASSLER et al., 2011).

### **1.2.3 Declínio da qualidade do solo: por que é interessante estudar?**

Sendo o solo importante para a manutenção da vida, dinâmicas de uso e manejo como as do Agroextrativista, preocupam, pois é um sistema que, conforme é manejado, em condições precárias, sem muitos *inputs*, exigindo unicamente do que a natureza pode fornecer, tendem a exigir do solo, não protegendo-o. Esta situação permite aferir que em poucos anos, a produção agropecuária não será mais a mesma. Por isso, os diferentes estudos do solo, existem para conhecer melhor o sistema ao qual se estuda.

As análises físico-hídricas são eficazes para identificar as diferenças entre tipos de uso do solo, e existem alguns trabalhos abordando a respeito (BOIVIN et al., 2006a, 2009; BOIVIN, 2007). Uma importante abordagem sobre a mudança estrutural do solo começou a ser estudada na década de 80, por Erik Braudeau (1988), com enfoque maior na física e termodinâmica da água. Esse tipo de análise, estuda a variação do volume da massa da amostra de solo em função de seu teor de água, isto se torna importante pois demonstrará o comportamento do solo e suas variações, que serão dependentes tanto de seus atributos originais, de sua formação, tanto de sua forma física, estrutural, que pode ser alterada conforme seu manejo. Sendo assim, é uma análise que conhece o solo sob diferentes formas.

A alteração física do solo é de relevante importância, pois os efeitos danosos de um manejo inadequado, o uso agrícola intensivo, ou até mesmo a limitação natural dos solos, por sua textura, profundidade, são fatores que evidenciam a necessidade de uma nova postura a respeito das práticas, pois não apenas a quantidade de elementos nutritivos passou a interessar, mas também as condições físicas que as raízes encontram no corpo do solo (HÉNIN et al., 1960; SOARES; ESPÍNDOLA; CASTRO, 2005).

A motivação para estudos que visem a prevenção da abertura de novas florestas e tecnologias para a restauração de pastagens já estabelecidas e degradadas é bastante forte, principalmente, quando se pensa na agricultura familiar amazônica, onde há poucos estudos científicos com enfoques pedológicos. Este tipo de agricultura vem se destacando como geradora de novas fontes de trabalho, sendo que no ranking mundial, o Brasil lidera as exportações de carne de porco, bovina e de aves (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL - ONU, 2013). É preciso contribuir com o crescimento e, principalmente, na diversificação da produção destas áreas de fronteiras agrícolas, que são marcadas por história de política de exploração.

A partir das abordagens e da problemática descrita, o presente trabalho tem como hipóteses:

- (I) As limitações do funcionamento dos solos em estudo são reflexos do manejo empregado e não das suas características naturais;
- (II) Os solos sob pastagem apresentam maiores alterações estruturais que os solos sob floresta, havendo diminuição de sua qualidade físico-hídrica;
- (III) O uso de medidas como a curva de retração do solo e a curva de retenção de água no solo são parâmetros que permitem o conhecimento da qualidade física do solo e possibilitam entender o comportamento hidroestrutural dos solos sob floresta e sob pastagem em solos amazônicos.

O objetivo deste trabalho é conhecer o solo a partir de caracterização morfológica, química e físico-hídrica de duas topossequências, uma com vegetação nativa e outra com pastagens em área de agricultura familiar. A principal motivação é a dificuldade em encontrar dados científicos mais detalhados sobre os solos desta parte da Amazônia, bem como a importância da aplicação de novas metodologias que contribuam para compreensão deste bioma.

Para isto, este trabalho será dividido em quatro capítulos que auxiliarão na obtenção do objetivo apresentado.

- Análise estrutural de solos em duas topossequências sob floresta e pastagem na Amazônia Oriental
- Análise micromorfométrica da estrutura e atributos hídricos de solos sob floresta e pastagem no sudeste paraense
- Curvas de retração em solos sob floresta e pastagem na Amazônia Oriental
- Relação entre variáveis das curvas de retenção de água no solo e de retração do solo em uma topossequência sob floresta e pastagem

## Referências

AHN, P.M. The effects of large scale mechanized agriculture on the physical properties of West African soils. **Ghana Journal of Agricultural Science**, Legon, v. 1, p. 35-40, 1968.

ALEGRE, J.C.; CASSEL, D.K. Dynamics of soil physical properties under alternative systems to slash-and-burn. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 58, p. 39-48, 1996.

- ANDRADE, H.; SCHAEFER, C.E.; DEMATTÊ, J.L.I.; ANDRADE, F.V. Pedogeomorfologia e micropedologia de uma seqüência Latossolo - Areia Quartzosa Hidromórfica sobre rochas cristalinas do Estado do Amazonas. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 1, p. 55-66, 1997.
- BARRETO, P.; SILVA, D. Os desafios para uma pecuária mais sustentável na Amazônia. **O Estado da Amazônia / Imazon**, Belém, n. 14, p. 6, 2009.
- BINSWANGER, H.P. Brazilian policies that encourage deforestation in the Amazon. **World Development**, Washington, v. 19, n. 7, p. 821-829, 1991.
- BIRKELAND, P.W. **Soils and geomorphology**. New York: Oxford University Press, 1999. 430 p.
- BOIVIN, P. Anisotropy, cracking, and shrinkage of Vertisol samples experimental study and shrinkage modeling. **Geoderma**, Amsterdam, v. 138, n. 1/2, p. 25-38, Feb. 2007.
- BOIVIN, P.; SCHÄFFER, B.; STURNY, W. Quantifying the relationship between soil organic carbon and soil physical properties using shrinkage modelling. **European Journal of Soil Science**, Malden, v. 60, p. 265–275, 2009.
- BOIVIN, P.; SCHÄFFER, B.; TEMGOUA, E.; GRATIER, M.; STEINMAN, G. Assessment of soil compaction using soil shrinkage modelling: Experimental data and perspectives. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, n. 1/2, p. 65-79, July 2006.
- BOULET, R.; HUMBEL, F.-X.; LUCAS, Y. Analyse structurale et cartographie en pédologie. II – une méthode d’analyse prenant en compte l’organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. **Cahiers de l’O.R.S.T.O.M. Série Pédologie**, Bondy, v. 19, n. 4, p. 323-339, 1982a.
- \_\_\_\_\_. Analyse structurale et cartographie en pédologie. III – passage de la phase analytique a une cartographie générale synthétique. **Cahiers de l’O.R.S.T.O.M. Série Pédologie**, Bondy, v. 19, n. 4, p. 341-351, 1982b.
- BOULET, R.; CHAUVEL, A.; HUMBEL, F.-X.; LUCAS, Y. Analyse structurale et cartographie en pédologie 1 – prise en compte de l’organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique: mes études de toposéquences et leurs principaux apports a la connaissance des sols. **Cahiers de l’O.R.S.T.O.M. Série Pédologie**, Bondy, v. 19, n. 4, p. 309-321, 1982.
- BRAUDEAU, E. Méthode de caractérisation pédo-hydrrique des sols basée sur l’analyse de la courbe de retrait. **Cahiers de l’O.R.S.T.O.M. série Pédologie**, Bondy, v. 24, p. 179-189, 1988.
- BROWN, S.; LUGO, A. Tropical secondary forests. **Journal of Tropical Ecology**, New York, v. 6, p. 1-32, 1990.
- BOCKHEIM, J.G.; GENNADIYEV, A.N.; HAMMER, R.D.; TANDARICH, J.P. Historical development of key concepts in pedology. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, p. 23-36, 2005.



BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Albrington: Waine Research, 1985. 152 p.

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

CARRERO, G.C. **Dinâmica do desmatamento e consolidação de propriedades rurais na fronteira de expansão agropecuária no sudeste do Amazonas**. 2009. 78 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2009.

CASTRO, S.S.; COOPER, M.; SANTOS, M.C.; VIDAL TORRADO, P. Micromorfologia do solo: bases e aplicações. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3, p. 107-164.

CERRI, C.C.; VOLKOFF, B.; EDUARDO, B.P. Biomassa microbiana em Latossolo Amarelo da Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 9, p. 1-4, 1985.

COSTA, F.A. Corporação e economia local: uma análise usando Contas Sociais Alfa (CS $\alpha$ ) do programa de investimentos da CVRD no Sudeste Paraense (2004 – 2010). **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 18, n. 3, p. 429-470, set./dez. 2008.

DEMATTÊ, J.A.M.; ALOISI, R.R.; DEMATTÊ, J.L.I. Sequência Latossolo Amarelo, Podzólico Amarelo, Areias Quartzosas sobre material da formação Barreiras na região de Tucuruí, Estado do Pará. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 51, p. 345-356, maio/ago. 1994.

ESPÍNDOLA, C.R. História da pedologia: um resgate bibliográfico. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA EM ENSINO E HISTÓRIA DE CIÊNCIAS DA TERRA, 1.; SIMPÓSIO NACIONAL “O ENSINO DA GEOLOGIA NO BRASIL”, 3., 2007, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 2007. p. 349-352.

FEARNSIDE, P.M. Biomassa das florestas amazônicas brasileiras. In: SEMINÁRIO EMISSÃO E SEQUESTRO DE CO<sub>2</sub>: UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1994, Porto Alegre. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 95-124.

\_\_\_\_\_. Land-tenure issues as factors in environmental destruction in Brazilian Amazonia: the case of Southern Pará. **World Development**, Washington, v. 29, n. 8, p. 1361-1372, 2001.

HASSLER, S. K.; ZIMMERMANN, B.; VAN BREUGEL, M.; HALL, J. S.; ELSENBEEER, H. Recovery of saturated hydraulic conductivity under secondary succession on former pasture in the humid tropics. **Forest Ecology and Management**, Netherlands, v. 261, p. 1634-1642, 2011.

HÉNIN, S.; FEODOROFF, A.; GRAS, R. & MONNIER, G. **Le profil cultural: Principes de physique du sol**. Paris: Masson, 1960. 320p.

HUGGETT, R.J. Soil landscape systems: a model of soil genesis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 13, p. 1-22, 1975.

HURTIENNE, T. Análise socioeconômica dos sistemas de uso de terra por pequenos produtores agrários na Amazônia Oriental. **Novos Cadernos NAEA**, Belém, v. 7, n. 2, p. 191-272, 2005.

LEPSCH, I.F. **19 Lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456 p.

MARTINEZ, L.J.; ZINCK, J.A. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 75, p. 3-18, 2004.

MENEZES, A.J.E.A. de. **Análise econômica da “produção invisível” nos estabelecimentos agrícolas familiares no Projeto de Assentamento Agroextrativista Praialta e Piranha, Município de Nova Ipixuna, Pará**. 2002. 130 p. Dissertação (Mestrado em Agriculturas Familiares e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Pará – Centro Agropecuário/Embrapa Amazônia Oriental, Belém, 2002.

MICHELOTTI, F. Luta pela terra e assentamentos no Sudeste do Pará. **Antropolítica: Revista Contemporânea de Antropologia**, Niterói, n. 26, p. 245, 2009.

NAVEGANTES-ALVES, L. Arranjo produtivo do leite do sudeste do Pará. In: CAMPOS, I. (Org.). **Plano de Desenvolvimento Sustentável da Amazônia Legal: estudos de aglomerações - PDSA 2005-2008**. Belém: Agência de Desenvolvimento da Amazônia, 2007. p. 11- 40.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **No Brasil, agricultura familiar representa 77% dos empregos no setor agrícola**. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/no-brasil-agricultura-familiar-representa-77-dos-empregos-no-setor-agricola/>>. Acesso em: 30 set. 2013.

PEREIRA, A.R. **Do posseiro ao sem-terra: a luta dos trabalhadores rurais pela posse da terra no Sudeste do Pará**. 2007. 113 p. Monografia (Curso de Especialização em História Social da Amazônia) – Universidade Federal do Pará, Marabá, 2007.

RIVERO, S.; ALMEIDA, O.; AVILA, S.; OLIVEIRA, W. Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 19, n. 1, p. 41-66, 1999.

RUELLAN, A.; DOSSO, M. **Régards sur le sol**. Paris: Foucher, AUPELF, 1993. 192 p.

SOARES, J.L.N.; ESPÍNDOLA, C.R.; CASTRO, S.S. de. Alteração física e morfológica em solos cultivados sob sistema tradicional de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p.1005-1014, 2005.

STEEG, J.; COOPER, M.; DOURADO NETO, D. SPAROVEK, G.; MAULE, R. F. Os assentamentos inseridos no contexto nacional. In: SPAROVEK, G. **A qualidade dos assentamentos da reforma agrária brasileira**. São Paulo: Páginas & Letras, 2003.

THOMAZ, E. L. Dinâmica do uso da terra e degradação do solo na Bacia do Rio Guabiroba – Guarapuava/PR. **Rev. RA'E GA O Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, n. 13, p. 109-128, 2007.

WATRIN, O. dos. S.; CRUZ, C.B.M; SHIMABUKURO, Y.E. Análise evolutiva da cobertura vegetal e do uso da terra em projetos de assentamentos na fronteira agrícola amazônica, utilizando geotecnologias. **Geografia**, Rio Claro, v. 30, p.59-76, 2005.

## 2 ANÁLISE ESTRUTURAL DE SOLOS EM DUAS TOPOSSEQUÊNCIAS SOB FLORESTA E PASTAGEM NA AMAZÔNIA ORIENTAL

### Resumo

O conhecimento do solo na floresta amazônica torna-se cada vez mais primordial face às modificações ambientais que esta vem sofrendo. Pesquisas criteriosas associadas à realidade agrária aumentam a confiabilidade de suas aplicações no futuro. Devido isto é importante o conhecimento da geometria dos horizontes através do estudo da análise estrutural do solo, que permite a 'reconstrução visual' da distribuição dos solos nas paisagens. O estudo foi conduzido em um assentamento de agricultura familiar no Sudeste do Pará (Nova Ipixuna), com o objetivo de caracterizar os solos que se desenvolvem sobre os dois principais tipo de uso do solo local: floresta e pastagem. Os solos foram caracterizados após tradagens e abertura de perfis para reconstrução da geometria bidimensional dos horizontes ao longo da vertente e coletas de solo para análises mineralógicas, físicas e químicas. Os resultados da análise estrutural indicaram que os solos estudados sob floresta e pastagem possuem sete compartimentos, diferenciados por suas características e propriedades. Nas camadas superficiais, a estrutura granular contribuiu com maior porosidade complexa e esteve relacionada a maior quantidade de areia e matéria orgânica. Em profundidade, o conteúdo de argila foi aumentando, e contribuiu com a modificação de estrutura granular a blocos subangulares, e modificação do tipo de porosidade. Os solos mais profundos apresentaram diferentes comportamentos, ora como argilosos, ora como arenosos. De forma geral, os solos foram caracterizados como caulíníficos, pobres nutricionalmente, adensados em subsuperfície, havendo segregação de ferro nos horizontes mais profundos.

Palavras chave: Floresta; Pastagem; Caracterização do solo; Análise estrutural

### Abstract

The knowledge of the soil in the Amazon forest becomes increasingly important given the environmental changes that this biome has suffered. Insightful research associated with agrarian reality increase the reliability of their applications in the future. The knowledge of the soil horizons geometry by studying their structural analysis, allows the 'visual reconstruction' of the soils distribution in the landscape. The study was carried out in a family farming settlement in south-eastern of Pará state (Nova Ipixuna), aiming to characterize the soils that were developed on the two main types of local land use: forest and grassland. Soils were characterized by opening soil profiles and soil sample auger for reconstruction of two-dimensional geometry of horizons along the slope and soil sampling for mineralogical, chemical and physical analyzes. The structural analysis results indicated that the studied soils under forest and grassland have seven compartments, distinguished by their characteristics and properties. The soils were characterized as kaolinitic, poor nutritionally, dense in subsurface, with activity of iron in the deeper horizons.

Keywords: Forest; Pasture; Soil characterization; Structural analysis

## 2.1 Introdução

O solo é composto de minerais, água, ar e matéria orgânica, e possui diferentes características que dependem da quantidade e origem de cada um desses elementos, e do local no relevo. A morfologia é definida como as características visíveis de um solo; é o estudo e a descrição da aparência do solo em seu ambiente natural, segundo as características visíveis a olho nu, ou prontamente perceptíveis ao tato. É também, o resultado da história da evolução e da dinâmica atual dos constituintes do solo (LEPSCH, 2011). A cor, estrutura, consistência, cerosidade, espessura, arranjo dos horizontes são atributos que contribuem na classificação do solo e ajudam entender o comportamento deste em relação à água, à flora e fauna do solo.

O conhecimento da morfologia do solo a partir de uma análise vertical é importante para conhecer a distribuição dos horizontes, e ter uma primeira noção sobre o comportamento deste. Mas quando é possível conhecer o solo também horizontalmente, pode-se compreender as diferenciações pedológicas ao longo das vertentes, aferindo sobre o comportamento do solo em uma escala mais abrangente. A análise estrutural considera a geometria lateral e vertical dos horizontes do solo num mesmo local (BOCQUIER, 1973; BOULET et al., 1982 a, 1982b, 1982c). Esta análise considera não somente o perfil de solo, mas também outros fatores que contribuem com a formação da paisagem, como o relevo, a vegetação, e quando existentes, o impacto das atividades humanas, no sistema solo.

Vários pedólogos com interesse nessa visão contínua, organizada e estruturada do solo ao longo das vertentes, aplicaram a análise estrutural em diferentes locais, e diversas áreas da ciência do solo. Essa abordagem começou com os franceses, na década de 1970, em estudos na Guiana Francesa e na África. No Brasil, os estudos são mais recentes e foram desenvolvidos em contribuição com os franceses. Essas pesquisas envolvem observações minuciosas de campo, determinações clássicas das propriedades físicas, químicas e mineralógicas, e em alguns casos, análises micromorfológicas em lâminas delgadas, observações em microscopia eletrônica e microsonda; também são realizados ensaios de campo e laboratório para caracterização hídrica do solo (QUEIROZ NETO, 2001).

As pesquisas nacionais com a aplicação da análise estrutural do solo estão em diversos campos de pesquisa e locais do país (NASCIMENTO et al., 2004; BARDY et al., 2008). Há ainda trabalhos que relacionam este tipo de análise aos atributos físicos e

morfológicos do solo, e à conservação do solo (QUEIROZ NETO, 1988; SABATIER et al., 1997; JUHÁSZ et al., 2006; COOPER et al., 2013).

Desta forma, o objetivo geral deste capítulo foi o de caracterizar e compreender a distribuição dos solos em uma topossequência sob dois tipos de uso: floresta e pastagem, em um estabelecimento agrícola da Amazônia Oriental.

## 2.2 Material e Métodos

### 2.2.1 O meio físico

A área de estudo localiza-se no Projeto de Assentamento Agroextrativista Praiaalta Piranheira, localidade Maçaranduba II, no município de Nova Ipixuna/Pará, entre as coordenadas: 04°45'00" a 04°58'11"S e 49°15'02" a 49°25'21"W, distando, aproximadamente 573 km da capital Belém (Figura 2.1). O assentamento é dividido em 5 localidades: Vila Cupu, Maçaranduba I e II, Praiaalta e Piranheira.

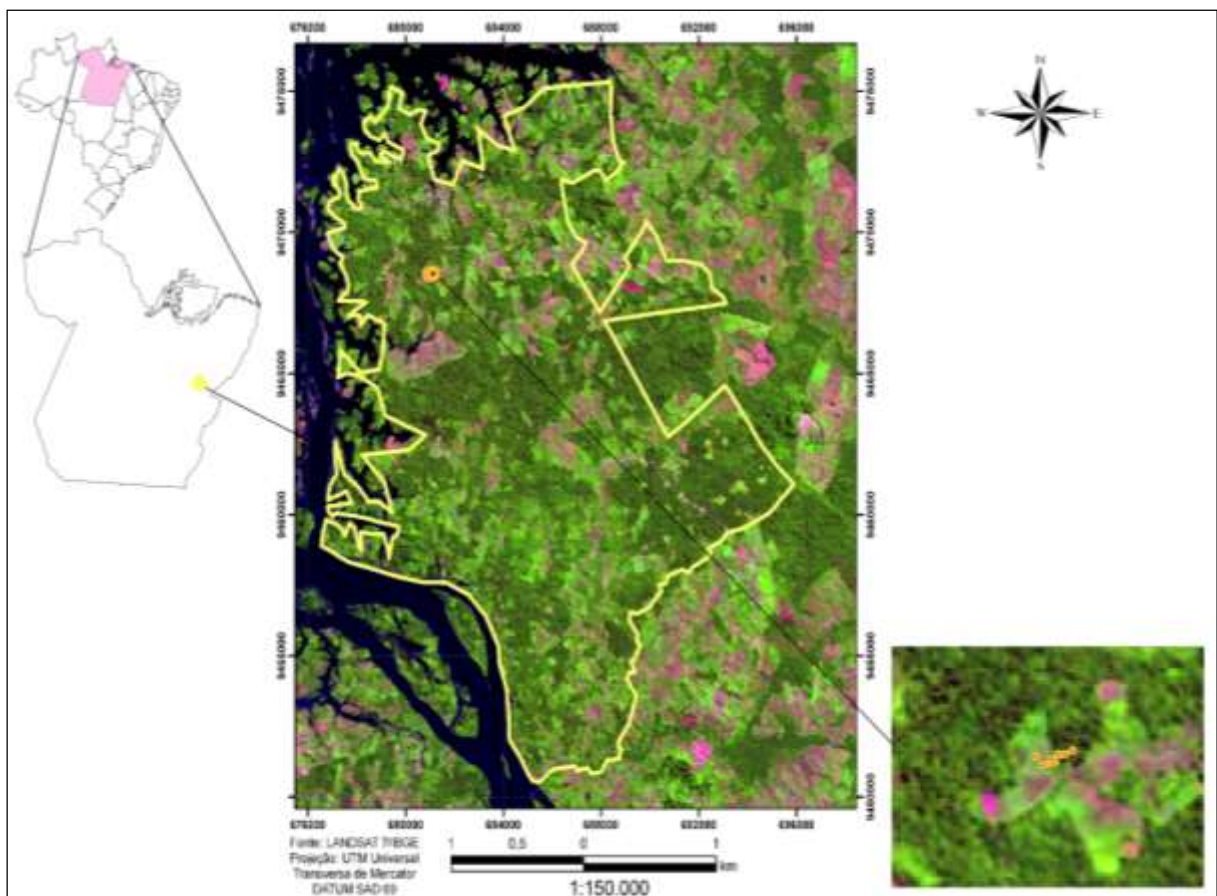


Figura 2.1 - Projeto de Assentamento Agroextrativista Praiaalta Piranheira no município de Nova Ipixuna/Pará, localidade de Maçaranduba II e localização da área de estudo

A geologia desta região pertence ao Domínio Bacajá. O conhecimento desse domínio é mínimo quando comparado aos das regiões vizinhas, Carajás e Tapajós, contando com levantamentos das décadas de 1970-1980 feitas pela SUDAM e RADAM (VASQUEZ, 2006; CARNEIRO, 2010). Porém, o Projeto Mapa Geológico do Estado do Pará (2004), atualizou os dados sobre a geologia do Estado próximas aos principais rios, rodovias e vicinais. Assim, Nova Ipixuna encontra-se no Complexo Metamórfico Cajazeiras (Domínio Bacajá), que possui rochas compostas por granulitos rehidratados de composição tonalítica a granulítica, ortognaisses enderbíticos a charnockíticos, frequentemente retrometamorfisados contendo localmente piroxênio, e por milonitos de alto grau (VASQUEZ, 2006; VASQUEZ; ROSA-COSTA, 2008; CARNEIRO, 2010). Estas rochas dão origem a solos ricos em quartzo e pequena quantidade de feldspato potássico, e são fortemente afetadas pelo metamorfismo com cristais fragmentados que resultam em solos com granulometria mais fina.

O relevo da região é inserido na Depressão do Baixo Rio Araguaia, com faixas de dobramentos e coberturas metassedimentares (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2008). Tem formas variadas, uma parte acidentada e mais comumente áreas de baixas colinas e áreas de topos aplainados, favorecendo em alguns locais a erosão laminar e, em outros, o escoamento superficial, que dão origem a sulcos e formações superficiais rasas e pedregosas (TRICART, 1977). Regionalmente, essas formas de relevo estão inseridas na Depressão Periférica do Sul do Pará (caracterizada como resultado da atuação dos processos erosivos), e no Planalto Dissecado do Sul do Pará (resultado da dissecação de antigos pediplanos) (COPSERVIÇOS, 2009).

De acordo com a COPSERVIÇOS (2009), os solos da região são classificados como Argissolos Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolos Vermelho-Amarelo (LVA), além de Gleissolos Háplicos (GX), Plintossolos Háplicos (FX), Neossolos Litólicos Eutróficos (RLe) e Distróficos (RLd), e, em menores proporções os Neossolos Litólicos Distróficos e afloramentos. A vegetação característica é a Floresta Equatorial Latifoliada com variações que favorecem o aparecimento dos subtipos: Floresta Densa Submontana em relevo aplainado e em relevo acidentado, Floresta Aberta Latifoliada, entremeada de pequenas áreas de capoeira, originárias da implantação de culturas de subsistência, pastagens abandonadas, áreas de pouso, dentre outras dinâmicas (SEPOF-PA, 2007).

O clima, segundo classificação de Köppen, insere-se na categoria de equatorial super-úmido (Am), no limite de transição para o tipo clima tropical com estação seca de inverno (Aw). Apresenta índices pluviométricos anuais altos, entre os meses de outubro a

abril, em torno de 2000 mm, com ocorrência de nítida estação seca de aproximadamente cinco meses, maio a setembro, sendo que a precipitação pluviométrica do mês mais seco é inferior a 60 mm. O regime hídrico da região caracteriza-se por elevados valores médios de umidade relativa do ar, durante a maior parte do ano. Em média são encontrados valores sempre acima de 80%, juntamente com as chuvas. Entre os meses de junho a setembro há diminuição para 70%. Possui temperatura média anual de 26°C, com a máxima corresponde a 32°C e mínima a 22°C (SAMPAIO et al., 2004; SEPOF-PA, 2007; COPSERVIÇOS, 2007).

### **2.2.2 Breve histórico da área**

O local selecionado para este estudo se encontra em um estabelecimento agrícola do Projeto de Assentamento Agroextrativista, especificamente na localidade de Maçaranduba II. Atualmente, no estabelecimento, o agricultor faz uso da floresta como renda familiar, através do extrativismo. Anteriormente, o proprietário do lote utilizou parte da área como pastagem por 10 anos, percebendo que a atividade não era muito lucrativa e sustentável para o tamanho da propriedade. As áreas de pastagem viraram áreas de pousio há aproximadamente 6 anos.

Quando o agricultor possuía áreas de pastagem, o manejo empregado, era o mesmo da maioria dos agricultores familiares: implantação da pastagem, com a gramínea *Brachiaria brizantha* juntamente à roça de arroz-milho-mandioca. Após a colheita das culturas, ocorria a entrada do animal. Os animais eram retirados quando a gramínea existente não era o suficiente para o pastejo, então ocorria a queimada da antiga pastagem, para renovação da área com implantação de nova gramínea. Isto geralmente ocorria a cada 3 anos. A limpeza da área era realizada com uso do fogo. Após 4 meses, a gramínea era implantada.

### **2.2.3 Metodologia de coleta de amostras e análises laboratoriais**

A floresta selecionada é utilizada somente para a coleta de castanha, andiroba, cupuaçu nativo e açaí. A pastagem escolhida, foi colocada em pousio há 6 anos, não recebendo desde aquela época manejo com fogo. Esporadicamente, o proprietário alugava a área por aproximadamente cinquenta dias, para pastejo bovino pertencente a vizinhos.

As topossequências foram escolhidas como representativas dos solos predominantes no assentamento, e estão posicionadas uma face à outra. Essa representatividade se deu por levantamentos anteriores realizados pelo Projeto AMAZ (LO-MAN-HUNG et al., 2011). A



disposição das topossequências estudadas seguiu a linha de maior declive da vertente, de montante à jusante. Em cada tipo de uso do solo, foram abertos 3 perfis: à montante, outro na parte intermediária do relevo e o terceiro à jusante (Figura 2.2). A parte mais baixa do relevo sofre influência de um pequeno córrego que todos os anos, no período chuvoso, aumenta o seu volume de água.

Escolhido o local para estudo, foram abertas trincheiras nas três posições da encosta, com a finalidade de conhecer a distribuição geométrica dos horizontes na topossequência (BOULET et al., 1982a, b, c).

Os perfis foram nomeados em floresta como F1, F2 e F3, da parte mais elevada para a parte inferior, e sob pastagem, P1, P2 e P3, também de montante à jusante. Em cada perfil, foi feita a descrição morfológica dos horizontes, segundo Lemos e Santos (2005), e posteriormente a coleta para as demais análises.

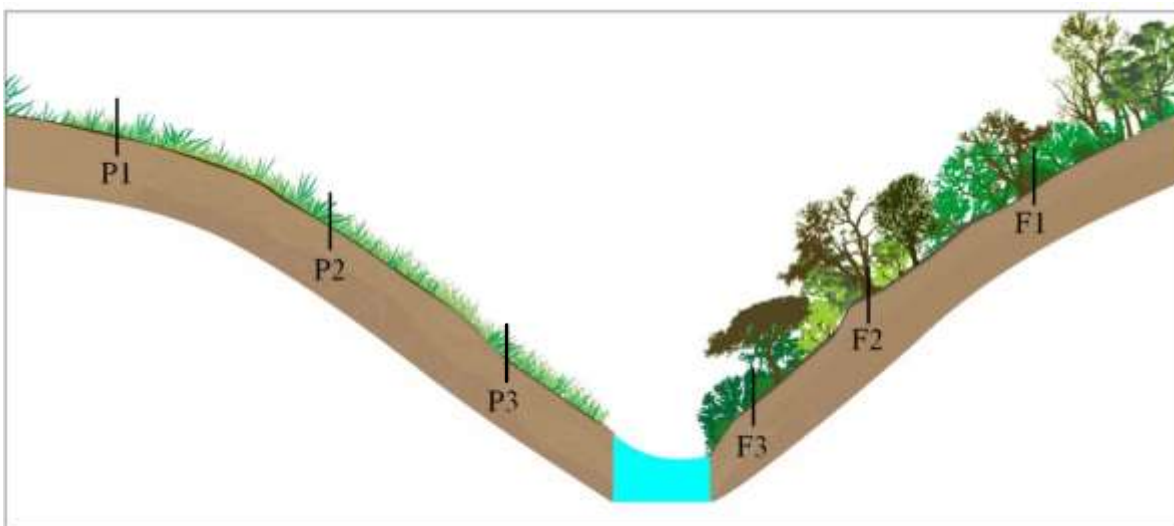


Figura 2.2 - Esquema da topossequência sob floresta e pastagem e localização dos perfis analisados no Projeto de Assentamento Agroextrativista Praia Alta Piranha, município de Nova Ipixuna/Pará, localidade de Maçaranduba II

Os solos foram classificados segundo critérios estabelecidos pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos até o 4º nível (EMBRAPA, 2013), e relacionados ao Sistema americano de classificação de solos Soil Taxonomy (USDA/NRCS) e ao World Reference Base (FAO/Unesco). O protocolo de amostragem para todas as análises foi baseado nas descrições morfológicas e separação dos horizontes.

A topossequência foi detalhada através de sucessivas tradagens, que foram feitas entre os perfis para definir as transições horizontais e verticais dos horizontes do solo, e reconstituir a geometria ao longo do transecto, à montante, na parte intermediária (meia

encosta) e jusante (BOULET et al., 1982a, b, c). As distâncias e localização dos pontos foram medidas com auxílio de GPS e trena, e a inclinação do relevo, feita com clinômetro.

A morfologia do solo e relevo foram descritos segundo Lemos e Santos (2005) e a classificação da liteira, de acordo com Luizão (2007).

As análises físicas, mineralógicas e químicas foram feitas com amostras deformadas e coletadas em cada horizonte dos perfis. As amostras deformadas foram secas ao ar, e peneiradas a 2 mm para uniformização de tamanho e obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA). As análises foram realizadas nos laboratórios de Ciência do Solo da ESALQ/USP em Piracicaba/SP.

## **2.2.4 Caracterização mineralógica da fração argila**

Esta análise foi realizada com a finalidade de identificar os minerais existentes nos solos estudados, na fração argila, baseado na metodologia proposta por Mehra e Jackson, 1960.

### **2.2.4.1 Remoção de matéria orgânica**

Em um béquer de 600 ml, foi pesado 10g de solo e adicionado 20 ml de água oxigenada 30%. Primeiramente a matéria orgânica reagiu à frio por 20 minutos ou até a reação terminar. Após 20 minutos, ou após o término da reação, a amostra foi levada para placa aquecedora a 75° C, misturada e queimada por água oxigenada. Ao término da reação, a amostra foi retirada da placa aquecedora até esfriar naturalmente. A amostra transferida para tubos de centrífuga de 100 ml com NaOAc pH 5,0 foi lavada e centrifugada mais uma vez com NaOAc a fim de remover os cátions liberados. Depois de lavada uma vez com etanol, o sobrenadante foi centrifugado e sifonado.

### **2.2.4.2 Remoção de óxidos de ferro**

A remoção do ferro livre facilita a dispersão dos materiais do solo e, conseqüentemente, das suas diversas frações. Os óxidos de ferro removidos, além de possibilitar a concentração dos silicatos, favorece a orientação preferencial dos colóides do

solo, o que é útil na intensificação do feixe difratado dos espaçamentos basais, que caracterizam os diferentes tipos de argilominerais (CAMARGO et al., 2009).

Os óxidos de ferro secundários foram removidos com auxílio de uma solução de 40 ml da solução de citrato de sódio e 5 ml de solução de bicarbonato de sódio, feita em um béquer. As amostras, sem matéria orgânica, foram aquecidas a aproximadamente 45 minutos em banho-maria a 75°C, com adição de 3g de ditionito de sódio, a cada 15 minutos. Após a remoção dos óxidos, para retirada dos óxidos de ferro restantes, foi adicionado às amostras 10ml de acetona, agitado e centrifugado a 2400rpm por 10 minutos. O sobrenadante foi descartado.

#### **2.2.4.3 Separação de areia e silte e saturação de argila a K 25°C**

A separação da areia acontece com a amostra sem óxidos e sem matéria orgânica. Para isto, utilizou-se uma peneira de 270 mesh e um béquer de 600 ml e água destilada foram utilizados. A amostra foi agitada e peneirada. A peneira foi bem lavada para a separação completa da areia, dos demais componentes do solo. A areia fica retida na peneira, e no béquer ficam depositados silte+argila. A areia foi colocada em estufa para secagem.

O béquer contendo silte + argila é centrifugado em 2400 rpm por 3 minutos. O sobrenadante, que será a argila, é transferido para outro béquer. O silte permanece depositado no fundo do tubo, após separação, este é levado à estufa.

A saturação de argilas com K é recomendável, pois substitui os cátions que ocupam as posições de troca por cátions conhecidos (CAMARGO et al., 2009).

Em um béquer, contendo a argila sem matéria orgânica e óxidos de Fe, foi acrescentado 10 ml de HCl para floculação e decantação. Após, a amostra foi centrifugada e obtida somente argila a ser saturada com KCl. Para saturação da argila, foi adicionado 40 ml da solução de KCl à argila contida no béquer, centrifugado e descartado o sobrenadante, esse processo é repetido até o sobrenadante ficar límpido. As amostras foram preparadas em lâminas de vidro e orientadas. A difratometria de raios-X foi utilizada para identificação dos minerais, em temperatura de 25°C. A identificação da fração argila foi realizada pelo aparelho Miniflex II Desktop X-Ray Diffractometer Rigaku D-5000, com radiação de  $\text{CuK}\alpha$  e operado a 30 kV e 15 mA. As irradiações variaram de 3 a 60° 2 $\theta$ , com intervalo de 0,02 ° 2 $\theta$  para cada 2s/ passo.

## 2.2.5 Extração de óxidos de ferro

### 2.2.5.1 Método do Citrato-Ditionito-Bicarbonato (CDB)

Este método extrai o ferro livre da amostra de solo, não diferenciando entre óxidos hidratados do intemperismo e óxidos cristalinos primários.

A amostra foi aquecida em solução complexante tamponada de citrato/bicarbonato, e adicionado ditionito de sódio em pó como agente redutor. Após, foi submetida a banho-maria, centrifugada e preparada para leitura. O ferro foi determinado no extrato por espectrometria de absorção atômica, e calculado pela eq. (1), segundo Mckeague e Day (1966) e Wada (1989).

$$\%Fe = \frac{(leitura - a_{br} * diluição) * 100}{1000 * 1000} \quad (1)$$

Onde  $a_{br}$ : amostra em branco, e os fatores de conversão:

$$g/kg Fe_2O_3 = g/kg Fe \times 1,43$$

### 2.2.5.2 Método do Oxalato

Este método extrai, no escuro, os óxidos amorfos do solo (SCHWERTMANN, 1973). A amostra foi colocada junto com oxalato de amônio em agitador elétrico por 4 horas, com a finalidade de formar complexos coloidais após a dissolução dos óxidos e oxi-hidróxidos amorfos do solo, permanecendo inatacados os argilo-minerais cristalinos. A leitura foi determinada no extrato por espectrofotometria de absorção atômica e calculada pela eq. (2), segundo Mckeague e Day (1966) e Wada (1989).

$$\%Fe = \frac{(leitura - a_{br} * diluição) * 100}{500 * 1000} \quad (2)$$

Onde  $a_{br}$ : amostra em branco, e os fatores de conversão:

$$g/kg Fe_2O_3 = 1,43 \times g/kg Fe$$

## 2.2.6 Caracterização química

As determinações de Al, Ca, Mg, K, P disponível, acidez potencial, e matéria orgânica, seguiram metodologia proposta pela EMBRAPA (1997). Com base nos resultados destas análises químicas foram calculadas, a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (T), saturação por bases (V%) e a saturação por Al (m%). O pH foi determinado em água, em  $\text{CaCl}_2$   $0,01\text{mol L}^{-1}$ ; e em pH KCl  $1\text{mol L}^{-1}$  segundo EMBRAPA (1997) (Figura 2.3).

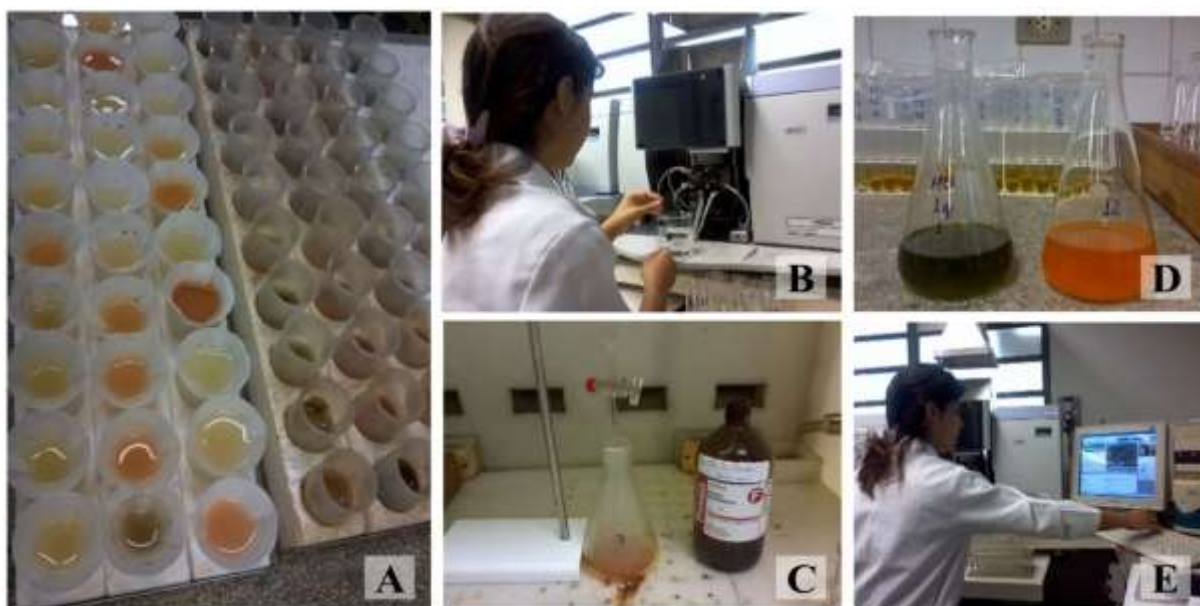


Figura 2.3 - Determinação das análises químicas de rotina nos solos analisados para: A) Filtração de solução de solo para determinação de  $\text{Al}^{3+}$ ; B) Leitura de elementos por fotômetro de chama; C) Titulação da matéria orgânica; D) Solução com difenilamina, após o ponto de viragem; E) Análise de P e a curva de calibração

### 2.2.6.1 Determinação do pH em $\text{CaCl}_2$ $0,01\text{mol L}^{-1}$ , KCl e água

Este método fornece a medida da atividade de hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) com eletrodo de vidro e referência, na suspensão de solo em  $\text{CaCl}_2$   $0,01\text{mol L}^{-1}$ , em KCl ou em água.

O pH em  $\text{CaCl}_2$  representa a atividade do íon  $\text{H}^+$  mais próxima daquela que acontece no ambiente radicular dos vegetais, pois sua concentração salina é semelhante a observada na maioria dos solos considerados férteis, associado a abundância do íon  $\text{Ca}^{2+}$  na maioria dos solos (RAIJ et al., 1987).

O pH quando medido pela solução de KCl, costuma dar valores menores que o pH medido em água, porque o contato da solução com a amostra de solo que induz à troca de cátions. A maior concentração dos íons  $\text{K}^+$  liberando íons  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  para a solução facilita a troca com os cátions e, conseqüentemente há aumento da acidez (EBELING et al., 2008).

Enquanto o pH em água, que mede a acidez ativa, costuma dar valores mais elevados que as demais análises, pois os ácidos mais fracos não aparecem na determinação. Por isso a utilidade de soluções que diminuam a influência de sais do solo no pH.

O preparo da solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  consistiu em dissolver 147 g de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  em água destilada ou deionizada, diluindo em 1000 mL em balão volumétrico e agitando. O pH da solução é ajustado entre 5,0 a 6,5 usando quando necessário  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a 0,1% ou  $\text{HCl}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ .

O procedimento analítico consistiu em transferir 10g de terra para frasco plástico, adicionar 25 mL da solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  e agitar a suspensão por 5 minutos. Após o repouso de 30 minutos, foi realizada a leitura.

A determinação de pH em água e pH em  $\text{KCl}$  1N, foi realizada pela substituição das soluções utilizadas, seguindo o mesmo procedimento descrito para o pH em  $\text{CaCl}_2$ .

Resultado: valor direto da Leitura.

### 2.2.6.2 Determinação da Acidez Trocável ( $\text{Al}^{3+}$ )

A extração do  $\text{Al}^{3+}$  ocorre através de reações de troca iônica, onde o excesso de um íon é capaz de descolar outros íons dos colóides do solo, os quais serão posteriormente determinados por meio da titulação.

O procedimento para a determinação do alumínio trocável constou na adição de 5 g de solo em um erlenmeyer, 50 mL de  $\text{KCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$  agitado por 15 minutos. Logo após, a solução foi filtrada (decantou durante a noite) e uma alíquota de 25 mL foi retirada do filtrado. Depois do processo de decantação, os 25 mL do sobrenadante foi transferido para outro erlenmeyer e titulado com solução padronizada de  $\text{NaOH}$   $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ , e adicionadas 3 gotas de fenolftaleína (indicador com ponto de viragem, cor rosa). Este cálculo é demonstrado na eq. (3). A amostra em branco foi feita com a solução de  $\text{KCl}$  sem  $\text{H}^+$ .

$$Al = \frac{[(V_{am} - V_{br}) * C_{NaOH} * 50 * 1000]}{25 * 2,5} \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1} \quad (3)$$

Onde:  $C_{\text{NaOH}} = 0,025$  / concentração de  $\text{NaOH}$

$V_{am}$ : Volume da amostra

$V_{br}$ : Volume da amostra em branco

### 2.2.6.3 Determinação do Potássio – Mehlich 1

A determinação do potássio consistiu na adição de 2,5g de terra a um béquer e 25 mL da solução Mehlich 1. Agitou-se por 5 minutos e esperou decantar por aproximadamente 15 horas. Logo após uma alíquota foi retirada de 5 mL do sobrenadante para tubo de ensaio, eq. (4). A leitura foi feita em fotômetro de chama.

$$K = \frac{(Leitura*10)}{39,102 \text{ (peso molecular do K)}} \text{ (mmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (4)$$

### 2.2.6.4 Determinação do Fósforo

A determinação do fósforo foi feita através do método da colorimetria. A adição de solução ácida de molibdato contendo íons ortofosfatos forma um complexo fosfomolibdico, que pode ser reduzido por ácido ascórbico a um composto azul. Quanto maior a concentração de fósforo na solução, maior será a intensidade da coloração azul. Obtendo-se a reta através da leitura das soluções padrões, pode-se determinar o fator de conversão das leituras feitas nos extratos.

A determinação do fósforo foi feita com a adição de 25 mL da solução Mehlich 1 em 2,5g de terra num tubo de ensaio. Agitou-se por 5 minutos e esperou decantar. Após decantação, a amostra de solo foi preparada com 5 mL pipetado do sobrenadante em tubo de ensaio, e adição de 10 mL de molibdato. A amostra foi agitada e permaneceu 30 min em repouso, eq. (5). A leitura foi realizada em colorímetro a 660 nm.

$$P = 0,011 * [P] \text{ (mg.kg)} \quad (5)$$

### 2.2.6.5 Determinação da Matéria Orgânica

O carbono ocorre no solo na forma tanto orgânica como inorgânica. A grande maioria é encontrada na matéria orgânica e em minerais carbonatados. Em regiões de clima muito úmido, onde os perfis são submetidos a intensa lixiviação, o carbono aparece predominantemente na forma orgânica. A matéria orgânica é determinada por métodos indiretos, no caso deste trabalho, ela foi determinada pela extensão da redução de um agente oxidante forte (WALKLEY; BLACK, 1934; CAMARGO et al., 2009).

Sua determinação foi realizada pelo método Walkley-Black. Uma alíquota de 1 g e 10 mL da solução de  $K_2Cr_2O_7$  (dicromato de potássio) foram adicionadas em 20 mL  $H_2SO_4$  (ácido sulfúrico). A solução foi agitada manualmente e ficou em repouso por 30 minutos. A seguir 200 mL de água deionizada e 10 mL de ácido fosfórico foram adicionados. Usou-se como titulante sulfato ferroso amoniacal ( $0,4 \text{ mol L}^{-1}$ ), e indicador, fenolftaleína, eq. (6). A agitação da solução foi magnética.

$$MO = \frac{(V_{br} - V_{am}) * CFe^{2+} * 0,003 * 1,33 * 1,724 * 1000}{V_{solo}} \quad (6)$$

Onde:  $CFe^{2+} = 10 \times 0,167 \times 6 / V_{br} \approx 0,4$  (refere-se à concentração de Fe encontrado no sulfato ferroso)

$V$ : Volume

$V_{am}$ : Volume da amostra

$V_{br}$ : Volume da amostra em branco

A percentagem de matéria orgânica é calculada multiplicando-se o resultado do carbono orgânico por 1,724. Este fator é utilizado em virtude de se admitir que, na composição média do húmus, o carbono participa com 58%.

#### 2.2.6.6 Determinação do Cálcio e Magnésio

O cálcio e o magnésio foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Para a calibração das leituras do aparelho são feitas as leituras das soluções padronizadas para a construção da reta de absorbância em função da concentração dos elementos. Com isso é determinado o fator de conversão entre a leitura dada pelo aparelho de absorção atômica e a concentração do elemento no solo.

A análise consistiu em transferir 2,5 g de solo e 25 mL de água deionizada para um béquer e agitar por 15 minutos, após a breve agitação, foram adicionadas ao béquer resinas catiônicas e agitadas por 16 horas. Passado este tempo de agitação, houve separação e lavagem das resinas. As amostras ficaram em repouso por 1 hora, depois ficaram em repouso por aproximadamente 1 hora e após mais 1 hora de agitação. O tratamento das resinas foi feito com  $NH_4Cl$   $0,8 \text{ mol L}^{-1}$  em  $HCl$   $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ .

Após todo o processo de descanso e agitação, as resinas catiônicas (carregadas de Ca e Mg) foram colocadas em solução de cloreto de amônio com ácido clorídrico, para a



transferência das cargas. Em cada amostra 10 mL da solução de lantânio ( $\text{La}_2\text{O}_3$  0,1%) foram adicionadas e consequente leitura no equipamento de espectroscopia de absorção atômica, eq. (7) e eq. (8).

$$Ca = \frac{(Leitura*2*10*11)}{40,078 \text{ (peso molecular do Ca)}} \text{ (cmol}_c \cdot \text{kg)} \quad (7)$$

$$Mg = \frac{(Leitura*2*10*11)}{24,305 \text{ (peso molecular do Mg)}} \text{ (cmol}_c \cdot \text{kg)} \quad (8)$$

O número 2 refere-se às cargas dos cátions e o número 11 refere-se ao lantânio (La), que é adicionado às soluções contribuindo com a redução de interferência de outros elementos como Si e Al na leitura no equipamento (KRUG; NÓBREGA; OLIVEIRA et al., 2004).

#### 2.2.6.7 Acidez potencial (H + Al) ( $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )

A acidez potencial revela a acidez total presente entre o nível inicial (pH do solo) e final (7,0) do pH (CAMARGO et al., 2009). Essa acidez foi extraída de 5 g de solo com acetato de cálcio a pH 7,0 e determinada por titulação com NaOH 0,025 mol  $\text{L}^{-1}$  na presença de fenolftaleína alcoólica, que se mantém incolor em soluções ácidas e torna-se cor-de-rosa em soluções básicas, eq. (9).

$$H + Al = \frac{[(V_{am} - V_{br}) * C_{NaOH} * 50 * 1000]}{25 * 2,5} \quad (9)$$

Onde:  $C_{NaOH} = 0,025$  (refere-se à concentração de NaOH)

$V_{am}$ : Volume da amostra

$V_{br}$ : Volume da amostra em branco

#### 2.2.6.8 CTC total

A CTC total foi calculada pela soma de todos os cátions trocáveis do solo (EMBRAPA, 1997). A eq.(10) demonstra o cálculo.

$$CTC = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + H^+ + Al^{3+} \quad (10)$$

### 2.2.6.9 Soma de bases trocáveis (SB)

A soma de bases foi calculada pela soma dos teores de cátions trocáveis, exceto H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup>, eq. (11) (EMBRAPA, 1997).

$$SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ \quad (11)$$

### 2.2.6.10 Saturação por bases (V%)

É calculada pela soma das bases trocáveis expressa em porcentagem de capacidade de troca de cátions, eq. (12).

$$V(\%) = \frac{100 \cdot SB}{CTC} \quad (12)$$

## 2.2.7 Caracterização Física

### 2.2.7.1 Granulometria

A análise da granulometria do solo foi feita em todos os horizontes, a partir de amostras compostas. A separação das frações minerais do solo se deu pelo método do densímetro.

Após agitação horizontal por 16 horas, foi feita a separação das frações granulométricas da TFSA (terra fina seca ao ar), utilizando-se como dispersante, solução contendo hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio (CAMARGO et al., 2009).

O princípio do método consiste na sedimentação diferenciada dos materiais do solo, devido seu tamanho, que permite estabelecer a velocidade em que a partícula decantará (Lei de Stokes). A densidade da suspensão é considerada e relacionada ao tamanho das partículas. Por exemplo, partículas com 0,2 mm sedimentam em 40 segundos, partículas maiores são ainda mais rápidas, sendo assim, após esse intervalo de tempo não há mais areia em suspensão.

Após duas horas, a fração silte também já não estará mais dispersa na água. A densidade registrada aos 40 segundos será a do líquido + argila dispersa + silte, após duas horas será a densidade do líquido + argila dispersa. Sabendo-se a massa de solo dispersa na

solução (50g) e a densidade do líquido, é possível estabelecer a contribuição de cada fração granulométrica para a suspensão.

Os cascalhos, também foram separados e quantificados em g/g. Estes foram medidos em quatro profundidades do perfil, selecionadas em campo, após observações e descrições morfológicas, como sendo locais importantes para o funcionamento físico-hídrico do solo, a partir de suas características de cor, estrutura, textura.

### **2.2.7.2 Densidade do solo e de partículas**

A avaliação da densidade do solo ( $D_s$ ) foi feita por amostras coletadas com cilindros de 100 cm<sup>3</sup>. As amostras foram secas em estufa a 105°C por 24 horas para a obtenção da massa seca do solo. A densidade do solo foi determinada relacionando massa seca do solo e o volume do cilindro de solo, eq. (13) (GROSSMAN; REINSCH, 2002).

$$D_s = \frac{m}{V} \text{ (g. cm}^3\text{)} \quad (13)$$

Onde,  $m$  é a massa seca do solo e  $V$  é o volume do cilindro.

A densidade de partículas ( $D_p$ ) foi determinada, com as mesmas amostras de  $D_s$ , tamisadas em peneira de 0,2 cm, com uma alíquota de aproximadamente 10 g de solo, pelo método do picnômetro a gás hélio (ACCUPYC 1330, Micromeritics Instrument Corporation®).

## **2.3 Resultados e Discussões**

### **2.3.1 Caracterização dos solos**

#### **2.3.1.1 Distribuição dos solos**

O estudo situou-se à montante, parte intermediária e jusante em duas topossequências, uma sob floresta e outra sob pastagem, num transecto de 200 m de comprimento. Observou-se uma transição gradual de um ARGISSOLO AMARELO distrófico saprolítico argiloso cascalhento em F1, F2, F3, e sob pastagem, ARGISSOLO

AMARELO distrófico saprolítico argiloso cascalhento em P1 e P2, e ARGISSOLO AMARELO distrófico epirredóxico argiloso em P3 (EMBRAPA, 2013). Essa classificação é uma sugestão para o 4º nível para a classe dos Argissolos Amarelos, devido aos atributos encontrados nos solos estudados (Figura 2.4).

O primeiro perfil sob floresta, F1, apresentou uma sequência de horizontes A-AB-Bt1-Bt2-BC-C, que pouco modificou para F2 com a sequência A-AB-Bt1-Bt2-BC-C. A transição foi gradual para F3, com a sequência A-AB-Bt1-Bt2-Bt3-BC-C.

O perfil à jusante da pastagem, P3, na sequência A-AB-BA-Bt1-Bt2-BC se diferenciou dos demais, pela ocorrência de mosqueados de oxirredução. Os perfis localizados nas partes mais elevadas do terreno mostraram poucas diferenças entre si: P2, com a sequência A-BA-Bt-BC-C e P1 com A-AB-Bt1-Bt2-BC-C. Ao observar a distribuição de horizontes de P1, notou-se semelhança com F1 e F2. Estes solos podem ser visualizados nas Figuras 2.4 e 2.5.

A partir dos resultados obtidos da análise estrutural proposta por Boulet (1982a, b, c), levando em consideração as semelhanças e diferenças verticais e laterais existentes entre os perfis e as tradagens intermediárias, as topossequências foram divididas em sete principais compartimentos. Esses compartimentos são encontrados tanto nos solos sob floresta, como nos solos sob pastagem em toda topossequência, ou seja, abrange floresta e pastagem (ver Figura 2.5).

A seguir estão descritos os compartimentos:

- O primeiro compartimento é localizado em superfície. Esse domínio de cor mais escura (bruno-amarelado escuro a preto), apresenta matéria orgânica e estrutura predominantemente granular, com textura mais arenosa.
- O segundo compartimento, localizado em subsuperfície apresentou cor mais amarelada, estrutura granular e blocos subangulares. A textura predominante é franco-argilo-arenosa, com presença de cascalho e areia grossa.
- O terceiro compartimento se caracteriza pelo considerável aumento no teor de argila. A pequena distância entre o horizonte A (compartimento 1) e B, mostra um abrupto gradiente textural. A estrutura desse domínio é em blocos subangulares, e a partir deste horizonte começam a surgir mosqueados esparsos que mesclam cores mais bruno-amareladas e vermelho.
- O quarto compartimento, compreende horizontes com mosqueados de oxirredução e argilosos. A estrutura predominante é em blocos subangulares e

angulares, com cores variegadas em bruno, vermelho e amarelo. Nesse domínio a presença de mosqueados é marcante, bem como de cascalhos.

- O quinto compartimento é o horizonte com material em alteração, ou saprolítico. Não houve muito cascalho como no domínio anterior, e a textura foi menos argilosa, e observou-se um incremento na fração areia grossa. O material apresentou uma estrutura mais maciça que se desfaz em blocos angulares, e subangulares.
- O sexto compartimento não é contínuo na topossequência. Ele apareceu à jusante na pastagem e é um horizonte onde existe atividade de oxirredução, com variegado de cores mais acinzentadas, relacionadas à dificuldade de drenagem e à proximidade do curso d'água na parte mais baixa do relevo.
- O sétimo compartimento, está localizado na parte inferior da vertente sob floresta. Este compartimento possui um horizonte úmido, com muita areia grossa e grande influência do lençol freático.

Essa classificação da topossequência é uma tipologia, demonstrada pelas Figuras 2.4 e 2.5, sendo o resultado das observações de campo, sustentadas por análises em laboratório.



Figura 2.4 - Classificação dos perfis estudados na topossequência, sob floresta (F) e sob pastagem (P), na sequência: 1 – Montante, 2 – Intermediária, 3 – Jusante





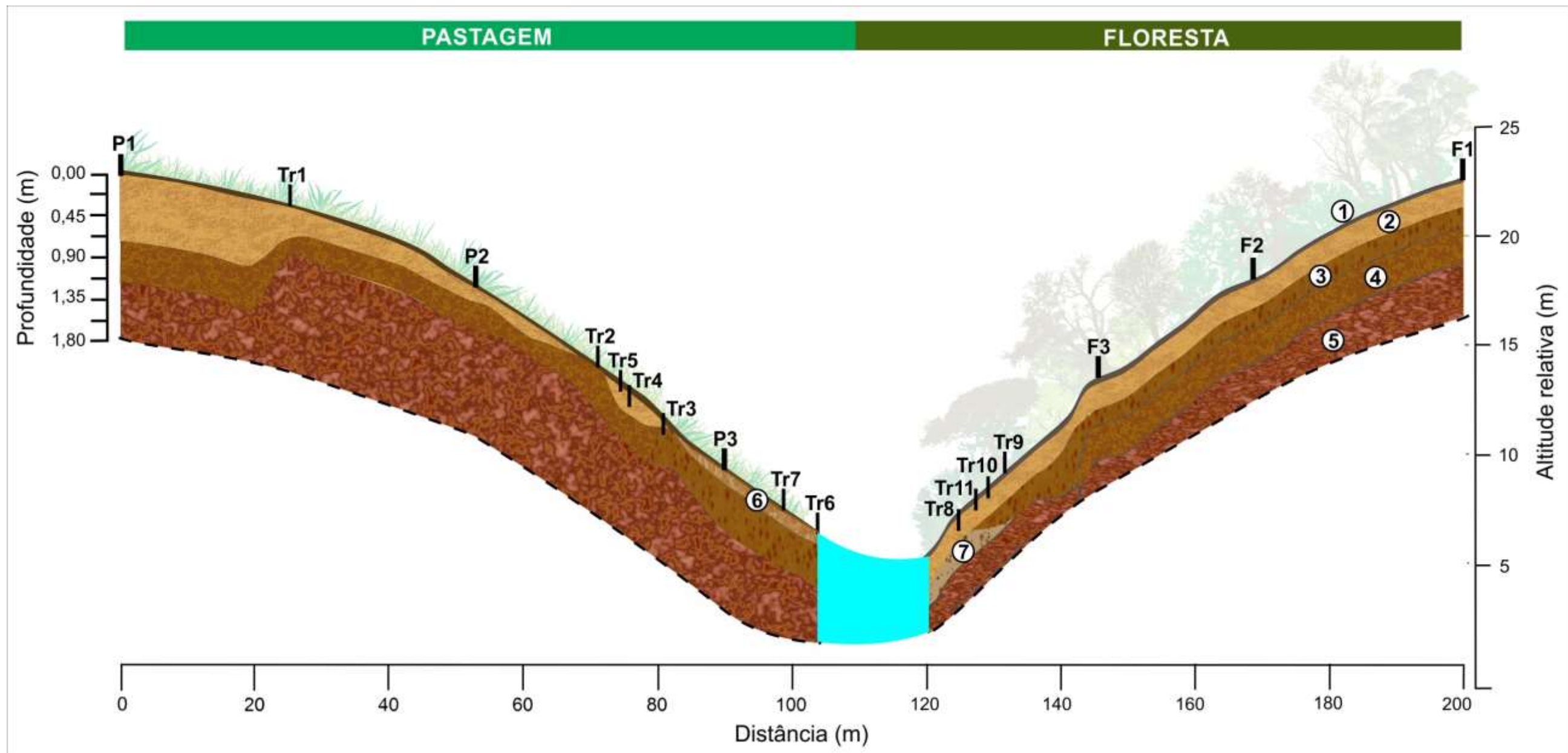


Figura 2.5 - Distribuição dos horizontes na topossequência indicando os perfis de solo descritos (fotografias). P = Perfil sob pastagem; F = Perfil sob floresta; Tr = Tradagens realizadas, os números representam a sequência de tradagens

- 1 - Horizonte superficial com matéria orgânica, Bruno-amarelado (10YR 5/6) a Preto (10YR 2/1), granular, arenosa. COMPARTIMENTO 1
- 2 - Horizonte subsuperficial Bruno-amarelado (10YR 5/6) a Amarelo-brunado (10YR 6/8), franco-argilo-arenosa, com cascalho e areia grossa. COMPARTIMENTO 2
- 3 - Horizonte com incremento de argila. Predominância de cor Bruno-forte (7,5YR 5/6) a Amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8). Início de mosqueados mais vermelhos (2,5YR 5/6). COMPARTIMENTO 3
- 4 - Horizonte com muito cascalho e argiloso. Blocos subangulares a angulares, com variegado de cores Bruno, Vermelho e Amarelo. Bastante mosqueado. COMPARTIMENTO 4
- 5 - Horizonte com material de origem em alteração. Material mais firme e seco de textura menos argilosa, e muita areia grossa, com pouco cascalho. Bastante mosqueado. COMPARTIMENTO 5
- 6 - Horizonte com material de origem em alteração. Franco arenoso, com variegado de cores mais acinzentadas relacionadas à dificuldade de drenagem. COMPARTIMENTO 6
- 7 - Horizonte com material de origem em alteração. Úmido, com muita areia grossa e grande influência do lençol freático. COMPARTIMENTO 7



### 2.3.1.2 Caracterização morfológica dos horizontes

#### Perfil F1 (localizado à montante, na floresta)

Horizonte A: 0,00 a 0,06 m de profundidade; Apresenta cor bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4) (75%) e mosqueados bruno-amarelado (10YR 5/6). Textura franco-arenosa, com areia grossa e cascalhos de quartzo, de estrutura granular, pequena a média, moderada. A consistência úmida é friável, seca é ligeiramente dura, e molhada, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. A transição é plana e clara. Horizonte superficial com liteira fina e grossa, e presença de canais e coprólitos.

Horizonte AB: profundidade 0,6 a 0,17 m; Cor bruno-amarelado (10YR 5/6). Textura franco-argilo-arenosa com presença de cascalhos de quartzo. Granular pequena e em blocos subangulares pequenos a médios. Friável, ligeiramente dura, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, com transição plana e gradual. Presença de raízes finas e grossas, e poros tubulares sem preenchimentos.

Horizonte Bt1: profundidade de 0,17 a 0,44 m. Cor bruno-amarelado (10YR 5/8). Textura franco-argilo-arenosa, com presença abundante de cascalhos e calhaus de quartzo e nódulos ferruginosos; estrutura granular pequena e blocos subangulares médios. Consistência friável, dura, plástica e pegajosa. A transição é ondulada e clara. Existência de raízes grossas, raízes mais finas são raramente encontradas.

Horizonte Bt2: profundidade de 0,44 a 0,62 m. Cor bruno-amarelado (10YR 5/8). A textura é franco-argilo-arenosa, com pequeno incremento de argila em relação ao horizonte anterior; cascalhos e calhaus abundantes de quartzo e nódulos ferruginosos. Granular pequena e blocos subangulares médios. Friável a firme, muito dura, plástica e pegajosa. Transição ondulada e clara. Os quartzos presentes neste horizonte mais denso, aparecem associados ao Fe, ocupando 30% do horizonte. Existência de raízes grossas, raízes mais finas são raramente encontradas.

Horizonte BC: profundidade de 0,62 a 0,99 m. Cor dominante bruno-forte (7,5YR 5/6), ocupando 60% do horizonte e pequenos mosqueados amarelo-brunados (10YR 6/8). Textura argilo-arenosa com cascalhos menores de nódulos ferruginosos e quartzos fraturados e ferruginizados. Estrutura em blocos subangulares, pequeno a médios, moderados. Consistência friável, dura plástica e pegajosa. Transição plana e gradual. Pouco material orgânico.

Horizonte C: profundidade 0,99 a 1,63+ m. Cor vermelho-amarelado (5YR 5/8), com variegados amarelo-avermelhado (5YR 6/8), amarelo (10YR 7/8), amarelo (2,5Y 7/8), amarelo-brunado (10YR 6/8). Textura argilo-arenosa com poucos cascalhos de nódulos ferruginosos e quartzos fraturados e ferruginizados. Estrutura em blocos subangulares, pequeno a médios, moderados a forte. Consistência firme, muito dura, plástica e pegajosa. Raízes raras. Ausência de material orgânico.

Perfil F2 (localizado na parte intermediária da vertente, sob floresta)

Horizonte A: profundidade 0,00 a 0,06 m. Cor bruno-amarelado (10YR 5/6). Textura franco-argilo-arenosa com presença de areia de granulometria mais grossa e cascalhos. Estrutura granular pequena e blocos subangulares pequenos a médios. Consistência friável, ligeiramente dura, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. Transição plana e clara. Existe neste horizonte acúmulo de liteira fina, presença de canais e coprólitos em menor incidência que à montante.

Horizonte AB: profundidade 0,06 a 0,26 m. Cor bruno-amarelado (10YR 5/8). Textura franco-argilo-arenosa com areia grossa e incremento de argila, presença de cascalhos. Estrutura em blocos subangulares pequenos a médios e forte. Friável, ligeiramente dura, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. Transição plana e clara. Liteira fina e grossa. Porosidade proveniente de fauna ou raízes.

Horizonte Bt1: profundidade de 0,26 a 0,45 m. Cor amarelo-brunado (10YR 6/8). Textura franco-argilo-arenosa com cascalhos freqüentes (40% do volume de quartzo e nódulos). Granular pequena e blocos subangulares médios em grau forte. Friável, ligeiramente dura, plástica e pegajosa. Transição ondulada e clara. Pouco material orgânico.

Horizonte Bt2: profundidade 0,45 a 0,63 m. Cor bruno-amarelado (10YR 5/8) que ocupa aproximadamente 85% do horizonte, e mosqueados bruno-forte (7,5YR 5/6). Textura argilo-arenosa com pouco cascalho. Granular pequena a média e blocos subangulares médios. Friável, ligeiramente dura, plástica e pegajosa. Transição ondulada e clara. Pouco material orgânico.

Horizonte BC: profundidade 0,63 a 0,90 m. Cor vermelho (2,5YR 5/6) (70%) e mosqueados amarelo-oliváceo (2,5Y 6/8). Textura argilo-arenosa, e cascalhos de quartzo e nódulos ferruginosos. Blocos subangulares médios moderado. Consistência friável a firme, dura, plástica e pegajosa. Transição plana e clara. Material orgânico escasso. Esse horizonte é mais seco ao tato.

Horizonte C: profundidade 0,90-1,65+ m. Cor dominante vermelho (2,5YR 5/8), com variegados vermelho-claro (2,5YR 6/8), rosado (2,5YR 8/3), bruno-avermelhado (2,5YR 4/4), amarelo-brunado (10YR 6/8, úmida) e amarelo-oliváceo (2,5Y 6/8). Textura argilo-arenosa, e menos cascalho de quartzo e nódulos ferruginosos que o horizonte anterior. Estrutura maciça, se desfazendo em blocos subangulares médios a grandes e fortes. Consistência mais firme, dura, plástica e ligeiramente pegajosa. Transição plana e abrupta. Sem material orgânico. Neste horizontes foram observados agregados fortes de argila, de cor amarelo-oliváceo. Os nódulos de Fe encontrados estão em formação ou degradação, e esboroando-se facilmente à leve pressão. Volumes brancos foram encontrados dispersos também esboroando-se facilmente à leve pressão. Existem áreas de concentração de quartzo.

#### Perfil F3 (localizado à jusante da vertente, sob floresta)

Neste perfil foi encontrado um fragmento de rocha intemperizada no lado esquerdo do perfil. Pode ser gnaiss ou xisto (Figura 2.4).

Horizonte A: profundidade 0,00 a 0,12 m. Cor bruno-escuro (10YR 3/3) e mosqueados bruno-amarelados (10YR 5/6). Textura franco-arenosa, com areia grossa e cascalhos de quartzo ferruginizados. Granular pequena e blocos subangulares pequenos a médios moderados. Friável, ligeiramente dura, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. Transição plana e clara. A atividade biológica é abundante. Existe porosidade em canais e presença de coprólitos grandes. Liteira grossa. A serapilheira possui 10 cm de espessura.

Horizonte AB: profundidade 0,12 a 0,24 m. Cor amarelo-brunado (10YR 6/6). Textura argilo-arenosa com areia grossa; cascalhos e calhaus de nódulos ferruginosos e quartzo. Blocos subangulares pequenos a médios moderado. Friável, ligeiramente dura, plástica e ligeiramente pegajosa. Transição plana e clara. Material orgânico composto por raízes grandes, médias e finas abundantes. Grande atividade biológica com presença de canais e pedotúbulos.

Horizonte Bt1: profundidade de 0,24 a 0,43 m. Cor amarelo-avermelhado (7,5R 6/8). Textura argilo-arenosa com menos areia grossa e mais argila, cascalhos e calhaus de nódulos ferruginosos e quartzo ferruginizado. Blocos subangulares pequenos a médios forte. Friável, ligeiramente dura, plástica e pegajosa. Transição ondulada e clara. Material vegetal com raízes grandes, médias e finas. Há uma redução na quantidade de canais e atividade biológica, em relação ao horizonte anterior.

Horizonte Bt2: profundidade 0,43 a 0,58 m. Cor amarelo-avermelhado (7,5R 6/6) e mosqueados vermelho-amarelados (5YR 5/8) que ocupam 25% do horizonte. Textura argilo-arenosa com menor quantidade de areia grossa e menos cascalhos de nódulos ferruginosos e quartzo. Blocos subangulares médios forte. Friável, ligeiramente dura, plástica e ligeiramente pegajosa. Transição ondulada e clara. Material vegetal composto por raízes grandes, médias e finas em ocorrência menor que no horizonte anterior. Menor atividade biológica, com menos bioporos.

Horizonte Bt3: profundidade 0,58 a 0,88 m. Cor vermelho-amarelado (5YR 5/8) ocupando 60% do horizonte, e variegados em amarelo-brunado (10YR 6/8) e amarelo-oliváceo (2,5Y 6/8) no restante da matriz do solo. Textura argilo-arenosa com maior quantidade de argila e menos cascalhos de nódulos ferruginosos e quartzo. Estrutura em blocos subangulares pequenos. Horizonte mais firme e maciço, dura, plástica e pegajosa. Transição ondulada e abrupta. Material vegetal escasso composto de raízes finas. Nódulos macios. Início do horizonte mosqueado.

Horizonte BC: profundidade 0,88 a 1,27 m. Cor vermelho-amarelado (5YR 5/8) em 80% do horizonte e mosqueados amarelo (10YR 7/8) no restante da matriz do solo. Textura argilo-arenosa com maior quantidade de argila, presença de areia grossa, calhaus de quartzo ferruginizado, menos cascalho. Estrutura em blocos subangulares pequenos e médios de grau moderado a forte. Friável a firme, dura, plástica e pegajosa. Transição descontínua e clara. Ausência de raízes, ausência de atividade biológica.

Horizonte C: profundidade 1,27 a 1,60+ m. Cor vermelho (2,5YR 5/8) em 75% do horizonte, com variegados vermelho (2,5YR 4/6), amarelo (10YR 7/8), amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 8/4), e bruno-forte (7,5YR 5/6). Textura argilo-arenosa com areia grossa e zonas de acúmulo de cascalhos de quartzo ferruginizado. Firme, dura, plástica e pegajosa. Transição descontínua e clara. Sem atividade biológica e sem raízes. Presença de zona branca com variegados de cores Bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/3), Amarelo (10 YR 7-8/8) e Vermelho (2,5YR 4/6).

#### Perfil P1 (localizado à montante, na pastagem)

Horizonte A: 0,00 a 0,05 m de profundidade. Apresenta cor bruno-escuro (10YR 3/3). Textura franco-arenosa com muita areia grossa. Estrutura granular pequena moderada. Friável, ligeiramente dura, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. Transição ondulada e clara. Muita porosidade interagregados. Liteira fina e abundante.

Horizonte AB: 0,05 a 0,13 m de profundidade. Cor bruno-oliváceo (2,5Y 4/4), com variegados bruno-oliváceo-claro (2,5Y 5/6) e vermelho-amarelado (5YR 4/6). Textura franco-arenosa, com presença importante de material grosseiro (calhaus). Estrutura granular e em blocos subangulares médios e moderados. Friável, ligeiramente dura, ligeiramente plástica e pegajosa. Transição ondulada e clara. Material vegetal composto por raízes finas. Horizonte com porosidade relativamente bem desenvolvida, composto por canais.

Horizonte Bt1: profundidade 0,13 a 0,67 m. Cor amarelo-brunado (10YR 6/8) com variegados bruno-escuro (10YR 3/3) e bruno-oliváceo (2,5Y 4/4); Textura franco-argilo-arenosa com areia grossa e cascalho de quartzo. Estrutura em blocos subangulares médios e moderados e prismática pequena. Friável, ligeiramente dura, ligeiramente plástica e pegajosa. Transição plana e clara. Presença de volumes mais escuros da superfície transportados pela atividade biológica foram observados.

Horizonte Bt2: profundidade 0,67 a 0,93 m. Cor amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8). Textura franco-argilo-arenosa com cascalho e areia grossa abundante; Blocos subangulares e prismática pequena. Friável, ligeiramente dura, ligeiramente plástica e pegajosa. Transição plana e clara. Presença de raízes finas abundantes.

Horizonte BC: profundidade 0,93 a 1,21 m. Cor amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8) em 70% do horizonte, e mosqueados em vermelho-amarelado (5YR 5/8). Textura franco-arenosa, com cascalho e calhaus de nódulos ferruginosos. Blocos subangulares e prismática pequena a média e moderada. Friável, ligeiramente dura, ligeiramente plástica e pegajosa. Transição plana e clara.

Horizonte C: profundidade 1,21 a 1,80+ m. Cor vermelho-amarelado (5YR 5/8) em 50% do horizonte e variegados amarelo-brunado (10YR 6/8) e amarelo (2,5Y 7/8). Textura franco-arenosa com bastante cascalho e calhaus de nódulos ferruginosos. Blocos angulares pequenos a médios forte. Friável a firme, dura, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. Transição ondulada e clara. Mais seco ao toque que os horizontes anteriores.

#### Perfil P2 (localizado na parte intermediária da vertente, sob pastagem)

Horizonte A: profundidade 0,00 a 0,09 m. Cor bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2). Textura franco-arenosa com muita areia grossa e cascalhos. Estrutura granular, pequena a média moderada. Friável, ligeiramente dura, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. Transição ondulada e clara. Liteira fina abundante, com maior acúmulo embaixo das touceiras, local este onde as raízes penetram em maior profundidade.

Horizonte BA: profundidade 0,09 a 0,18 m. Cor bruno-amarelado (10YR 5/8, úmida) em 40% do horizonte e variegados em bruno-forte (7,5YR 5/8) e cinzento-oliváceo (5Y 4/2). Textura franco-arenosa, menos cascalho que em superfície e areia grossa. Granular e blocos angulares pequenos e forte. Friável, ligeiramente dura, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. Transição ondulada e abrupta. Raízes finas abundantes e escuras. Sinais de gleização.

Horizonte Bt: profundidade 0,18 a 0,44 m. Cor amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8), mosqueados vermelho (10R 4/8). Textura franco-argilo-arenosa, com aumento significativo da argila e areia grossa abundante; cascalho de nódulos ferruginosos esparsos, avermelhados, duros e freqüentes (35%). Blocos angulares pequenos a médios moderados. Friável, dura, plástica e pegajosa. Transição ondulada e clara. Presença de mosqueados milimétricos e centimétricos esparsos no horizonte. Mosqueados duros, podem ser nódulos em degradação ou formação, moderadamente dura. Abundantes material vegetal composto de raízes finas.

Horizonte BC: profundidade 0,44 a 0,85 m. Cor amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8) com variegados vermelhos (10R 5/6-8), vermelho-acinzentados (10R 4/4) e amarelos (10YR 7/8). Textura franco-arenosa com cascalhos de quartzo e abundância de nódulos ferruginosos. Blocos angulares, prismática pequenos a médios moderados a forte. Firme, dura, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. Transição ondulada e clara. Canais de raízes antigas da floresta foram encontrados. Nos bioporos encontrados foram observados preenchimentos de matéria orgânica em decomposição, bem como estão servindo de canais para o crescimento de raízes da brachiaria.

Horizonte C: profundidade 0,85 a 1,60 m. Coloração variegada composta de vermelho-escuro-acinzentado (10R 3-4/4), vermelho (10R 4/6-8), vermelho-claro (10R 6/8), vermelho-claro (10R 7/6), vermelho-claro (2,5YR 6/8), vermelho-claro (2,5YR 7/8), amarelo (2,5Y 8/8), amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 8/3) e amarelo (2,5Y 8/6). Textura franco-argilo-arenosa com bastante areia grossa e cascalho de quartzo. Blocos angulares, prismática pequenos a médios moderados a forte. Firme, dura, não plástica e não pegajosa. Transição ondulada e abrupta. Horizonte de alteração adensado. Processos de migração e remobilização de Fe. Presença rara de raízes finas.

Perfil P3 (localizado à jusante da vertente, sob pastagem)

Horizonte A: profundidade 0,00 a 0,09 m. Cor preto (10YR 2/1). Textura franco-arenosa com abundância de areia grossa e cascalho. Granular e blocos subangulares pequenos

fracos a moderados. Friável, ligeiramente dura, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. Transição plana e abrupta. Abundante liteira fina.

Horizonte AB: profundidade 0,09 a 0,15 m. Cor amarelo-brunado (10YR 6/8), com variegados amarelo (2,5Y 8/8), amarelo-avermelhado (7,5YR 7/8), cinzento-muito-escuro (10YR 3/1) e bruno-amarelado (10YR 5/6). Textura franco-arenosa, com areia grossa e cascalho de nódulos e quartzo ferruginizado. Blocos subangulares pequenos a médios moderados. Friável, ligeiramente dura, plástica e ligeiramente pegajosa. Transição plana e abrupta. Material vegetal composto por raízes finas abundantes.

Horizonte BA: profundidade 0,15 a 0,37 m. Cor amarelo (2,5Y 7/6) e mosqueados amarelo-brunado (10YR 6/8). Franco-argilo-arenosa, com cascalhos e calhaus de quartzo e nódulos ferruginosos. Blocos subangulares pequenos a médios moderados. Friável, dura, plástica e pegajosa. Transição plana e difusa. Material vegetal composto por raízes finas abundantes. Preenchimento de canais com matéria orgânica.

Horizonte Bt1: profundidade 0,37 a 0,76 m. Cor amarelo (2,5Y 7/6) e variegados vermelho-amarelados (5YR 5/6), amarelo-avermelhados (7,5 YR 6/6). Textura franco-argilo-arenosa, com bastante argila e areia grossa, cascalho e calhaus de quartzo e nódulos ferruginosos. Blocos angulares médios moderados. Firme, dura, muito plástica e pegajosa. Transição ondulada e clara. Material vegetal composto por raízes finas abundantes.

Horizonte Bt2: profundidade 0,76 a 1,10 m. Cor vermelho-amarelado (5YR 5/8) em 45% do horizonte e variegados vermelhos (2,5YR 5/8) e amarelos (10YR 7/8). Franco-argilo-arenosa com areia grossa e cascalho de quartzo e nódulos ferruginosos. Blocos angulares médios forte. Firme, dura, muito plástica e pegajosa. Transição difusa e clara. Material vegetal composto por poucas raízes finas.

Horizonte BC: profundidade 1,10 a 1,33+ m. Coloração variegada composta de amarelo-brunado (10YR 6/8, cor predominante), vermelho (10R 4-5/8), amarelo (2,5Y 7/6), amarelo-oliváceo (2,5Y 6/8). Textura franco-argilo-arenosa com mais argila e areia grossa que o horizonte anterior, menos cascalhos de quartzo e nódulos ferruginosos. Blocos angulares médios forte. Muito firme, muito dura, plástica e pegajosa. Transição ondulada e abrupta. Neste horizonte diminuem os nódulos e aumentam os mosqueados mais firmes e secos. O lençol freático aparece a partir dos 0,70 m de profundidade.

### **2.3.1.3 Características analíticas dos horizontes**

As análises granulométricas dos solos estudados mostram heterogeneidade. Os solos apresentaram, de maneira geral, granulometrias mais arenosas e franco-arenosas em superfície, com aumento do teor de argila em profundidade, que classificou os horizontes B e BC, como argilosos. Abaixo destes horizontes, foi encontrado um material mais firme, de granulometria mais grossa caracterizando uma textura franco-argilosa e argilo-arenosa (Anexo B e Figura 2.6).

Os cascalhos e calhaus também foram relevantes para todos os perfis, principalmente onde foi visualizado petroplintita (Figura 2.7). Os elementos grossos apareceram com maior frequência a partir da profundidade de 0,4 m, onde geralmente começam os horizontes mais argilosos da topossequência. O horizonte Bt, de P3, foi o que mais apresentou cascalhos do transecto (Figura 2.7 e Anexo C).



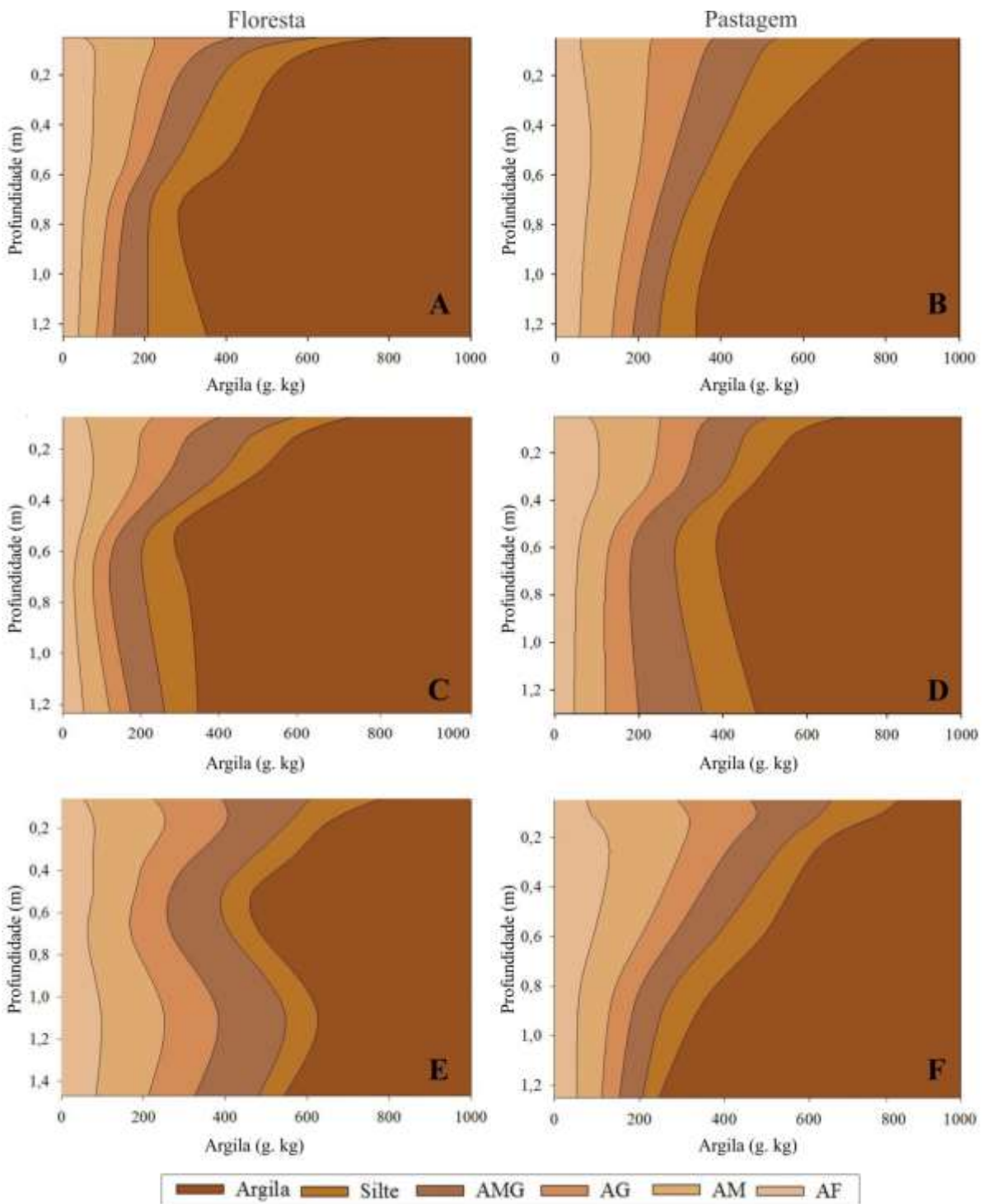


Figura 2.6 - Análise granulométrica em Argissolo (A, C) e Cambissolo (E) sob floresta; e Argissolo (B, D) e Plintossolo (F) sob pastagem, à montante, na parte intermediária e à jusante do relevo. AMG: Areia Muito Grossa; AG: Areia Grossa; AM: Areia Média; AF: Areia Fina

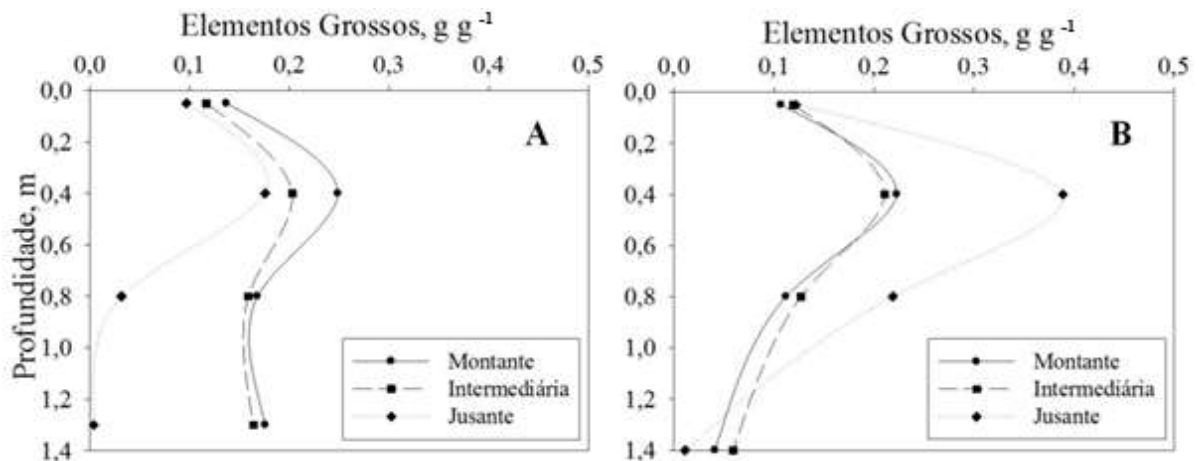


Figura 2.7 - Calhaus + cascalho nos perfis de solos estudados, sob floresta (A) e sob pastagem (B)

A densidade do solo apresentou valores para os horizontes superficiais entre 1,26 a 1,58 Mg m<sup>-3</sup> na topossequência sob floresta, enquanto na vertente sob pastagem os valores variaram entre 1,27 a 1,63 Mg m<sup>-3</sup>. Os horizontes com incremento de argila apresentaram sob floresta variação entre 1,41 e 1,53 Mg m<sup>-3</sup>, e sob pastagem variaram na faixa entre 1,47 a 1,69 Mg m<sup>-3</sup>. O horizonte mais profundo, de material em alteração, variou entre 1,40 e 1,44 sob floresta, enquanto a densidade sob pastagem abrangeu entre 1,42 e 1,68 Mg m<sup>-3</sup> (Figura 2.8).

Os maiores valores de densidade do solo em toda topossequência foram observados na camada subsuperficial e estão localizados no compartimento 2. Os solos sob pastagem apresentaram valores de maior densidade do solo em subsuperfície que em floresta (Figura 2.8 A, B).

Os horizontes mais argilosos dos compartimentos 3 e 4, apresentaram valores de densidade do solo de um horizonte mais adensado. Enquanto os horizontes mais profundos do compartimento 5, influenciados pelo material em alteração, não apresentaram uma tendência específica, principalmente os solos sob pastagem que apresentaram variações de densidade do solo importantes.

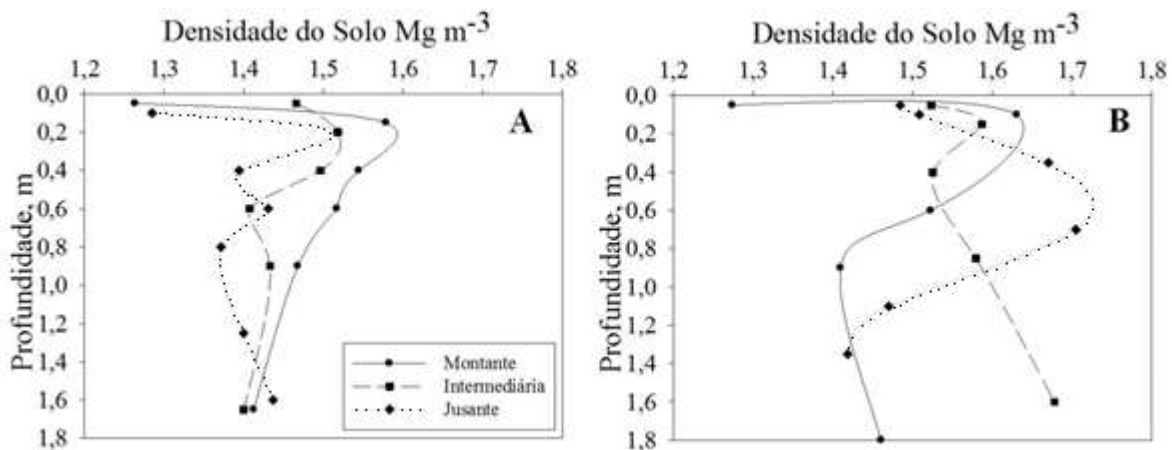


Figura 2.8 - Densidade do solo nos perfis de solos estudados, sob floresta (A) e sob pastagem (B)

No que diz respeito às análises químicas, o pH observado na topossequência apresentou a seguinte tendência nos solos sob floresta: valores mais baixos em superfície entre 3,6 e 4,2, e que aumentaram em profundidade, nos horizontes mais argilosos, na faixa de 3,9 a 4,8, e nos horizontes em alteração entre os valores de 4,1 a 5,0. Sob pastagem, o maior pH encontrado foi em superfície, nos compartimentos 1 e 2, com valores entre 4,2 e 5,5. Nos horizontes mais argilosos, dos compartimentos 3 e 4, os valores variaram entre 3,9 a 5,1, e nos horizontes em alteração, do compartimento 5, o pH variou de 4,1 a 4,7. Na topossequência, a acidez trocável sob floresta foi maior em superfície. Já em pastagem a subsuperfície apresentou, em sua maioria, valores mais elevados (Anexo E). A acidez potencial e trocável sob floresta, apresentaram maiores valores em superfície e foram reduzindo em profundidade. Sob pastagem, a camada superficial, apresentou menor acidez trocável. O perfil P3 foi o que apresentou menor acidez potencial na topossequência. Os solos que apresentaram a maior saturação por alumínio foram os solos sob floresta.

No que concerne ao Fe contido no solo, tanto na forma livre como o Fe amorfo, os resultados indicaram pouco conteúdo de Fe em toda a topossequência. Os óxidos de ferro na fração argila, extraídos por ditionito, apresentaram sob floresta, maiores valores nos horizontes subsuperficiais, enquanto sob pastagem não houveram tendências evidentes, às vezes os valores foram maiores em superfície, outras vezes em subsuperfície. Quanto aos teores de ferro amorfos, estes estiveram mais concentrados em superfície, em todo o transecto. A razão  $Fe_o/Fe_d$  evidenciou o predomínio de formas amorfas nos solos analisados, concentrados principalmente em superfície, que pode estar relacionado à influência da matéria orgânica nestes horizontes (Anexo F).

Os valores dos cátions básicos (Ca, K, Mg) no solo foram baixos em toda toposequência, sendo que sob floresta, o teor de Ca foi ainda mais baixo que sob pastagem. O fósforo (P) também foi encontrado em concentrações pequenas em todos os perfis. Sob pastagem este elemento ainda apareceu em maior quantidade na superfície em P1 (Anexo F).

Os valores de CTC, SB e V% também foram considerados baixos em toda toposequência. Estes atributos ainda foram mais elevados nos primeiros 0,20 m do solo. Esse pequeno aumento está relacionado à influência da matéria orgânica nas camadas superficiais.

A composição mineralógica dos solos na fração argila não mostrou grande variação de minerais ao longo das toposequências. As análises revelaram dominância de caulinita, além da pequena ocorrência de gibsitita, ilita e quartzo. Alguns exemplos foram destacados na Figura 2.9, porque os demais difratogramas possuem muita semelhança com os apresentados.

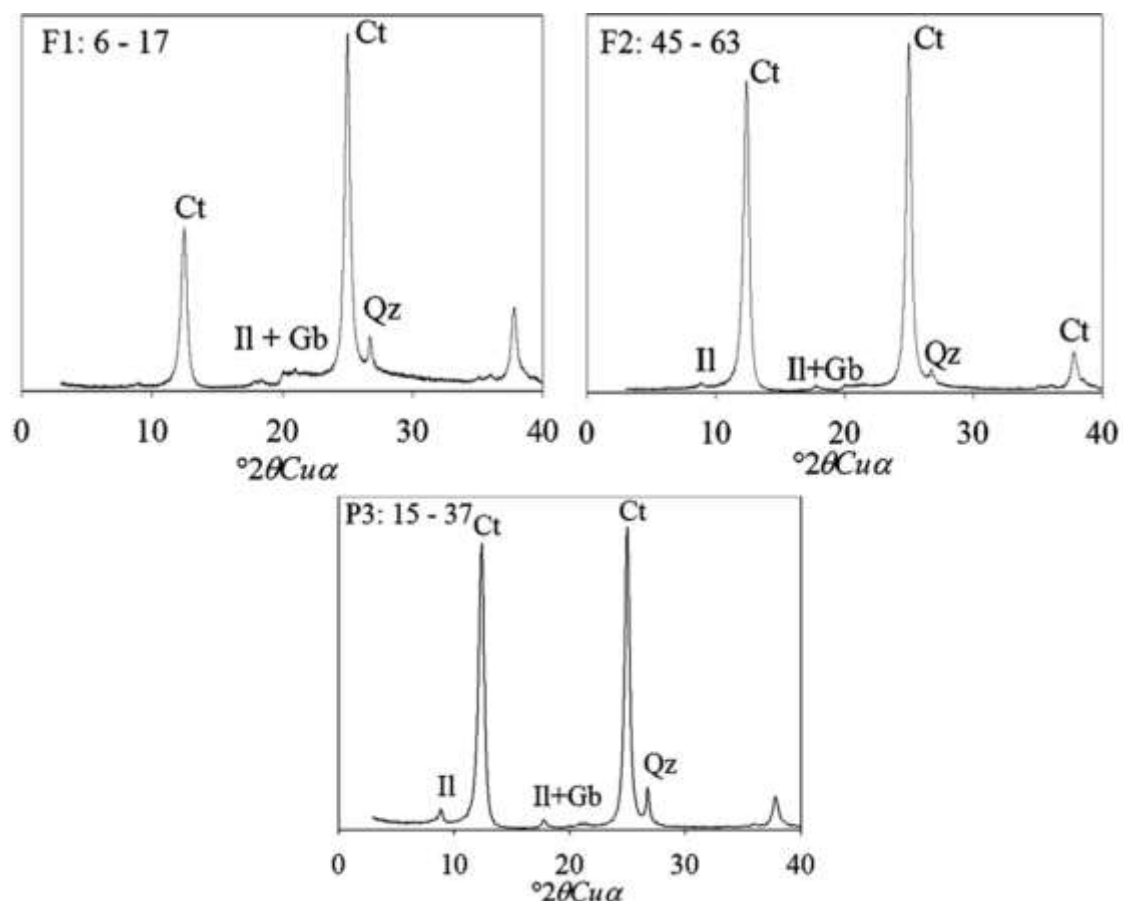


Figura 2.9 - Difratogramas da fração argila da toposequência estudada. Exemplos em alguns perfis e profundidades analisadas. Ct: Caulinita; Il: Ilita; Gb: Gibsitita; Qz: Quartzo

### 2.3.2 Interpretações sobre a organização e os atributos dos solos

A disposição dos solos no relevo, juntamente ao conjunto das características morfológicas e análises em laboratório foram suficientes para dividir os solos estudados em 7 compartimentos. Cada compartimento possui seus atributos particulares importantes para a compreensão do funcionamento do solo.

As duas topossequências estão localizadas em área de relevo ondulado e com topografia pouco movimentada. A declividade média é de 20% em floresta e 14% em pastagem, e estão organizadas uma em frente à outra (Figura 2.5). Na parte inferior do relevo, à jusante, existe um pequeno curso d'água, que divide os dois tipos de uso do solo. Este pequeno manancial sofre flutuação sazonal periódica, e aumenta seu fluxo nos meses mais chuvosos, o regime hídrico foi de primordial importância para os atributos encontrados em toda topossequência.

A cor é uma propriedade importante que contribuiu com a distinção dos horizontes e diferenciação dos compartimentos. As topossequências apresentaram um gradiente de cores: partindo de tonalidades mais escuras em superfície, variando para o bruno em subsuperfície, e em maior profundidade, tons mais amarelos e vermelhos, chegando no horizonte de alteração, com considerável variegado de cores. Essas tonalidades observadas no perfil ressaltaram condições importantes sobre os solos. Por exemplo, os solos mais escuros indicaram maiores teores de matéria orgânica. As cores mais vermelhas indicaram boa drenagem e boas condições de aeração e oxidação. Conforme o croma reduziu, ficou mais evidente os ciclos de redução e oxidação que ocorrem alternadamente nestes solos em ambos os tipos de uso. As cores acinzentadas, indicaram a deficiência de drenagem.

O mecanismo que expõe o solo à oscilações do lençol freático, com algum impedimento ao movimento da água, facilitou a redução e oxidação dos óxidos de Fe. Este fenômeno influenciou as características morfológicas destes solos, formando uma coloração das zonas segregadas e enriquecidas em Fe (BREEMEN; BUURMAN, 1998; CORINGA et al., 2012). A existência de petroplintita nos perfis pode estar relacionado à oscilação sazonal da água subterrânea.

O terceiro perfil sob pastagem, é o que apresenta o Bt mais argiloso, e por estar em posição mais baixa no relevo, os mosqueados apareceram a partir deste horizonte, evidenciando que o alto conteúdo de argila, impediu a livre circulação de água e contribuiu com a presença de mosqueados mais acima no perfil, ao contrário dos demais perfis.

Em relação ao Fe amorfo e cristalino analisados, ambos foram encontrados em baixos teores em todos os perfis. Nas camadas superficiais dos dois tipos de uso do solo, a presença de material amorfo, ou seja, os óxidos com baixo grau de cristalinidade, possivelmente estiveram relacionados a uma drenagem mais deficiente, ou à presença da matéria orgânica (NUNES et al., 2001; LYNCH, 2009; MATA et al., 2011). Em geral, a presença de Fe amorfo é relacionada com a superfície de um solo, pois reflete o efeito dos orgânicos em impedir a cristalização de óxidos de Fe (CORNELL; SCHWERTMANN, 1996).

A natureza predominantemente caulínica destes solos predomina na região amazônica (COUCEIRO; SANTANA, 1999; CAMPOS et al., 2011). As análises químicas comprovaram que estes solos são pobres. Os teores de Al e a acidez foram altos, enquanto os cátions básicos apresentaram baixos valores nos solos (Anexo D; E). O compartimento 1 foi o que apresentou teores de nutrientes mais elevados, provavelmente relacionados à matéria orgânica existente em superfície. Apesar disto, todos os solos foram caracterizados como distróficos, por apresentarem baixa saturação por bases. Essa característica é comum aos solos amazônicos (SILVA JUNIOR et al., 2009; MOREIRA; MORAES; FAGERIA, 2012).

Em corroboração aos atributos encontrados nos perfis estudados, existe também a densidade do solo. Essa medida física evidenciou o impedimento físico existente a partir dos 0,4 m de profundidade (compartimento 2). Os valores mais altos de Ds desta camada indicou adensamento, ou seja, valores elevados para solos argilosos (BRADY; WEIL, 2002). Porém este adensamento é natural em Argissolos, que possuem horizonte diagnóstico com incremento de argila, havendo mais argila que o horizonte A, podendo ou não, ser maior que o horizonte C (EMBRAPA, 2013). A mudança de estrutura granular em superfície para blocos subangulares e angulares, e por vezes, prismática, em subsuperfície foram importantes e apareceram nos horizontes mais argilosos. A ocorrência da estrutura prismática nos horizontes mais adensados e argilosos indica problemas de drenagem, existentes nestes solos, como explicados anteriormente (BUOL et al., 1997; BRADY; WEIL, 2002). A estrutura granular está relacionada à presença da matéria orgânica, e também à textura arenosa.

## **2.4 Conclusões**

Os solos estudados apresentaram variações morfológicas importantes que permitiu separar 7 compartimentos nas topossequências. Os dois sistemas analisados, floresta e pastagem, apresentaram atributos semelhantes.

Do ponto de vista químico e mineralógico, os solos são pobres, e predominantemente caulíníticos. Os mosqueados encontrados nas camadas mais profundas dos perfis à montante e na parte intermediária, e a partir da subsuperfície dos perfis à jusante, estão relacionados à oscilação do lençol freático, e à presença de compartimentos mais adensados, com incremento de argila, que influencia na circulação da água no perfil do solo.

## Referências

BARDY, M.; FRITSCH, E.; DERENNE, S.; ALLARD, T.; NASCIMENTO, N.R.; BUENO, G.T. Micromorphology and spectroscopic characteristics of organic matter in waterlogged podzols of the upper Amazon basin. **Geoderma**, Amsterdam, v. 145, n. 3/4, p. 222-230, June 2008.

BOCQUIER, G. Génèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad: interprétation byogéodynamique. **ORSTOM**, Paris, v. 62, 350 p., 1973.

BOULET, R.; HUMBEL, F.-X.; LUCAS, Y. Analyse structurale et cartographie en pédologie. II – une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. **Cahiers de l'O.R.S.T.O.M.** Série Pédologie, Bondy, v. 19, n. 4, p. 323-339, 1982a.

\_\_\_\_\_. Analyse structurale et cartographie en pédologie. III – passage de la phase analytique a une cartographie générale synthétique. **Cahiers de l'O.R.S.T.O.M.** Série Pédologie, Bondy, v. 19, n. 4, p. 341-351, 1982b.

BOULET, R.; CHAUVEL, A.; HUMBEL, F.-X.; LUCAS, Y. Analyse structurale et cartographie en pédologie 1 – prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique: mes études de toposéquences et leurs principaux apports a la connaissance des sols. **Cahiers de l'O.R.S.T.O.M.** Série Pédologie, Bondy, v. 19, n. 4, p. 309-321, 1982c.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 13<sup>th</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 960 p.

BREEMEN, N. van; BUURMAN, P. **Soil formation**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1998. 376 p.

BUOL, S.W.; HOLE, F.D.; McCracken, R.J.; SOUTHARD, R.J. **Soil genesis and classification**. Ames: Iowa State University Press, 1997. 527 p.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas, Instituto Agrônomo, 2009. 77 p. (Boletim Técnico, 106).

CAMPOS, M.C.C.; RIBEIRO, M.R.; SOUZA JUNIOR, V.S.; RIBEIRO FILHO, M.R.; R.V.C.C. Relações solo-paisagem em uma topossequência sobre substrato granítico em Santo Antônio do Matupi, Manicoré (AM). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 13-23, 2011.

CARNEIRO, C.C. **Modelagem espacial de dados aerogeofísicos e interpretação de imagens SAR aplicados ao mapeamento geológico e metalogenético da região central do Domínio Bacajá, Estado do Pará**. 2010. 148 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

COOPER, M.; MEDEIROS, J.C.; ROSA, J.D.; SORIA, J.E.; TOMA, R.S. Soil functioning in a toposequence under rainforest in São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 2, p. 392-399, 2013.

COOPERATIVA DE PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS. **Plano de recuperação do Projeto de Assentamento Agroextrativista Praia Alta Piranha**. Marabá, 2009. 179 p.

CORINGA, E.A.O.; COUTO, E.G.; PEREZ, X.L.O.; TORRADO, P.V. Atributos de solos hidromórficos no Pantanal Norte Matogrossense. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 42, n. 1, p. 19-28, 2012.

CORNELL, R.M.; SCHWERTMANN, U. (Ed.). **The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence and uses**. New York: VCH Publ., 1996. 573 p.

COUCEIRO, P.R.C.; SANTANA, G.P. Caulinita em solo da Amazônia: caracterização e permutabilidade. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 29, p. 267-275, 1999.

EBELING, A.G.; ANJOS, L.H.C.; PEREZ, D.V.; PEREIRA, M.G.; VALLADARES, G.S. Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 2, p. 429-439, 2008.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 2013. 353 p.

\_\_\_\_\_. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DICK, W.A. (Ed.) **Methods of soil analysis: Physical methods**. Madison: SSSA, 2002. p.201-228.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa geomorfológico do Estado do Pará**. Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Ambientais, 2008. 182 p.

JUHÁSZ, C.E.P.; CURSI, P.R.; COOPER, M.; OLIVEIRA, T.C.; RODRIGUES, R.R. Soil water dynamics in a toposequence under Savanna Woodland (Cerradão) in Assis, SP, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 401-412, 2006.

KRUG, F.J.; NÓBREGA, J.A.; OLIVEIRA, P.V. de. **Espectrometria de absorção atômica: Parte 1. Fundamentos e atomização com chama**. Disponível em: <<http://apostilas.cena.usp.br/Krug/AAS%20geral%20parte%201%20revisada.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2013.



LEMOS, R.C. de; SANTOS, R.D. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 4. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.

LEPSCH, I.F. **19 Lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456 p.

LO-MAN-HUNG, N.F.; MARICHAL, R.; CANDIANI, D.F.; CARVALHO, L.S.; INDICATTI, R.P.; BONALDO, A.B.; COBO, D.H.R.; FEIJOO, A.M.; TSELOUIKO, S.; PRAXEDES, C. BROWN, G.; VELASQUEZ, E.; DECAËNS, T.; OSZWALD, J.; MARTINS, M.; LAVELLE, P. Impact of different land management on soil spiders (Arachnida: Araneae) in two Amazonian areas of Brazil and Colombia. **Journal of Arachnology**, Maryland, v. 39, n. 2, p. 296-302, 2011.

LUIZÃO, F.J. Ciclos de nutrientes na Amazônia: respostas às mudanças ambientais e climáticas. **Ciência e Cultura**, Campinas, v. 59, p. 31-36, 2007.

LYNCH, L.S. **Gênese e geoquímica de solos em ambiente cárstico no cerrado da Região de Planaltina de Goiás**. 2009. 166 p. Tese (Doutorado em Solos em Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

MATA, J.F.; SILVA, R.R. da; FONTES, M.P.F.; ERASMO, E.A.L.; FARIAS, V.L.S. Análise mineralógica, granulométrica e química, em solos de ecótonos do sudoeste do Tocantins. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 4, n. 2, p. 152–175, 2011.

MCKEAGUE, J.A.; DAY, J.H. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v. 46, p. 13-22, 1966.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: CLAYS AND CLAY MINERALS CONFERENCE, 7., 1960, London. **Proceedings...** London: Pergamon Press., 1960. p. 317-327.

MOREIRA, A.; MORAES, L.A.C.; FAGERIA, N.K. Nutritional limitations in multi-strata agroforestry system with native amazonian plants. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 35, n. 12, p. 1791-1805, 2012.

NASCIMENTO, N.R.; BUENO, G.T.; FRITSCH, E.; HERBILLON, A.J.; ALLARD, T.; MELFI, A.J.; ASTOLFO, R.; BOUCHER, H.; LI, Y. Podzolisation as a desferritization process: a study of Acrisol-Podzol sequence derived from Palaeozoic sandstones in the northern upper Amazon Basin. **European Journal of Soil Science**, Hoboken, v. 55, p. 523–538, 2004.

NUNES, W.A.G.A.; KER, J.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FERNANDES FILHO, E.I.; GOMES, F.H. Relação solo-paisagem-material de origem e gênese de alguns solos no domínio do "Mar de Morros", Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 341-354, 2001.

QUEIROZ NETO, J.P. Análise estrutural da cobertura pedológica no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 21., 1987, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p. 415-430.

\_\_\_\_\_. O estudo de formações superficiais no Brasil. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 65-78, 2001.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

SABATIER, D.; GRIMALDI, M.; PRÉVOST, M.-F.; GUILLAUME, J.; GODRON, M.; DOSSO, M.; CURMI, P. The influence of soil cover organization on the floristic and structural heterogeneity of a Guianan rain forest. **Plant Ecology**, Dordrecht, v. 131, n. 81, p. 81-108, 1997.

SAMPAIO, S.M.N.; VENTURIERI, A.; SILVA, B.N.R. da; SILVA, L.G.T.; HOMMA, A.K.O. CARVALHO, R.A. **Dinâmica da cobertura vegetal e uso da terra no Sudeste Paraense: o caso do Projeto de Assentamento São Francisco**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2004. 38 p.

SCHWERTMANN, U. Use of oxalate for Fe extraction from soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v. 53, p. 244-246, 1973.

SECRETARIA DE ESTADO DE PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E FINANÇAS – ESTADO DO PARÁ. **Portal Amazônia 06/02/2007**. Disponível em: <<http://portalamazonia.globo.com/pscript/amazoniadeaaz/artigoAZ.php>>. Acesso em: 19 nov. 2009.

SILVA JÚNIOR, M.L.; DESJARDINS, T.; SARRAZIN, M.; MELO, V.S. de; MARTINS, P.F.S; SANTOS, E.R.; CARVALHO, C.J.R. Carbon content in Amazonian oxisols after forest conversion to pasture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1603-1611, 2009.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE; SUPREN, 1977. 91 p.

VASQUEZ, M.L. **Geocronologia em zircão, monazita e granada e isótopos de Nd das associações litológicas da porção oeste do Domínio Bacajá: evolução crustal da porção meridional da Província Maroni-Itacaiúnas – sudeste do Cráton Amazônico**. 2006. 212 p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

VASQUEZ, M.L.; ROSA-COSTA, L.T. (Org.). **Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas - SIG: texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do Estado do Pará**. Belém: CPRM, 2008. 328 p. Escala 1:1.000.000.

WADA, K. Allophane and imogolite. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.). **Minerals in soil environment**. Madison: SSSA, 1989. p. 1051–1087.

WALKLEY, A.; BLACK, J.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, p. 29-38, 1934.



### **3 ANÁLISE MICROMORFOMÉTRICA DA ESTRUTURA E ATRIBUTOS HÍDRICOS DE SOLOS SOB FLORESTA E PASTAGEM NO SUDESTE PARAENSE**

#### **Resumo**

Com o objetivo de compreender o comportamento físico-hídrico dos solos sob floresta e pastagem em área de agricultura familiar no sudeste paraense, foram estudadas detalhadamente a porosidade do solo pela análise micromorfométrica, a condutividade hidráulica e curva de retenção de água no solo. As caracterizações ocorreram em cada um dos 6 perfis analisados, ao longo das topossequências estudadas, a partir da análise estrutural. A análise estrutural mostrou relação entre os sete compartimentos e o comportamento físico-hídrico dos horizontes avaliados. As diferenças observadas foram mais significativas em relação à divisão dos compartimentos, que respeita as variações morfológicas (como textura, estrutura, ocorrência de elementos grossos), ao longo da topossequência, do que a diferença entre os tipos de uso do solo, como floresta e pastagem. A textura e estrutura foram de grande importância para a diferença de porosidade do solo entre a superfície, os horizontes subsuperficiais, e os horizontes em profundidades maiores. Os horizontes mais argilosos, apresentaram maior retenção de água e menor condutividade hidráulica. A variação de comportamento ao longo da topossequência mostrou que os solos à jusante no perfil possui influências relacionadas à oscilações do lençol freático e à textura mais argilosa, que os diferenciam dos perfis localizados em posições superiores no relevo.

Palavras-chave: Porosidade do solo; Comportamento da água; Manejo do solo; Micromorfometria

#### **Abstract**

The aim of the study was understand the physical-hydric behaviour of soils under forest and grassland in family farming area located in southeast of Pará. The porosity was studied using micromorfometric analysis. Additionally, the hydraulic conductivity and soil water retention curve were analysed. The characterization was performed in each one of the six analysed profiles and along of the toposequences that were studied through structural analysis. The structural analysis showed relationship between the seven compartments and the physical-hydric behaviour of the evaluated horizons. The observed difference were higher despite of the division of compartments, that consider the morphologic variations (e.g. texture, structure, occurrence of coarse elements) along the toposequence, than the difference between the land use types as forest and grassland. The texture and structure showed great importance in the soil porosity difference among surface, subsurface and deeper horizons. The horizons with higher clay content, showed greater water retention and lower hydraulic conductivity. This change in behaviour along the toposequence showed that soils downstream of the profile has influences related to fluctuations of the water table and the horizon clayey that differentiate them from profiles located in the upper positions in the landscape.

Keywords: Soil porosity; Water behaviour; Soil management; Micromorphometry

### 3.1 Introdução

A caracterização físico-hídrica do solo é uma ferramenta importante para compreender a dinâmica dos fluxos de água no solo, aprofundando a compreensão do comportamento da água e sua disponibilidade para as plantas. Essa dinâmica se dá principalmente pela existência e distribuição dos poros no solo. A importância da porosidade do solo depende da sua forma e tamanho, de modo que é essencial o conhecimento dessa geometria e distribuição, a fim de melhor caracterizá-los.

Vários métodos são utilizados a fim de se aproximar o máximo possível do comportamento do solo, e melhor compreendê-lo. A medida da condutividade hidráulica é um desses métodos. Ela fornece informações sobre o comportamento da água no solo e permite a caracterização do fluxo de água no perfil do solo, distinguindo a condutividade dos macroporos através do movimento de água na matriz do solo (COOPER et al., 2013). A condutividade hidráulica (K) de um solo representa uma propriedade do meio em transportar água, sendo essencial para a quantificação do fluxo em meio poroso. Quanto maior a condutividade hidráulica do solo mais facilmente a água, ou qualquer líquido, permeia por este solo (DIAS, 2012). Entre as propriedades físicas do solo, a condutividade hidráulica é uma das mais importantes quando se estudam fenômenos ligados ao movimento da água no solo (JONG van LIER; LIBARDI, 1997).

A curva de retenção de água no solo tem sido utilizada como outra importante ferramenta na descrição do comportamento físico-hídrico dos solos não-saturados. Ela é a relação do teor de água ( $\theta$ ) e potencial matricial ( $\psi$ ). A água que é retida sobre determinado potencial é decorrente da estrutura e da distribuição do tamanho de poros (BEUTLER et al., 2002; MACHADO et al., 2008). Grandes valores de umidade em altos potenciais de água, ocasionará rápida drenagem e menor retenção de água no solo. Isso ocorre caso haja elevada proporção de macroporos, causadas pela estrutura, e/ou altos conteúdos de carbono. Onde existem baixos conteúdos de umidade em potenciais mais baixos significa que a água drena mais lentamente e está retida com mais força no solo. Este fenômeno pode estar relacionado à maior densidade e ao maior conteúdo de argila, que resulta em uma grande proporção de microporos e conseqüentemente, maior retenção de água (COOPER et al., 2012). A curva de retenção pode ser utilizada na avaliação da qualidade do solo, norteando práticas de uso e manejo sustentável dos sistemas de produção agrícola (MACHADO et al., 2008).

Os estudos micromorfométricos, juntamente às diferentes análises de solo, permitem a síntese e integração da organização da paisagem à microestrutura do solo. As análises micromorfométricas caracterizam o espaço poral e fornecem informações detalhadas das condições estruturais do solo. Esta análise é também usada para avaliar a vulnerabilidade física do solo e interpretar seu comportamento e dinâmica (COOPER et al., 2013).

A dinâmica do solo da floresta estudada através do movimento da água ao longo do perfil do solo é fundamental, pois a disponibilidade de água no solo é um dos fatores mais importantes para o crescimento da planta. As técnicas que estudam os atributos da micromorfologia do solo fornecem informações úteis sobre o sistema poroso do solo (CASTRO et al., 2003) que, associada ao comportamento hídrico do solo, ajuda na compreensão da relação solo-água-vegetação. Desta forma, é possível determinar as relações estabelecidas no interior do sistema do solo que estão envolvidos e influenciam a paisagem.

O objetivo deste capítulo é o de relacionar os atributos físicos ao comportamento hídrico em solos de floresta e pastagem, ao longo dos perfis e das topossequências; e conferir se a tipologia dos horizontes obtida pela análise estrutural corresponde às características físico-hídricas encontradas nos dois tipos de uso do solo.

## **3.2 Material e Métodos**

### **3.2.1 O meio físico**

A área em estudo localiza-se no município de Nova Ipixuna, estado do Pará e abrange o Projeto de Assentamento Agroextrativista Praia Alta Piranheira.

O clima desta região é o equatorial super-úmido (Am), no limite de transição para o tipo clima tropical com estação seca de inverno (Aw). Apresenta índices pluviométricos em torno de 2000 mm/ano (COPSERVIÇOS, 2009). A vegetação é classificada como Floresta Densa Submontana em relevo aplainado, e em relevo acidentado, Floresta Aberta Latifoliada (SEPOF-PA, 2007). Os solos da área em estudo foram classificados como Argissolo Amarelo, (EMBRAPA, 2013).

### 3.2.2 Local de estudo e amostragem dos solos

Os solos estudados estão organizados em topossequência, sob dois tipos de coberturas vegetais características da localidade: floresta e pastagem. Os transectos estão localizados um face ao outro. Em cada transecto foram abertas três trincheiras, a fim de conhecer morfologicamente a distribuição dos horizontes e seus atributos, bem como a realização de coletas de solos para posteriores análises em laboratórios. Nesta parte do estudo serão estudados os atributos físico-hídricos do solo, considerando a divisão dos compartimentos através da análise estrutural como encontrados no Capítulo 2 (Figura 2.5).

Na topossequência, os compartimentos foram divididos respeitando as seguintes formas.

- Compartimento 1: Horizonte superficial com matéria orgânica, Bruno-amarelado (10YR 5/6) a Preto (10YR 2/1), granular, arenosa.
- Compartimento 2: Horizonte subsuperficial Bruno-amarelado (10YR 5/6) a Amarelo-brunado (10YR 6/8), franco-argilo-arenosa, com muito cascalho e areia grossa.
- Compartimento 3: Horizonte com incremento de argila. Predominância de cor Bruno-forte (7,5YR 5/6) a Amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8). Início de mosqueados mais vermelhos (2,5YR 5/6).
- Compartimento 4: Horizonte cascalhento e argiloso. Blocos subangulares a angulares, com variegado de cores Bruno, Vermelho e Amarelo. Bastante mosqueado.
- Compartimento 5: Horizonte com material de origem em alteração. Material mais firme e seco de textura menos argilosa, e areia grossa. Pouco cascalho.
- Compartimento 6: Horizonte cascalhento, franco-arenoso com variegados de cores mais acinzentadas. Localizado na parte inferior do relevo sob pastagem.
- Compartimento 7: Horizonte cascalhento, com areia grossa, e grande influência do lençol freático. Localizado na parte inferior do relevo sob floresta.

A amostragem não seguiu o mesmo protocolo para o conhecimento dos atributos físicos e hídricos do solo (Figura 3.1). As análises físicas foram realizadas de três modos: 1 – Amostra representativa de cada horizonte para análises granulométricas; 2 – Amostras de solo em cilindro metálico de volume conhecido para determinação da densidade do solo, três

amostras por horizonte; 3 – Amostras indeformadas de solo em forma de bloco, sendo coletados três blocos por horizonte.

As análises físico-hídricas ocorreram de duas formas: 1 - A curva de retenção de água no solo foi medida em amostras indeformadas, mais especificamente em amostras de solo coletadas em cilindros metálicos de volume conhecido (100 cm<sup>3</sup>), totalizando em 3 repetições por horizonte; 2 – A condutividade hidráulica (Ks) foi medida em blocos indeformados, coletados em quatro profundidades do perfil. Essas profundidades foram escolhidas no momento da descrição morfológica, como sendo profundidades importantes para o funcionamento hídrico. As repetições das medidas de condutividade hidráulica foram realizadas no mesmo bloco, ou em dois blocos (Figura 3.1).



Figura 3. 1 - Esquema de coleta e amostragem do solo para análises em laboratório

### 3.2.3 Análise física do solo

O método utilizado para quantificar a densidade do solo foi o do cilindro volumétrico, e a densidade de partículas medida pelo picnômetro a gás hélio (GROSSMAN;



REINSCH, 2002). A porosidade do solo foi calculada a partir da densidade do solo e de partículas.

A análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro, tendo como princípio a Lei de Stokes sobre a sedimentação de partículas (CAMARGO et al., 2009).

As análises físicas foram realizadas no Laboratório de Física do Solo no Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP, Piracicaba-SP.

### **3.2.4 Análise micromorfométrica do solo**

Foram coletadas 3 amostras indeformadas em formas de bloco, de 0,07 x 0,05 x 0,12 m orientados à superfície em cada horizonte das trincheiras abertas nos dois tipos de uso do solo. Após a coleta, as amostras foram protegidas e transportadas para o laboratório de Micromorfologia do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP, Piracicaba-SP.

#### **3.2.4.1 Preparação das amostras**

As amostras em bloco foram secas ao ar, por aproximadamente 15 dias. Após este período foram levadas à estufa a 40°C com ventilação forçada por 48 horas. Quando secas, as amostras foram colocadas em potes plásticos individualmente e se iniciou o processo de impregnação da amostra com uma mistura de resina poliéster e monômero de estireno de acordo com Murphy (1986), adicionando-se um pigmento fluorescente (MURPHY; BULLOCK; TURNER, 1977). Esta solução foi adicionada aos poucos a fim de penetrar todo o bloco, para isto, os blocos são acondicionados em dessecadores interligados a uma bomba de vácuo, a fim de facilitar a penetração da solução para a impregnação, segundo Castro et al. (2003). A amostra acondicionada no pote plástico, é retirada a cada 30 minutos da bomba de vácuo para adição de mais dose de solução, este processo de retirada e retorno à bomba de vácuo, ocorre até a amostra estar submersa na solução. Após, esta etapa, cada amostra permaneceu no vácuo por no mínimo 24 horas (RINGROSE-VOASE, 1991).

Posteriormente à secagem e endurecimento, o bloco foi cortado em blocos menores, com serra de diamante, e lixados com o auxílio de um disco rotatório e um material abrasivo, o carbureto de silício preto de granulação mais grosseira (220 mesh, com grãos de 53-62 µm), e polidas com um disco rotatório e carbureto de silício verde, mais fino (600 mesh, grãos de

18-22 $\mu\text{m}$ ), mantendo a amostra sempre úmida em contato com o material abrasivo (Figura 3.2). Depois de polido, o bloco estava pronto para a realização da análise micromorfométrica.

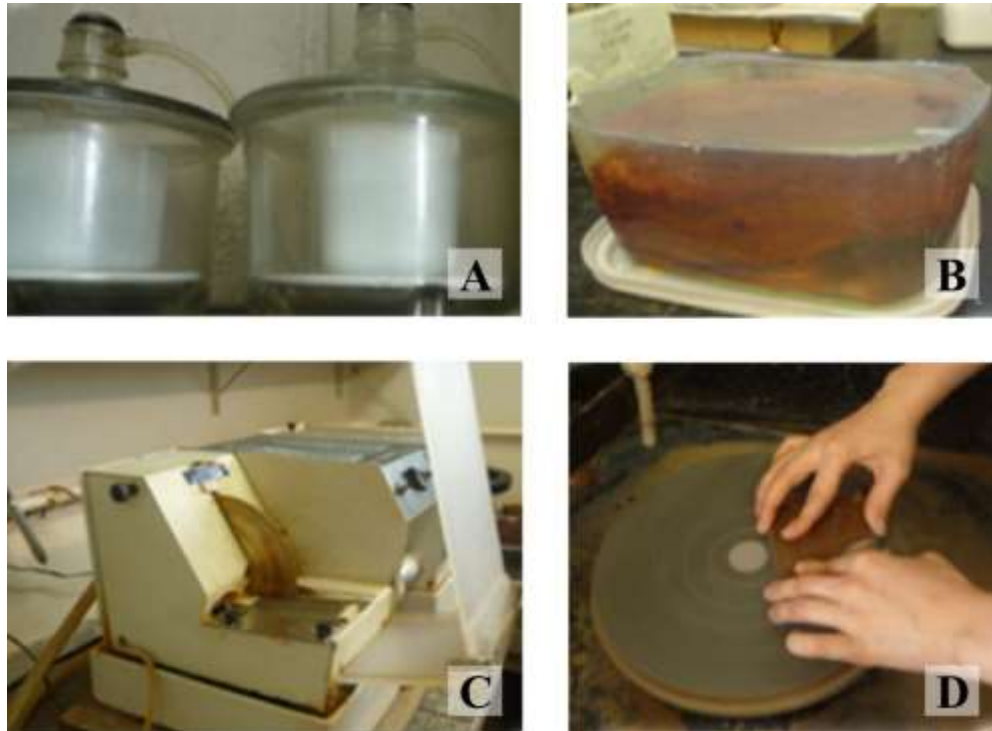


Figura 3. 2 - Preparação dos blocos para análise micromorfométrica. A. Impregnação dos blocos pela solução com resina, em bombas de vácuo. B. Bloco de solo impregnado e endurecido. C. Aparelho com serra de diamante que corta os blocos de solo depois de endurecidos. D. Disco rotatório que lixa o bloco após cortado. Fotos: Alix Vidal

### 3.2.4.2 Análise micromorfométrica

A observação e quantificação dos poros do solo foi realizado com auxílio de um microscópio ótico polarizante e lupa binocular Zeiss, ambos sob luz normal (LN) e polarizada (LP). A quantificação da porosidade foi possível pelo método da análise de imagens. Os blocos de solo foram iluminados com luz ultravioleta, e por isso o emprego do pigmento fluorescente na solução para impregnação da amostra, e fotografados com o auxílio de uma câmera digital (Sony®, modelo DFW-X700), em sistema “*charged couple device*” (CCD), acoplada ao microscópio petrográfico.

Foram selecionadas para cada tipo de uso e profundidade, imagens (fotomicrografias) aleatórias de cada bloco no tamanho de 12x15 mm (180mm<sup>2</sup>). A digitalização das imagens foi em 1024x768 pixels, com resolução espectral de 256 tons de cinza, em aumento de 10x, igualando um pixel a 156,25  $\mu\text{m}^2$ . De posse das imagens com resolução espectral de 256

níveis de cinza, foi realizada a binarização e etiquetagem das imagens empregando um programa de análises de imagem: Noesis Visilog 5.4. Após estas etapas o programa quantifica as variáveis básicas, que se referem ao conjunto do espaço poroso da imagem, e as variáveis derivadas, definidas como as entidades discretas sobre a imagem. Uma vez determinadas as variáveis básicas e derivadas, estas foram classificadas segundo classes de tamanhos, tipos de forma ou combinações de tipos de forma com classes de tamanhos. Tal procedimento foi otimizado por macros desenvolvidas em linguagem Visual Basic no Microsoft® Excel elaborado por Juhász et al. (2007).

Esta etapa consistiu em quantificar a porosidade do bloco. A determinação da área e o formato dos poróides (MORAN et al., 1988), em cada bloco de solo foi realizada com índices de forma, como utilizado em Cooper e Vidal-Torrado (2005).

O primeiro índice de forma ( $I_1$ ) separou os poros arredondados dos complexos eq. (1):

$$I_1 = \frac{P^2}{4 \pi A} \quad (1)$$

$P$  – é o perímetro do poróide ( $\mu\text{m}$ ),  $A$  – a área que o poróide ocupa ( $\mu\text{m}^2$ ).

O segundo índice de forma ( $I_2$ ) classifica adequadamente os poros alongados e complexos eq. (2):

$$I_2 = \frac{\frac{1}{m} \sum_i (N_i) i}{\frac{1}{n} \sum_j (D_F) j} \quad (2)$$

$m$  – é o número de direções  $i$  o qual é calculado o número de interceptos  $N_i$  ( $i = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  e  $135^\circ$ ),  $n$  – número de direções  $j$  nas quais são calculados os diâmetros de Féret  $D_F$  ( $j = 0^\circ$  e  $90^\circ$ ). Estando o índice  $I_2$  como complemento do índice  $I_1$  (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Classificação das formas dos poróides

Forma do poróide	Índices de forma	
	$I_1$	$I_2$
Arredondado	$I_1 \leq 5$	
Alongado	$5 < I_1 \leq 25$	$\leq 2,2$
Complexo	$I_1 > 5$	$> 2,2$

As classes de forma definidas: arredondados, alongados e complexos e as classes de tamanho dos poróides são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Definição das classes de tamanho x forma dos poróides

Limites das classes de tamanho em mm <sup>2</sup>	Classes de forma		
	Arredondados	Alongados	Complexos
0,001 – 0,01	Arr <sub>p</sub>	Alon <sub>p</sub>	Comp <sub>p</sub>
0,01 – 0,1	Arr <sub>m</sub>	Alon <sub>m</sub>	Comp <sub>m</sub>
>0,1	Arr <sub>g</sub>	Alon <sub>g</sub>	Comp <sub>g</sub>

A Figura 3.3 apresenta uma parte do processo de quantificação dos poros.



Figura 3.3 - Material para realização da análise micromorfométrica. A. Captura de imagem e identificação dos poros. B. Câmera digital, localizada na parte superior e posterior da lupa binocular. Fotos: Alix Vidal

### 3.2.4.3 Análises estatísticas dos dados

Os dados estatísticos foram inicialmente avaliados pela estatística descritiva, com o uso de boxplot para conhecimento das tendências dos solos estudados, tomando por base, a média, mediana, valor máximo, primeiro e terceiro quartil (MCGILL; TUKEY; LARSEN, 1978).

As análises estatísticas dos dados de micromorfometria foram realizadas e verificadas pela normalidade dos dados por meio do teste de SHAPIRO-WILK (1965). A hipótese de normalidade não foi validada na grande maioria dos dados. Assim, foi decidido usar o teste de KRUSKAL-WALLIS com probabilidade a 5%, teste não paramétrico, usado para comparação de medianas com amostras de tamanhos diferentes que não respeitam a lei de normalidade. A

seguir, foi realizado um teste complementar para poder diferenciar os horizontes entre eles, usando a função “kruskalmc” do pacote estatístico “pgirmess”. A execução das análises estatísticas se deu com o uso do Programa R (2012).

### 3.2.5 Análise físico-hídrica do solo

#### 3.2.5.1 Curva característica de retenção de água no solo

As curvas características de retenção de água no solo foram obtidas em amostras indeformadas de solos, com cilindros metálicos de volume conhecido (100 cm<sup>3</sup>). As amostras foram saturadas e submetidas aos potenciais matriciais ( $\Psi$ ) de -1, -2, -4, -6 -8 e -10 kPa em mesa de tensão, preenchidas com pó de quartzo, de granulometria conhecida (TOPP; ZEBCHUK, 1979), e os potenciais de -33, -50, -75, -100, -150, -300 e -500 kPa em placas porosas utilizando uma câmara de pressão de Richards (DANE; HOPMANS, 2002). As análises foram realizadas no laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP.

Após equilíbrio hidráulico atingido em cada potencial aplicado na amostra de solo, foi possível determinar sua massa úmida, e no fim das medidas de tensão, a massa seca, por secagem em estufa a  $\pm 105$  °C durante 24 h. A definição das umidades e seus teores de água base peso (kg kg<sup>-1</sup>) e base volume (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) se deram após secagem das amostras.

O ajuste das curvas de retenção de água no solo aos dados experimentais foi realizado empregando a equação proposta por van Genuchten (1980), com o uso do programa RETC (van GENUCHTEN et al., 1991) eq. (3). Nesse programa, o método dos mínimos quadrados é usado para encontrar os parâmetros da curva (van GENUCHTEN, 1980), que melhor se ajusta aos dados experimentais obtidos. Em todos os ajustes das amostras, foi adotada a restrição de Mualem,  $m=1-1/n$  (MUALEM, 1986).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \psi_m)^n]^m} \quad (3)$$

Em que  $\theta$  é a conteúdo de água do solo (kg kg<sup>-1</sup>),  $\psi$  é o potencial mátrico da água no solo (kPa),  $\theta_s$  é o conteúdo de água na saturação (kg kg<sup>-1</sup>),  $\theta_r$  é o conteúdo de água residual

( $\text{kg kg}^{-1}$ ) e  $n$  e  $m$  ( $m = 1-1/n$ ) são parâmetros empíricos adimensionais de ajuste e  $\alpha$  é um parâmetro expresso em  $\text{kPa}^{-1}$ .

A classificação da porosidade foi feita segundo Bullock et al. (1985). Esta classificação enquadra os microporos em diâmetro menor que  $50 \mu\text{m}$ , e está relacionado ao potencial de  $6 \text{kPa}$ . Acima deste tamanho, estão os meso e macroporos. A porosidade total do solo pela curva de retenção, é igual à saturação em volume de solo e pode ser determinada de acordo com a expressão eq. (4).

$$\text{Porosidade Total} = \left( \frac{m_{sat} - m_s}{V_t} \right) \quad (4)$$

Onde  $m_{sat}$  é a massa da amostra após a saturação;  $m_s$  é a massa da amostra seca;  $V_t$  é o volume da amostra de solo.

A microporosidade do solo considerou o conteúdo de água no potencial de  $6 \text{kPa}$  eq. (5).

$$\text{Microporosidade} = \left( \frac{m_{6kPa} - m_s}{V_t} \right) \quad (5)$$

Em que  $m_{6kPa}$ , a massa da amostra após ser submetida à tensão de  $6 \text{kPa}$ .

A macroporosidade do solo foi determinada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade do solo eq. (6).

$$\text{Macroporosidade} = \text{Porosidade Total} - \text{Microporosidade} \quad (6)$$

### 3.2.5.2 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica do solo foi realizada em laboratório, a partir de grandes blocos retirados em quatro profundidades de cada perfil analisado, como citado anteriormente. Os ensaios de infiltração e condutividade hidráulica foram realizadas em laboratório com o infiltrômetro MiniDisk Infiltrometer (DECAGON DEVICE, 2012).

O procedimento consistiu em colocar o infiltrômetro sobre o bloco de solo, e submeter uma tensão (no caso deste trabalho:  $-0,5$ ,  $-1,5$ ,  $-3,0$ ,  $-6,0 \text{ cm.H}_2\text{O}$ ), até a

estabilização do volume de água que infiltra no solo. Entre o equipamento e o bloco de solo, foi colocado areia para facilitar o contato entre ambos e garantir o equilíbrio do infiltrômetro (Figura 3.4).

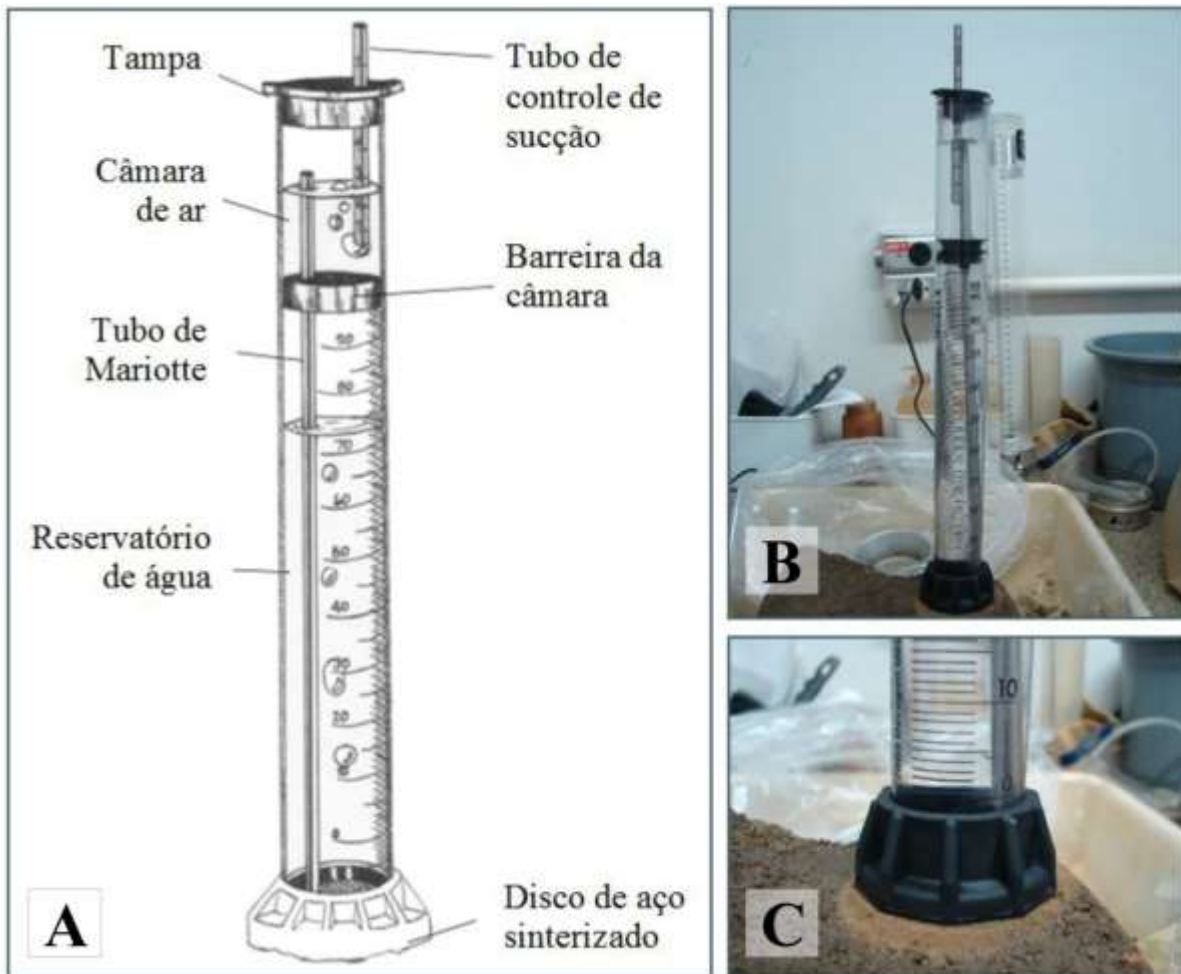


Figura 3. 4 - Diagrama do infiltrômetro (a) e o infiltrômetro de mini-disco montado em laboratório (b), com o contato entre o equipamento e o solo (c)

O cálculo da infiltração de água no solo seguiu o protocolo proposto por Ankeny et al. (1991), que determina a condutividade hidráulica não-saturada sob várias tensões sobre a mesma superfície. A equação de Wooding (1968) para a taxa de infiltração estável é utilizada no cálculo. Este protocolo simplificado só permite estimar a condutividade hidráulica.

### 3.3 Resultados e Discussões

#### 3.3.1 Características físicas dos solos

Os atributos físicos encontrados nos solos estudados apresentaram mudanças relativamente abruptas entre os horizontes superficiais e subsuperficiais (Tabela 3.3). Em geral, a textura foi predominantemente arenosa em superfície, havendo a existência de um gradiente textural, com aumento de argila em profundidade, e quando encontrado o material de alteração, a granulometria, por vezes, foi mais grossa.

Os perfis sob floresta F1 e F2 apresentaram a sequência areia-franca ou franco-arenosa – franco-argilo-arenosa – argilosa, bem característicos da classe dos Argissolos. O perfil F3 apresentou sequência diferenciada, areia-franca – franco-argilo-arenosa – argilo-arenosa – franco-argilo-arenosa. Mas, também apresentou um aumento de argila em profundidade que reduziu no horizonte em alteração.

Sob pastagem, os perfis P1 e P2 apresentaram texturas franco-arenosa – franco-argilo-arenosa a argilo-arenosa – argilosa – franco-argilosa. Em P3, a sequência foi mais argilosa em profundidade, arenosa – franco-arenosa – franco-argilo-arenosa – argilo-arenosa – argilosa (Anexo B).

A densidade do solo ( $D_s$ ) apresentou menores valores em superfície, devido ao maior teor de matéria orgânica existente nos primeiros centímetros dos perfis (compartimento 1). De fato, os teores de matéria orgânica (MO) são mais altos no horizonte superficial, variando de 13 a 32,5 g kg<sup>-1</sup> em floresta e entre 16,4 e 25,4 g kg<sup>-1</sup> na pastagem (Tabela 3.3). A partir dos 0,05 m, a densidade aumentou em ambos os usos do solo, reduzindo novamente aos 0,40 m sob floresta e aos 0,60 m sob pastagem, atingindo valores similares àqueles do horizonte superficial. O aumento da  $D_s$  na camada subsuperficial está relacionado a dois fatores: primeiro, à presença da textura arenosa, e segundo, à redução da matéria orgânica. Sob pastagem, há ainda o fator pisoteio do gado, sofrido nos anos anteriores. Nos horizontes mais profundos, o aumento da  $D_s$  deu-se devido à presença de elementos grossos e também, em alguns horizontes, de uma textura mais grossa (Anexo C e Figura 2.6). O aumento da  $D_s$  do solo em profundidade também se deve ao adensamento das partículas de solo, proveniente da própria estrutura do solo, como nos compartimentos 3 e 4.

A porosidade total (PT), medida a partir da  $D_s$  e  $D_p$ , em consonância com a  $D_s$ , mostrou maior porosidade do solo nos primeiros centímetros, reduzindo em profundidade.



Quando houve o aumento de porosidade em profundidade, houve redução da  $D_s$ , pois a porosidade do solo evolui de maneira inversa à densidade do solo (REYNOLDS et al., 2002). A  $D_p$ , apresentou-se constante em todos os perfis, devido à pouca variação da mineralogia do solo, como mostrado no capítulo anterior (Figura 2.9).

Tabela 3.3 – Densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp) e porosidade total (PT) dos perfis estudados.

(continua)

<b>Horizonte</b>	<b>Dp</b>	<b>Ds</b>	<b>PT<sup>(1)</sup></b>	<b>PT<sup>(2)</sup></b>	<b>Macro</b>	<b>Micro</b>
Profundidade (m)	----- Mg m <sup>-3</sup> -----		----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----			
<b>F1 - Argissolo Amarelo distrófico saprolítico argiloso cascalhento</b>						
A 0,00-0,06	2,58	1,26	0,51	0,51	0,32	0,19
AB 0,06-0,17	2,60	1,58	0,39	0,39	0,22	0,12
Bt1 0,17-0,44	2,61	1,54	0,41	0,40	0,21	0,28
Bt2 0,44-0,62	2,60	1,52	0,41	0,41	0,23	0,23
BC 0,62-0,99	2,61	1,47	0,44	0,50	0,13	0,37
C 0,99-1,63	2,64	1,41	0,47	0,28	0,11	0,17
<b>F2 - Argissolo Amarelo distrófico saprolítico argiloso cascalhento</b>						
A 0,00-0,06	2,60	1,47	0,43	0,45	0,26	0,19
AB 0,06-0,26	2,61	1,52	0,42	0,44	0,16	0,28
Bt1 0,26-0,45	2,61	1,50	0,43	0,47	0,25	0,22
Bt2 0,45-0,63	2,61	1,41	0,46	0,50	0,18	0,32
BC 0,63-0,90	2,62	1,43	0,45	0,29	0,14	0,15
C 0,90-1,65+	2,62	1,40	0,46	0,32	0,15	0,17
<b>F3 – Argissolo Amarelo distrófico saprolítico argiloso cascalhento</b>						
A 0,00-0,12	2,60	1,28	0,51	0,46	0,23	0,23
AB 0,12-0,24	2,61	1,52	0,42	0,27	0,21	0,06
Bt1 0,24-0,43	2,61	1,39	0,47	0,28	0,19	0,09
Bt2 0,43-0,58	2,61	1,43	0,45	0,32	0,13	0,19
Bt3 0,58-0,88	2,62	1,37	0,48	0,31	0,11	0,20
BC 0,88-1,27	2,61	1,40	0,46	0,34	0,09	0,25
C 1,27-1,60+	2,63	1,44	0,45	0,30	0,09	0,21

Tabela 3.3 – Descrições morfológicas simplificadas propriedades físicas dos perfis estudados

(conclusão)

<b>Horizonte</b> Profundidade (m)	<b>Dp</b> -----Mg m <sup>-3</sup> -----	<b>Ds</b>	<b>PT<sup>(1)</sup></b>	<b>PT<sup>(2)</sup></b>	<b>Macro</b> ----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----	<b>Micro</b>
P1 - Argissolo Amarelo distrófico saprolítico argiloso cascalhento						
A 0,00-0,05	2,58	1,27	0,51	0,52	0,24	0,28
AB 0,05-0,13	2,60	1,63	0,37	0,42	0,27	0,15
Bt1 0,13-0,67	2,60	1,52	0,41	0,43	0,31	0,12
Bt2 0,67-0,93	2,61	1,41	0,46	0,48	0,36	0,12
BC 0,93-1,21	2,61	1,46	0,44	0,31	0,20	0,11
P2 - Argissolo Amarelo distrófico saprolítico argiloso cascalhento						
A 0,00-0,09	2,60	1,52	0,41	0,42	0,16	0,29
BA 0,09-0,18	2,61	1,59	0,39	0,45	0,15	0,30
Bt 0,18-0,44	2,61	1,53	0,41	0,47	0,15	0,32
BC 0,44-0,85	2,64	1,58	0,40	0,30	0,12	0,18
C 0,85-1,60+	2,65	1,68	0,37	0,21	0,08	0,13
P3 - Argissolo Amarelo distrófico epirodóxico argiloso cascalhento						
A 0,00-0,09	2,61	1,48	0,43	0,47	0,23	0,24
AB 0,09-0,15	2,62	1,51	0,42	0,42	0,22	0,20
BA 0,15-0,37	2,62	1,67	0,36	0,34	0,14	0,20
Bt1 0,37-0,76	2,61	1,71	0,34	0,29	0,16	0,13
Bt2 0,76-1,10	2,63	1,47	0,44	0,31	0,08	0,23
BC 1,10-1,33+	2,67	1,42	0,47	0,34	0,08	0,26

<sup>(1)</sup> Porosidade do solo total calculada pela Ds e Dp. <sup>(2)</sup> PT calculada pela curva de retenção de água no solo

### 3.3.2 Micromorfometria por análise de imagens dos solos estudados

A análise de imagens realizada quantificou macro e mesoporos dos blocos amostrados. Conforme a classificação de Bullock et. al (1985), são considerados mesoporos os diâmetros entre 50 e 200 micrômetros, e macroporos os poros que constituem o diâmetro de 500 a 5000 micrômetros. Esta análise permite descrever a evolução de macro e mesoporosidade do solo dentro de um perfil.

#### 3.3.2.1 Quantificação de macro e mesoporosidade

A Tabela 3.4 apresenta os resultados das estatísticas descritivas dos dados de porosidade de solo (%). Quando se observa os coeficientes de variação (CV%), se constata que a variabilidade dos dados é média ( $12\% < CV < 60\%$ ) para a maioria dos horizontes sob floresta e pastagem, segundo os critérios de Warrick e Nielsen (1980).

Os horizontes de F1, em geral, apresentaram CV em torno de 34 a 48%, exceto BC, que apresentou baixa variabilidade ( $< 12\%$ ) em torno de 0,59%. No perfil F2, os coeficientes de variação abrangeram uma faixa maior, de 24 a 59%, relacionado à variabilidade natural do perfil, que ocasionou diferenças importantes na porosidade do solo. Os horizontes Bt3 e BC do perfil F3 apresentaram alta variabilidade ( $CV > 60\%$ ). Esta variação pode estar relacionada à proximidade desses horizontes mais profundos ao lençol freático, que ao oscilar sazonalmente, influencia nas condições estruturais do solo, e implica em variabilidades na porosidade do solo.

Os coeficientes de variação sob pastagem, em P1, variaram entre 23 a 49%, com maior porosidade do solo em superfície. No segundo perfil, P2, a porosidade do solo também foi maior nos horizontes A e AB. No perfil P3, o maior coeficiente de variação ( $CV > 60\%$ ) foi no horizonte Bt2. Essa observação, assim como no terceiro perfil em floresta, é coerente com o fato de os horizontes terem influência da oscilação do lençol freático, influenciando até mesmo na intensidade de pedogênese destes solos (Tabela 3.4 e Figura 3.6).

Tabela 3.4 – Estatística descritiva dos dados de macro e mesoporosidade de solo (%)

<b>Porosidade do solo (%)</b>					
<b>Perfil</b>	<b>Horizonte</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>s*</b>	<b>CV*</b>
<b>F1 Floresta</b>	A	24,15	23,28	11,60	48,03
	AB	21,26	19,35	7,78	36,59
	Bt1	20,50	18,78	7,13	34,78
	Bt2	6,83	7,01	2,50	36,60
	BC	8,43	8,43	0,05	0,59
<b>F2 Floresta</b>	A	23,57	22,17	13,89	58,93
	AB	12,52	12,16	3,05	24,36
	Bt1	14,93	13,82	6,71	44,94
	Bt2	6,15	6,04	2,34	38,05
	BC	3,88	3,41	1,75	45,10
<b>F3 Floresta</b>	A	20,74	20,40	9,07	43,73
	AB	12,44	11,72	3,17	25,48
	Bt1	14,57	13,99	3,62	24,85
	Bt2	8,87	9,04	3,15	35,51
	Bt3	11,10	7,81	8,72	78,56
	BC	7,13	7,13	9,93	139,27
<b>P1 Pastagem</b>	A/AB	18,18	17,21	4,24	23,32
	Bt1	16,03	16,21	3,42	21,33
	Bt2	14,30	12,49	6,28	43,92
	BC	13,41	11,96	6,64	49,52
<b>P2 Pastagem</b>	A/AB	20,14	19,43	4,66	23,14
	BA	14,78	14,18	5,31	35,93
	Bt	16,37	15,28	5,88	35,92
<b>P3 Pastagem</b>	A	23,76	22,49	6,81	28,66
	AB	15,13	14,30	4,39	29,02
	BA	12,64	12,62	2,39	18,91
	Bt1	5,04	5,32	2,16	42,86
	Bt2	10,38	6,95	7,21	69,46

\* s-desvio padrão; CV-coeficiente de variação

A Figura 3.6 apresenta os “boxplots” da área total de poros (%) em todos os horizontes de cada perfil sob floresta e pastagem. Os resultados médios da análise de variância da porosidade do solo apresentaram valores adequados para boa qualidade do solo nos horizontes superficiais sob floresta e pastagem. Observaram-se valores máximos de 24,15% e mínimos de 12,44% para os horizontes A, AB e Bt1 sob floresta e valores entre 23,76% e 12,64% para os horizontes A, AB e BA sob pastagem. Em contrapartida, os resultados de porosidade do

solo para os horizontes mais profundos Bt2 e BC do perfil F1, F2, F3 sob floresta e o horizonte Bt1 do perfil P3 sob pastagem apresentaram valores abaixo do limite mínimo ( $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) para garantir a aeração e difusão de oxigênio no solo para as raízes (GRABLE; SIEMER, 1968; XU; NIEBER; GUPTA, 1992).

As análises de imagens também mostraram diminuição significativa da porosidade do solo entre o horizonte A e B para todos os perfis sob floresta e pastagem (Figura 3.6). A diminuição da porosidade do solo em profundidade foi observada em várias publicações (DESJARDINS et al., 2000; ANDRADE et al., 2010; COOPER et al., 2012). Segundo tais autores, essa diminuição pode ser compreendida devido às modificações texturais e estruturais que ocorrem ao longo do perfil. De fato, a porosidade do solo sendo o resultado da distribuição espacial das partículas sólidas do solo e de sua estrutura, tende a ser menor quando o contato entre as partículas do solo se torna maior (BRADY, 1983).

Nestes solos, a existência de um incremento de argila em profundidade, corrobora tais afirmações. A estrutura em blocos subangulares e angulares, encontrada principalmente nos horizontes subsuperficiais, contribui com a qualidade e quantidade dos poros, em menor quantidade nos horizontes mais argilosos; enquanto nos horizontes mais superficiais, de textura mais arenosa e estrutura granular de tamanho pequena a média, a porosidade do solo foi maior.

A descrição no campo (Anexo A) e as análises físicas (Tabela 3.3, Anexos B; C) mostraram incremento da fração argila em profundidade e diminuição da areia em todos os perfis. Nos horizontes com predominância da fração areia, foi observado maior macroporosidade, enquanto em horizontes mais argilosos houve predominância de microporos, isto ocorre devido seu pequeno tamanho, à grande área superficial específica natural e suas cargas, que proporcionam maior porosidade total.

Outro aspecto relevante dos dados de porosidade é que na floresta, a diminuição dos poros se revela significativamente diferente a partir do horizonte Bt2. Por exemplo, no perfil 1, a média de área de poros passa de 20,49% a 6,83% entre o horizonte Bt1 e Bt2. Na pastagem, nos perfis 2 e 3, a diminuição da porosidade do solo ocorre mais em superfície, no horizonte BA. Em P2, a área de poros modifica de 20,13% a 14,76% entre o horizonte A/AB e BA.

Essa observação não quer dizer que a porosidade do solo é mais alta na floresta, mas que a porosidade diminui mais abruptamente entre o horizonte superficial e subsuperficial. O fato de as raízes das árvores em floresta conseguirem aprofundar mais no perfil, mantendo certa porosidade do solo até o horizonte Bt2, pode explicar essa observação. Ressalta-se

também que os valores de porosidade do solo nos horizontes superficiais entre a floresta e pastagem não apresentam grandes diferenças (Figura 3.5). Por exemplo, nos perfis à jusante sob floresta e pastagem, a porosidade total do solo é de 20,74 e 23,76%, respectivamente. Esse resultado é contraditório com uma boa parte da literatura que mostra que a macro e mesoporosidade do solo é mais alta em floresta nativa, em superfície e em profundidade, em comparação com pastagem ou com qualquer outra cultura (DESJARDINS et al., 2000; BERTOL et al., 2004; GIAROLA et al., 2007; PORTUGUAL et al., 2008; CARDOSO et al., 2011; SEVERIANO et al., 2011; RESENDE et al., 2012). Porém, essas publicações ocorrem em várias regiões do Brasil e com manejo geralmente intensivo da pastagem, casos diferentes da área de pastagem analisada, que está em pousio por aproximadamente 6 anos.

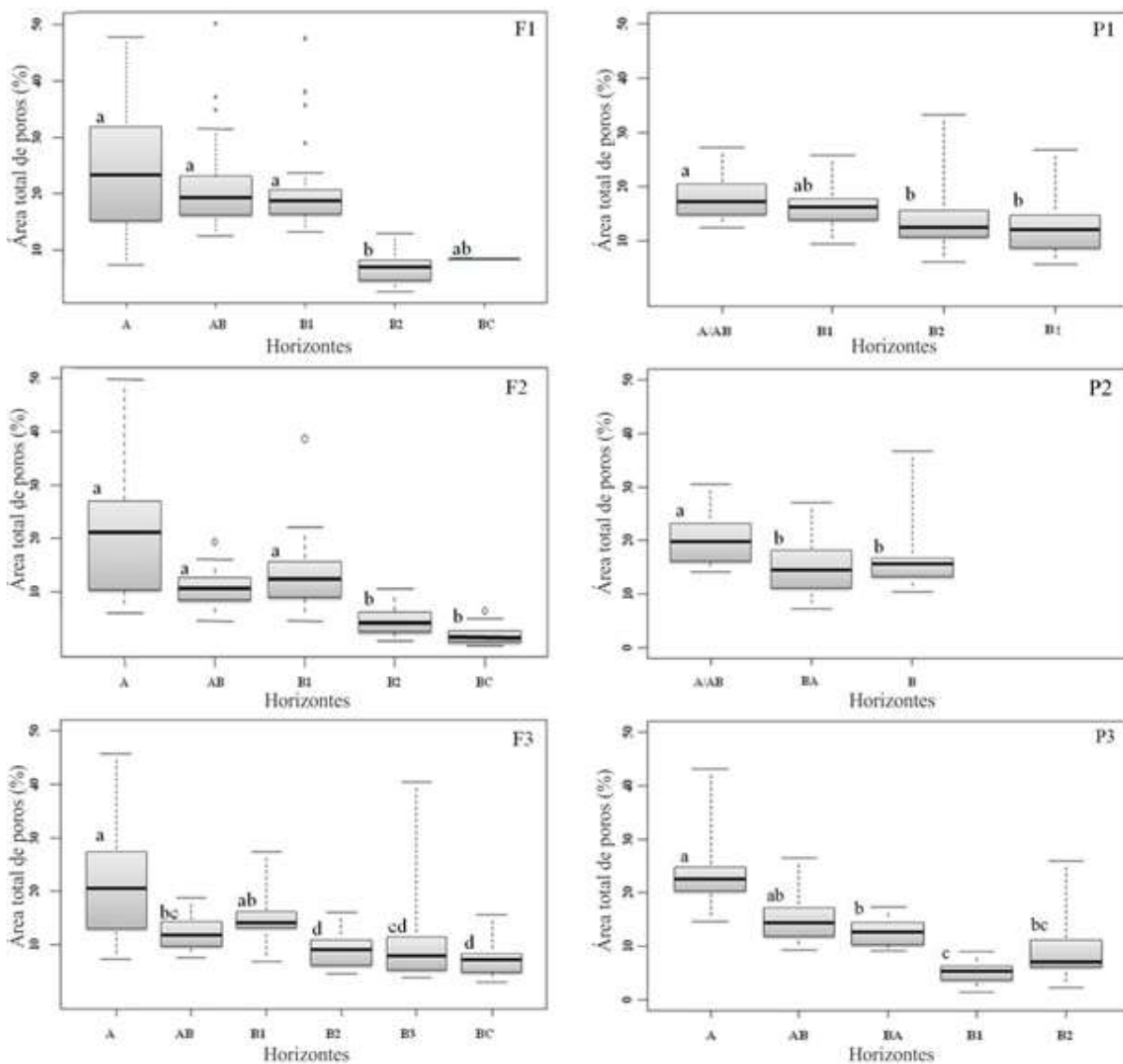


Figura 3. 5 - Boxplot de macro e mesoporosidade do solo nos horizontes dos diferentes perfis sob floresta e pastagem. Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, quanto os horizontes, a 5% de probabilidade pelo teste (*Kruskal-Wallis*)

### 3.3.2.2 Tamanho e formato dos poros

As Figuras 3.6, 3.7, 3.8 ilustram a distribuição relativa dos tipos (arredondados, alongados e complexos) e tamanhos (pequenos, médios e grandes) dos poros dos horizontes superficiais de cada perfil analisado sob os dois tipos de uso do solo. A porosidade do solo nos horizontes superficiais, sob floresta e pastagem, foi dominada por poros do tipo complexo.

Sob floresta, no perfil F1, os horizontes A, AB e Bt1, apresentaram porosidade complexa entre 10 a 20% de porosidade complexa da área total de poros analisada. No horizonte Bt2, em F1, os poros complexos, diminuem de maneira abrupta, devido ao aumento de argila, e à mudança de estrutura granular para blocos subangulares e angulares, que deu lugar a uma porosidade do solo arredondada pequena, média e grande. Comportamento semelhante ocorreu nos horizontes Bt2 e BC em F2. O perfil F3, apresentou a menor porosidade complexa em todo o perfil, sendo que a superfície foi onde houve a maior ocorrência de porosidade complexa.

Em pastagem, no perfil P1, os poros complexos ainda representam a metade ou quase a metade da porosidade total. A outra metade é dividida entre os poros arredondados e alongados, com predominância dos arredondados. A porosidade complexa foi maior também em superfície, com 18,18% da área total de poros analisada. No perfil P2, em BA, a porosidade arredondada foi mais expressiva que a porosidade complexa. O mesmo ocorreu no terceiro perfil, P3, onde a porosidade arredondada, nos perfis mais profundos apresentou relevante importância. Os solos sob pastagem apresentaram diminuição amena dos poros complexos e aumento dos poros arredondados pequenos, em relação à floresta. De maneira geral, existe menor proporção de porosidade do solo complexa nos horizontes superficiais da pastagem em comparação com a floresta, mas sempre os poros complexos representam entre 5 e 10 % da porosidade total, seja no horizonte superficial ou subsuperficial.

Nos dois tipos de uso do solo, a dominância de poros complexos no horizonte A, juntamente a uma estrutura granular e consistência friável, indicam maior aeração, podendo ser sinal de boa condução e retenção de água mais restritiva. A distribuição dos tipos de poros arredondados que predominam a partir dos horizontes Bt1 e Bt2 em floresta e pastagem, associados à estrutura em blocos e de consistência mais firme, indicam maior coesão entre as partículas de solo e pode mostrar boa retenção da água, corroborando com os resultados de Cooper e Vidal-Torrado (2005) e Cooper et al. (2012).



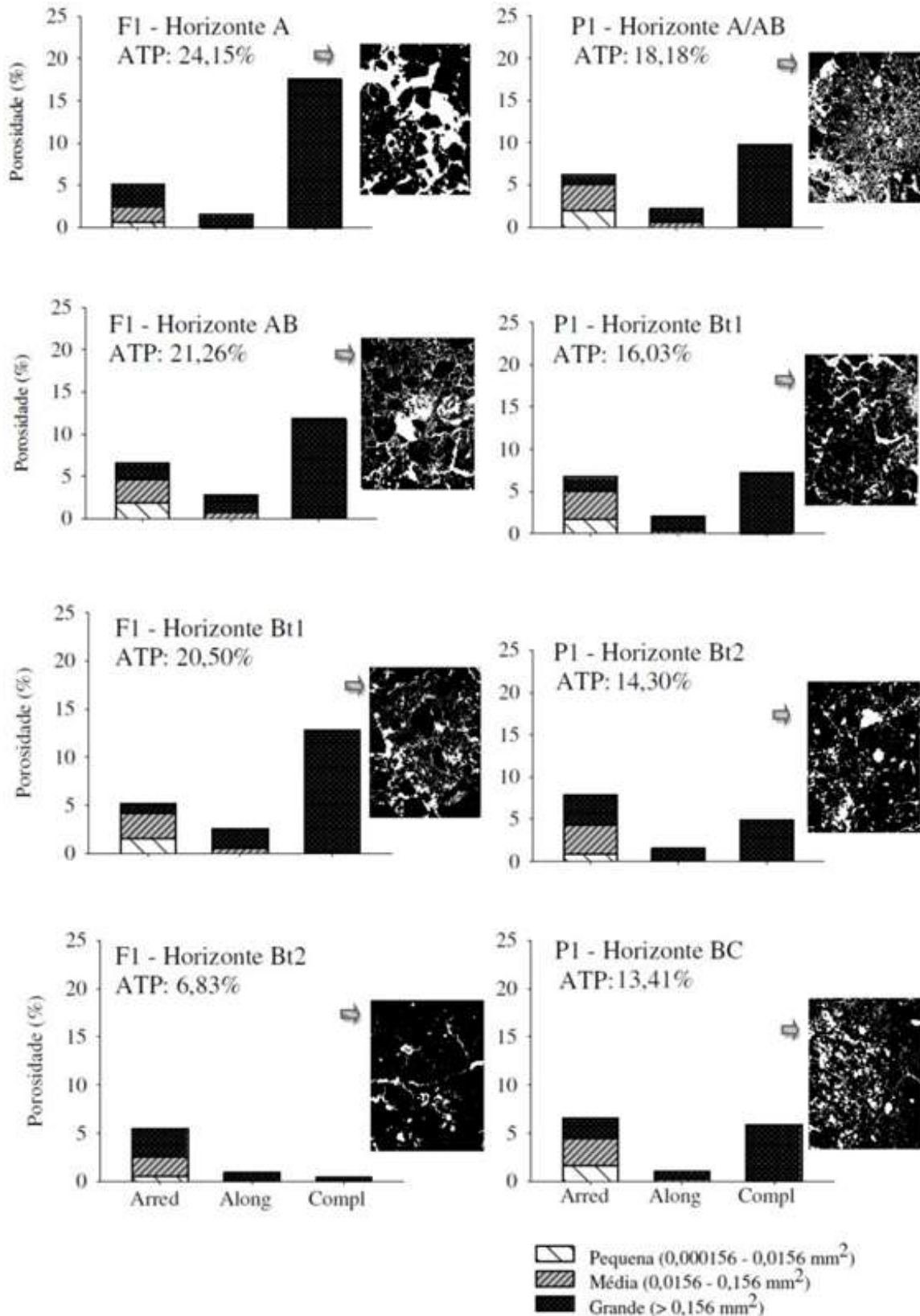


Figura 3. 6 - Distribuição da porosidade do solo total (ATP), segundo a forma e o tamanho dos poróides de cada horizonte dos perfis F1 (Floresta) e P1 (Pastagem), e imagens binárias correspondentes (os poróides aparecem em branco e a fase sólida em preto). Arred = arredondados, Along = alongados, Compl = complexos

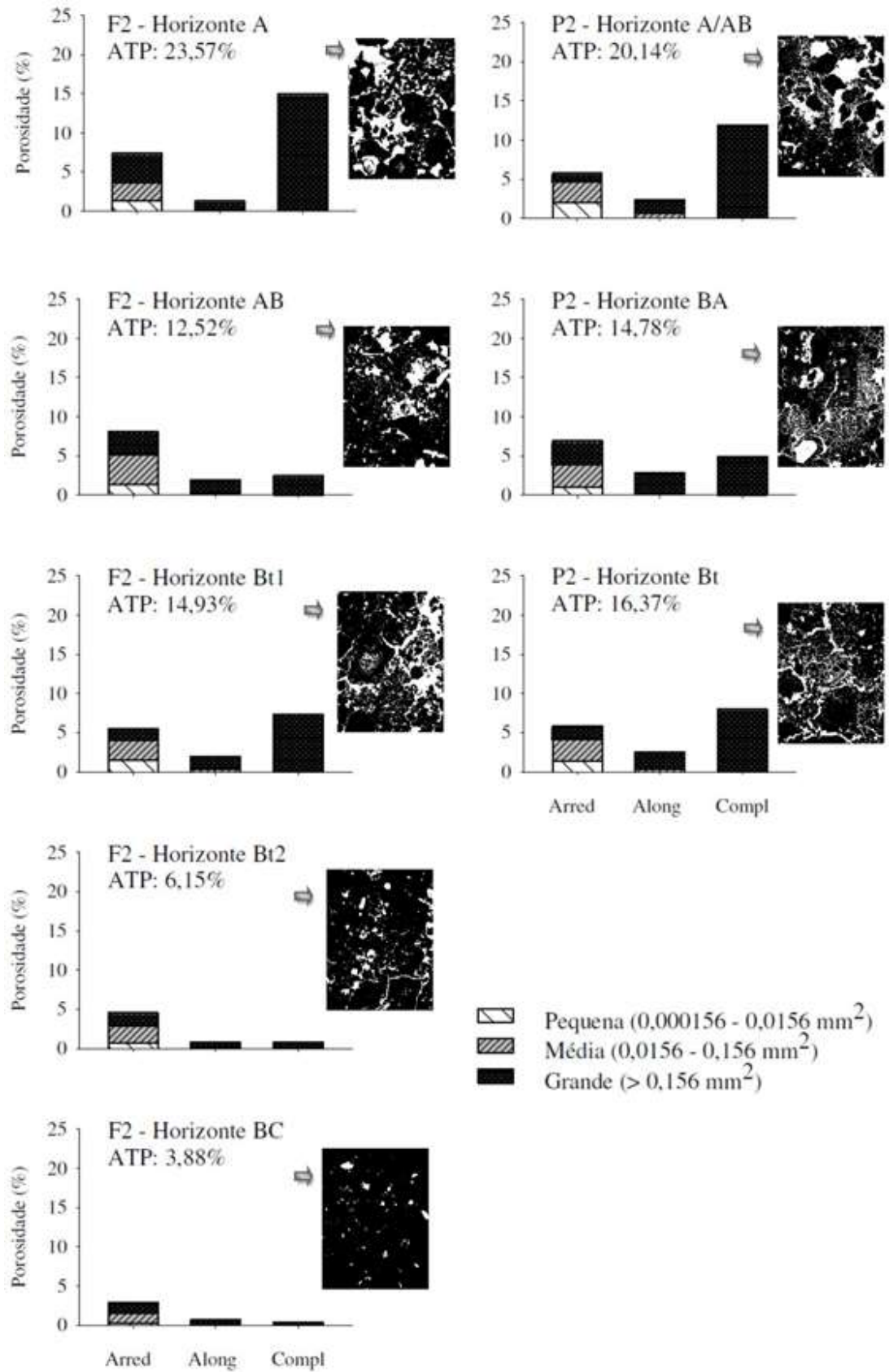


Figura 3. 7 - Distribuição da porosidade do solo total (ATP), segundo a forma e o tamanho dos poróides de cada horizonte dos perfis F2 (Floresta) e P2 (Pastagem), e imagens binárias correspondentes (os poróides aparecem em branco e a fase sólida em preto). Arred = arredondados, Along = alongados, Compl = complexos

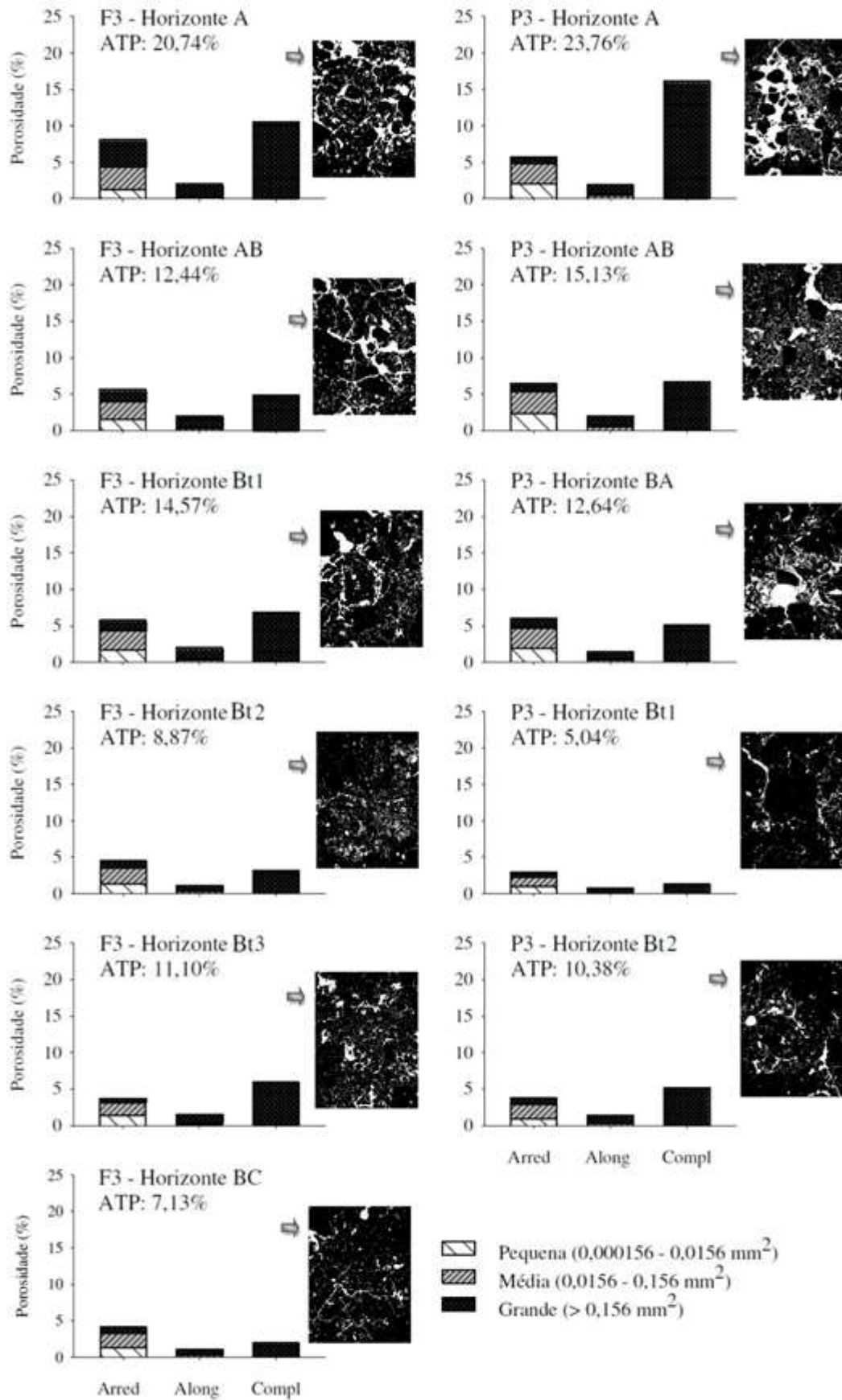


Figura 3. 8 - Distribuição da porosidade do solo total (ATP), segundo a forma e o tamanho dos poróides de cada horizonte dos perfis F3 (Floresta) e P3 (Pastagem), e imagens binárias correspondentes (os poróides aparecem em branco e a fase sólida em preto). Arred = arredondados, Along = alongados, Compl = complexos

### 3.3.3 Dinâmica físico-hídrica dos solos estudados

As relações existentes entre a estrutura do solo e o comportamento hídrico do horizonte são importantes a fim de conhecer a organização do solo, para isto a determinação pela micromorfometria do solo, condutividade hidráulica e curva de retenção, são ferramentas úteis que contribuem para posse deste conhecimento.

#### 3.3.3.1 Condutividade hidráulica de alguns horizontes

O infiltrômetro a sucção controlada permite separar o fluxo de água nos diferentes poros (biológicos e entre os agregados) na matriz do solo (PERROUX; WHITE, 1988). Este método também tem sido usado para o estudo da variabilidade espacial das propriedades de infiltração (MATHIEU; PIELTAIN, 1998). Este método, *in situ*, requer um mínimo de perturbação do solo, é relativamente rápido e opera efetivamente nos potenciais matriciais dos poros, próximo de zero, ou na faixa dos macroporos (-15 cm < P < 0 cm de água; WATSON; LUXMORE, 1986). Nesta faixa os macroporos do solo são considerados hidraulicamente ativos e importantes para a transmissão de água e solutos (STONE; GUIMARÃES; MOREIRA, 2002).

Se consideramos que o espaço poroso se assemelha a uma rede de tubos capilares, pode-se estabelecer uma relação entre o valor do potencial da água do solo e o valor máximo  $r$  do raio dos poros ocupados pela água. Desta forma, temos eq. (7)

$$r = -\frac{2\sigma \cos \alpha}{\rho gh} \approx -\frac{0,1482}{h} \quad (7)$$

sendo  $\sigma$ : a tensão superficial entre a água e o ar [MT<sup>-2</sup>],  $\alpha$ : o ângulo de contato entre a água e a parede do poro,  $\rho$ : a densidade da água [ML<sup>-3</sup>],  $g$ : a aceleração devido à gravidade [ML<sup>-2</sup>],  $h$ : a pressão de água (cm H<sub>2</sub>O) e  $r$  o raio equivalente do poro (em cm).

Assim, aplicando esta equação aos potenciais de -1, -3,5 e -10 cm H<sub>2</sub>O, exclui-se do processo de infiltração os poros de raios equivalentes superiores a 1,5, 0,4 e 0,15 mm, respectivamente (COOPER, 1999).

As quatro curvas de condutividade hidráulica (Ks) determinadas por perfil sob floresta e pastagem estão representadas na Figura 3.10.

O conjunto dos valores de condutividade hidráulica, em ambos os tipos de uso do solo mostram que a dispersão das medidas não foi grande. Em geral, a superfície e subsuperfície apresentaram maiores variações, isto se deve à contribuição dos macro e mesoporos concentrados, em sua maioria, nesta camada. A macro e a mesoporosidade do solo têm geralmente uma origem estrutural e, ou, biológica e estão sujeitas a uma forte heterogeneidade espacial, isto pode explicar a dispersão observada na determinação da condutividade hidráulica (COOPER; VIDAL-TORRADO, 2005). Neste caso, vale ressaltar a contribuição da textura arenosa e estrutura granular, que foi de grande importância para maior condutividade hidráulica nestes horizontes mais superficiais.

Existe na toposequência sob floresta, maior dispersão das medidas de montante à jusante. Os horizontes superficiais, como já citados, foram importantes para a condutividade, principalmente nos potenciais -0,5 e -1,5 cm.H<sub>2</sub>O, onde as variações observadas são maiores. Estes potenciais referem-se à condutividade hidráulica próxima à saturação e à condutividade através de poros de até 1,5 mm de diâmetro, que é a macroporosidade. Em F1, os horizontes de maior condutividade hidráulica foram os mais superficiais e o mais profundo. O horizonte BC, o mais argiloso do perfil, ofereceu maior resistência à infiltração e condutividade da água no solo.

Em geral, os horizontes mais argilosos apresentam maior adensamento, como mostrado pela análise micromorfométrica, que contribui à menor condutividade nestes horizontes. Em F2, o horizonte a 0,40 m, com maior porosidade total do perfil, 0,47 m m<sup>-1</sup> (Tabela 3.3), mostrou maior K<sub>s</sub>, sendo que desta porosidade do solo, 0,25 m m<sup>-1</sup>, deve-se aos macroporos, esta porosidade refere-se à textura, sem elevados teores de areia, e também à estrutura granular e blocos subangulares pequenos. O perfil F3, por estar mais próximo do curso d'água, sofre variações do lençol freático que refletem em diferentes condições estruturais, e refletem variabilidade na porosidade do solo, confirmado pela micromorfometria. O horizonte superficial apresentou baixa condutividade, que pode ter sido devido a alguma alteração durante o transporte dos blocos, pois as demais análises realizadas não sustentam esse resultado.

A condutividade hidráulica sob pastagem, em superfície, à montante e na parte intermediária, foram maiores que nos perfis subjacentes, devido à matéria orgânica proveniente das raízes superficiais das gramíneas, à influência textural de maior diâmetro, e à contribuição da estrutura granular.

A pastagem apresentou maior quantidade de liteira grossa e fina em superfície, devido a existência de grandes touceiras de gramíneas na área em pousio, há

aproximadamente 6 anos. As demais camadas, também mostraram a importância da macroporosidade do solo, influenciada ainda pela textura mais arenosa. As variações da classe de macroporos são maiores e estão relacionadas às variações encontradas nas condutividades hidráulicas determinados nos potenciais de -0,5 e -1,5 cm.H<sub>2</sub>O. A forma dos poros, em sua maioria complexa grande no perfil (Figura 3.6, 3.7, 3.8), também influenciou na condutividade determinada nestes potenciais. Devido isto, a condução de água neste perfil foi maior.

No perfil P2, a superfície, em acordo ao que foi explicado acima, teve influência do teor de matéria orgânica, bem como da textura arenosa. Os demais horizontes, apresentaram menor condução de água no perfil, relacionado à estrutura mais adensada. No perfil P3, à jusante, no horizonte superficial, pode ter ocorrido o mesmo problema que no perfil sob floresta, em relação ao transporte da amostra, visto que as demais análises não sustentam o resultado de condutividade hidráulica praticamente nula, em superfície. Os horizontes subsuperficiais apresentaram condições de condutividade semelhantes, sendo que aos 0,90 m, a condução de água foi um pouco maior (Figura 3.9). Este fato pode estar relacionado a alguma alteração no perfil, devido o contato com a umidade proveniente da oscilação do lençol freático.

De forma geral, a condutividade também mostrou uma tendência próxima à divisão dos compartimentos da análise estrutural. Os compartimentos 1 e 2, em maior contato com a matéria orgânica, e de textura mais arenosa, tiveram maior macroporosidade do solo, conseqüentemente, maior condutividade hidráulica. Os compartimentos 3 e 4, apresentam menores conduções de água na matriz mais argilosa, constituindo quase uma barreira de impedimento à livre circulação da água; enquanto, o compartimento 5, 6 e 7, de matriz por vezes, argilosas e às vezes mais arenosa, apresenta comportamentos variados, de maior ou menor condutividade hidráulica, relacionado às diferenças granulométricas do material de origem, que também contribuiu com a diferenciação de cores apresentadas nestas camadas mais profundas.



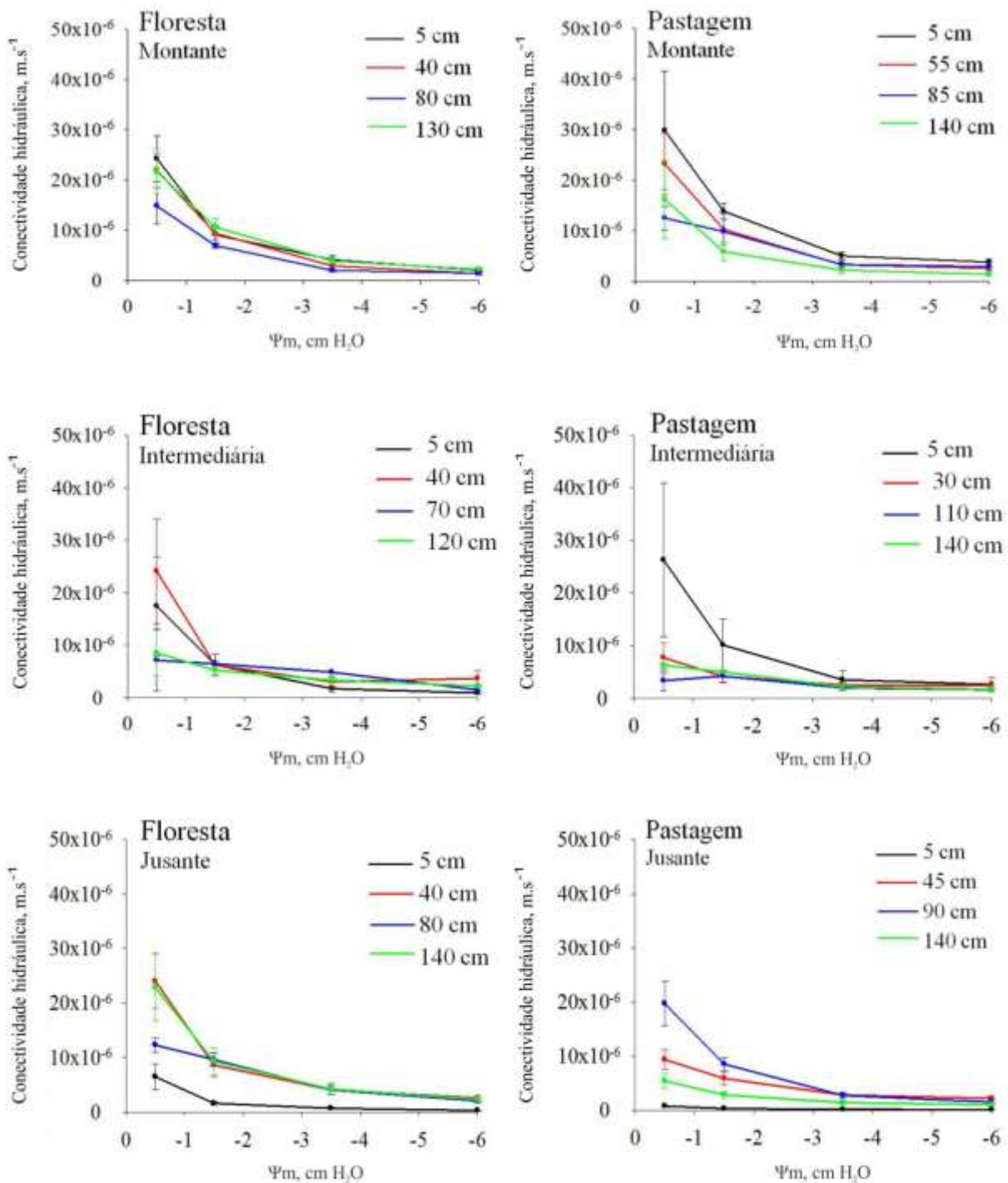


Figura 3.9 - Condutividade hidráulica da água em solos sob floresta e pastagem

### 3.3.3.2 Curva característica de retenção de água no solo

Os resultados referentes às curvas de retenção de água no solo estão apresentados na Figura 3.10. As maiores diferenças na forma das curvas entre os horizontes são encontradas no horizonte superficial nos dois usos do solo. Nos horizontes superficiais, as curvas de

retenção apresentaram inclinações em relação ao eixo do potencial mátrico um pouco maiores que os horizontes subsuperficiais. Esse comportamento se deve ao fato de que por ser um horizonte mais arenoso, e com estrutura granular, apresenta uma condição de drenagem mais rápida que os demais horizontes, como encontrado por Juhász et al. (2007).

Os perfis sob floresta F1, F2 e F3 apresenta comportamentos diferenciados, um diz respeito à superfície, comentado anteriormente, outro refere-se à subsuperfície, até aproximadamente os 0,45 m, correspondente aos horizontes AB, BA, Bt1 ou Bt2, semelhantes entre eles, com um gradiente de umidade gravimétrica médio a baixo entre os potenciais baixos e altos. Esse gradiente menos pronunciado é devido a porosidade estrutural menos desenvolvida, enquanto a porosidade textural é mais desenvolvida. Estando estes horizontes também com umidades semelhantes desde a saturação até o ponto de 500 kPa. Outro grupo é dos horizontes mais profundos. Estes apresentam formas semelhantes ao grupo da subsuperfície, porém a umidade à saturação e umidade final, às vezes, são diferentes.

No perfil F1, a faixa de umidade à saturação foi entre 0,3 e 0,4 kg kg<sup>-1</sup>, faixa de umidade de onde saiu a maioria das curvas medidas, com exceção do último horizonte (0,99 a 1,63 m) que começou em valor de saturação baixo e não apresentou muita variação de umidade com o aumento das pressões. Provavelmente isso ocorre devido uma matriz de solo mais densa, com baixa porosidade do solo, 0,28 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>, como demonstrado na Tabela 3.3. Em oposição, o horizonte superior a este (0,62 a 0,99 m), apresentou maior porosidade total do solo, 0,50 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>, e grande parte deve-se à microporosidade (0,37 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>), o que manteve o solo com maior umidade em todos os potenciais aplicados (Figura 3.10).

No perfil F2, nota-se um gradiente de umidade gravimétrica maior no horizonte Bt2, em relação aos demais horizontes, isso se deve ao incremento de argila que ocorre a partir desta camada, e também à elevada porosidade total com participação da microporosidade do solo em sua maioria. O que leva à concluir que os demais horizontes em profundidade, mesmo argilosos, possuem porosidade estrutural diferenciada, provavelmente relacionada à diferença de estrutura em blocos subangulares, angulares e às vezes, prismática.

Finalmente, o perfil F3, apresentou gradiente de umidade gravimétrica baixo em todos os potenciais aplicados. O comportamento dos horizontes se assemelharam, sendo que os horizontes subsuperficiais, apontam baixa porosidade estrutural do solo, enquanto os horizontes mais profundos, e mais argilosos, permanecem com características estruturais mais próximas.

As curvas de retenção de água sob pastagem, apresentaram comportamentos semelhantes à floresta. Os horizontes superficiais em P1 e P3 apresentaram inclinações em



relação ao eixo do potencial mátrico um pouco maior que os horizontes subsuperficiais, principalmente em P1, podendo ser devido à presença da areia, ao maior teor de matéria orgânica, e ainda à estrutura granular.

Os horizontes subsuperficiais estiveram com gradientes de umidade e formas de curva sempre próximos, que afirma a semelhança da estrutura existente entre as camadas. Os horizontes mais profundos mostraram diferentes gradientes de umidade, que indicam maior diferença de estrutura nas camadas de profundidade superior a 0,80 m. Em P1, a superfície apresentou comportamento diferente dos outros horizontes, com menor retenção. Enquanto os demais, apresentaram maior retenção. O segundo perfil em pastagem, apresentou, maior retenção em superfície que à montante, e uma diferença importante nos gradientes de umidades mais superficiais e os mais profundos (Figura 3.10). O perfil P3, apresentou entre 0,37 a 0,66 m elevada densidade, o que conferiu à curva o menor gradiente de umidade gravimétrica do perfil. As curvas em profundidade (de 0,76 a 1,33 m), foram muito próximas, provavelmente devido ao elevado teor de argila, e à estrutura semelhante que contribuiu com a baixa porosidade total nos horizontes (Tabela 3.3).

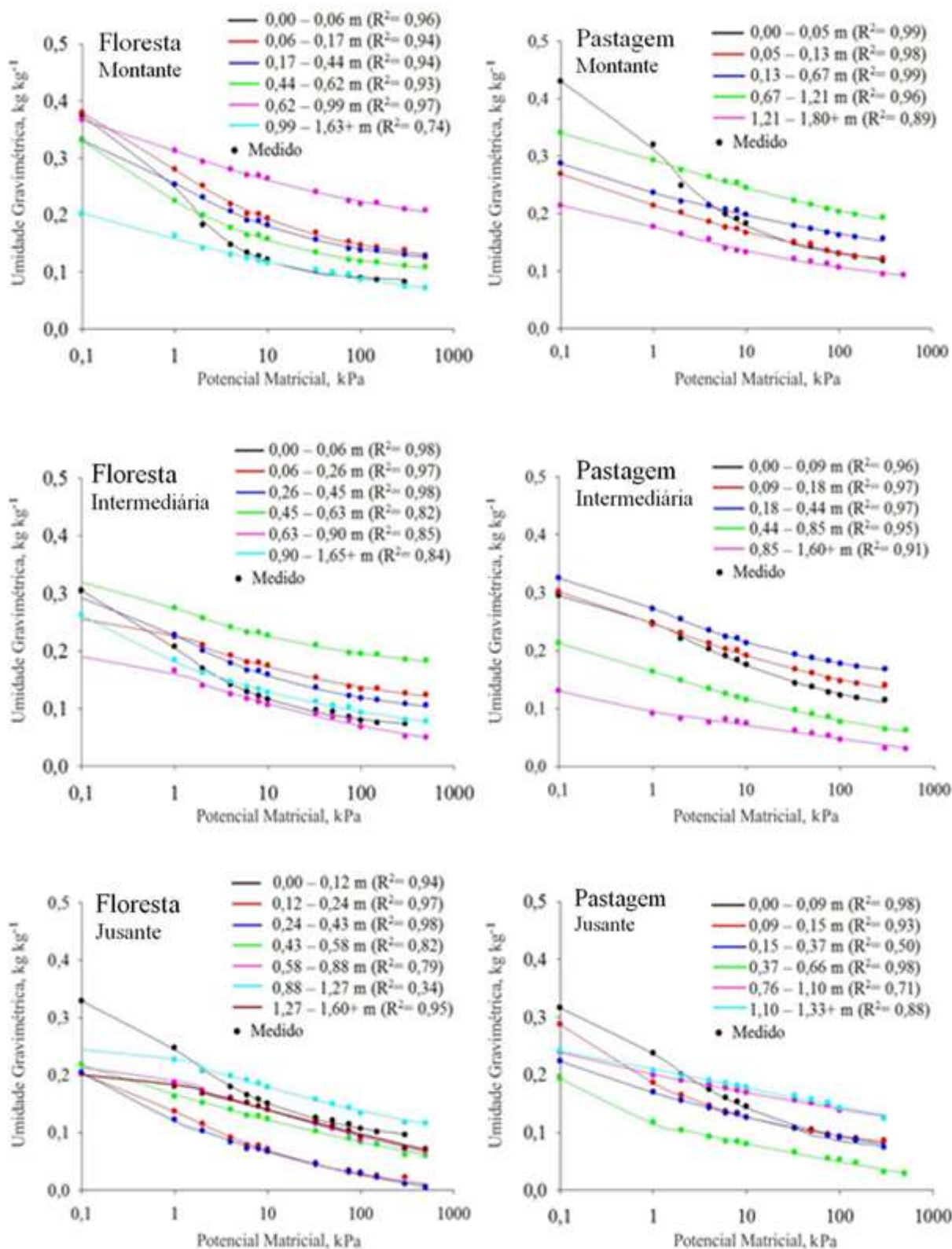


Figura 3.10 - Curvas de retenção de água no solo sob floresta e pastagem

Em análise às semelhanças e diferenças discutidas acima, é possível relacionar as curvas aos compartimentos definidos pela análise estrutural. O compartimento 1, em superfície apresentou formas de curvas mais diferenciadas das demais, estando relacionada à

textura mais arenosa, à estrutura granular e à matéria orgânica que confere aos solos maior porosidade do solo, e desta porosidade, a maior participação é de macroporos. Os compartimentos 2 e 3, tanto em formato da curva, como em gradiente de umidade gravimétrica, foram próximos. Apresentaram porosidade do solo menor que a superfície e com comportamento semelhante. A transição de textura destes solos, de arenosa à franco-arenosa para mais argilosa, fez com que a porosidade textural fosse importante no comportamento hídrico destes horizontes. A variação das curvas em profundidade são menores, e estão relacionadas ao aumento da porosidade arredondada, que tendem a ser isoladas; enquanto que nos horizontes superficiais, mais arenosos e granulares, por possuírem poros maiores e maior conectividade entre os poros, e quando submetidos a uma pressão são esvaziados rapidamente.

Os horizontes mais argilosos em profundidade, compartimento 4, apresentaram diferentes gradientes de umidade. Isso pode ser devido à diferenciação de estrutura do próprio horizonte mais argiloso. Este compartimento apresenta porosidade do solo com maior participação de microporos, e retém maior umidade. Os compartimentos 5, 6 e 7 que contém o material em alteração, contribuiu para que as curvas tivessem comportamentos diferenciados. Às vezes apresentavam comportamentos de maior retenção de água, quando os solos possuíam textura argilosa, e quando menos argilosos, as curvas eram diferentes, ou seja, esses horizontes não foram caracterizados por somente um tipo de curva.

Pequenas oscilações nos perfis, na curva no potencial de 6 kPa, mostra a importância da mudança do tamanho da porosidade para a retenção da umidade do solo. Os dados micromorfométricos mostraram a importância da macro e mesoporosidade do solo, relacionadas ao potencial de 1 a 6 kPa, sendo ilustrativas e fiéis ao que ocorreu nos solos. A porosidade complexa existente, esteve relacionada à estrutura granular, textura arenosa e ao teor de matéria orgânica maior em superfície. Com a redução da porosidade complexa do solo, relacionada ao aumento de argila em profundidade no perfil, e redução do teor de matéria orgânica, houve a mudança da estrutura granular, para blocos subangulares e angulares; a porosidade complexa deu lugar à uma porosidade do solo arredondada que variou de pequena a grande. Esses resultados corroboram com os encontrados por Carducci et al. (2011).

Quanto ao ajuste realizado pelo RETC, através da equação de van Genuchten (1980), os valores obtidos de  $R^2$  nos perfis sob floresta, foram superiores a 90%, nos horizontes superficiais e até os primeiros 0,40 m de profundidade (Anexo H). Abaixo desta profundidade, os ajustes foram mais baixos, quanto mais se aprofundava no perfil. Isto mostra

que o ajuste foi satisfatório somente para as camadas mais superficiais. Sob pastagem, os ajustes foram satisfatórios para a maioria dos horizontes nos três perfis, porém tiveram horizontes com baixos valores de  $R^2$ , assim como em floresta. Nestes casos, o ajuste pela equação de van Genuchten (1980) não foi o mais indicado. Juntamente a estes ajustes, o parâmetro  $\alpha$  que é relacionado aos à textura argilosa, foram bem variáveis nos dois tipos de uso do solo, mostrando valores mais elevados nos horizontes profundos, que nos superficiais. O parâmetro  $n$ , também responsável pela forma da curva, apresenta valores mais elevados em superfície, correspondendo à maior macroporosidade do solo.

O teor de água na saturação,  $\theta_s$ , ajustado pelo RETC, apresentou valores próximos ao  $\theta_s$  medido, que em geral fazem correspondência à porosidade total do solo. Porém, às vezes isso não é possível devido o ar que fica aprisionado no solo (RAMOS et al., 2009). Quanto ao  $\theta_r$ , que em geral é o mais difícil de estimar, apresentou valores variados, próximo de zero, e às vezes mais altos.

### 3.4 Conclusões

Os solos estudados apresentaram diferenciações mais importantes entre horizontes, do que entre os tipos de uso do solo. A análise micromorfológica mostrou as maiores diferenças entre a superfície arenosa, com material orgânico, e os horizontes profundos e mais argilosos. Os perfis à jusante, mostraram importantes diferenças na porosidade do solo em todo o perfil, podendo estar relacionado com a oscilação do lençol freático.

As análises físico-hídricas apontaram maior condutividade hidráulica em superfície sob pastagem, devido ao aporte de material vegetal das gramíneas, na área em pousio. Os horizontes argilosos, presentes a partir dos 0,40 m apresentaram maior retenção de água, e menor condutividade hidráulica em toda topossequência, em oposição aos horizontes de textura franco a arenosa, que apresentaram maior macroporosidade e menor retenção de água nos horizontes superficiais.

O compartimento 1, com maior porosidade do solo, estrutura granular e concentração de matéria orgânica, obteve as menores densidade do solo, retenção de água, e aumento da condutividade hidráulica. Comportamento oposto a este foi encontrado nos compartimentos 2, 3 e 4. O compartimento 2, mostrou comportamento variado, devido à variação de textura. Os compartimentos 3 e 4, com estrutura em blocos subangulares e angulares, apresentaram menor porosidade complexa e maior porosidade arredondada que a superfície, juntamente à maior densidade do solo, maior retenção de água, e menor condutividade hidráulica. Os

compartimentos 5, 6 e 7, não apresentaram comportamentos semelhantes, devido ao material em alteração e o contato direto com o lençol freático.

A dinâmica dos solos estudados, está relacionada a seus atributos intrínsecos. A textura é de primordial importância para tal comportamento sob os dois tipos de uso do solo. Neste caso, o manejo do estabelecimento agrícola, nada intensivo nos últimos anos, não tem tido muita influência sobre os solos.

## Referências

- ANDRADE, A.P.; MAFRA, A.L.; BALDO, G.R.; PICCOLLA, C.D.P.; BERTOL, I. e ALBUQUERQUE, J.A. Physical properties of a humic cambisol under tillage and cropping systems after 12 years. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 219-226, 2010.
- ANKENY, M.D.; AHMED, M.; KASPAR, T.C.; HORTON, R. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 467-470, 1991.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JR., W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 155-163, 2004.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 829-834, 2002.
- BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos, 1983. 286 p.
- BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Wolverhampton: Waine Research Publications, 1985. 153 p.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 2009. 77 p. (Boletim Técnico, 106).
- CARDOSO, E.L.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; FREITAS, D.A.F. Qualidade química e física do solo sob vegetação nativa e pastagens na Pantanal Sul-Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 613-622, 2011.
- CARDUCCI, C. E. et al. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 77-86, 2011.

CASTRO, S.S.; COOPER, M.; SANTOS, M.C.; VIDAL TORRADO, P. Micromorfologia do solo: bases e aplicações. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3, p. 107-164.

COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e B textural sobre diabásio**. 1999. 130p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 581-595, 2005.

COOPER, M.; ROSA, D.J.; MEDEIROS, J.C.; OLIVEIRA, T.C. de; TOMA, R.S.; JUHÁSZ, C.E.D. Hydro-physical characterization of soils under tropical semi-deciduous forest. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 69, n. 2, p. 152-159, Mar./Apr. 2012.

COOPER, M.; MEDEIROS, J.C.; ROSA, D.J.; SORIA, J.E. Soil functioning in a topequence under rainforest in São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 2, p. 392-399, 2013.

COOPERATIVA DE PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS. **Plano de recuperação do Projeto de Assentamento Agroextrativista Praia Alta Piranheira**. Marabá, 2009. 179 p.

DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. Pressure plate extractor. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: SSSA, 2002. p. 688-690.

DECAGON DEVICE. **Mini disk infiltrometer: user's manual version 10**. Disponível em: <<http://www.decagon.com/education/minidisk-infiltrometer-manual/>>. Acesso: 10 mar. 2012.

DESJARDINS, T.; LAVELLE, P.; BARROS, E.; BROSSARD, M.; CHAPUIS-LARDY, L.; CHAUVEL, A.; GRIMALDI, M.; GUIMARÃES, F.; MARTINS, P.; MITJA, D.; MÜLLER, M.; SARRAZIN, M.; TAVARES, F. e TOPALL, O. Dégradation des pâturages amazoniens-Description d'un syndrome et de ses déterminants. **Études et Gestion de Sols**, Orléans, v. 7, n. 4, p. 353-378, 2000. Numéro special.

DIAS, C.O. **Determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados**. 2012. 227 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. – Brasília/DF: EMBRAPA, 2013.

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

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox, potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.

- GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DICK, W.A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: SSSA, 2002. p. 201-228.
- JONG van LIER, Q.; LIBARDI, P.L. Extraction of soil water by plants: development and validation of a model. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 535-542, 1997.
- JUHÁSZ, C.E.P.; COOPER, M.; CURSI, P.R.; KETZER, A.O.; TOMA, R.S. Savanna woodland soil micromorphology related to water retention. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 4, p. 344-354, 2007.
- MACHADO, J.L.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C.A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 495-502, 2008.
- MATHIEU, C.; PIELTAIN, F. **Analyse physique des sols: méthodes choisies**. Paris: Lavoisier Tec & Doc., 1998. 275 p.
- MCGILL, R.; TUKEY, J.W.; LARSEN, W.A. Variations of box plots. **The American Statistician**, Alexandria, v. 32, p. 12-16, 1978.
- MORAN, C.J.; KOPPI, A.J.; MURPHY, B.W.; McBRATNEY, A.B. Comparison of the macropore structure of a sandy loam surface soil horizon subjected to two tillage treatments. **Soil and Use Management**, Wallingford, v. 4, n. 3, p. 96-102, 1988.
- MUALEM, Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils, predictions and formulas. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: ASA, 1986. v. 9, chap. 31, p. 799–823.
- MURPHY, C.P. **Thin section preparation of soils and sediments**. Berkhamsted: A.B. Academic Publ., 1986. 149 p.
- MURPHY, C.P.; BULLOCK, P.; TURNER, R.H. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis: Part I: Principles and techniques. **Soil Science**, Baltimore, v. 28, p. 498-508, 1977.
- PERROUX, K.M.; WHITE, I. Design for disk permeameters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 1205-1215, 1988.
- PORTUGUAL, A.F.; COSTA, O.D.A.; COSTA, L.M.; SANTOS, B.C.M. Atributos químicos e físicos de um Cambissolos haplicos Tb distrófico sob diferentes usos na zona da mata mineira, Seção V Gênese morfologia e classificação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 249-258, 2008.
- R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2012. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 12 fev. 2012.

- RAMOS, T.B.; GONÇALVES; JACINTO, G. MARTINS; PIRES, F.P. Avaliação das propriedades hidráulicas do solo por modelagem inversa através dos dados obtidos pelo infiltrômetro de tensão e por métodos laboratoriais. *Revista de Ciências Agrárias*, Lisboa, v. 32, n.1, p. 384-396, 2009.
- RESENDE, T.M.; MOARES, E.R; FRANCO, F.O.; ARRUDA, E.M.; ARAUJO, J.R; SANTOS, D.D.; BORGES, E.N.; RIBEIRO, B.T. Evaluation of physical soil under different uses in areas with added animal waste in the Cerrado. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, p. 179-184, 2012.
- REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110, p. 131-146, 2002.
- RINGROSE-VOASE, A.J. Micromorphology of soil structure: description, quantification, application. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 29, p. 777-813, 1991.
- SECRETARIA DE ESTADO DE PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E FINANÇAS – ESTADO DO PARÁ. **Portal Amazônia 06/02/2007**. Disponível em: <<http://portalamazonia.globo.com/pscript/amazoniadeaaz/artigoAZ.php>>. Acesso em: 19 nov. 2009.
- SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; SILVA, G.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the Cerrado Region: I- Relationship between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 773-782, 2011.
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, London, v. 52, p. 591-609, 1965.
- STONE, L.F.; GUIMARAES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.
- TOPP, G.C.; ZEBCHUK, W. The determination of soil-water desorption curves for soil cores **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v. 59, p. 19-26, 1979.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.
- van GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. Riverside: USDA, ARS, US Salinity Laboratory, 1991. 100 p.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.
- WATSON, K.W.; LUXMORE, R.J. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 578-582, 1986.



WOODING, R.A. Steady infiltration from a shallow circular pond. **Water Resources Research**, Washington, v. 4, p. 1259-1273, 1968.

XU, X.; NIEBER, J.L.; GUPTA, S.C. Compaction effects on the gas diffusion coefficients in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 6, p. 1743-1750, 1992.

## 4 CURVAS DE RETRAÇÃO EM SOLOS SOB FLORESTA E PASTAGEM NA AMAZÔNIA ORIENTAL

### Resumo

O estudo da variação volumétrica da estrutura do solo em função do teor de água existente permite conhecer as propriedades hidráulicas levando em consideração a configuração interna da interface solo-água, ou seja, as relações água-partículas da matriz do solo. Esta parte do trabalho descreve as características referentes à curva de retração do solo, que ocorre na variação de um solo saturado até sua secagem. Sendo a primeira vez que ocorre um estudo com esta abordagem em solos amazônicos, o objetivo deste trabalho foi o de caracterizar duas topossequências, uma sob floresta e outra sob pastagem, através da curva de retração. Para isto, foram utilizados os parâmetros da curva de retração do solo obtidos através das medidas realizadas em amostras indeformadas de solo. Os resultados indicaram que a matéria orgânica foi importante para a retração do solo em superfície, porém em menor intensidade, que o conteúdo de argila. Os horizontes argilosos em profundidades superiores a 0,40 m, apresentaram maiores retrações causada pela água básica, que é a água útil contida na microporosidade expansível, proveniente dos agregados primários do solo.

Palavras-chave: Curva de retração do solo; Textura do solo; Comportamento físico-hídrico do solo

### Abstract

The study of structural variation of the soil volume in function of the water content allows knowing the hydraulic properties, taking into account the internal configuration of the water-soil interface, namely, relations of water the soil matrix particles. This part of the paper describes the characteristics which refer to the soil curve retraction. It occurs in saturated soil variation until its drying. This is the first time that this type of study is done in amazonian soils. The objective of this paper was to characterize two topossequences, one under forest and other pasture, through the soil shrinkage curve. For this, the soil shrinkage curve parameters were used soil obtained through the measure performed in undisturbed samples of soil. The results indicated that the organic matter was important to the soil shrinkage in surface, however, in lower intensity than the clayey. The clayey horizons in depth of 0,40 m or more, indicated more soil shrinkage caused by basic water which is the useful water inside the swelling microporosity descendant from primary aggregates of the soil.

Keywords: Soil curve retraction; Soil texture; Behavior of soil physical and hydraulic

## 4.1 Introdução

A alteração da estrutura do solo é considerada um dos mais importantes problemas em degradação do solo e queda da produção agrícola. Devido isso, é essencial que a estrutura seja representada com modelos precisos para simular seu comportamento hidroestrutural (BRAUDEAU et al., 1999). O estudo da variação volumétrica da estrutura do solo em função do teor de água existente permite conhecer as propriedades hidráulicas levando em consideração a configuração interna da interface solo-água. Este estudo conduz a uma abordagem empírica de representar e estimar a dinâmica da água e propriedades do solo, tais como a retração, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível, capacidade de aeração, condutividade hidráulica não-saturada e retenção de água (BRAUDEAU; MOHTAR; CHAHINIAN, 2004).

Existem duas abordagens principais para modelar a água do solo nas propriedades físicas da matriz do solo, como explicado por Braudeau et al. (BRAUDEAU; FRANGI; MOHTAR, 2004). A primeira é o da estrutura do solo como um conjunto de tubos capilares entre e dentro de agregados rígidos, que formam somente um ou dois níveis de estrutura. A estrutura do solo é então caracterizada pela distribuição mono ou bimodal do volume de poros por classe de tamanho e diâmetro de poro equivalente (COPPOLA, 2000). A segunda abordagem considera a estrutura do solo como um arranjo de partículas em várias escalas: matriz argilosa, agregados primários e conjunto de agregados primários que constituem a fábrica do solo ao nível de horizontes (BREWER, 1964).

O primeiro método de abordagem é o mais velho e mais amplamente difundido. Muitas equações surgiram a partir dele, e inclui a bem conhecida expressão que relaciona o potencial de água no solo ao diâmetro de poros. Porém, esta abordagem restringe a realidade porque desconsidera as hierarquias da estrutura do solo e as propriedades específicas da interação matriz-água, tais como expansão e contração, rearranjo de partículas, e a presença da pressão da expansão (BRAUDEAU; FRANGI; MOHTAR, 2004).

A segunda abordagem reconhece tanto a hierarquia da estrutura do solo e a importância de cada componente para seu comportamento, bem como as propriedades de contração e expansão dos agregados. Seu uso tem sido limitado na modelagem das propriedades físicas do solo. Um principal obstáculo ao uso desta abordagem é um tipo de método experimental que caracterize as escalas de estrutura do solo e suas respectivas contribuições às propriedades hidráulicas do solo. Isto requer um método que conceitualmente

distinga e delimite os níveis agrupados de estrutura do solo bem como os separe a níveis físicos e funcionais. A partir disto, modelos foram criados na tentativa de considerar e quantificar a estrutura do solo e seus níveis hierárquicos, e precisar seu comportamento hidroestrutural.

#### **4.1.1 A Pedoestrutura**

O menor volume de solo onde se desenvolve as interações entre a água e estrutura do solo será definido aqui como “pedoestrutura”. A pedoestrutura, refere-se a integração da matriz do solo no seu aspecto morfológico e seu funcionamento hidráulico. A curva de retração do solo, que é a variação volumétrica da estrutura do solo ao perder água, expressa a organização e atividade da pedoestrutura (BREWER, 1964; BRAUDEAU; MOHTAR; CHAHINIAN, 2004). Todos esses conceitos serão abordados e aplicados neste capítulo.

##### **4.1.1.1 Os agregados primários e porosidade do solo**

Os agregados primários são os agregados mais simples, e não podem ser divididos em agregados menores, o seu conjunto forma os agregados do mais alto nível de organização (BREWER, 1964). Em um primeiro nível de observação são considerados, a porosidade dos agregados primários (microporosidade) e os grãos minerais, que são as partículas primárias. O arranjo dos agregados primários formam a porosidade interpedal, macroporosidade, constituindo-se o segundo nível de agregação. Este nível é o da pedoestrutura, considerando mais que o arranjo dos agregados, como citado anteriormente. No terceiro nível de observação temos o horizonte, composto pela pedoestrutura e sua porosidade (Figura 4.1). Essa organização hierarquizada, considera o perfil do solo (*pedon*) como a unidade representativa à escala de uma parcela (BRAUDEAU; MOHTAR; CHAHINIAN, 2004).

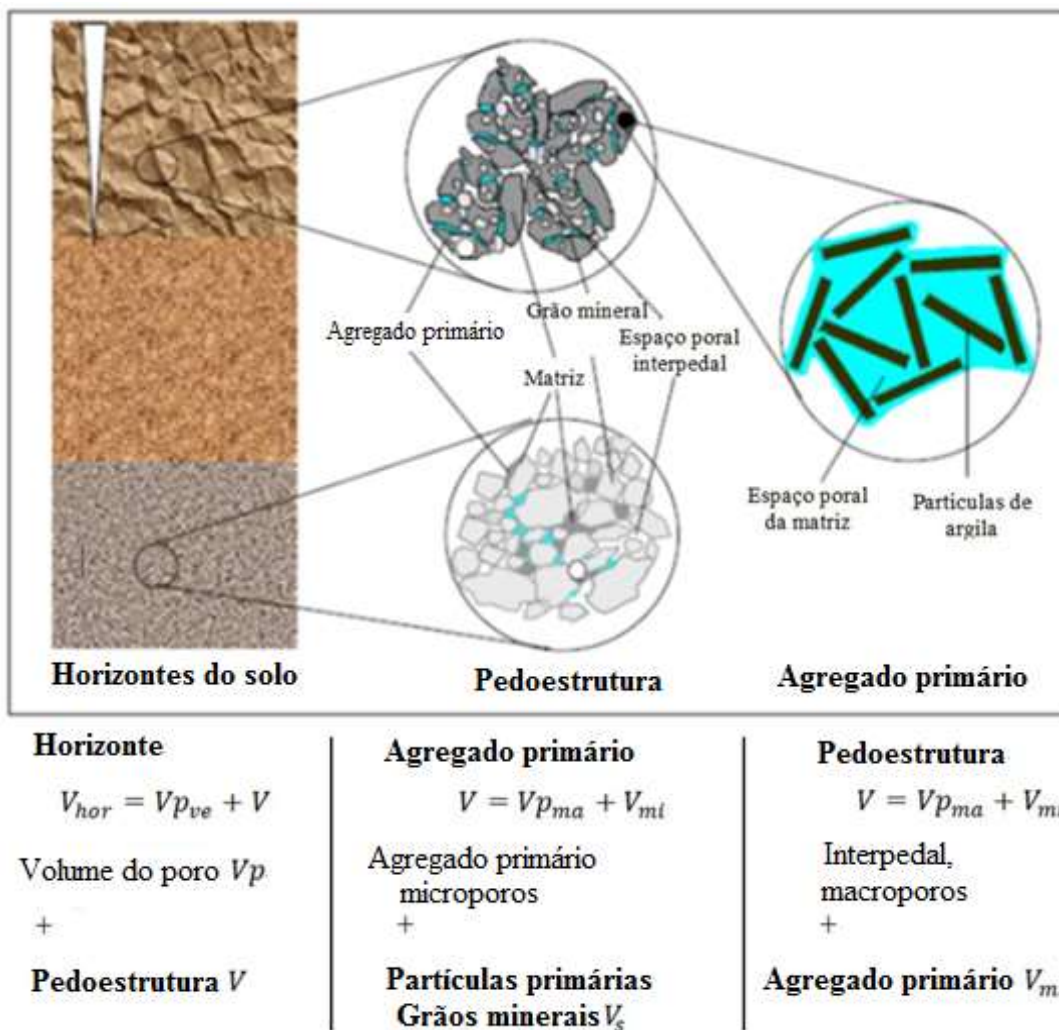


Figura 4.1 - Representação esquemática dos quatro níveis de organização funcional de um pedon: o horizonte, a pedoestrutura, os agregados primários e as partículas primárias

Uma abordagem baseada na determinação do ponto de entrada de ar nos agregados primários é importante como primeiro passo para a compreensão do comportamento estrutural do solo. Para isto, dois sistemas de porosidade bem definidos e complementares na pedoestrutura são considerados: o volume microporal  $V_p^{\mu}$  e o volume macroporal  $V_p^m$ . Ambos os sistemas podem sofrer expansão ou retração pela absorção ou extração de água. No caso da microporosidade, é considerada a aproximação ou distanciamento das partículas primárias (argila, silte fino, hidróxidos, etc). No caso da macroporosidade, os agregados primários sofrem o efeito das forças osmóticas quando os espaços intersticiais (inter-particulares ou inter-agregados) estão saturados de água. Uma vez definido os sistemas de poros, é importante conhecer a interação entre a água e a matriz do solo.

#### 4.1.1.2 Classes de água: expansão e condensação

A capacidade do solo de expandir e/ou retraindo está relacionada à entrada ou saída de água. A concepção do mecanismo de retração ou expansão do solo supõe a existência de duas classes de água contidas no sistema poroso: uma água de expansão  $E_g$  (*eau de gonflement*) e uma água de condensação  $E_c$  (*eau de condensation*) (BRAUDEAU; SENE; MOHTAR, 2005). A  $E_g$  ocupa um volume poral entre as partículas ou agregados; sua extração da amostra por evaporação causa retração do sistema poral. Por outro lado a  $E_c$  ocupa os espaços porais intersticiais e é substituída pelo ar (ou o vapor saturado) quando ela deixa o poro; sua evaporação provoca retração fraca ou nula.

A dinâmica dessas águas no solo é estudada pela curva de retração (*shrinkage curve*). Esta curva é o resultado de diferentes estados de equilíbrio entre as duas classes de água (de expansão e condensação), sendo uma característica do funcionamento da organização interna da pedoestrutura. Essa curva é analisada por partes lineares e curvilíneas; as fases lineares representam a saída de uma só classe de água, de saída de  $E_g$  ou  $E_c$ , e as fases curvilíneas constituem uma transição entre duas fases lineares provocadas pela saída simultânea das duas classes de água correspondentes às duas fases lineares (BRAUDEAU, 2001; BRAUDEAU; SENE; MOHTAR, 2005). Essas duas categorias de água se subdividem em quatro conteúdos de água de expansão e condensação:  $w_{ip}$ ,  $w_{st}$ ,  $w_{bs}$  e  $w_{re}$  (Figura 4.2).

A  $w_{ip}$  (*interpedal water*) é a água interpedal localizada na macroporosidade entre os agregados, em um estado hídrico entre a saturação de água e umidade superior à capacidade de campo. A  $w_{st}$  (*structural water*) é a água estrutural ou água útil contida na macroporosidade entre os agregados. Esta água está diretamente acessível às raízes, e se situa na superfície dos agregados, estando retida sem os agregados se expandirem ao máximo. Na curva de retração  $w_{st}$  corresponde à umidade entre os pontos D e M (Figura 4.2). A  $w_{bs}$  (*basic water*) é a água básica ou água útil na microporosidade expansível, corresponde a um estado de saturação dos agregados primários e está pouco acessível às raízes. Seu desaparecimento provoca retração equivalente aos agregados primários. A  $w_{re}$  (*residual water*) é a água residual não mais acessível às plantas retida na microporosidade do solo.

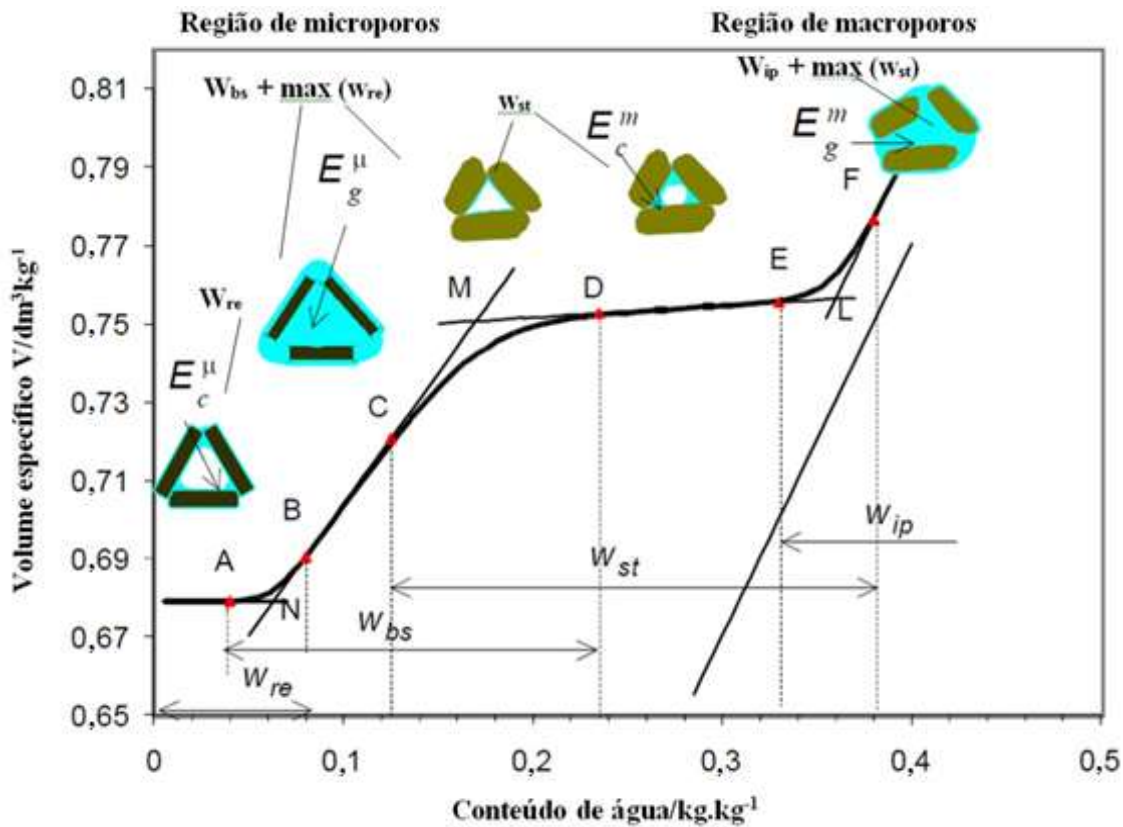


Figura 4.2 - Curva de retração medida com nomenclatura usada para as fases de retração (de inclinação  $K_s$ ), pontos característicos e pontos de umidades associadas ( $w_s$ ), indicando as fases de retração do solo.

Assim, a água contida em uma amostra de solo é definida pela soma destes quatro conteúdos de água, conforme descrito na eq. (1) abaixo:

$$W = w_{re} + w_{bs} + w_{st} + w_{ip} \quad (1)$$

Os diferentes conteúdos de água na evaporação em cada uma das fases de retração estão melhor representados na Tabela 4.1. A diferença feita entre os quatro conteúdos de água (2 águas de expansão e 2 de condensação) é resultado de um estado comportamental da amostra de solo associada a cada fase de retração, linear ou curvilínea.

Tabela 4.1 - Fases de retração do solo relacionados aos conteúdos de água encontradas no solo

Fases de retração	Residual		Plásmico linear III	Estrutural		Interpedal	
	Linear I	Curvilíneo II		Curvilíneo IV	Linear V	Curvilíneo VI	Linear VII
Pontos de transição	0	A	B	C	D	E	F
Teor em água símbolos	$w_{re}$ Água residual	$w_{re} + w_{bs}$	$w_{bs}$ Água plásmica	$w_{bs} + w_{st}$	$w_{st}$ Água estrutural	$w_{st} + w_{ip}$	$w_{ip}$ Água interpedal
Classes de água	$E_c^\mu$ água de condensação	$E_c^\mu + E_g^\mu$	$E_g^\mu$ Água de expansão	$E_g^\mu + E_c^m$	$E_c^m$ água de condensação	$E_c^m + E_g^m$	$E_g^m$ água de expansão
Sistema poral ativo	micro ( $\mu$ )	micro ( $\mu$ )	micro ( $\mu$ )	( $\mu$ )+ (m)	macro (m)	macro (m)	macro (m)

Conhecidas as classes e conteúdos de água e onde provavelmente cada uma se encontra, pode-se descrever o processo de retração (BRAUDEAU, 2001; BRAUDEAU; SENE; MOHTAR, 2005). A Figura 4.2 será importante para situar os pontos em cada fase.

- Primeiramente, a partir da saturação, ocorre retração interagregados num estado completamente saturado, antes do ponto F (retração interpedal);
- Após F, o ar entra na amostra de solo e ocorre retração interagregados até o ponto E, ponto de aproximação dos agregados. A fase de retração curvilínea (F – E) é o resultado simultâneo de  $w_{ip}$ , água de expansão e de  $w_{st}$ , água de condensação, do espaço interagregado;
- Entre E e D (retração estrutural), a retração é fraca ou nula e corresponde à saída de  $w_{st}$ , água de condensação, e dos agregados entre eles mesmo saturados e expandidos;
- Entre C e B a retração é básica,  $w_{bs}$ , não há mais água entre os agregados e a água não sai da matriz argilosa dos agregados primários;
- Enfim, entre B e A, a água provém no mesmo tempo dos agregados primários ainda saturados (água de expansão  $w_{bs}$ ) e dos agregados primários não saturados, onde o ar já penetrou (correspondendo à água de condensação  $w_{re}$ );
- A retração se ameniza gradualmente até ser nula em A, o limite da retração. Quando a entrada de ar ocupa todos os agregados primários, quer dizer que as plaquetas de argila e outras partículas primárias estão todas coalescidas e não se reorganizam mais após a saída da água.



#### 4.1.1.3 Os diferentes pontos de umidade na pedoestrutura - Embasamento teórico

Para modelar a saída da água dos dois tipos de poros, micro e macroscópicos, é necessário se apoiar sobre uma hipótese de funcionamento hidroestrutural da amostra de solo.

A Figura 4.2 mostrou uma curva de retração com vários pontos críticos usados como parâmetros característicos. Estes parâmetros são os da curva de retração, como descrito pela eq. (2):

$$V = V_o + K_{re}w_{re} + K_{bs}w_{bs} + K_{st}w_{st} + K_{ip}w_{ip} \quad (2)$$

As variáveis acima são representadas por:  $V$ , é o volume do solo;  $V_o$  é o volume do solo no estado seco; o  $Ks$  são as inclinações das fases de retração lineares; o  $w$  são as frações correspondentes de água; e os subscritos re, bs, st e ip se referem às fases residual, básica, estrutural e interpedal, respectivamente (BRAUDEAU, 2001; BRAUDEAU; SENE; MOHTAR, 2005). De fato,  $w$  é a fração de água responsável pelo estágio de contração linear. As águas  $w_{ip}$ , e  $w_{st}$  estão nos poros interpedais, enquanto  $w_{bs}$  e  $w_{re}$  estão nos agregados primários. As equações destas frações de água estão derivadas na integração das funções logísticas de água disponível, como descrito nas equações eq. (3.1), (3.2), (3.3), (3.4):

$$w_{ip} = \frac{1}{k_L} \ln[1 + \exp\{k_L(W - W_L)\}] \quad (3.1)$$

$$w_{st} = -\frac{1}{k_M} \ln[1 + \exp\{k_M(W - W_M)\}] - \frac{1}{k_L} \ln[1 + \exp\{k_L(W - W_L)\}] \quad (3.2)$$

$$w_{bs} = \frac{1}{k_N} \ln[1 + \exp\{k_N(W - W_N)\}] + \frac{1}{k_M} \ln[1 + \exp\{k_M(W - W_M)\}] \quad (3.3)$$

$$w_{re} = -\frac{1}{k_N} \ln[1 + \exp\{k_N(W - W_N)\}] + W_N \quad (3.4)$$

A quantidade  $W_N$ ,  $W_M$  e  $W_L$  são os conteúdos de água nos pontos de intersecção  $N'$ ,  $M'$  e  $L'$  de retas tangentes que se estendem a regiões de retração quase-linear da curva, e  $k_N$ ,  $k_M$  e  $k_L$  representam a distância vertical entre estes pontos de intersecção e a curva de retração.

Como um exemplo,  $k_M/\ln(2) = (K_{bs} - K_{st})/(V_M - V_{M'})$ , onde  $V_M$  é o volume do solo em  $\text{dm}^3\text{kg}^{-1}$  no ponto M e  $V_{M'}$  é o volume do solo em  $M'$ .

Os parâmetros da eq. (2) e (3) constituem um conjunto independente para descrever a curva de retração. Eles incluem  $k_N, k_M, k_L, W_N, W_M, W_L, K_{re}, K_{bs}, K_{st}, K_{ip}$  e  $V_0$ . Esses parâmetros serão os trabalhados neste capítulo. Porém é importante saber, até mesmo para a correspondência de parâmetros que podem ser visualizados na Figura 4.2, que existem outros conjuntos de parâmetros que também servem para avaliar os pontos importantes da curva de retração.

O primeiro conjunto, mostrado acima, pode ser substituído por um conjunto equivalente, nomeados  $W_A, W_B, W_C, W_D, W_E, W_F, K_{re}, K_{bs}, K_{st}, K_{ip}$  e  $V_A$ , onde  $W_A, W_B, \dots, W_F$  são conteúdos de água nos pontos de transição A, B, ..., F da curva de retração que marcam a mudança na configuração da estrutura (BRAUDEAU; FRANGI; MOHTAR, 2004) (Figura 4.3). Por exemplo, ponto D é onde os agregados primários começam a encolher ( $w_{st}$ ), ponto C é o ponto seco da macroporosidade ( $w_{bs} = 0$ ), e ponto B é o ponto de entrada de ar para os agregados primários ( $w_{re}$ ).

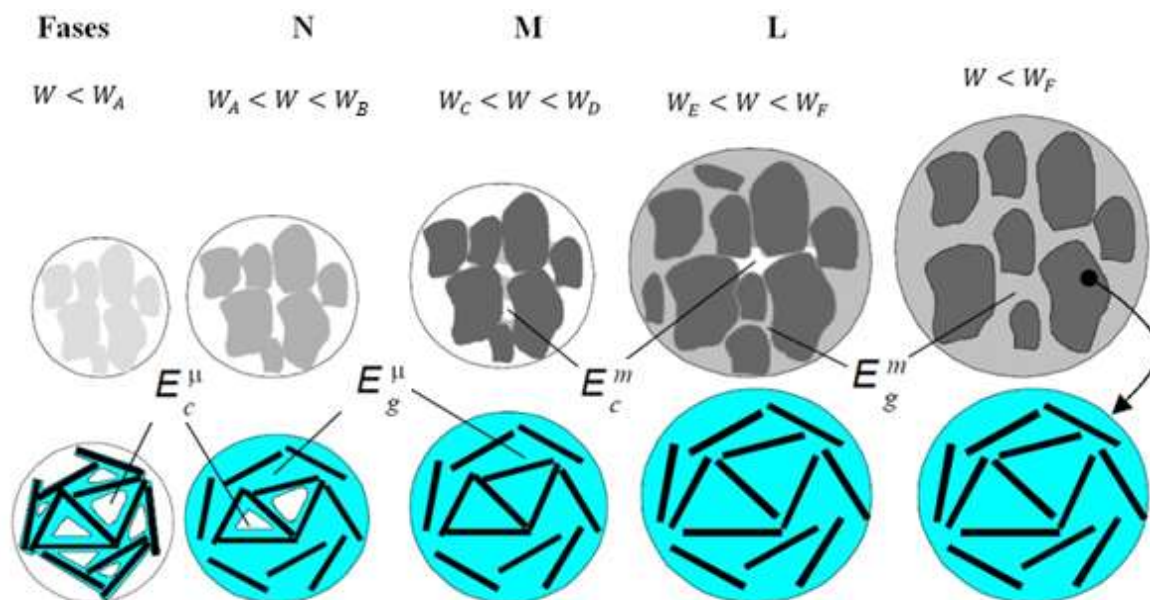


Figura 4.3 - Representação esquemática dos locais de expansão e condensação nos dois sistemas de porosidade do solo: entre as partículas de argila e entre os agregados

#### 4.1.1.4 Relações entre as propriedades e os parâmetros pedoestruturais

As relações existentes entre as propriedades e os parâmetros pedoestruturais (BRAUDEAU; FRANGI; MOHTAR, 2004), mostram:

1  $W_N = \max(w_{re}) = \rho_w \min(\eta_{mi})$ , o volume de poros específico dos agregados primários secos, onde  $\rho_w$  é a densidade da água, aceita como  $1 \text{ kg.dm}^{-3}$ .

2  $W_M = \max(w_{re}) + \max(w_{bs}) = \rho_w \max(\eta_{mi})$ , o volume do poro específico máximo dos agregados primários saturados.

3  $W_L - W_M = \max(w_{bs}) = \rho_w \eta_{ma}$ , o volume de poro específico entre os agregados na saturação.

4  $W_L = \rho_w \eta$ , o volume de poro total na saturação,

Na relação,  $\eta$  é um volume de poro num dado conteúdo de água. Além disso, o entendimento da configuração hidroestrutural do solo a cada ponto de transição dada pela curva de retração, leva a correspondência entre estes pontos e as noções agronômicas clássicas de estados de umidade do solo, tais como capacidade de campo, ponto de murcha permanente e saturação (BRAUDEAU, 2004b). Portanto,  $W_B$  é correspondente ao ponto de murcha,  $W_C$  à porosidade interpedal seca,  $W_D$  à umidade na capacidade de campo, e  $W_F$  à saturação.

Assim, a curva de retração é uma função característica da forma como os sólidos, água e ar estão organizados no solo (BRAUDEAU; MOHTAR; CHAHINIAN, 2004). A caracterização funcional do modelo representa os vários equilíbrios que serão determinados na pedoestrutura.

Uma vez conceituada, a análise da curva de retração tem sido aplicada em diversas áreas afins como, na avaliação do impacto do conteúdo de argila e tipo de argila nas propriedades do solo (BOIVIN; GARNIER; TESSIER et al., 2004); o impacto do carbono orgânico do solo nas propriedades físicas do solo (BOIVIN; SCHAFFER; STURMY, 2009); o impacto do tráfego nas propriedades porais do solo (BOIVIN et al., 2006; SCHAFFER; SCHULIN; BOIVIN, 2008) e ainda na avaliação do impacto físico na biota do solo (MILLERET et al., 2009). No entanto a análise de retração, não tem sido usada ainda para avaliação de sistemas de uso do solo em ambientes agrícolas tropicais brasileiros. O objetivo deste estudo é o de medir a retração dos solos sob floresta e pastagem, bem como o de conhecer e aplicar uma nova metodologia aos solos amazônicos.

## 4.2 Material e Métodos

### 4.2.1 Descrição da área de estudo e coleta das amostras de solo

As áreas selecionadas para o estudo correspondem às já detalhadas no item 2.2 do Capítulo 2.

As amostras de solo selecionadas para o estudo foram coletadas em duas topossequências, uma localizada sob floresta e outra sob pastagem. Em cada tipo de uso do solo, foram abertas 3 trincheiras, a fim de conhecer a organização e atributos dos horizontes.

A retração do solo foi medida em blocos indeformados, coletados em quatro pontos do perfil. Esses pontos foram escolhidos no momento da descrição morfológica, como sendo pontos importantes para o funcionamento hídrico. As repetições das medidas foram realizadas no mesmo bloco, ou em dois blocos, sendo coletada 3 amostras indeformadas de solo por profundidade. Os cilindros possuem volume conhecido ( $100 \text{ cm}^3$ ).

As amostras foram preparadas para análise da curva de retração no Laboratório de Física do Solo do *Institut de Recherche pour le Développement* – IRD Bondy/França, no período de novembro de 2012 a abril de 2013.

### 4.2.2 Preparação das amostras indeformadas (cilindros)

Os blocos foram colocados em bombas de vácuo para serem umedecidos de maneira uniforme (Figura 4.4A). A obtenção de amostras indeformadas foi feita através de cilindros metálicos, que foram cuidadosamente colocados na superfície do bloco e esculpido. O solo circundante foi retirado com uma espátula para preservar um volume conhecido, necessário à análise de retração (Figura 4.4 B, C, D, E).



Figura 4.4 - Etapas de construção do cilindro de solo para análise de retração. A – Umedecimento do bloco de solo; B – Escolha do local para retirada da amostra; C – Início da amostragem; D – Cilindro quase finalizado para análise de retração; E – Processo final de esculptura do cilindro no bloco de solo

Após esculpidas, as amostras foram umedecidas lentamente com água deionizada. O potencial inicial de  $-10\text{ cm H}_2\text{O}$  foi aplicado para umedecimento da amostra até a saturação em ‘mini-mesas’ de tensão. O tempo de duração para saturação foi entre 6 a 13 dias, dependendo da granulometria da amostra, quanto mais argilosa, maior tempo para saturação. Um papel filtro foi utilizado para facilitar a manipulação da amostra no béquer e intermediar o contato entre o solo e ‘mini-mesa’ de tensão (Figura 4.5). Após a saturação, ou bem próximas à saturação, as amostras estavam prontas para análise de retração do solo.

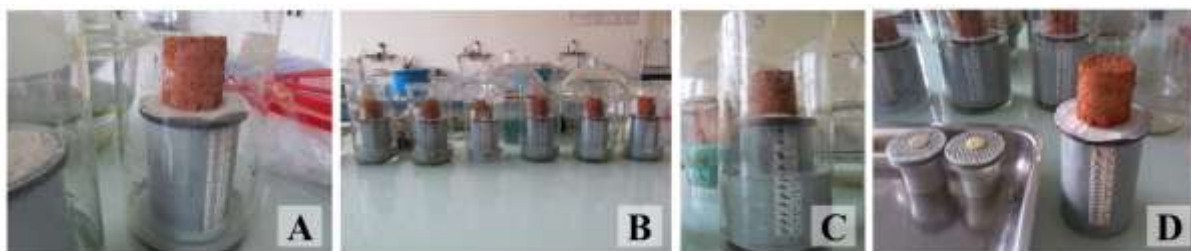


Figura 4.5 - Etapas de saturação e organização das amostras para entrada no equipamento. A – Início da saturação da amostra; B – Bateria de amostras para saturação; C – Adição de água para saturação da amostra; D – Amostra saturada pronta para análise

#### 4.2.3 Medidas de retração

As amostras de solo, depois de saturadas, foram colocadas no retratômetro, equipamento especializado em medir a retração do solo. Este equipamento é capaz de detectar alterações de volume do solo após a perda de água, isto ocorre porque este aparelho funciona também como uma estufa. A uma temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$ , o solo perde água com o passar do tempo. Essa variação de volume é captada por três feixes de lasers, um de altura e dois laterais que medem a largura. A variação de massa é realizada por uma balança eletrônica, situada abaixo de uma plataforma giratória onde as amostras são pesadas (Figura 4.6). Esta plataforma possui oitos lugares disponíveis para análise. Em cada bateria de amostra, seis amostras indeformadas foram colocadas para medida e dois lugares foram preenchidos com cilindros metálicos padrão, de altura e largura conhecidos, utilizados para calibração.

Uma vez que as amostras foram colocadas no aparelho, pequenos discos de plástico são colocados acima de cada amostra. Essas peças são colocadas para que a medida de altura não sofra grandes variações de uma amostra para outra. O laser pode causar esta variação por refletir em diferentes materiais que compõem o solo, alterando as leituras finais, assim, a pequena peça com cor central amarela (Figura 4.6 C, D), é colocada no centro superior da amostra para que todas reflitam a mesma cor, no mesmo material. A coloração não sofre

alteração térmica, e a superfície sempre plana, facilitará a reflexão do laser e resultará em medidas mais confiáveis.

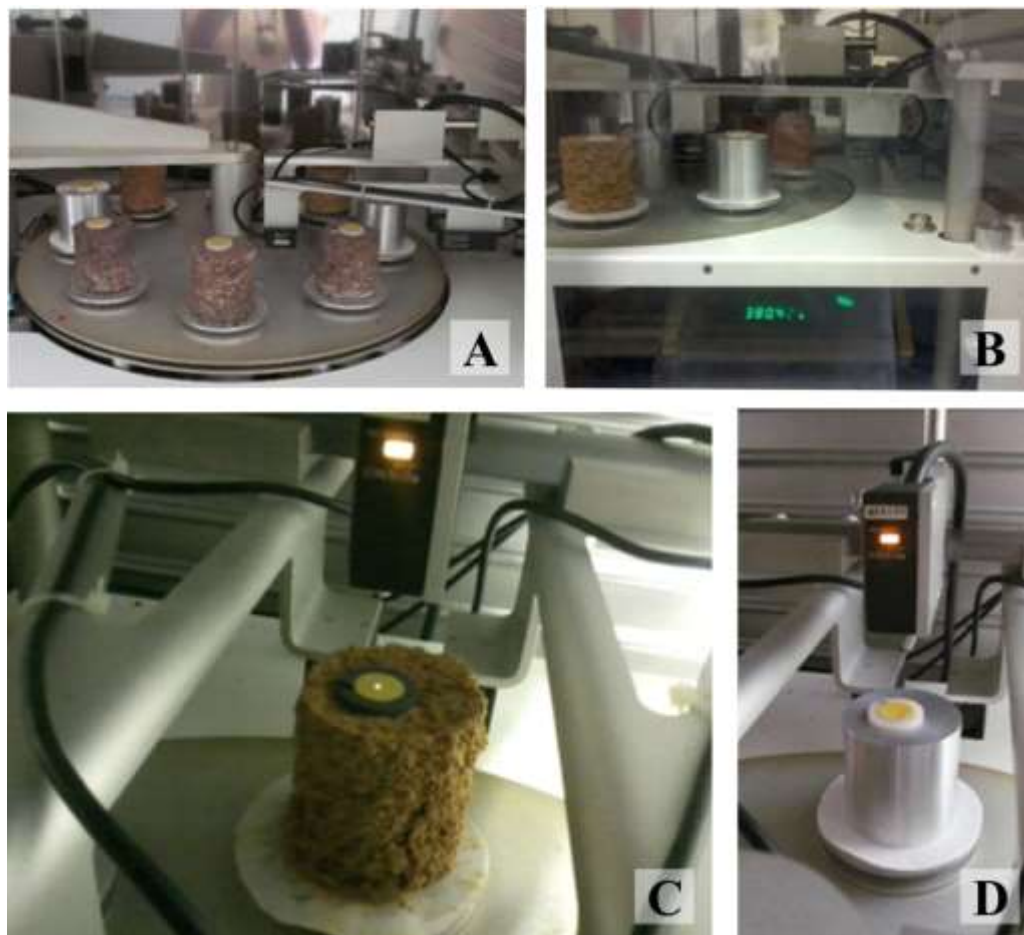


Figura 4.6 - Medida da curva de retração. A - Amostras no interior do retratômetro, localizadas na plataforma giratória; B - Registro da massa de solo na balança eletrônica; C - Posicionamento do laser de altura (acima); D - Cilindro metálico de calibração e na lateral, spot do laser que mede a variação de largura da amostra de solo

O controle de todo o processo de medição do equipamento é realizado com interface direta com um computador, através do software LabView, que trata as variáveis de entrada e as dispõe em formato de fácil visualização, manipulação e análise. A troca de dados é feita entre uma central de processamento que recebe os dados de todos os sensores e as envia às respectivas placas de aquisição de dados, conectadas ao computador (Figura 4.7).

Cada amostra é medida no intervalo de 8 minutos, este é o tempo necessário para a volta completa da plataforma, até a próxima medida na mesma amostra. A medição termina quando a amostra estabiliza peso, altura e largura, possível de ver pelos gráficos contidos no programa. A duração média para a estabilização das amostras de solo é de 7 dias. Após a estabilização, foi feita a recuperação dos dados para posterior análise.



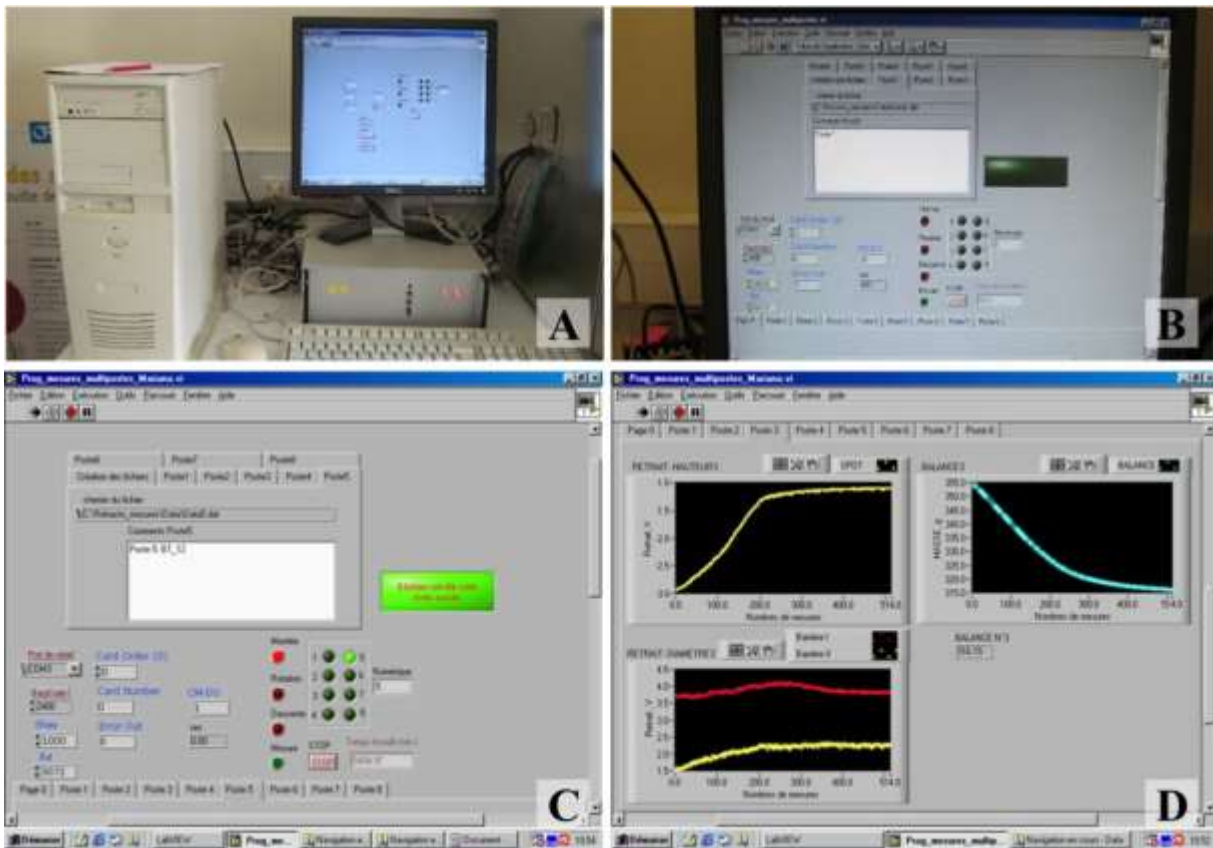


Figura 4.7 - Telas de comandos do Labview para funcionamento do retratômetro. A – Tela central do programa, onde os comandos são ativados; B, C – Tela de identificação das amostras nos lugares que ocuparão na plataforma giratória; D – Curvas feitas pelo programa durante a edição da retração do solo, a curva amarela mede a altura, a azul mede a variação de massa e as duas (vermelha e amarela) medem a largura

Após a retirada das amostras do retratômetro, a densidade do solo foi medida, com adaptações do método do torrão impermeabilizado (adaptado de EMBRAPA, 1997). A adaptação consistiu na utilização de um saco, de volume conhecido, e bomba de vácuo. A amostra, ao ser colocada no saco plástico foi succionada e o saco foi modelado com as mesmas dimensões da amostra de solo e mergulhada em um béquer contendo água. Assim, obteve-se o peso da amostra mergulhada em água. A densidade do solo foi medida pela relação demonstrada através da eq. (4).

$$D_s = \frac{\text{massa de solo seco a } 105^\circ}{\text{volume de solo seco} - \text{volume do saco}} \quad (4)$$

Uma vez obtidos os valores de massa e volume de cada amostra de solo, os dados foram processados em uma planilha de análise que possui todas as fórmulas necessárias para a





### 4.3 Resultados e Discussão

#### 4.3.1 Curvas de retração

A Figura 4.9 apresenta as curvas de retração medidas referentes a cada perfil para quatro profundidades do solo. Os pontos medidos são representados no gráfico, juntamente à curva de retração modelada. Vale ressaltar que as linhas de saturação existentes na figura são somente de um dos horizontes do solo representado, estão no gráfico como exemplo de posicionamento da linha de saturação em relação à curva, pois existe para cada horizonte uma linha de saturação.

Os solos sob floresta apresentaram diferentes comportamentos, tanto em profundidade, quanto ao longo da vertente.

No perfil à montante, F1, as profundidades de 0,05m e 0,40 m possuem volume inicial do solo de aproximadamente  $0,79 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ . Ao perderem água, as amostras apresentam diferentes retrações. A camada superficial variou em  $0,028 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$  de seu volume, enquanto aos 0,40 m, a variação foi de  $0,044 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ , ou seja, as diferentes características existentes entre as camadas fizeram com que a subsuperfície dobrasse a variação de volume em relação à superfície (Tabela 4.2).

O segundo perfil da floresta, F2, apresentou na camada superficial, retração similar ao horizonte em maior profundidade, 1,20 m. Semelhantemente aos horizontes intermediários, aos 0,40 e 0,70 m, que também mostraram retrações similares entre si, porém entre 0,05 e 1,20 m não apresentaram semelhanças. Ambas as amostras apresentaram conteúdo de água na faixa entre 0,2 a  $0,3 \text{ kg kg}^{-1}$ .

No perfil F3, à jusante, o horizonte superficial apresentou a umidade mais baixa e o menor volume inicial da amostra de solo, com variação de  $0,024 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ . O horizonte inferior, aos 0,40 m, mostrou a menor variação em subsuperfície ( $0,009 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ ), de todos os horizontes subsuperficiais analisados. Os demais horizontes (aos 0,80 e 1,40 m) tiveram maiores variações de volume do solo.

Sob pastagem, no perfil P1, a variação de volume do solo em superfície e em 0,55 m, foram semelhantes, com retração próxima a  $0,03 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ , enquanto que em 1,40 m essa variação foi menor,  $0,019 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ .

No perfil P2, parte intermediária do relevo, a variação de volume foi maior em superfície ( $0,017 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$  aos 0,05 m), reduzindo em profundidade ( $0,015 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$  em 1,10

m). No perfil à jusante, P3, a superfície apresentou a menor variação de volume do perfil, ( $0,018 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ ). Em contraposição, na camada de 0,45 m, o volume de  $0,035 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$  foi a maior variação encontrada neste tipo de uso do solo.

De maneira geral, as menores retrações do solo, ou seja, a diferença de volume do solo foi menor nas camadas mais profundas, abaixo dos 0,50 m de profundidade (Tabela 4.2).

Tabela 4. 2 – Parâmetros da curva de retração do solo para amostras representativas de cada horizonte do solo.

Identificação	$W_M$	$W_N$	$W_{\text{sat}}$	$K_{\text{bs}}$	$V_o$	$\Delta\text{volume}$	$W_M - W_N$	$\Delta\text{umidade}$
								$\text{kg kg}^{-1}$
----- $\text{dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ -----								
F1 0,05 m	0,161	0,051	0,176	0,283	0,756	0,028	0,110	0,171
F1 0,40 m	0,156	0,105	0,205	0,977	0,741	0,044	0,051	0,177
F1 0,80 m	0,209	0,168	0,287	0,749	0,734	0,021	0,041	0,291
F1 1,30 m	0,200	0,142	0,258	0,194	0,696	0,010	0,059	0,258
F2 0,05 m	0,137	0,089	0,213	0,453	0,702	0,026	0,048	0,209
F2 0,40 m	0,229	0,176	0,317	0,967	0,767	0,049	0,053	0,278
F2 0,70 m	0,251	0,158	0,285	0,516	0,761	0,047	0,093	0,279
F2 1,20 m	0,231	0,158	0,259	0,208	0,702	0,015	0,073	0,199
F3 0,05 m	0,127	0,073	0,158	0,253	0,634	0,014	0,054	0,155
F3 0,40 m	0,314	0,243	0,356	0,176	0,677	0,003	0,071	0,249
F3 0,80 m	0,242	0,193	0,303	0,547	0,727	0,024	0,049	0,290
F3 1,40 m	0,249	0,148	0,272	0,194	0,676	0,016	0,101	0,267
P1 0,05 m	0,193	0,090	0,201	0,299	0,650	0,028	0,103	0,187
P1 0,55 m	0,163	0,124	0,269	0,774	0,657	0,033	0,039	0,263
P1 1,40 m	0,227	0,186	0,277	0,437	0,679	0,020	0,041	0,269
P2 0,05 m	0,131	0,072	0,180	0,298	0,594	0,020	0,060	0,162
P2 0,30 m	0,149	0,106	0,203	0,440	0,611	0,018	0,043	0,201
P2 0,55 m	0,142	0,066	0,177	0,244	0,638	0,019	0,076	0,172
P2 1,10 m	0,201	0,144	0,235	0,267	0,622	0,014	0,057	0,234
P3 0,05 m	0,213	0,092	0,232	0,158	0,810	0,016	0,120	0,186
P3 0,45 m	0,179	0,112	0,232	0,519	0,674	0,030	0,067	0,228
P3 1,40 m	0,289	0,211	0,340	0,265	0,772	0,025	0,078	0,328

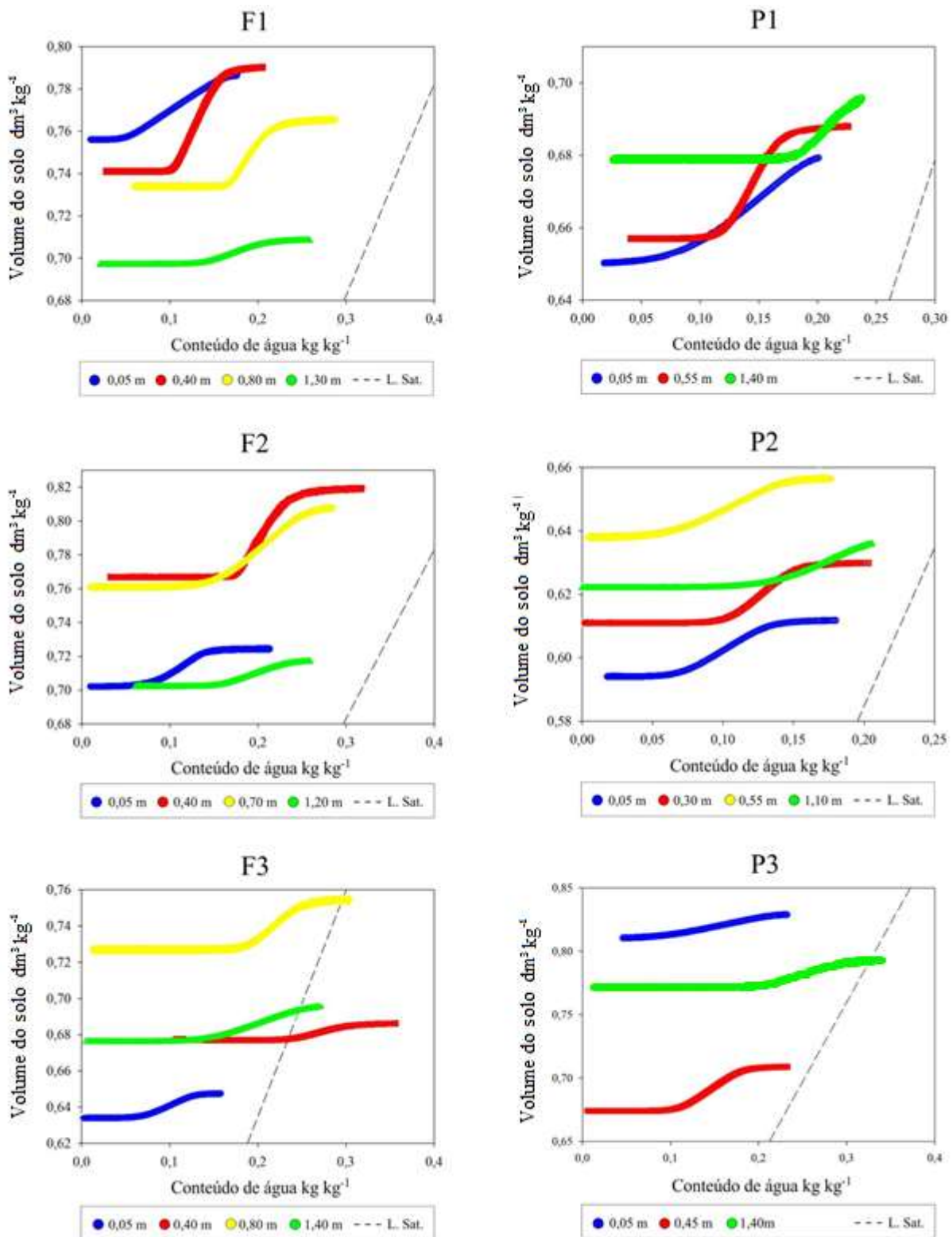


Figura 4.9 - Curvas de retração representativas de cada horizonte dos perfis de solo analisados. Os símbolos são as curvas ajustadas, a linha contínua são as curvas medidas. As curvas medidas não podem ser distinguidas nos gráficos. L. Sat: Linha de saturação.

A Figura 4.10 apresenta dois exemplos de curvas de retração, contendo os pontos de umidades da fase de retração curvilínea e linear (A, B, C, D, E e M, N, L,  $w_{\text{sat}}$ ,

respectivamente). A figura também mostra o teor de água e o conteúdo correspondente às águas na curva de retração apresentada. Lembrando que os processos seguintes foram realizados em cada amostra de solo referente às curvas discutidas no item 4.3.1.

#### 4.3.2 Classes de água do solo e suas proporções em amostras de solo

Os solos apresentados na Figura 4.10 foram utilizados como exemplos do processo pelo qual passaram todos os horizontes analisados. Primeiramente, foi identificado os pontos da curva de retração (Figura 4.10 A) e identificação do teor em conteúdo de água contido em cada amostra (Figura 4.10 B).

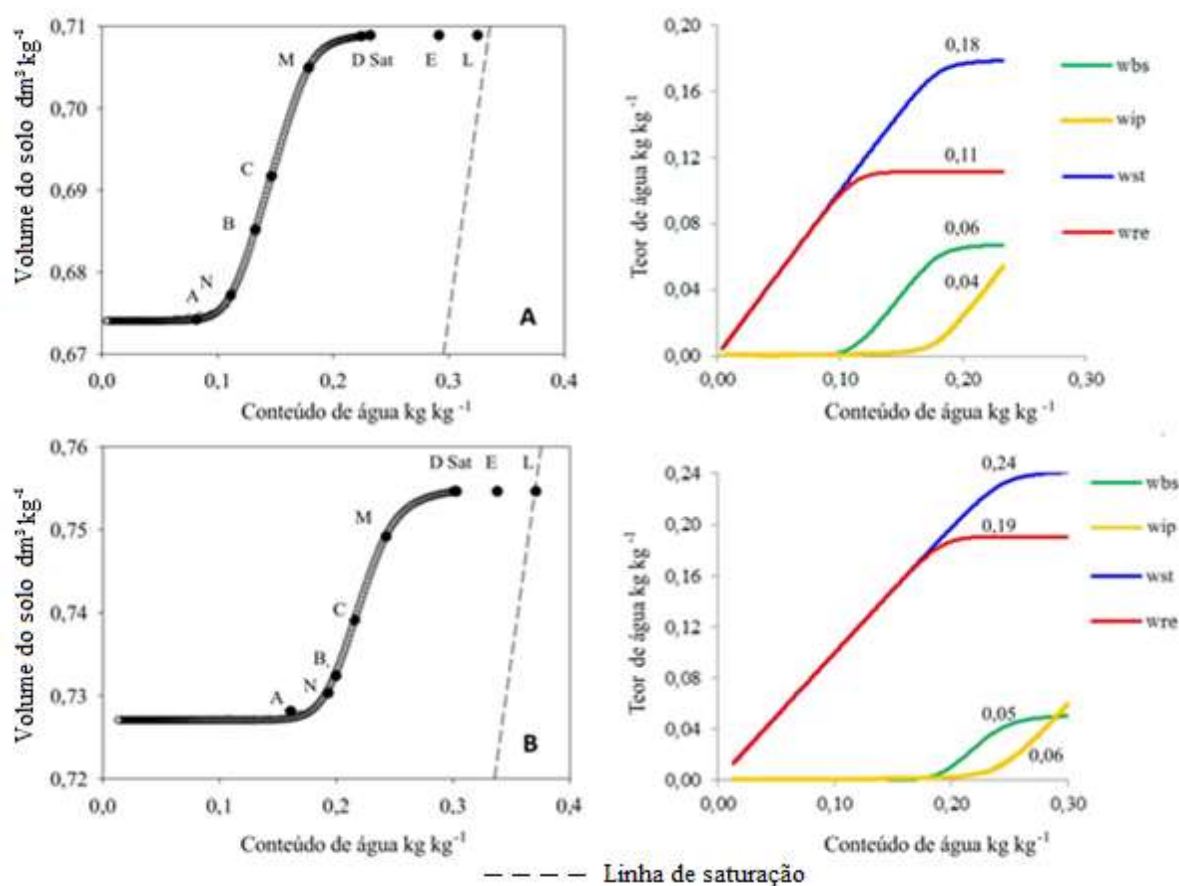


Figura 4.10 - Curvas de retração (medida e ajustada) e os quatro conteúdos de água, em dois horizontes de solo: A – P3 a 0,45 m de profundidade; B – F3 a 0,80 m de profundidade. Teor de água - wbs: água básica; wip: água interpedal; wst: água estrutural; wre: água residual.

No caso acima, foram exemplificados a profundidade de 0,45 m de P3, e 0,80 m em F3. A variação de volume do solo sob pastagem foi de  $0,035 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ , enquanto sob floresta a variação foi  $0,028 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ . Desta variação, como pode ser visualizado na Figura 4.10, é possível saber qual a classe de água responsável por maior parte desta mudança de volume. A

variação também está relacionada à granulometria mais fina e à estruturação do solo sob pastagem na profundidade analisada. Estas profundidades foram selecionadas somente para demonstração do que foi feito com as demais amostras, e não como comparação. É importante para visualizar também o que ocorre em diferentes profundidades.

Os dois horizontes tiveram a participação dos mesmos conteúdos de água:  $w_{st} > w_{re} > w_{bs} > w_{ip}$ , porém em teores diferentes, sendo que no horizonte do perfil F3 a participação da água estrutural ( $w_{st}$ ) e residual ( $w_{re}$ ) foram maiores que no horizonte do perfil P3. Ou seja, neste horizonte, a água útil contida na macroporosidade e acessível às raízes, e também a água presa na microporosidade do solo foram importantes para a caracterização das amostras, e a água estrutural contribuiu na diminuição de volume do solo.

A participação da água interpedal ( $w_{ip}$ ) nestes solos, que seria a água ocupando os macroporos, e da água básica ( $w_{bs}$ ), que é água útil na microporosidade expansível, e corresponde a um estado de saturação dos agregados primários estando pouco acessível às raízes, foram menores. Exemplo da variação das umidades  $w_{st}$  e  $w_{re}$  nos horizontes analisados (Figura 4.11).

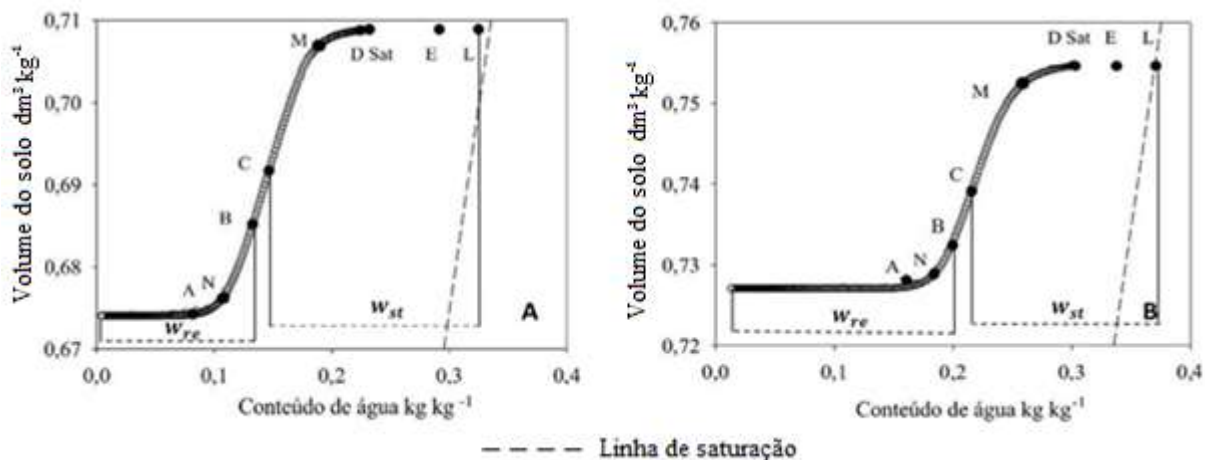


Figura 4.11 - Área de abrangência das principais umidades encontradas em dois horizontes de solo: A - P3 a 0,45 m de profundidade; B - F3 a 0,80 m de profundidade

A fim de melhor caracterizar a localização dos pontos de umidade nas amostras estudadas, a umidade  $w_{st}$  foi considerada até o ponto L, visto que nestes solos o ponto F (que seria um dos pontos limite, referente à retração interpedal, como visto na Figura 4.2) não foi atingido. Concluindo, a diferença de  $w_{st}$  no horizonte F3 a 0,80 m de profundidade, foi no valor de  $0,18 \text{ kg kg}^{-1}$ , enquanto em P3 a 0,45 m, a variação de umidade compreendeu  $0,17 \text{ kg kg}^{-1}$ .

### 4.3.3 Determinação da fase de retração linear básica, $K_{bs}$

Assim como os demais parâmetros da curva de retração abordados no item 4.3.1 deste capítulo, a determinação desta fase de retração da curva, também foi determinada pelo ajuste da curva de retração medida. Esta fase de retração básica é de interesse deste estudo pois abrange a fase relacionada à textura, à matriz argilosa do solo. Os capítulos anteriores mostraram que a textura foi de relevante importância para as características encontradas na topossequência. O parâmetro  $K_{bs}$  é a inclinação da fase de retração principal (fase básica), causada pela retração da matriz argilosa do solo.

Os mesmos horizontes apresentados acima (P3 a 0,45 m de profundidade; F3 a 0,80 m de profundidade), foram tomados neste item como exemplos da identificação de  $K_{bs}$  em todos os horizontes analisados (Figura 4.12).

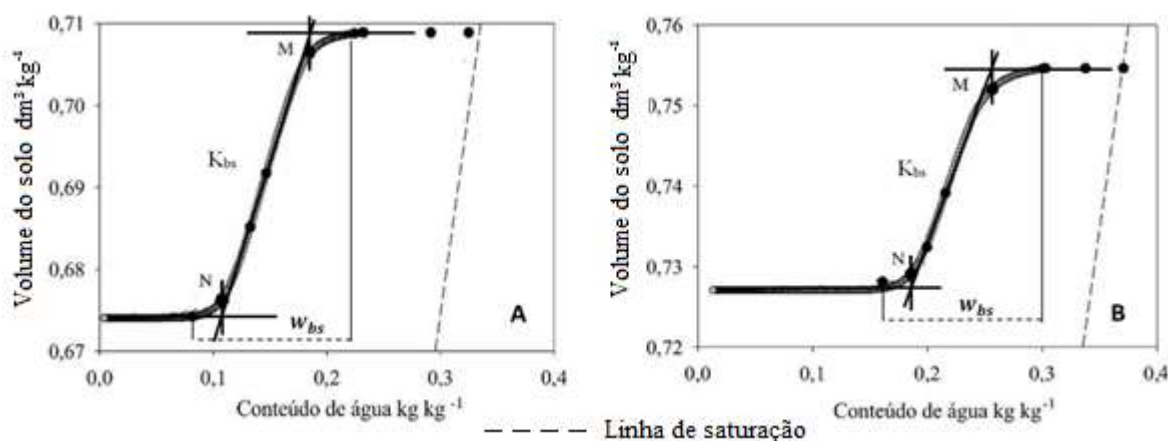


Figura 4.12 - Área de abrangência das principais umidades encontradas em dois horizontes de solo: A – P3 a 0,45 m de profundidade; B – F3 a 0,80 m de profundidade

A fase de retração linear básica,  $K_{bs}$ , em pastagem foi de  $0,52 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ , enquanto sob floresta foi de  $0,55 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ . Importante lembrar que os pontos N e M são importantes para delimitar  $K_{bs}$ , como explicado anteriormente, sendo que N é o volume de poros contidos nos agregados primários secos, referente à retração mínima dos microporos, e M é o volume máximo dos poros dos agregados primários saturados, água ainda disponível às plantas, porém em pouca quantidade.

Tomando por base os valores acima mostrados de  $K_{bs}$  para floresta e pastagem, pode-se dizer que a morfologia do espaço poroso entre os agregados, foram próximas, devido à pouca diferença encontrada entre os valores desta fase de retração ( $K_{bs}$ ). Este parâmetro

também está relacionado à capacidade do solo em absorver água, devido sua relação com o conteúdo de argila.

#### **4.3.4 Relação entre os parâmetros da curva de retração e alguns atributos do solo**

A Figura 4.9 e a Tabela 4.2 mostram as curvas de retração e os valores dos parâmetros encontrados para cada horizonte. As variações encontradas em ambas as medidas, ocorrem devido a estrutura do solo. Como observado nos capítulos anteriores, os horizontes se mostraram heterogêneos, devido a diferença de seus atributos.

A textura, juntamente com a estrutura do solo foram os atributos que mais influenciaram a diferenciação entre os horizontes. Em superfície, no compartimento 1, a textura arenosa, juntamente à estrutura granular, contendo matéria orgânica, contribuíram com o aparecimento de uma porosidade complexa predominante, demonstrada pela micromorfometria (Capítulo 3). Essa estruturação do solo permitiu que a variação de volume em superfície fosse diferenciada dos demais horizontes. Os perfis F1 e P2, são exemplos onde as maiores retrações ocorreram em superfície. De modo geral, a macroporosidade não permite que o solo retenha bastante água, isso pode explicar a pequena variação de volume, nos demais horizontes superficiais deste compartimento.

Os horizontes pertencentes aos domínios 2, 3 e 4, apresentaram em sua maioria, maiores variações de volume do solo. O incremento de argila em profundidade, juntamente à estrutura em blocos, contribuíram com uma porosidade do solo arredondada grande a média que permitiu a retenção de água nestes horizontes. Isto faz com que o solo absorva mais água e a retenha, fazendo com que estes horizontes apresentem maiores variações ao longo do tempo.

Os compartimentos 5, 6 e 7, apresentaram comportamentos variados, assim como em superfície. O contato com o material em alteração, afere à estes horizontes diferentes características, e conseqüentemente, diferentes retrações do solo, às vezes apresentando as maiores variações de massa e volume de solo do perfil.

A retração devido a estrutura do solo ocorreu, nos pontos de umidade encontrados acima do ponto  $W_M$ , e estes foram responsáveis pela retração inicial dos solos. As diferentes curvas apresentadas na Figura 4.9, posicionam diferentes pontos para  $W_M$ , mostrados também nos exemplos das Figuras 4.10 e 4.11. Sendo  $W_M$  o conteúdo de água no ponto de intersecção  $M'$  e  $L'$ , os valores superiores a este conteúdo de água ( $W_M$ ) indicam na curva de retração a

importância da macroporosidade interpedal, mostrando o ponto onde os agregados começam a perder água. As diferentes posições de  $W_M$  nos gráficos indicam diferentes estruturas e texturas, que fazem o solo reter água por mais tempo ou perdê-la mais facilmente. O mesmo ocorre para  $W_N$ , que é o ponto de intersecção  $N'$  e  $M'$ , que varia conforme as características do solo, e está mais próximo a retração final do solo, ou seja, o momento em que o solo está seco.

Os maiores valores de  $K_{bs}$  foram encontrados nas profundidades superiores a 0,40 m, ou seja, nos horizontes mais argilosos. Esses valores demonstram que o teor de argila foi fator importante para a variação de volume e, conseqüentemente, pela retração básica do solo. A granulometria mais fina é a principal responsável pela microporosidade do solo e conseqüentemente pelo comportamento hídrico dos agregados primários. Assim sendo, o parâmetro  $K_{bs}$ , indicou que parte das variações de volume do solo se deu pela variação dos agregados primários no solos mais profundos. A Tabela 4.2 apresenta os maiores valores nos horizontes F2 aos 0,40 m; F3 aos 0,80 m; P1, 0,55 m; e P3, aos 0,45 m, que representam esta variação da fase linear básica.

#### 4.4 Conclusões

A curva de retração é uma metodologia que permite aferir comportamento físico-hídrico a partir da análise qualitativa de seus parâmetros. Esta metodologia é bastante aplicada em solos onde o movimento de expansão e contração são consideráveis; e também é importante porque consegue medir as fases retração mesmo em solos que não apresentam expansões e contrações consideráveis. Nos solos estudados, as variações não foram tão grandes, mas permitiram observar que a textura argilosa foi o fator mais importante para a mudança de volume do solo quanto este perdeu água.

Em alguns perfis, a superfície apresentou alguma retração devido à presença de matéria orgânica. Em geral, os horizontes mais arenosos não apresentaram grande alteração de volume, como era de se esperar. Os horizontes mais profundos e mais argilosos, foram os que mais sofreram alterações de volume.

A mineralogia, em geral, é importante para o comportamento de retração do solo. No caso deste estudo, a presença predominante de caulinita, foi outro fator que contribuiu para que estes solos apresentassem pouca retração, devido à própria estrutura deste argilo-mineral. Os elementos grossos também influenciaram a qualidade de retração do solo.



## Referências

- BOIVIN, P.; GARNIER, P.; TESSIER, D. Relationship between clay content, clay type and shrinkage properties of soil samples. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 1145-1153, July, 2004.
- BOIVIN, P.; SCHAFFER, B.; STURMY, W. Quantifying the relationship between soil organic carbon and soil physical properties using shrinkage modelling. **European Journal of Soil Science**, Malden, v. 60, p. 265-275, Apr. 2009.
- BOIVIN, P.; SCHAFFER, B.; TEMGOUA, E.; GRATIER, M.; STEINMAN, G. Assessment of soil compaction using shrinkage modelling: experimental data and perspectives. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, p. 65-79, July 2006.
- BRAUDEAU, E. Pédostructure et caractérisation pédohydrrique. In: BRAUDEAU, E.; MTIMET, A. (Ed). **Un système d'information pédologique, le sirs-sols du périmètre irrigué de cebala: Borj-Touil dans la Basse Vallée de la Majerda**. Tunis: Ministère de l'Agriculture, 2001. 134 p. (Bulletin sols de Tunisie, n°spécial).
- BRAUDEAU, E.; FRANGI, J-P.; MOHTAR, R.H. Characterizing nonrigid aggregated soil–water medium using its shrinkage curve. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 359-370, Mar-April, 2004.
- BRAUDEAU, E.; MOHTAR, R.H.; CHAHINIAN, N. Estimating soil shrinkage parameters. In: PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. (Ed.). **Development of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004. chap. 13, p. 225-240. (Development in Soil Science, 30).
- BRAUDEAU, E.; SENE, M.; MOHTAR, R. H. Hydrostructural characteristics of two African tropical soils. **European Journal of Soil Science**, Oxon, v. 56, p. 375-388, June, 2005.
- BRAUDEAU, E.; COSTANTINI, J.M.; BELLIER, G.; COLLEUILLE, H. New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 525-535, June, 1999.
- BREWER, R. **Fabric and mineral analysis of soils**. New York: John Wiley, 1964. 470 p.
- COPPOLA, A. Unimodal and bimodal description of hydraulic properties for aggregated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 1252-1262, July/Aug. 2000.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1997. 212 p.
- MILLERET, R.; Le BAYON, R.-C.; LAMY, F.; GOBAT, J.-M.; BOIVIN, P. Impact of roots, mycorrhizas and earthworms on soil physical properties as assessed by shrinkage analysis. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 373, p. 499-507, July, 2009.
- SCHAFFER, B.; SCHULIN, R.; BOIVIN, P. Changes in shrinkage of restored soil caused by compaction beneath heavy agricultural machinery. **European Journal of Soil Science**, Malden, v. 59, p. 771-783, Feb. 2008.

## 5 RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS DAS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E DE RETRAÇÃO DO SOLO EM UMA TOPOSSEQUÊNCIA SOB FLORESTA E PASTAGEM

### Resumo

Uma boa caracterização de um solo depende de variáveis que possam demonstrar importantes modificações do solo em diferentes escalas. Neste capítulo, diferentes relações foram analisadas a partir de metodologias que estudam o comportamento físico-hídrico do solo a fim de descrever, discriminar e testar as relações existentes entre variáveis da curva de retenção de água no solo e da curva de retração do solo, com o tipo de uso do solo, a posição do solo na topossequência e a divisão de horizontes do solo, em diferentes perfis, com uso de análises estatística multivariada. Os resultados mostraram que a textura e a estrutura do solo foram importantes para discriminar grupos entre os parâmetros analisados. O horizonte A apresentou maior diferença, em relação aos demais em profundidades maiores. Isso ocorreu devido à diferenciação de textura e estrutura, e às diferenças existentes entre os tipos de uso do solo. Na curva de retenção de água, os parâmetros  $\alpha$  e  $n$ , foram sensíveis à diferença de porosidade do solo estrutural e textural, que influenciam em variados tamanhos de poros. A curva de retração, relacionou positivamente as diferentes umidades do solo, sendo que o parâmetro  $K_{bs}$  teve comportamento diferente dos demais parâmetros analisados e foi dependente da textura do solo. As diferenças existentes devido a estrutura e textura, permitiram concluir que os atributos intrínsecos do solo foram relevantes no comportamento destes solos, bem como a cobertura vegetal existente, que apresentou diferenças mais sutis.

Palavras-chave: Atributos do solo; Análise estatística multivariada; Parâmetros da curva de retração do solo; Parametros da curva de retenção de água no solo

### Abstract

A good characterization of a soil depends on variables that can demonstrate significant changes of soil at different scales. In this chapter, different relations were analysed from methodologies that study the soil physical-hydric behaviour in order to describe, discriminate and test the relations between the soil water retention and soil shrinkage curve according to the type of land use, position of the soil in the topsequence and horizon divisions in different profiles, using multivariate statistical analysis. The results showed that the soil texture and structure were important for discriminate between the groups analyzed parameters. The A horizon showed higher difference in comparison to the others in greater depths. This effect occurred due to the differentiation of texture, structure and types of land use. The parameters  $\alpha$  and  $n$ , in the water retention curve, were sensitive to differentiate the structural and textural soil porosity, which influence varying pore sizes. The shrinkage curve positively related the different soil moistures. The parameter  $K_{bs}$  showed different behaviour, depending on the soil texture. Differences due to the soil structure and texture allowed conclude that the intrinsic behaviours of the soil were relevant in the behaviour of these soils, as well as vegetal covering, which showed more subtle differences.

Keywords: Multivariate statistical analysis; Soil attributes; Parameters of soil shrinkage curve; Parameters of soil water retention curve

## 5.1 Introdução

A combinação de diferentes elementos que formam um todo é importante para compreender o meio natural. Esta é uma abordagem importante, pois uma vez que se conhece o sistema, interferir no mesmo se torna mais interessante e com maiores possibilidades ao acerto, já que há o conhecimento de suas características. Contudo, aplicar uma ferramenta que seja capaz de contribuir ao conhecimento dessa complexidade não é fácil.

“Como, assim, enfrentar a árdua tarefa de entender a totalidade? A primeira noção a levar em conta é a de que o conhecimento pressupõe análise e a segunda noção essencial é a de que a análise pressupõe a divisão” (SANTOS, 2006, p. 75).

A utilização de métodos que descrevam a realidade do solo, composta por suas características e propriedades, e com intervenção de fatores externos (como fauna, flora, clima), é complexa.

Existem metodologias aplicadas aos solos que por exigirem o conhecimento de diferentes atributos do solo (como textura, natureza da argila, estrutura) a fim de melhor compreender os resultados provenientes de tais análises, são consideradas boas indicadoras da situação do solo. A curva de retenção de água no solo é uma delas, pois consegue reunir as propriedades concernentes ao comportamento físico-hídrico do solo que ajuda a compreender, por exemplo, o balanço e a disponibilidade da água às plantas, a dinâmica da água e solutos no solo, a infiltração e no manejo da irrigação (TORMENA; SILVA, 2002; LUCAS et al., 2011).

Todos esses importantes estudos, dependem da porosidade dos solos que, em condições naturais, é ocupada por água e ar. A curva de retenção permite determinar a distribuição do tamanho dos poros no solo (LIBARDI, 2005). Assim, é possível obter relações de dependência entre os coeficientes das equações matemáticas que descrevam a curva de retenção e diversas propriedades do solo. Esta curva pode ser utilizada na avaliação da qualidade do solo e indicar práticas adequadas de produção agrícola (MACHADO et al., 2008; LUCAS et al., 2011).

A forma como esses poros estão organizados, a partir do arranjo das partículas primárias dos solos, em grupos de agregados, define a estrutura do solo (BRADY; WEIL, 2002). A estrutura do solo é uma das propriedades físicas que mais fornece dados sobre o

comportamento do solo em relação à água. É por isso, que além da curva de retenção, a análise da estrutura do solo através da curva de retração também é importante para conseguir mais informações sobre o complexo sistema solo.

Cada solo possui comportamento característico que relaciona o seu conteúdo de água à energia com que a água é retida pela fase sólida (potencial matricial do solo). Da mesma forma, a retração ocorrida pelos solos pode também ser caracterizada pela sua curva de retração, que mostra a variação do volume de solo em função do teor de água, durante a secagem do solo (BRAUDEAU, 2001).

A curva de retração do solo entra na abordagem da hidropedologia que consiste em compreender as variações dos solos na paisagem pelas interações solo-água. Esta curva está intimamente relacionada ao conceito de pedoestrutura, e permite definir fisicamente as variáveis e os parâmetros que descrevem a estrutura e organização do solo (água, ar e sólidos em suas relativas repartições). As formulações das equações físicas provenientes da curva de retração, descrevem as propriedades hidro-estruturais do solo, tais como a curva de retração e de retenção de água (SALAHAT et al., 2012). Esta é uma outra boa análise indicativa da situação do solo, levando em consideração seus atributos intrínsecos, bem como os fatores externos.

O objetivo deste capítulo foi o de descrever, discriminar e testar as relações existentes entre os parâmetros da curva de retenção de água no solo e da curva de retração do solo, resultantes da caracterização dos solos distribuídos ao longo de duas topossequências sob floresta e pastagem em projeto de assentamento de agricultura familiar da Amazônia Oriental.

## **5.2 Material e Métodos**

### **5.2.1 Localização e considerações gerais**

A área em estudo localiza-se no município de Nova Ipixuna, região sudeste do Estado do Pará (Figura 5.1). O estudo foi desenvolvido em um assentamento de agricultura familiar, no Projeto de Assentamento Agroextrativista Praia Alta Piranha, onde se localizam as topossequências escolhidas para este estudo.



Figura 5.1 - Localização do município de Nova Ipixuna

O clima da região é equatorial super-úmido (Am), na transição para clima tropical com estação seca de inverno (Aw). A vegetação característica é a Floresta Equatorial Latifoliada, com áreas de floresta nativa preservada (COPSERVIÇOS, 2009). Os solos da área em estudo foram classificados como Argissolo Amarelo distrófico saprolítico argiloso cascalhento (EMBRAPA, 2013), e estão localizados sob uma floresta nativa e sob uma pastagem em pousio. A declividade média das áreas em estudo são de 20% em floresta e 14% em pastagem.

### 5.2.2 Protocolo de amostragem

Os solos estudados se localizam em topossequências sob dois tipos de uso do solo: floresta e pastagem. Foram analisados três perfis, em cada tipo de uso, em três posições do relevo: à montante, na parte intermediária e à jusante. As siglas empregadas foram F1, F2, F3, para floresta, e P1, P2, P3, para pastagem, organizados de montante à jusante, respectivamente. Os horizontes foram descritos nesta parte do trabalho como: A-AB-B1-B2-BC-C. Como foi feita uma tipologia dos horizontes a fim de facilitar as análises estatísticas, os horizontes foram divididos em B1 e B2.

As curvas de retenção do solo foram feitas a partir de amostras indeformadas, coletadas em cilindros metálicos de 100 cm<sup>2</sup>. Em cada horizonte do solo, foram coletadas 3 repetições.

Amostras indeformadas de solo foram coletadas com cilindros metálicos de volume conhecido (100 cm<sup>3</sup>) para obtenção das curvas de retração do solo. A retração do solo foi medida em quatro profundidades de cada perfil. Esses pontos foram selecionados no momento da descrição morfológica, devido apresentarem características importantes ao funcionamento hídrico destes solos.

### 5.2.3 Curva de retenção de água no solo

As curvas de retenção de água (CRA) no solo foram determinadas com o uso de mesas de tensão e câmaras de pressão de Richards, nos potenciais matriciais de ( $\Psi$ ) de -1, -2, -4, -6 -8, -10, -33, -50, -75, -100, -150, -300 e -500 kPa, segundo metodologia descrita em EMBRAPA (1997). A partir dos dados de umidades saturada ( $\theta_s$ ) e residual ( $\theta_r$ ), foi possível calcular capacidade de água disponível (CAD) a 6 e 10 kPa (REICHARDT, 1987), porosidade total do solo (PorTot), macroporosidade (macro) e microporosidade (micro) (Tabela 3.3)

O ajuste das curvas de retenção de água no solo aos dados experimentais foi realizado empregando a equação proposta por van Genuchten (1980), com o uso do programa RETC (van GENUCHTEN; LEIJ; YATES, 1991) eq. (1) (Anexo H). Nesse programa, o método dos mínimos quadrados é usado para encontrar os parâmetros da curva (van GENUCHTEN, 1980), que melhor se ajusta aos dados experimentais obtidos. Em todos os ajustes das amostras, foi adotada a restrição de Mualem,  $m=1-1/n$  (MUALEM, 1986).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \psi_m)^n]^m} \quad (1)$$

Em que  $\theta$  é a conteúdo de água do solo (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>),  $\psi$  é o potencial mátrico da água no solo (kPa),  $\theta_s$  é o conteúdo de água na saturação (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>),  $\theta_r$  é o conteúdo de água residual (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e  $n$  e  $m$  ( $m = 1-1/n$ ) são parâmetros empíricos adimensionais de ajuste e  $\alpha$  é um parâmetro expresso em kPa<sup>-1</sup>.

### 5.2.4 Curva de retração de água no solo

As amostras indeformadas para obtenção da curva de retração foram medidas pelo retratômetro a fim de obter a diferença entre os volumes e massas iniciais e finais do solo. A partir da obtenção dessa diferença, iniciou-se o ajuste das curvas para obtenção dos

parâmetros necessários:  $V_0$ , que é o volume do solo no estado seco; o  $K_{bs}$ , a inclinação das fase de retração linear, e se refere à fase básica;  $W_N$ , é o conteúdo de água referente aos poros dos agregados primários secos;  $W_M$ , é o conteúdo máximo de água referente aos poros dos agregados primários saturados; e o ponto de saturação, que foi considerado o ponto mais úmido medido na curva (BRAUDEAU, 2001; BRAUDEAU; SENE; MOHTAR, 2005).

Os horizontes analisados, em quatro profundidades do perfil, foram identificados como A, B, BC e C.

### 5.2.5 Análise estatística

Por meio do pacote estatístico R (R Core Team 2012), foram realizadas análises de componentes principais normalizadas (ACP) e análise discriminante (AD) com o objetivo de avaliar o grau de discriminação dos horizontes em função: 1) do tipo de uso do solo; 2) da posição do perfil na vertente e 3) das classificações dos horizontes, na retenção de água do solo e na retração do solo, através dos parâmetros empíricos e/ou quantitativos de cada curva. A significância estatística do índice avaliando a separação entre os tipos de horizonte (variância inter-classes) foi testada através do teste de permutações de Monte Carlo (TER BRAAK, 1995). As análises foram conduzidas a partir dos pacotes adicionais “ade4” (DRAY; DUFOUR; THIOULOUSE, 2013), e “FactoMineR” (HUSSON; JOSSE; MAZET, 2012).

## 5.3 Resultados e Discussões

### 5.3.1 Análise em Componentes Principais (ACP) e Análise Discriminante (AD) em curvas de retenção de água no solo

A ACP e AD são métodos descritivos multivariados, onde existe  $n$  observações para 4 variáveis quantitativas, no caso das curvas de retenção:  $\alpha$ ,  $n$ ,  $\theta_s$  e  $\theta_r$ . A ACP dos parâmetros da equação de van Genuchten separou os pontos de pastagem e floresta, as posições da vertente e os horizontes do solo (Figura 5.2).

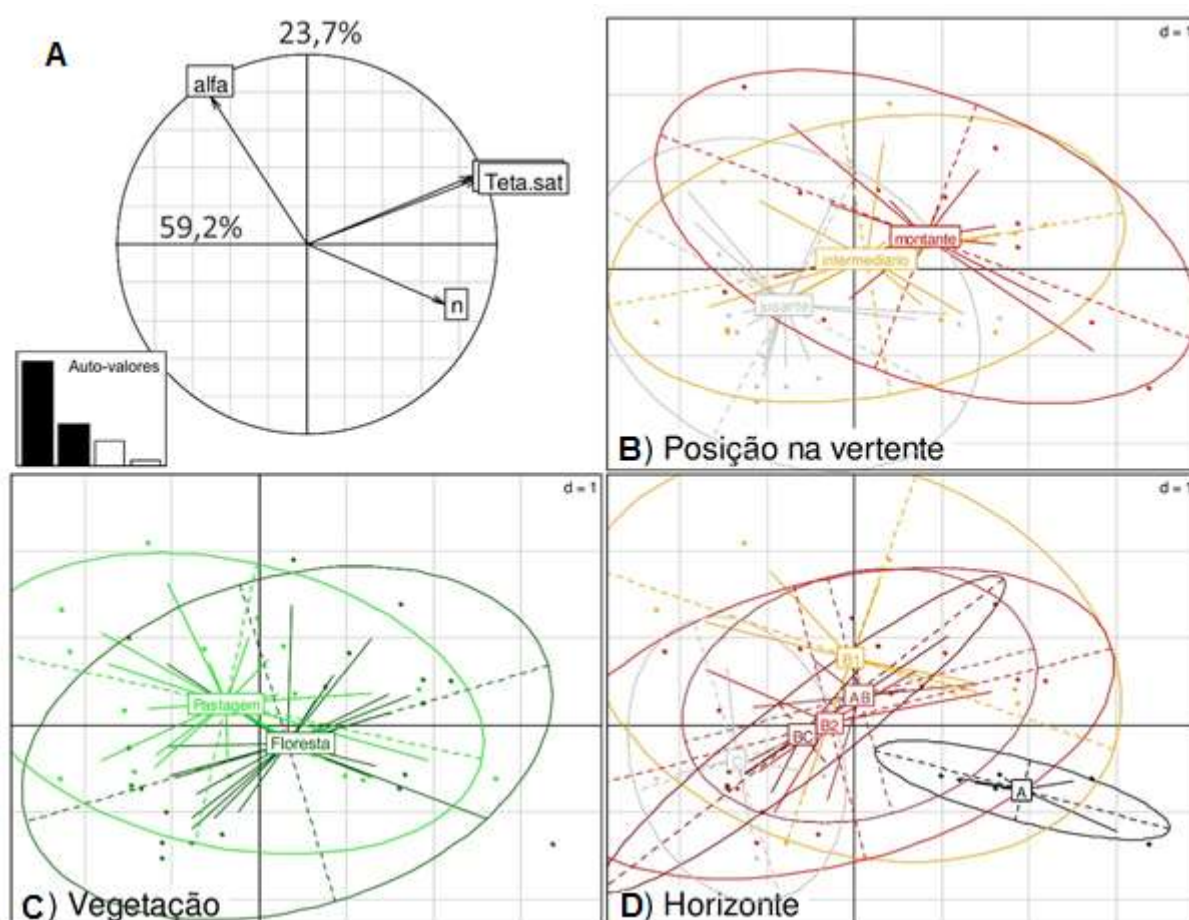


Figura 5.2 - Análise em Componentes Principais normalizadas dos parâmetros de van Genuchten gerado a partir da curva de retenção de água no solo ( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$  e  $n$ ), nos perfis de solo em floresta e pastagem. Círculo de correlações e posições dos parâmetros (A) em relação aos componentes principais. Posições dos pontos de observações agrupados por posições no relevo (B), tipo de vegetação (C) e horizontes (D)

As variáveis que mais contribuíram para a componente principal 1 (explica 59,2% da variância total) foram as umidades saturada e residual ( $\theta_s$  e  $\theta_r$ ), no lado positivo do eixo 1 e o parâmetro  $n$ , no lado negativo do eixo 2 (Figura 5.2 A). As posições na vertente, apresentaram a sequência montante-intermediária-jusante, sendo que os perfis localizados à jusante da topossequência se distanciaram mais das outras posições, o que indica diferenças entre si (Figura 5.2 B). As coberturas vegetais também não foram semelhantes, devido à distância que apresentam entre si na disposição do gráfico (Figura 5.2 C), bem como os horizontes, em destaque o horizonte A, que apresentou atributos diferenciados dos demais (Figura 5.2 D). O teste de permutação de Monte Carlo mostrou que 35% ( $P$ -value < 0,004) da variância total (dos parâmetros da curva) deve-se à diferenciação entre os horizontes.



A Figura 5.3, mostra as correlações dos parâmetros da curva de retenção com outras variáveis importantes à forma da curva, por exemplo argila com o  $\alpha$ . As variáveis em azul são projetadas no plano fatorial definido pela ACP dos 4 parâmetros.

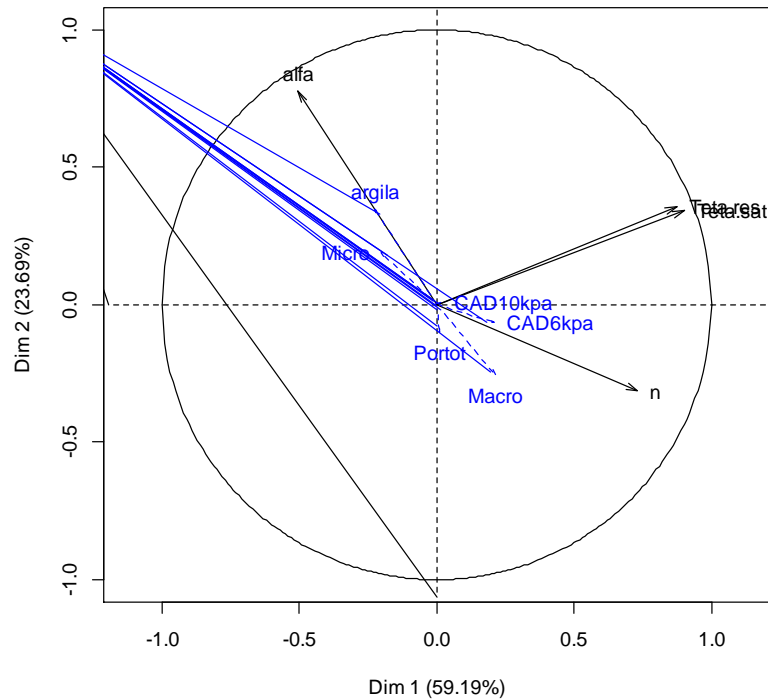


Figura 5.3 - ACP dos parâmetros de van Genuchten e suas relações com os parâmetros da CRA (argila, PorTot, macro, micro CAD 6 e 10 kPa)

A componente principal 2, explica 23,7% da variância total dos parâmetros de van Genuchten. O  $\alpha$ , parâmetro empírico da CRA, tem relação com o teor de argila e a microporosidade do solo. A relação de  $\alpha$  foi inversa à macroporosidade do solo, e às capacidades de água disponível (CAD) a 6 e 10 kPa. Os valores de 6 e 10 kPa foram selecionados por serem pertinentes à capacidade de campo do solo (REICHARDT, 1987; MEYER; GEE, 1999). As correlações de  $\alpha$  ao teor de argila e à microporosidade são pertinentes.

O parâmetro  $n$ , de maior participação no eixo 1, está relacionado à forma da curva de retenção, sendo afetado pela variação da tensão da água no solo (SILVA et al., 2006). Este parâmetro apresentou oposição à alfa. Assim sendo, está explicado a relação de  $n$  com os macroporos e à disponibilidade da água do solo na capacidade de campo, pois estes apresentam importantes variações no solo e contribuem diretamente com a forma da curva de retenção. Enquanto isso,  $\alpha$  mostrou maior relação à uma matriz do solo densa, de textura argilosa e maior presença de microporos.

Outro fator a ser observado, é a divisão dos horizontes. A separação observada nestas análises coincidem com os compartimentos definidos na análise morfológica realizada com a técnica da análise estrutural.

Uma maior exploração dos dados foi possível com uma ACP inter-classes, que confirmou a diferença do horizonte A, em relação aos outros horizontes, mais agrupados (Figura 5.4).

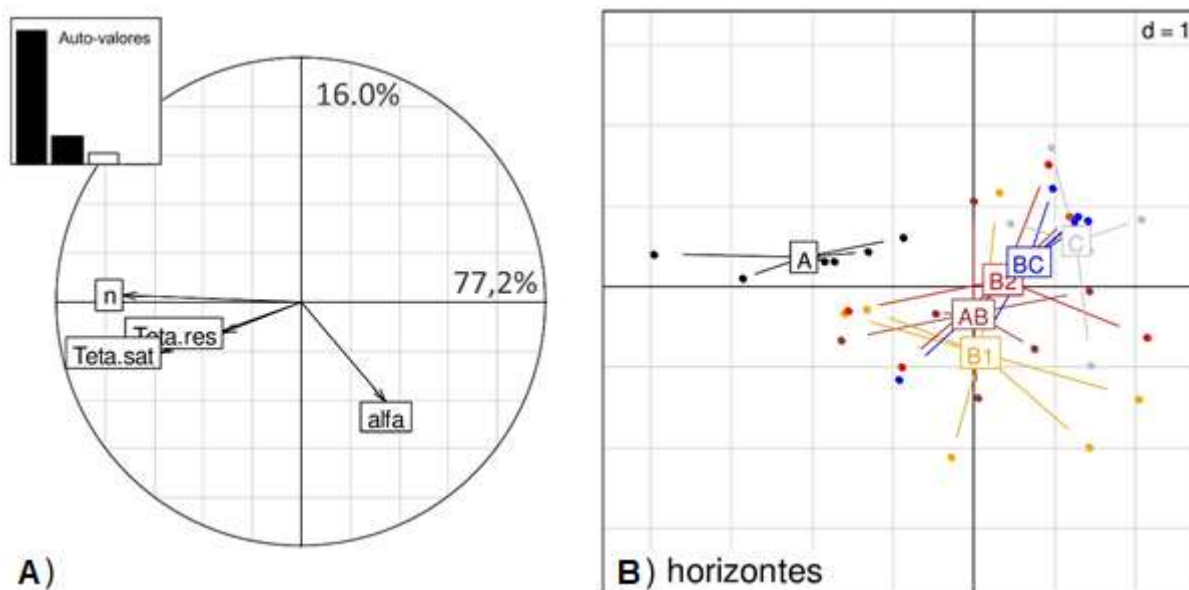


Figura 5.4 - ACP inter-classes apresentando a relação dos parâmetros da CRA ( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$  e  $n$ ) e os principais horizontes encontrados nas toposequências (A, AB, B1, B2, BC e C)

A Figura 5.4, mostra maior contribuição do parâmetro  $n$ , no eixo 1 (77,2%), enquanto que no segundo plano, o parâmetro  $\alpha$ , teve maior importância no eixo 2 (16%). A separação entre o horizonte A e os demais horizontes no eixo 1, se dá com a contribuição do parâmetro  $n$  e  $\theta_s$ .

O horizonte A superficial, possui textura mais arenosa e estrutura predominantemente granular, AB, possui também textura mais arenosa a franco, porém começa a apresentar estruturas em blocos. Assim, a relação do horizonte A, com o parâmetro  $n$ , sensível à forma da curva, é alta, pois, quanto mais arenoso o solo, maior presença de macroporos, maior facilidade em perder água e maiores variações na curva de retenção. O horizonte superficial também conta com a participação da matéria orgânica, que contribui para o aparecimento da estrutura granular. As curvas de retenção, capítulo 3, mostraram essa maior variação de forma, em relação às demais curvas, corroborando com os dados aqui encontrados.

A relação oposta ocorre com o parâmetro  $\alpha$ , que é relacionado à uma textura mais fina, com menor variação da umidade e maior presença de microporos (Figura 5.4A). Os perfis de solo apresentaram aumento de argila em profundidade. Com esse incremento de argila, apareceram a partir dos horizontes subsuperficiais as estruturas em blocos subangulares e angulares, e por vezes prismática. Os dados micromorfométricos, contidos no capítulo 3, mostraram participação nesta matriz mais argilosa, de porosidade arredondada menor, e poros complexos menores, que confere a estes solos, maior retenção de água.

Esse fator posicionou as variáveis da Figura 5.4, em disposição gradual, variando do mais argiloso (AB e B) até os horizontes que apresentam menor conteúdo de argila. A análise discriminante confirmou a tendência destes resultados encontrados pela ACP (Figura 5.5).

Os parâmetros  $\alpha$  e  $n$  apresentaram relações inversas entre si, e  $\theta_s$  e  $\theta_r$  mostraram relações diretas entre si, dependentes da textura, da estrutura e da variação da umidade volumétrica nos perfis e ao longo das topossequências (Anexo H).

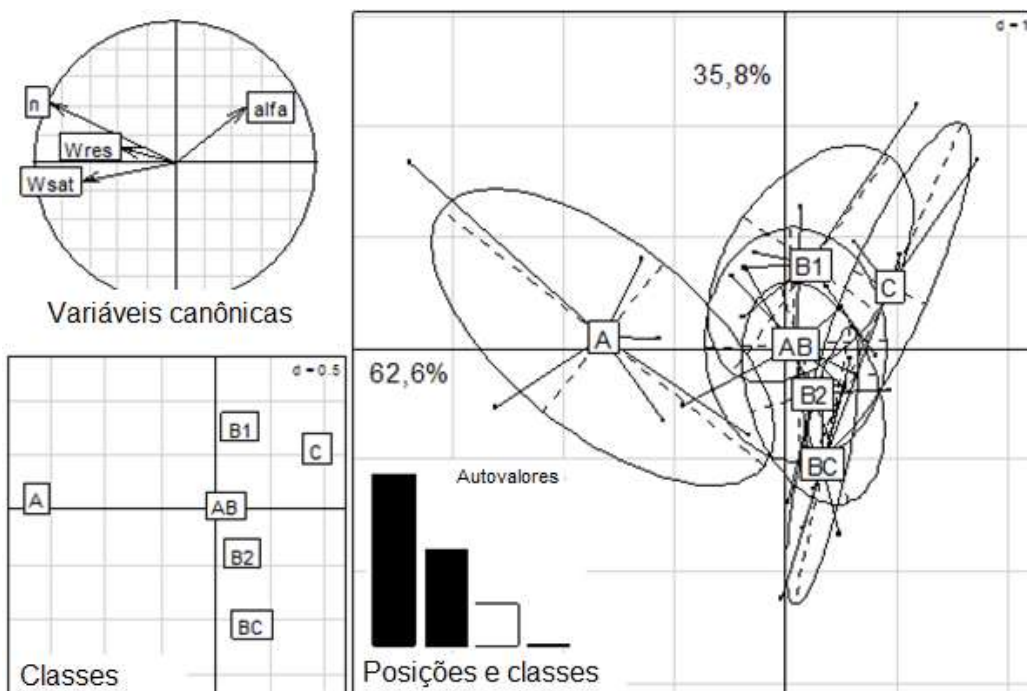


Figura 5.5 - Análise discriminante dos parâmetros da CRA ( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$  e  $n$ ) e as relações com os principais horizontes encontrados nas topossequências (A, AB, B1, B2, BC e C)

### 5.3.2 Análise em Componentes Principais (ACP) e Análise Discriminante em curvas de retração do solo

Os métodos descritivos da ACP e AD foram utilizados para avaliação de 5 variáveis quantitativas das curvas de retração:  $W_M$ ,  $W_N$ ,  $K_{b_s}$ ,  $V_o$  e Sat, a umidade do ponto inicial na curva, mais perto da saturação em água.

A primeira ACP considerou a variância total dos dados. A variância total dos dados foi maximizada no primeiro eixo, o componente principal 1.

A ACP normalizada dos cinco parâmetros medidos pela curva de retração distribuiu ao longo do primeiro componente principal (59,9% da variabilidade total), no lado positivo, a umidade à saturação, os pontos de umidade, e  $V_o$ . O segundo componente explicou 21,1%, com maior contribuição de  $K_{b_s}$ . Sendo assim, o primeiro plano fatorial explicou 81% da variabilidade total, correspondente aos dois primeiros componentes principais (Figura 5.6). O teste de permutação de Monte Carlo mostrou que 35,5% ( $P$ -value < 0,001) da variabilidade total (dos parâmetros da curva) deve-se à tipologia dos horizontes.

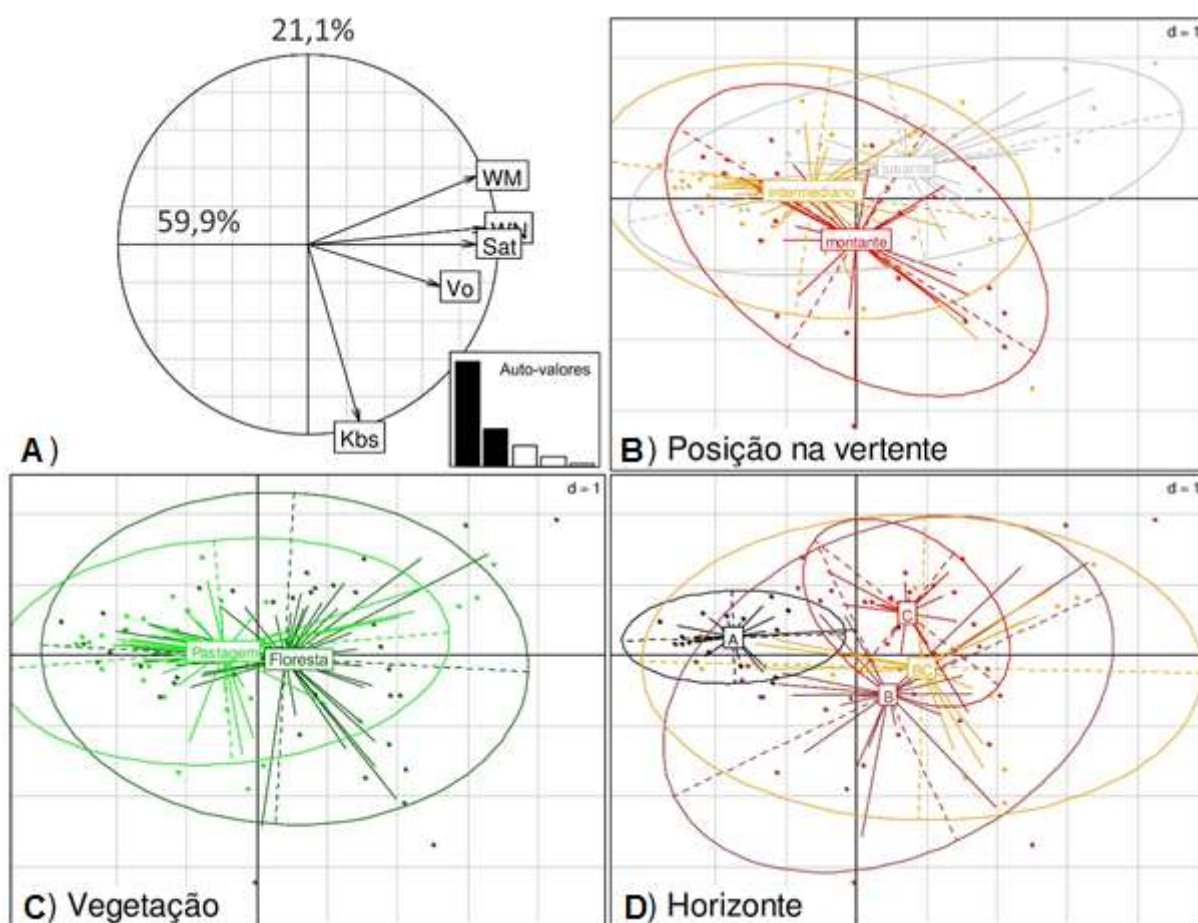


Figura 5.6 - Análise em Componentes Principais (ACP) normalizada dos parâmetros de retração do solo, nos perfis estudados. Círculo de correlações (A) e os perfis de observações e suas posições no relevo (B) com montante – F1 e P1, parte intermediária – F2 e P2, e jusante – F3 e P3, e o tipo de vegetação existente na topossequência: floresta e pastagem, (C) com os horizontes classificados em A, B, BC e C, para estas análises

Os parâmetros da curva de retração mostraram proximidade entre as variáveis (Figura 5.6A). Os horizontes apresentaram maior homogeneidade em superfície, horizonte A e em profundidade, horizonte C (Figura 5.6D). De maneira geral, os pontos analisados apresentaram grande variação dos dados, demonstrados pela distribuição dos pontos no primeiro plano fatorial (Figura 5.6 B, C, D).

A variabilidade geral explicada pela CP 1, tem maior importância da variável  $W_N$ , que diz respeito ao baixo conteúdo de água nos agregados primários, sendo que este ponto está localizado próximo ao ponto de murcha permanente. Já na CP 2, o parâmetro  $K_{bs}$ , correspondente à fase de retração básica do solo, e influenciado pelo efeito da textura, apresentou relevante importância no comportamento intrínseco do solo. Em contraposição a estes parâmetros referentes à porosidade de menor diâmetro do solo, está o horizonte A, mais arenoso, e com maior macroporosidade, e devido isso, ele se encontra separado dos horizontes de textura mais fina (Figura 5.6D). Segundo o teste de permutações de Monte Carlo, 29,9% da variância total dos solos são explicadas pela tipologia dos horizontes.

Os parâmetros da curva de retração apresentaram grande correlação quando analisados os horizontes do solo. O eixo 1 da ACP inter-classes explicou maior parte dos agrupamento das variáveis (Figura 5.7)

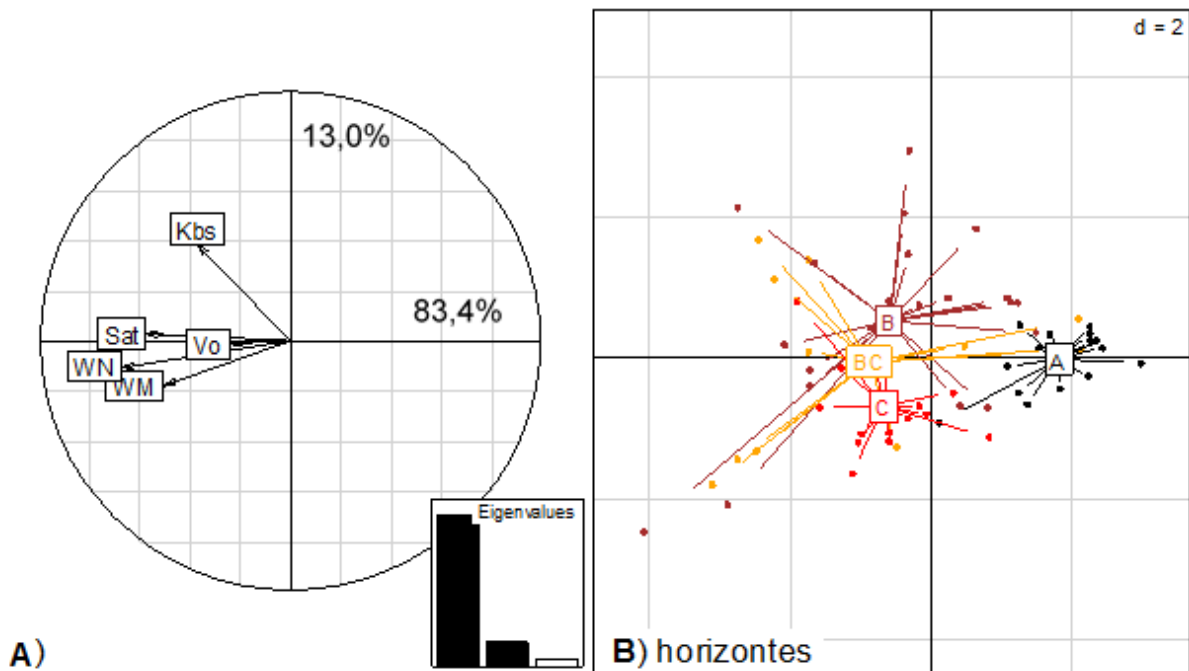


Figura 5.7 - Análise em Componentes Principais (ACP) inter-classes dos parâmetros de retração do solo, nos quatro horizontes estudados. Círculo de correlações (A) e observações nos horizontes classificados em A, B, BC e C (B)

Os parâmetros  $Sat$ ,  $W_M$  e  $W_N$ , aparecem agrupados pois referem-se às umidades da curva de retração, e são relacionados entre si, pois são umidades subseqüentes.

A fase de retração linear básica,  $K_{bS}$ , causada pelo plasma argiloso, sempre aparece em oposição às variáveis  $W_M$  e  $W_N$  (Figura 5.7). Isto demonstra uma relação inversamente proporcional. Essa fase de retração,  $K_{bS}$ , está compreendida entre  $W_M$  e  $W_N$  e refere-se à água básica ( $w_{bS}$ ), que é a água útil na microporosidade expansível, é correspondente a um estado de saturação dos agregados primários e está pouco acessível às raízes. O desaparecimento da água básica provoca uma retração equivalente aos agregados primários (BRAUDEAU, 2001; BRAUDEAU; SENE; MOHTAR, 2005).

No entanto, em relação à distribuição dos horizontes, a importância dos parâmetros da curva de retração, foi pequena (Figura 5.7B), quando comparado a algum outro fator que as posicionou desta forma, com separação do horizonte superficial e os horizontes mais profundos. Acredita-se que a textura teve importância primordial para tais resultados, como demonstrados pelas CRAs.

A análise discriminante confirmou as tendências e agrupamentos existentes pelos parâmetros da curva de retração do solo (Figura 5.8). Mais uma vez, o horizonte A, responsável pela maior porosidade complexa do solo, com estrutura granular e textura mais arenosa, foi discriminado separadamente dos demais horizontes, que possuem maior microporosidade, porosidade arredondada pequena, menor quantidade de porosidade complexa grande, estrutura predominante em blocos subangulares e textura argilosa.

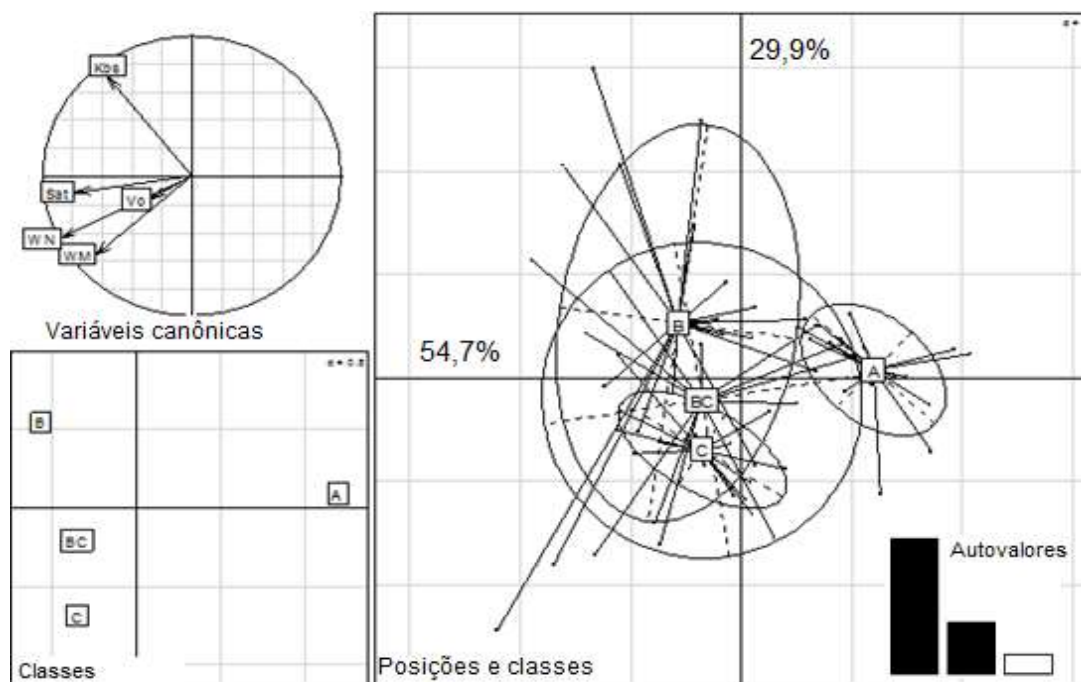


Figura 5.8 - Análise discriminante dos parâmetros da curva de retração do solo ( $Sat$ ,  $W_M$ ,  $W_N$  e  $V_0$ ) e as relações com os principais horizontes encontrados nas toposequências (A, B, BC e C).

## 5.4 Conclusões

As análises multivariadas das curvas de retenção de água no solo e de retração do solo, apresentaram grandes diferenças entre os horizontes superficiais e os de subsuperfície.

A curva de retenção de água no solo, medida resultante de importantes características do solo, como textura, estrutura, porosidade; apresentou importantes relações destes atributos com os parâmetros empíricos da curva, conseguidos através dos ajustes feitos pela equação de van Genuchten (1980). O parâmetro  $n$ , mostrou relação com a macroporosidade e com as tensões referentes à capacidade de campo (6-10 kPa), que se relacionam com a forma da curva de retenção. Em contraposição,  $\alpha$  foi bem relacionado à microporosidade do solo e ao conteúdo de argila, fatores que contribuem para maior retenção de água no solo.

A curva de retração do solo também mostrou importância na diferenciação de seus parâmetros a partir da diferença de textura apresentada entre as camadas superficiais e mais profundas. Os teores de umidade se relacionaram e agruparam-se em todas as análises. O parâmetro  $K_{bs}$ , que é a razão da diferença de volume e de umidade entre  $W_M$  e  $W_N$  na curva de retração, expressou comportamento inverso às umidades  $W_M$  e  $W_N$ , sendo o representante



de maior participação na CP2, referente a um comportamento mais intrínseco do solo, que de forma indireta está relacionado à textura argilosa.

## Referências

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 13<sup>th</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 960 p.

BRAUDEAU, E. Pédostructure et caractérisation pédohydrrique. In: BRAUDEAU, E.; MTIMET, A. (Ed). **Un système d'information pédologique, le sirs-sols du périmètre irrigué de cebala: Borj-Touil dans la Basse Vallée de la Majerda**. Tunis: Ministère de l'Agriculture, 2001. 134 p. (Bulletin sols de Tunisie, n<sup>o</sup>spécial).

BRAUDEAU, E.; SENE, M.; MOHTAR, R.H. Hydrostructural characteristics of two African tropical soils. **Eur. J. Soil Sci. completar o título**, Oxon, v. 56, p. 375–388, 2005.

COOPERATIVA DE PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS. **Plano de recuperação do Projeto de Assentamento Agroextrativista Praia Alta Piranha**. Marabá, 2009. 179 p.

DRAY, S.; DUFOUR, A-B.; THIOULOUSE, J. **Package 'ade4' – Analysis of Ecological Data: exploratory and Euclidean methods in environmental sciences**. Lyon, 2013. Disponível em: <<http://cran.r-project.org/web/packages/ade4/ade4.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2013.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 2013. 353 p.

HUSSON, F.S.; JOSSE, J. Le; MAZET, J **FactoMineR. Multivariate exploratory data analysis and data mining with R: R package version 1.18**. 2012

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.

LUCAS, J.F.R.; TAVARES, M.H.F.; CARDOSO, D.L.; CASSARO, F.A.M. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1957-1973, 2011.

MACHADO, J.L.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C.A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção da água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 495-502, 2008.

MEYER, P.D.; GEE, G.W. Flux-based estimation of field capacity. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 125, p. 595-599, 1999.

MUALEM, Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils, predictions and formulas. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: ASA, 1986. v. 9, chap. 31, p. 799–823.



R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2012. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 12 fev. 2012.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188 p

SALAHAT, M.; MOHTAR, R.H.; BRAUDEAU, E.; SCHULZE, D.G.; ASSI, A. Toward delineating hydro-functional soil mapping units using the pedostructure concept: a case study. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxon, v. 86, p. 15-25, Aug. 2012.

SANTOS, M. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. 4. ed. São Paulo: EDUSP, 2006. 384 p.

SILVA, E.M. da; LIMA, J.E.F.W.; AZEVEDO, J.A. de; RODRIGUES, L.N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 323-330, 2006.

TER BRAAK, C.J.F. Ordination. In: JONGMAN, R.H.G.; TER BRAAK, C.J.F.; TONGEREN, O.F.R. van (Ed.). **Data analysis in community and landscape ecology**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. p. 91-173.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 305-314, 2002.

van GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

van GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. Riverside: USDA, ARS, US Salinity Laboratory, 1991. 100 p.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo, motivado pela problemática da evolução do uso do solo na Amazônia Oriental, e pela escassez de dados que ajudem a compreender este bioma, se propôs a caracterizar os solos sob floresta e pastagem em áreas de agricultura familiar. Baseado nisto, hipóteses foram criadas, e no decorrer da pesquisa foi verificado que (i) o funcionamento dos solos está relacionado principalmente às suas características naturais pois, os atributos intrínsecos do solo foram preponderantes ao seu comportamento, ou seja, a textura foi o fator primordial de diferenciação entre os horizontes. O tipo de uso do solo chegou a influenciar a quantidade e o tipo da porosidade existente em superfície, sob floresta, com maior ocorrência de porosidade complexa grande, e pastagem. A contribuição das raízes mais profundas da floresta também existiu, mas não foi preponderante para a diferenciação do comportamento dos solos; (ii) as variações mais importantes nos solos ocorreram nos horizontes, como: o aumento da densidade do solo em profundidade, relacionado à variação de textura; a mobilização do ferro, a partir do horizonte mais argiloso e adensado; a baixa condutividade hidráulica e retração dos solos, juntamente ao aumento da retenção da água nos horizontes mais argilosos; estiveram relacionados, à divisão dos horizontes e/ou compartimentos do solo, e finalmente, (iii) o uso de parâmetros relacionados às medidas físico-hídricas e hidroestruturais do solo, foram sensíveis às características e propriedades dos solos.

A partir disto foi possível perceber que, no caso estudado, os processos de degradação na verdade, são processos naturais decorrentes dos próprios solos, pois o fato de a pastagem não estar em uso contínuo, as principais alterações do solo foram naturais, havendo somente poucas alterações devido à utilização da pastagem há anos atrás. A caracterização geral permitiu conhecer o sistema e os processos que ocorrem *in locu* nestes solos.

Os resultados mais relacionados aos atributos intrínsecos do solo, do que ao tipo de uso, se deve ao fato de que a área sob pastagem, por estar em pousio, apresentou pouca alteração estrutural devido ao manejo; condição essa diferenciada nos sistemas de pastejo amazônicos, que, em geral, apresentam elevado grau de degradação. No entanto, a escolha da área se deu pelas características dos seus solos, que representam grande parte dos solos do projeto de assentamento agroextrativista Praia Alta Piranhiera. Este estudo indicou, de uma forma geral, que estes solos possuem importantes limitações ao seu uso, o que corrobora com a observação de Steeg et al. (2003): “estudos mostram que a região Norte apresenta a maior

limitação para uso dos solos quando comparados à média nacional (...) os assentamentos rurais, se concentram em solos com condições inferiores de uso, quando considerado a profundidade de enraizamento, capacidade de retenção de água, disponibilidade de nutrientes e susceptibilidade à erosão. É evidente que há pouca escolha de localização dos PAs em função de tipos e qualidades do solo. Grande parte dos assentamentos rurais se situa em áreas de elevada restrição edáfica...”

A partir de afirmações como esta, e os resultados apresentados neste trabalho, é evidente que os solos possuem restrições. É importante elaborar formas viáveis de adaptação para reprodução da família em ambientes com estes tipos de solos. O cunho agroextrativista, principal motivador de criação do projeto de assentamento estudado, é uma alternativa que contribui com a permanência do agricultor no local, sendo também um tipo de sistema que não altera a cobertura do solo, pois em outros casos, existentes no próprio assentamento, com o mesmo tipo de solo, mas com uso intensivo da pastagem, os solos estão em situações de erosão avançada, que contribuirá em poucos anos com a saída do agricultor no assentamento. Este estabelecimento agrícola foi estudado, porque é um representativo das características naturais da maioria dos solos da região. O que não impede de também ser aplicado em outras áreas com diferentes intensidades de usos.

Uma questão que também concerne à reprodução da família no local é a de como o agricultor pode viver tranquilamente do sustento da floresta, ou sistemas agroextrativistas, e se inserir na economia local? É possível a criação de um cenário ideal onde se consiga produzir a partir de solos com características limitantes e permita conservar a cobertura vegetal amazônica?

Essas e várias outras questões são pertinentes quando se pensa em melhorar a vida do agricultor e conservar a floresta amazônica. A aplicação de técnicas científicas que resultem em práticas relevantes e adequadas ao cotidiano, são cabíveis também ao meio acadêmico. Assim, os conhecimentos obtidos através desta tese podem ser consideravelmente ampliados. Neste âmbito, há algumas sugestões de trabalhos futuros, como:

- Simulação de cenários de uso do solo, que integrem a floresta às atividades agrícolas e pecuárias, adaptáveis à região e à economia local;
- Indicadores da qualidade do solo que sejam de fácil apreensão pelo agricultor;
- Estudos sobre a fauna do solo, que relacionem sua ocorrência às variações climáticas no decorrer do ano.

**ANEXOS**



## Anexo A - Morfologia e classificação dos solos sob diferentes usos com floresta e pastagem

(continua)

Horizonte	Prof. (m)	Cor Úmida (Munsell)	Argila (%)	Textura	Estrutura	Classificação
<b>Montante</b>						
F1 - A	0,00-0,06	10YR 4/4 (Bruno-amarelado-escuro) (75%) 10YR 5/6 (Bruno-amarelado)	15	Franco-arenosa	Bs, gr, me, mo, fo	Argissolo Amarelo distrófico saprolítico argiloso cascalhento - PAd (Brazilian System of Soil Classification, 2013); Typic Haplustults (Soil Taxonomy, 2010); Haplic Acrisols Clayic (WRB-FAO, 2006).
F1 - AB	0,06-0,17	10YR 5/6 (Bruno-amarelado)	33	Franco-argilo-arenosa	Bs, gr, p, me, mo, fo	
F1 - Bt1	0,17-0,44	10YR 5/8 (Bruno-amarelado)	40	Areno-argilosa	Bs, gr, p, mo	
F1 - Bt2	44-62	10YR 5/8 (Bruno-amarelado)	50	Argilosa	Bs, gr, p, me, mo	
F1 - BC	62-99	7,5YR 5/6 (60%) (Bruno-forte) 10YR 6/8 (Bruno-amarelado)	60	Argilosa	Bs, p, me, fo	
F1 - C	99-163+	5YR 5/8 (40%) (Vermelho-amarelado) 5YR 6/8 (15%) (Amarelo-avermelhado) 10YR 7/8 (Amarelo) 2,5Y 7/8 (Amarelo) 10YR 6/8 (Bruno-amarelado)	48	Argilosa	Bs, p, mo, fo	
<b>Intermediário</b>						
F2 - A	0-6	10YR 5/6 (Bruno-amarelado)	13	Franco-arenosa	Bs, gr, p, me, fo	Argissolo Amarelo distrófico saprolítico argiloso cascalhento - PAd (Brazilian System of Soil Classification, 2013); Typic Haplustults (Soil Taxonomy, 2010); Haplic Acrisols Clayic (WRB-FAO, 2006).
F2 - AB	6-26	10YR 5/8 (Bruno-amarelado)	28	Franco-argilo-arenosa	Bs, p, me, mo	
F2 - Bt1	26-45	10YR 6/8 (Amarelo-brunado)	38	Franco-argilo-arenosa	Bs, gr, p, mo	
F2 - Bt2	45-63	10YR 5/8 (85%) (Bruno-amarelado) 7,5YR 5/6 (Bruno-forte)	58	Argilosa	Bs, gr, p, me, fo	

Anexo A - Morfologia e classificação dos solos sob diferentes usos com floresta e pastagem

(continuação)

Horizonte	Prof. (cm)	Cor Úmida (Munsell)	Argila (%)	Textura	Estrutura	Classificação
F2 - BC	63-90	2,5YR 5/6 (70%) (Vermelho) 2,5Y 6/8 (Amarelo-oliváceo)	45	Argilosa	Bs, me, mo	
F2 - C	90-165+	2,5YR 5/8 (50%) (Vermelho) 2,5YR 6/8 (15%) (Vermelho-claro) 2,5YR 8/3 (10%) (Rosado) 2,5YR 4/4 (10%) (Bruno-avermelhado) 10YR 6/8 (10%) (Amarelo-brunado) 2,5Y 6/8 (5%) (Amarelo-oliváceo)	43	Argilosa	Bs, me, g, fo	
<b>Jusante</b>						
F3 - A	0-12	10YR 3/3 (80%) (Bruno-escuro) 10YR 5/6 (Bruno-amarelado)	15	Franco-arenosa	Bs, gr, p, me, mo, fo	Argissolo Amarelo distrófico saprolítico argiloso cascalhento - PAd (Brazilian System of Soil Classification, 2013); Typic Haplustults (Soil Taxonomy, 2010); Haplic Acrisols Clayic (WRB-FAO, 2006).
F3 - AB	12-24	10YR 6/6 (Amarelo-brunado)	25	Franco-argilo-arenosa	Bs, p, me, mo	
F3 - Bt1	24-43	7,5YR 6/8 (Amarelo-avermelhado)	30	Franco-argilo-arenosa	Bs, p, me, fo	
F3 - Bt2	43-58	7,5YR 6/6 (75%) (Amarelo-avermelhado) 5YR 5/8 (Vermelho-amarelado)	40	Areno-argilosa	Bs, me, mo	
F3 - Bt3	58-88	5YR 5/8 (60%) (Vermelho-amarelado) 10YR 6/8 (Amarelo-brunado) 2,5Y 6/8 (Amarelo-oliváceo)	38	Areno-argilosa	Bs, p, mo	

Anexo A - Morfologia e classificação dos solos sob diferentes usos com floresta e pastagem

(continuação)

Horizonte	Prof. (cm)	Cor Úmida (Munsell)	Argila (%)	Textura	Estrutura	Classificação
F3 - BC	88-127	5YR 5/8 (80%) (Vermelho-amarelado) 10YR 7/8 (Amarelo)	25	Franco-argilo-arenosa	Bs, p, me, mo, fo	
F3 - C	127-160+	2,5YR 5/8 (65%) (Vermelho) 2,5YR 4/6 (Vermelho) 10YR 7/8 (Amarelo) 2,5Y 8/4 (Pale Yellow) 7,5YR 5/6 (Bruno-forte)	23	Franco-argilo-arenosa	Bs, g, fo	
<b>Montante</b>						
P1 - A	0-5	10YR 3/3 (Bruno-escuro)	10	Franco-arenosa	Gr, p, mo	Argissolo Amarelo distrófico saprolítico
P1 - AB	5-13	2,5Y 4/4 (50%) (Bruno-oliváceo) 5YR 4/6 (Vermelho-amarelado) 2,5Y 5/6 (Bruno-oliváceo-claro)	17	Franco-arenosa	Bs, gr, me, mo	argiloso cascalhento - PAd (Brazilian System of Soil Classification, 2013); Typic Haplustults (Soil Taxonomy, 2010); Haplic Acrisols Clayic (WRB-FAO, 2006).
P1 - Bt1	13-67	10YR 6/8 (Amarelo-brunado) 10YR 3/3 (Bruno-escuro) 2,5Y 4/4 (Bruno-oliváceo)	37	Areno-argilosa	Bs, pr, p, fr, mo	
P1 - Bt2	67-93	7,5YR 6/8 (Amarelo-avermelhado)	50	Argilosa	Bs, pr, p, mo	
P1 - BC	93-121	7,5YR 6/8 (Amarelo-avermelhado) 5YR 5/8 (Vermelho-amarelado)	57	Argilosa	Bs, pr, p, me, mo	
P1 - C	121-180+	5YR 5/8 (Vermelho-amarelado) 10YR 6/8 (Amarelo-brunado) 2,5Y 7/8 (Amarelo)	50	Argilosa	Ba, p, me, fo	



Anexo A - Morfologia e classificação dos solos sob diferentes usos com floresta e pastagem

(continuação)

Horizonte	Prof. (cm)	Cor Úmida (Munsell)	Argila (%)	Textura	Estrutura	Classificação
<b>Intermediário</b>						
P2 - A	0-9	10YR 3/2 (Bruno-acinzentado muito escuro)	20	Franco-arenosa	Gr, p, me, mo	Argissolo distrófico saprolítico argiloso cascalhento - PAd (Brazilian System of Soil Classification, 2013); Typic Haplustults (Soil Taxonomy, 2010); Haplic Acrisols Clayic (WRB-FAO, 2006).
P2 - BA	9-18	10YR 5/8 (40%) (Bruno-amarelado) 7,5YR 5/8 (40%) (Bruno-forte) 5Y 4/2 (Cinzento-oliváceo)	30	Franco-argilo-arenosa	Ba, gr, p, fo	
P2 - Bt	18-44	7,5YR 6/8 (Amarelo-avermelhado) 10R 4/8 (mosqueado) (Vermelho)	40	Franco-argilosa	Ba, p, me, mo	
P2 - BC	44-85	7,5YR 6/8 (Amarelo-avermelhado) 10R 5/6 (mosqueado) (Vermelho) 10R 5/8 (mosqueado) (Vermelho) 10R 4/4 (mosqueado) (Vermelho-acinzentado) 10YR 7/8 (mosqueado) (Amarelo)	42	Argilosa	Ba, pr, p, me, mo, fo	
P2 - C	85-160+	10R 3-4/4 (Vermelho-escuro-acinzentado) 10R 4/6 (Vermelho) 10R 4/8 (Vermelho) 10R 6/8 (Vermelho-claro) 10R 7/6 (Vermelho-claro) 2,5YR 6/8 (Vermelho-claro) 2,5YR 7/8 (Vermelho-claro)	27	Franco-argilosa	Ba, pr, p, me, mo, fo	



Anexo A - Morfologia e classificação dos solos sob diferentes usos com floresta e pastagem

						(conclusão)
Horizonte	Prof. (cm)	Cor Úmida (Munsell)	Argila (%)	Textura	Estrutura	Classificação
		2,5Y 7/6 (Amarelo)				
		2,5Y 6/8 (Amarelo- oliváceo)				
		10YR 6/8 (Amarelo- brunado)				

F: Floresta; P: Pastagem; Prof.: Profundidade; Tipo de estrutura: bs, bloco subangular; ba, bloco angular; gr, granular; pr, prismática; Tamanho de estrutura: p, pequena; me, média; g, grande; Grau de estrutura: fr, fraca; mo, moderada; fo, forte

## Anexo B - Granulometria e textura dos solos em uso com floresta e pastagem

Horizontes	AMG*	AG	AM	AF	AT	Silte	Argila	Textura
g kg <sup>-1</sup>								
<b>Floresta – à montante</b>								
A	174	204	195	222	795	55	150	Franco-arenosa
AB	148	124	119	220	611	61	328	Franco-argilo-arenosa
Bt1	123	104	79	189	495	104	401	Argilo-arenosa
Bt2	123	71	53	152	399	99	502	Argila
BC	70	62	41	110	283	114	603	Argila
C	144	85	41	82	352	170	478	Argila
<b>Floresta – intermediária</b>								
A	157	205	188	247	797	77	126	Franco-arenosa
AB	117	159	122	199	597	127	276	Franco-argilo-arenosa
Bt1	94	130	85	185	494	130	377	Franco-argilo-arenosa
Bt2	66	72	46	112	296	125	579	Argila
BC	110	89	44	77	320	230	450	Argila
C	80	86	55	127	348	226	426	Argila
<b>Floresta – à jusante</b>								
A	170	215	167	225	777	73	150	Franco-arenosa
AB	96	149	147	253	645	105	250	Franco-argilo-arenosa
Bt1	98	142	113	203	556	144	300	Franco-argilo-arenosa
Bt2	74	127	85	182	468	132	400	Argilo-arenosa
Bt3	75	147	103	173	498	126	376	Argilo-arenosa
BC	79	164	132	251	626	124	250	Franco-argilo-arenosa
C	63	156	113	212	544	229	227	Franco-argilo-arenosa
<b>Pastagem – à montante</b>								
A	234	166	156	241	797	103	100	Franco-arenosa
AB	214	137	132	227	710	116	174	Franco-arenosa
Bt1	107	103	84	212	506	120	374	Argilo-arenosa
Bt2	88	71	62	181	402	98	500	Argila
BC	85	62	52	145	344	83	573	Argila
C	104	65	46	126	341	161	498	Argila
<b>Pastagem – intermediária</b>								
A	180	133	118	251	682	118	200	Franco-arenosa
BA	114	113	90	247	564	136	300	Franco-argilo-arenosa
Bt	73	98	76	215	462	140	398	Franco-argilosa
BC	98	101	56	129	384	194	422	Argila
C	127	152	78	122	479	247	274	Franco-argilosa
<b>Pastagem – à jusante</b>								
A	159	188	174	289	810	115	75	Areia-franca
AB	134	142	157	318	751	124	125	Franco-arenosa
BA	88	121	110	298	617	132	251	Franco-argilo-arenosa
Bt1	109	103	78	210	500	150	350	Argilo-arenosa
Bt2	90	73	57	135	355	168	477	Argila
C	39	54	42	111	246	278	476	Argila

\* AMG: Areia Muito Grossa; AG: Areia Grossa; AM: Areia Média; AF: Areia Fina; AT: Areia Total

Anexo C – Elementos grossos (EG) existentes em quatro profundidades dos perfis de solo sob floresta e pastagem

<b>Identificação</b>	<b>EG (g g<sup>-1</sup>)</b>	<b>Identificação</b>	<b>EG (g g<sup>-1</sup>)</b>
Floresta		Pastagem	
Argissolo Amarelo distrófico saprolítico argiloso cascalhento – Montante			
5	0,137	5	0,107
40	0,249	55	0,223
80	0,168	85	0,112
130	0,176	140	0,041
Argissolo Amarelo distrófico saprolítico argiloso cascalhento – Intermediária			
5	0,117	5	0,119
40	0,203	30	0,211
70	0,159	55	0,127
120	0,164	110	0,059
Argissolo Amarelo distrófico saprolítico argiloso cascalhento - Jusante		Argissolo Amarelo distrófico epiirredóxico argiloso cascalhento – Jusante	
5	0,097	5	0,122
40	0,176	45	0,389
80	0,032	90	0,219
140	0,004	140	0,011

EG\*: Elementos grossos.

Anexo D - Atributos químicos, pH Al<sup>3+</sup>, H+Al, m% dos solos estudados

Horizontes	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	pH CaCl <sub>2</sub>	Al <sup>3+</sup> ----- mmol.c.kg -----	H+Al	m %
<b>Floresta – à montante</b>						
A	3,9	3,6	3,6	8,8	43,6	45,2
AB	3,9	3,9	3,7	9,1	28,8	76,2
Bt1	4,4	4,0	3,9	8,8	23,8	78,5
Bt2	4,7	4,1	4,1	6,4	21,8	60,6
BC	5,0	4,2	4,2	6,9	22,6	49,9
C	4,7	4,1	4,1	8,1	19,8	66,1
<b>Floresta – intermediária</b>						
A	3,9	3,8	3,7	6,0	24,6	64,8
AB	4,1	3,9	3,8	8,6	22,4	86,2
Bt1	4,3	4,0	3,9	8,4	21,6	81,0
Bt2	4,7	4,1	4,2	8,2	22,4	72,9
BC	4,8	4,1	4,2	9,1	19,6	80,9
C	4,8	4,1	4,2	11,9	21,6	90,1
<b>Floresta – à jusante</b>						
A	3,9	3,7	3,6	8,8	26,8	56,9
AB	4,2	4,0	3,9	9,1	23,2	65,3
Bt1	4,4	4,0	4,0	7,0	17,2	56,2
Bt2	4,6	4,1	4,1	7,0	19,0	60,4
Bt3	4,8	4,3	4,3	6,4	14,0	68,3
BC	5,0	4,3	4,3	6,8	9,8	73,7
C	4,9	4,2	4,2	5,8	12,0	86,8
<b>Pastagem – à montante</b>						
A	5,5	4,6	4,8	1,5	17,8	8,1
AB	4,9	4,3	4,3	2,2	29,2	14,8
Bt1	4,2	3,9	3,9	13,5	30,4	86,7
Bt2	4,2	3,9	3,9	11,0	32,4	87,1
BC	4,6	4,1	4,1	11,5	22,4	90,7
C	4,7	4,1	4,1	4,4	22,6	87,4
<b>Pastagem – intermediária</b>						
A	4,6	4,6	4,2	7,3	21,8	36,3
BA	4,5	4,3	4,0	11,2	22,8	57,6
Bt	4,4	3,9	4,0	12,8	27,0	76,5
BC	4,8	3,9	4,0	11,8	23,6	81,7
C	4,6	4,1	4,1	3,5	19,8	90,3
<b>Pastagem – à jusante</b>						
AB	4,8	4,1	4,2	2,9	18,4	23,4
BA	4,8	4,6	4,2	2,2	17,8	27,3
Bt1	4,6	4,3	4,3	3,0	11,4	20,9
Bt2	5,0	3,9	4,2	6,5	13,8	31,8
BC	5,1	3,9	4,2	8,5	18,8	58,0

## Anexo E – Atributos químicos, K, P, Ca, Mg, CTC, SB, V% e MO dos solos estudados

Horizontes	K cmol <sub>c</sub> .kg	P mg.kg	Ca ---- cmol <sub>c</sub> .kg ----	Mg	CTC cmol <sub>c</sub> .kg	SB ---- % ----	V	MO g.kg
<b>Floresta – à montante</b>								
A	0,172	8,59	3,12	5,81	5,42	10,65	19,63	32,51
AB	0,132	2,23	0,04	1,48	3,16	2,85	8,99	11,54
Bt1	0,081	1,32	0,00	1,60	2,62	2,41	9,21	10,96
Bt2	0,079	1,14	0,00	3,37	2,59	4,16	16,03	12,13
BC	0,075	1,05	2,00	4,18	2,95	6,93	23,46	4,87
C	0,110	0,95	0,11	2,95	2,39	4,15	17,34	3,62
<b>Floresta – intermediária</b>								
A	0,089	5,50	1,15	1,22	2,78	3,26	11,71	13,02
AB	0,036	2,41	0,28	0,73	2,37	1,37	5,77	9,53
Bt1	0,036	1,50	0,37	1,24	2,35	1,97	8,37	8,97
Bt2	0,023	1,14	0,04	2,78	2,54	3,04	11,96	6,37
BC	0,012	1,23	0,03	2,00	2,17	2,15	9,88	6,68
C	0,012	1,14	0,00	1,19	2,29	1,31	5,74	1,43
<b>Floresta – à jusante</b>								
A	0,139	9,95	1,74	2,17	3,21	5,30	16,52	17,28
AB	0,118	4,68	0,44	2,09	2,69	3,71	13,79	12,21
Bt1	0,102	2,23	0,28	3,69	2,21	4,99	22,49	9,40
Bt2	0,097	1,68	0,26	3,23	2,34	4,47	19,03	7,67
Bt3	0,095	1,23	0,14	1,59	1,66	2,69	16,11	5,10
BC	0,098	1,23	0,00	0,63	1,14	1,61	14,08	0,23
C	0,066	0,95	0,00	0,35	1,30	1,00	7,73	3,29
<b>Pastagem – à montante</b>								
A	0,253	16,86	8,07	6,47	3,48	17,07	48,96	25,40
AB	0,349	4,50	5,09	4,14	4,19	12,71	30,33	18,30
Bt1	0,084	2,50	0,87	0,36	3,24	2,07	6,37	9,73
Bt2	0,103	2,41	0,44	0,16	3,40	1,64	4,80	8,05
BC	0,066	1,32	0,37	0,16	2,35	1,18	5,01	7,29
C	0,119	1,95	0,15	0,37	2,43	1,71	7,05	5,05
<b>Pastagem – intermediária</b>								
A	0,077	5,23	4,98	1,95	2,95	7,71	26,12	17,33
BA	0,044	2,14	4,00	0,93	2,81	5,37	19,07	14,40
Bt	0,023	4,32	2,21	1,01	3,04	3,45	11,32	11,31
BC	0,021	2,14	1,54	1,11	2,64	2,87	10,84	8,05
C	0,031	0,95	0,39	0,58	2,10	1,27	6,04	2,19
<b>Pastagem – à jusante</b>								
A	0,091	7,77	8,21	2,31	2,98	11,43	38,32	16,41
AB	0,061	5,68	6,36	0,76	2,55	7,72	30,26	13,53
BA	0,030	7,32	7,37	0,65	1,97	8,33	42,21	11,34
Bt1	0,024	4,59	4,89	1,30	2,02	6,43	31,77	6,57
Bt2	0,136	1,14	0,38	2,97	2,35	4,71	20,03	1,63

Anexo F - Teores de óxidos de ferro em solos com floresta e pastagem pelos métodos oxalato ( $\text{Fe}_o$ ) e citrato-ditionito ( $\text{Fe}_d$ ) e sua relação  $\text{Fe}_o/\text{Fe}_d$

Horizontes	$\text{Fe}_2\text{O}_3_o$	$\text{Fe}_2\text{O}_3_d$	$\text{Fe}_d$	$\text{Fe}_o$	$\text{Fe}_o/\text{Fe}_d$
<b>dag.kg<sup>-1</sup></b>					
<b>Floresta – à montante</b>					
A	0,182	0,654	0,458	0,128	0,279
AB	1,101	1,012	0,708	0,770	1,088
Bt1	0,672	1,203	0,841	0,470	0,559
Bt2	0,972	1,448	1,013	0,680	0,672
BC	0,470	0,963	0,673	0,328	0,488
C	0,558	2,224	1,555	0,390	0,251
<b>Floresta – intermediária</b>					
A	1,144	0,635	0,444	0,800	1,803
AB	1,051	1,051	0,735	0,735	1,000
Bt1	1,015	1,362	0,953	0,710	0,745
Bt2	0,772	1,720	1,203	0,540	0,449
BC	0,249	1,254	0,877	0,174	0,199
C	0,508	1,739	1,216	0,355	0,292
<b>Floresta – à jusante</b>					
A	1,838	0,561	0,393	1,285	3,274
AB	1,323	0,676	0,473	0,925	1,958
Bt1	1,251	1,065	0,745	0,875	1,174
Bt2	0,930	1,446	1,011	0,650	0,643
Bt3	0,951	2,077	1,453	0,665	0,458
BC	0,557	1,690	1,182	0,390	0,330
C	0,579	1,639	1,146	0,405	0,353
<b>Pastagem – à montante</b>					
A	2,445	0,711	0,498	1,710	3,437
AB	2,460	0,845	0,591	1,720	2,909
Bt1	1,151	1,162	0,813	0,805	0,991
Bt2	0,658	1,670	1,168	0,460	0,394
BC	0,695	1,408	0,984	0,486	0,494
C	0,379	2,084	1,458	0,265	0,182
<b>Pastagem – intermediária</b>					
A	2,588	1,033	0,723	1,810	2,505
BA	2,023	1,367	0,956	1,415	1,480
Bt	0,887	1,736	1,214	0,620	0,511
BC	0,265	0,545	0,381	0,185	0,486
C	0,012	1,555	1,088	0,009	0,008
<b>Pastagem – à jusante</b>					
A	1,258	0,490	0,343	0,880	2,569
AB	1,673	0,649	0,454	1,170	2,579
BA	1,244	0,972	0,680	0,870	1,279
Bt1	0,787	1,232	0,861	0,550	0,639
Bt2	1,329	1,912	1,337	0,930	0,695



Anexo G - Parâmetros das curvas de retenção de água no solo, a partir do ajuste de van Genuchten (1980), com os dados volumétricos e gravimétricos

Profundidade (m)	Horiz. do solo	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	$R^2$	PT	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	$R^2$	PT
		-- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> --				m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>				-- kg kg <sup>-1</sup> --			
		Volumétrico						Gravimétrico					
F1 0,00-0,06	A	0,12	0,51	1,83	1,73	0,97	0,51	0,08	0,37	1,84	1,74	0,96	0,51
F1 0,06-0,17	AB	0,14	0,52	3,84	1,31	0,90	0,39	0,10	0,38	3,82	1,31	0,88	0,39
F1 0,17-0,44	Bt1	0,15	0,49	3,18	1,31	0,97	0,40	0,10	0,33	3,12	1,31	0,95	0,40
F1 0,44-0,62	Bt2	0,12	0,46	5,84	1,31	0,84	0,41	0,09	0,33	5,78	1,31	0,93	0,41
F1 0,62-0,99	BC	0,20	0,50	4,66	1,17	0,97	0,50	0,15	0,37	4,66	1,17	0,97	0,50
F1 0,99-1,63+	C	0,03	0,28	5,26	1,16	0,81	0,28	0,02	0,20	5,18	1,16	0,74	0,28
F2 0,00-0,06	A	0,09	0,45	2,83	1,45	0,98	0,45	0,06	0,30	2,85	1,45	0,98	0,45
F2 0,06-0,26	AB	0,13	0,44	4,21	1,21	0,98	0,44	0,08	0,28	4,22	1,21	0,97	0,44
F2 0,26-0,45	Bt1	0,10	0,48	9,05	1,28	0,99	0,47	0,08	0,36	9,08	1,28	0,98	0,47
F2 0,45-0,63	Bt2	0,21	0,50	2,20	1,21	0,79	0,50	0,15	0,36	2,02	1,22	0,82	0,50
F2 0,63-0,90	BC	0,00	0,29	4,50	1,19	0,84	0,29	0,00	0,22	4,53	1,19	0,85	0,29
F2 0,90-1,65+	C	0,04	0,32	8,65	1,19	0,86	0,32	0,03	0,26	9,10	1,19	0,84	0,32
F3 0,00-0,12	A	0,11	0,46	2,39	1,38	0,97	0,46	0,08	0,33	2,40	1,39	0,94	0,46
F3 0,12-0,24	AB	0,00	0,35	3,14	1,32	0,96	0,27	0,00	0,20	2,20	1,36	0,97	0,27
F3 0,24-0,43	Bt1	0,00	0,29	3,58	1,33	0,98	0,28	0,00	0,20	3,60	1,33	0,97	0,28
F3 0,43-0,58	Bt2	0,00	0,31	3,99	1,16	0,82	0,32	0,00	0,22	4,00	1,16	0,81	0,32
F3 0,58-0,88	Bt3	0,00	0,30	2,25	1,17	0,82	0,31	0,00	0,23	2,27	1,17	0,79	0,31
F3 0,88-1,27	BC	0,00	0,35	2,43	1,12	0,47	0,34	0,00	0,26	2,44	1,12	0,38	0,34
F3 1,27-1,60+	C	0,00	0,30	1,68	1,16	0,96	0,30	0,00	0,22	1,70	1,16	0,95	0,30
P1 0,00-0,05	A	0,13	0,52	2,07	1,50	0,99	0,52	0,11	0,43	2,06	1,51	0,99	0,52
P1 0,05-0,13	AB	0,05	0,42	6,45	1,13	0,99	0,42	0,03	0,27	6,55	1,13	0,99	0,42
P1 0,13-0,67	Bt1	0,04	0,43	9,85	1,09	0,99	0,43	0,03	0,29	9,83	1,09	0,99	0,43
P1 0,67-0,93	Bt2	0,10	0,47	4,93	1,11	0,93	0,48	0,07	0,34	4,92	1,11	0,97	0,48
P1 0,93-1,21	BC	0,08	0,31	3,22	1,20	0,86	0,31	0,06	0,21	3,23	1,20	0,90	0,31
P2 0,00-0,09	A	0,09	0,45	1,84	1,25	0,96	0,42	0,06	0,29	1,82	1,25	0,97	0,42
P2 0,09-0,18	BA	0,09	0,45	4,03	1,17	0,98	0,45	0,06	0,30	4,14	1,16	0,98	0,45
P2 0,18-0,44	Bt	0,19	0,47	2,92	1,25	0,97	0,47	0,13	0,32	2,91	1,25	0,97	0,47
P2 0,44-0,85	BC	0,00	0,30	4,18	1,16	0,99	0,30	0,00	0,21	4,20	1,16	0,96	0,30
P2 0,85-1,60+	C	0,00	0,21	5,56	1,16	0,87	0,21	0,00	0,13	5,65	1,16	0,89	0,21
P3 0,00-0,09	A	0,07	0,47	2,35	1,33	0,99	0,47	0,05	0,32	2,37	1,34	0,98	0,47
P3 0,09-0,15	AB	0,08	0,42	7,95	1,27	0,98	0,42	0,06	0,29	7,74	1,27	0,93	0,42
P3 0,15-0,37	BA	0,00	0,34	6,18	1,14	0,47	0,34	0,00	0,22	5,98	1,14	0,49	0,34
P3 0,37-0,76	Bt1	0,00	0,29	10,69	1,20	0,97	0,29	0,00	0,19	10,63	1,20	0,98	0,29
P3 0,76-1,10	Bt2	0,00	0,31	8,06	1,08	0,84	0,31	0,00	0,24	8,12	1,08	0,71	0,31
P3 1,10-1,33+	BC	0,00	0,33	3,72	1,09	0,89	0,34	0,00	0,24	3,76	1,09	0,87	0,34