

**JOÃO SANTIAGO REIS**

**MAPEAMENTO DIGITAL E CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS DOS  
TABULEIROS COSTEIROS DO AMAPÁ**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: João Carlos Ker

Coorientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

Reis, João Santiago, 1988-

R375m  
2020

Mapeamento digital e caracterização dos solos dos  
Tabuleiros Costeiros do Amapá / João Santiago Reis. – Viçosa,  
MG, 2020.

100 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: João Carlos Ker.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Mapeamento do solo - Amapá. 2. Solos costeiros.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.  
Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.

II. Título.

CDD 22. ed. 631.4798116

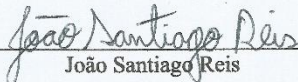
**JOÃO SANTIAGO REIS**

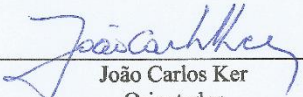
**MAPEAMENTO DIGITAL E CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS DOS  
TABULEIROS COSTEIROS DO AMAPÁ**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 17 de novembro de 2020.

Assentimento:

  
João Santiago Reis  
Autor

  
João Carlos Ker  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

A toda minha família, em especial à minha mãe, que nunca mediu esforços e sempre me apoiou incondicionalmente para a concretização deste sonho.

A Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Solos, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por possibilitarem a infraestrutura e oportunidade de realização do Doutorado.

Ao professor, orientador, e amigo João Carlos Ker por todo o conhecimento compartilhado, pelos ensinamentos acadêmicos e de vida, pela paciência, compreensão, e orientação na condução deste trabalho.

A empresa Amapá Florestal e Celulose (AMCEL), sem a qual o financiamento deste projeto não seria possível, em especial ao pesquisador Antônio Rosa pelo apoio e por todos ensinamentos.

Ao coorientador Prof. Elpídio Inácio Fernandes Filho pela valorosa e significativa contribuição na conceitualização deste trabalho, além dos conhecimentos compartilhados desde a graduação até aqui.

Aos Pedólogos Bruno Nery Vasconcelos e Davi Feital Gjorup pela competência, seriedade e compromisso, que sempre têm no desenvolvimento de trabalhos, e que colaboraram muito na realização do presente estudo.

Ao pesquisador Gustavo Veloso, sem o qual este trabalho não seria possível, agradeço pela paciência, pelos ensinamentos, e pela agilidade em todas as etapas do desenvolvimento do trabalho.

A Dayane, minha companheira, pela compreensão, incentivo, amizade, amor e carinho, que me fortaleceu e ajudou a todo momento, tornando a jornada mais tranquila e prazerosa.

Aos funcionários do Departamento de Solos, por todo o auxílio essencial para a execução dos trabalhos. Em especial José Maurício, Carlinhos, Cláudio, Geovani, Júlio, Carol e Nayan.

Aos amigos da pós graduação que tornaram mais prazerosas as atividades do curso, em especial Elaine, Raphael, Rodrigo, Julia, e Sandro.

E a todas as pessoas que de alguma maneira me apoiaram ou ajudaram para que eu atingisse esta conquista.

*“Ninguém pode construir em teu lugar as pontes que precisarás passar, para atravessar o rio da vida - ninguém, exceto tu, só tu. Existem, por certo, atalhos sem números, e pontes, e semideuses que se oferecerão para levar-te além do rio; mas isso te custaria a tua própria pessoa; tu te hipotecarias e te perderias. Existe no mundo um único caminho por onde só tu podes passar. Onde leva? Não perguntes, segue-o!”*

*Friedrich Nietzsche*

## RESUMO

REIS, João Santiago, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2020. **Mapeamento digital e caracterização dos solos dos Tabuleiros Costeiros do Amapá.** Orientador: João Carlos Ker. Coorientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

O Grupo Barreiras, e seu geossistema correlato dos Tabuleiros Costeiros, é uma importante unidade geológica que se estende por grande parte da faixa litorânea atlântica brasileira, desde o norte do estado do Rio de Janeiro até o Amapá. É um importante compartimento da paisagem brasileira, que conta com grandes ocupações urbanas e exploração agrícola diversa. Por apresentar relevos com predominância de formas planas e suave onduladas, exibe grande potencial de exploração para agricultura de alta tecnologia, assim como para infraestrutura viária para escoamento da produção, e comercialização de produtos do sudeste ao norte do país. Os mapeamentos de solos são ferramentas que permitem a visualização da espacialização deste recurso natural e possibilita o planejamento de atividades de maneira mais eficiente e inteligente sob a superfície da terra. O ambiente em questão apresenta alguns desafios para definição de unidades de mapeamento (UM) em escalas mais detalhadas, por conta da heterogeneidade e variação lateral da granulometria de seus sedimentos, assim como dos solos formados a partir deles, e também por causa de seu relevo suavizado. Estes fatores diminuem as possibilidades de utilização de indicadores ambientais para estratificação das UM. Ao mesmo tempo, no estado do Amapá ainda são escassos os estudos sobre solos desenvolvidos dessa formação, necessitando mais estudos para compreensão de seus processos de gênese, e conhecimento das suas potencialidades de utilização e distribuição espacial. Baseado nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo geral avaliar a utilização de técnicas de Mapeamento Digital de Solos (MDS) no auxílio do delineamento de UM em nível semi-detalhado, e caracterizar os solos e a distribuição espacial dos mesmos em Tabuleiros Costeiros no estado do Amapá. Para tanto, foi elaborada uma metodologia de MDS para realizar a predição da textura de solos regionais, em que foi possível avaliar diferentes algoritmos preditivos, avaliar sua performance, e testar sua acurácia. Além disso, foram estudados solos representativos selecionados, para caracterização e compreensão de seus atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos. Os resultados evidenciam desempenho satisfatório na aplicação de técnicas de MDS para melhora dos mapas de solos elaborados nestes tipos de ambientes. Também mostram que os solos desenvolvidos de sedimentos do Grupo Barreiras no Amapá, possuem constituição e propriedades semelhantes aos solos correlatos à esta unidade da paisagem em outras partes do Brasil.

**Palavras-chave:** Mapeamento digital de solos. Grupo Barreiras. Tabuleiros Costeiros.

## ABSTRACT

REIS, João Santiago, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2020. **Digital mapping and soil characterization on Coastal Highlands from Amapá.** Adviser: João Carlos Ker. Co-adviser: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

The Barreiras Group, and its related geosystem of the Coastal Highlands, is an important geological unit that extends over a large part of the Brazilian Atlantic coast, from the north of Rio de Janeiro state to Amapá. It is an important compartment of the Brazilian landscape, which has large urban occupations and diverse agricultural exploitation. As it presents reliefs with predominance of flat and smooth forms, it exhibits great potential for exploration for high-tech agriculture, as well as for road infrastructure to distribute production, and the commercialization of products from the southeast to the north of the country. Soil mapping is a tool that allows the visualization of spatialization of this natural resource and makes it possible to plan activities more efficiently and intelligently under the Earth's surface. The environment in question presents some challenges for defining mapping units (UM) in more detailed scales, due to the heterogeneity and lateral sediments granulometry variations, as well as the soils formed from them, and also because of its smoothed relief. These factors reduce the possibilities of using environmental indicators to stratify the UMs. At the same time, in the state of Amapá, studies on soils developed from this formation are still scarce, requiring further studies to understand its processes of genesis, and knowledge of its potential for use and spatial distribution. Based on this context, the present study aimed of evaluate the use of Digital Soil Mapping (MDS) techniques to aid the mapping units designs on a semi-detailed scale, and to characterize the soils and their spatial distribution in Coastal Highlands in the Amapá state. For that, an MDS methodology was developed to predict the texture of regional soils, in which it was possible to evaluate different predictive algorithms, evaluate their performance, and test their accuracy. In addition, selected representative soils were studied to characterize and understand their morphological, physical, chemical and mineralogical attributes. The results show a satisfactory performance in the application of MDS techniques to improve soil maps prepared in these types of environments. They also show that the soils developed from the Barreiras Group sediments in Amapá, have similar constitution and properties to the soils related to this landscape unit in other Brazilian places.

**Keywords:** Soil mapping. Coastal highlands. Cohesive soils. Barreiras Group.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>9</b>
-------------------------------	----------

### **CAPÍTULO 1 - MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS NO AUXÍLIO DE DELINEAMENTO DE UNIDADES DE MAPEAMENTO EM NÍVEL SEMI- DETALHADO, EM TABULEIROS COSTEIROS NO AMAPÁ**

<b>RESUMO.....</b>	<b>11</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>13</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>16</b>
2.1. ÁREA DE ESTUDO .....	16
2.2. BANCO DE DADOS DE SOLOS .....	17
2.3. BANCO DE COVARIÁVEIS .....	18
2.4. ARRANJO METODOLÓGICO .....	18
2.5. MODELOS PREDITIVOS .....	22
2.6. AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DOS MODELOS .....	24
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>27</b>
3.1. DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE AREIA E ARGILA .....	27
3.2. COVARIÁVEIS SELECIONADAS E PERFORMANCE DOS MODELOS .....	28
3.3. PREDIÇÃO DOS TEORES DE ARGILA E DE AREIA .....	39
<b>4. CONCLUSÕES.....</b>	<b>51</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>52</b>
<b>APÊNDICE I – GRÁFICOS DE IMPORTÂNCIA RELATIVA DE TODOS OS MODELOS PREDITIVOS QUANDO UTILIZADO O CONJUNTO DE COVARIÁVEIS COM DADOS DE LEVANTAMENTO AEROGEOFÍSICO.....</b>	<b>56</b>

### **CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS EM DIFERENTES COMPARTIMENTOS GEOMORFOLÓGICOS DE TABULEIROS COSTEIROS, DO GRUPO BARREIRAS NO AMAPÁ**

<b>RESUMO.....</b>	<b>61</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>63</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>67</b>
2.1. ÁREA DE ESTUDO .....	67
2.2. ANÁLISES EM LABORATÓRIO .....	70
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>72</b>
3.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MORFOLÓGICA DOS SOLOS .....	72
3.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.....	77
3.3. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	78
3.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DA COBERTURA PEDOLÓGICA .....	88
<b>4. CONCLUSÕES.....</b>	<b>95</b>

<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>96</b>
<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>100</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

O Grupo Barreiras é uma importante unidade da paisagem brasileira, que se estende desde o norte do estado do Rio de Janeiro até o Amapá, na costa atlântica. Também é reconhecido pelo compartimento geomorfológico conhecido com Tabuleiros Costeiros, unidade correlata à esta formação geológica.

Por apresentar relevos com predominância de formas planas e suave onduladas, é importante tanto para agricultura, como para o estabelecimento de cidades, rodovias, e rotas de escoamento da produção.

Os mapeamentos de solos são ferramentas que permitem a espacialização de informações sobre solos, e possibilita o planejamento de uso da terra. O ambiente em questão apresenta desafios para definição de unidades de mapeamento (UM) em escalas mais detalhadas, por conta da heterogeneidade e variação lateral da granulometria de seus sedimentos, assim como dos solos formados a partir deles, e principalmente por causa de seu relevo suavizado. Estes fatores dificultam a utilização de indicadores ambientais para estratificação das UM, transformando o mapeamento de solos nesses locais uma tarefa árdua, demorada e muito trabalhosa

Ao mesmo tempo, no estado do Amapá ainda são escassos os estudos sobre solos desenvolvidos dessa formação, necessitando mais estudos para compreensão de seus processos de gênese, e conhecimento das suas potencialidades de utilização e sua distribuição espacial.

Baseado nesse contexto, o presente estudo teve como objetivos avaliar a utilização de técnicas de Mapeamento Digital de Solos (MDS) no auxílio do delineamento de unidades de mapeamento em nível semi-detalhado, e caracterizar os solos e a distribuição dos mesmos em Tabuleiros Costeiros no estado do Amapá.

Para tal, o primeiro capítulo lança mão de informações e amostras pré-existentes, relacionadas à um mapeamento de solos na escala 1:30.000, para avaliar a eficiência da utilização de atributos do terreno, posição geográfica das amostras, e de dados aerogeofísicos para predição de mapas de textura dos solos, em região de difícil definição de unidades de mapeamento simples. Além disso, também são testados modelos preditivos gerados por cinco algoritmos diferentes, com diferentes métodos de predição e seleção de covariáveis a serem utilizadas. As performances foram avaliadas, a incerteza das predições quantificada, e os mapas

preditos foram comparados aos mapas gerados por mapeamento convencional de solos para melhora na delimitação das unidades de mapeamento destes.

No segundo capítulo, é feita uma caracterização dos solos regionais a partir da comparação de dois ambientes com dissecação diferenciada para testar a hipótese da homogeneidade dos solos de Tabuleiros Costeiros correlatos ao Grupo Barreiras no estado do Amapá. Os solos foram caracterizados quanto à sua morfologia, física, química e mineralogia. Informações obtidas das observações de campo também são apresentadas, com objetivo de subsidiar futuras interpretações de gênese dos solos locais.

Ao final, são apresentadas as conclusões gerais, que versam sobre os principais resultados obtidos por este estudo.

## CAPÍTULO 1

### MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS NO AUXÍLIO DE DELINEAMENTO DE UNIDADES DE MAPEAMENTO EM NÍVEL SEMI-DETALHADO, EM TABULEIROS COSTEIROS NO AMAPÁ

#### RESUMO

REIS, João Santiago, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2020. **Mapeamento digital de solos no auxílio de delineamento de unidades de mapeamento em nível semi-detalhado, em Tabuleiros Costeiros no Amapá.** Orientador: João Carlos Ker. Coorientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Mapeamentos de solos são ferramentas essenciais no planejamento do uso da terra, seja para fins agrícolas, industriais, urbanos ou de conservação natural. No Brasil, com a criação do Programa Nacional de Solos (PronaSolos), que pretende mapear toda a extensão do território nacional, surge a demanda do desenvolvimento de técnicas mais avançadas de mapeamento com potencial de aumentar a eficiência, diminuir o tempo, e viabilizar a execução deste projeto. As técnicas de Mapeamento Digital de Solos (MDS) são promissoras neste sentido, porém, pouco se tem testado sobre a eficiência das mesmas em escalas menos generalistas como é o caso do nível semi-detalhado. Também é importante que estas técnicas sejam avaliadas em áreas de difícil delineamento de unidades de mapeamento (UM) de solos, que geralmente correspondem a relevos planos e mais suavizados, e também são áreas com grande potencial de uso para agricultura de alta produtividade. Este é o caso dos Tabuleiros Costeiros, que além do relevo suave é constituído de litologia sedimentar (Grupo Barreiras), e tende a apresentar variabilidade lateral em textura dos solos, dificultando o mapeamento executado através das técnicas convencionais. Pensando neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade de técnicas de MDS no auxílio do delineamento de UM em nível semi-detalhado. Para tal, foi construído um banco de dados de amostras de solo, com textura quantificada, provenientes de um mapeamento executado em escala 1:30.000, e inserido em modelos preditivos junto com um banco de covariáveis selecionadas. Como covariáveis foram utilizados índices morfométricos, posição geográfica das amostras, e dados de levantamento aerogeofísico. Para elaborar mapas de predição de textura dos solos, foram utilizados os algoritmos Cubist, Earth, Linear Model, Random Forest, e Support Vector Machine, e suas

performances foram avaliadas. O arranjo metodológico permitiu otimizar as predições, testar os melhores algoritmos para a realidade estudada, e prever os teores de areia e argila associados à sua incerteza. A utilização de dados de horizontes subsuperficiais apresentaram melhores resultados do que amostras de horizontes superficiais. A utilização de dados de levantamento aerogeofísicos (gamaespectrometria e magnetometria) melhoram a capacidade preditiva dos modelos, melhorando suas performances. Os modelos Random Forest e Cubist apresentaram melhores resultados. Mesmo sendo métodos diferentes e utilizarem diferentes covariáveis, chegaram ao mesmo resultado nos parâmetros de avaliação de performance. Os resultados mostraram que técnicas de MDS são satisfatórias para auxílio no delineamento de unidades de mapeamento simples, em mapas de solos em nível semi-detalhado a partir de modelos de predição de textura dos solos.

**Palavras-chave:** Mapeamento digital de solos. Machine learning. Tabuleiros Costeiros.

## ABSTRACT

REIS, João Santiago, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, november de 2020. **Digital Soil Mapping to aid in mapping units design on a semi-detailed scale, in Coastal Highlands from Amapá.** Adviser: João Carlos Ker. Co-adviser: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Soil maps are essential tools in land use planning, whether for agricultural, industrial, urban or natural conservation purposes. In Brazil, with the creation of the National Soil Program (PronaSolos), which intends to map the entire national territory, there is a demand for the development of more advanced mapping techniques with potential to increase efficiency, decrease time, and enable the execution of this project. The Digital Soil Mapping (DSM) techniques are promising in this sense, however, little has been tested on their efficiency in less general scales such as the semi-detailed scale. It is also important that these techniques are evaluated in areas of difficult design of soil mapping units, which generally correspond to flat and smooth reliefs, and are also areas of great potential for use in high-productivity agriculture. This is the case of Coastal Highlands, which in addition to the smooth relief has a sedimentary lithology (Barreiras Group), tends to present lateral variability in soil texture, making it difficult to map soils in a conventional framework. In this context, the present study aimed to evaluate the applicability of MDS techniques in helping to outline mapping units on a semi-detailed scale. To achieve this, a database of soil samples was constructed, with quantified texture, from a mapping performed on a 1:30.000 scale, and inserted in predictive models together with a bank of selected covariates. As covariables, morphometric indexes, geographical position of the samples, and aerogeophysical data were used. To elaborate soil texture prediction maps, the algorithms Cubist, Earth, Linear Model, Random Forest and Support Vector Machine were used, and their performances were evaluated. The methodological framework allowed to optimize the predictions, to test the best algorithms, and to predict the sand and clay contents associated with its uncertainty. The use of data from subsurface horizons showed better results than samples from superficial horizons. Aerogeophysical data (gamma-spectrometry and magnetometry) improves the predictive capacity of the models, improving their performance. Random Forest and Cubist models showed better results. Despite different methods and using different covariates, they reached the same result in the performance evaluation parameters. The results show that DSM techniques are satisfactory to aid in the design of simple mapping units, in semi-detailed soil maps scale, based on soil texture prediction models.

**Keywords:** Digital soil mapping. Machine learning. Coastal Highlands.

## 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre a distribuição dos solos na paisagem é de extrema relevância para uso racional e mais eficiente deste importante recurso natural. Os mapas de solos são ferramentas que permitem entender esta espacialização, e realizar interpretações acerca de demandas ambientais e de uso. São indispensáveis para utilização mais racional e eficiente das terras, tendo aplicação direta no setor agrícola para auxílio na orientação de práticas de manejo, direcionamento de plantio de variedades, planejamento de plantio e colheita, estimativas de produtividade, dentre outras atividades (KER et al., 2017a).

Com o início do Programa Nacional de Solos (PronaSolos) no Brasil, que é um projeto que pretende mapear os solos de todo território nacional em escala de média intensidade (1:100.000), e em nível semi-detalhado (1:50.000 ou mais detalhadas) em áreas prioritárias (POLIDORO et al., 2016), surge a demanda do desenvolvimento de técnicas mais avançadas de mapeamento com potencial de aumentar a eficiência, diminuir o tempo, e viabilizar a execução deste projeto.

As técnicas de Mapeamento Digital de Solos (MDS) são promissoras neste sentido, porém, pouco se tem testado sobre a eficiência das mesmas em escalas menos generalistas como é o caso do nível semi-detalhado. Também é importante que estas técnicas sejam avaliadas em áreas de difícil delineamento de unidades de mapeamento (UM) de solos, que geralmente correspondem à relevos planos e mais suavizados, e também são áreas com grande potencial de uso para agricultura de alta produtividade.

Os solos de Tabuleiros Costeiros, relacionados ao Grupo Barreiras, apresentam características semelhantes em diversas partes do Brasil, sendo na maioria dos casos de textura argilosa ou muito argilosa, relacionados a relevo plano ou suave ondulado, fertilidade natural baixa (álícos e distróficos), mas são facilmente mecanizáveis por conta da topografia, e podem ser corrigidos e adubados – sendo muito bem utilizados para exploração agrícola, após o emprego de práticas de manejo adequadas (RIBEIRO, 1998).

Existem desafios quanto ao entendimento da distribuição espacial de solos em topografia aplainada e litologia sedimentar. Em escalas mais detalhadas de mapeamento, devido à homogeneidade geológica e geomorfológica, torna-se difícil o delineamento das UM, que se diferem principalmente por textura e fase de relevo, pois não apresentam importantes estratificadores, tanto de campo quanto de reconhecimento de padrões em fotos aéreas ou

produtos orbitais. Essa dificuldade do mapeamento, coloca-se como um desafio para elaboração de mapas semi-detalhados, que têm objetivo de fornecer subsídios para planejamento e implantação de projetos agrícolas, ou para políticas públicas (IBGE, 2015).

Baseado nessas considerações, uma predição mais precisa da textura dos solos destes ambientes é muito importante, sendo as técnicas de MDS uma ferramenta de grande potencial no auxílio de delineamento de unidades de mapeamento em nível semi-detalhado. Modelos de predição para atributos dos solos são utilizados em diversas partes do mundo e no Brasil, com aplicabilidade, eficiência e precisão variáveis a depender de cada caso (MCBRATNEY et al., 2000; HENDERSON et al., 2005; VASQUES et al., 2008; CARVALHO JUNIOR et al., 2014; TAQUES, 2014; BHERING et al., 2016; PINHEIRO et al., 2018; PAUL et al., 2020).

Um dos princípios fundamentais do MDS é a representação da correlação entre covariáveis ambientais e o objeto de interesse a ser predito, que podem ser atributos ou classes de solos. Deseja-se identificar os padrões de distribuição destes elementos na paisagem de forma mais quantitativa (LAGACHERIE & MCBRATNEY, 2007), com possibilidade de quantificação do erro/acerto do modelo.

A utilização destas tecnologias aliadas ao conhecimento teórico e prático do Pedólogo, apresentam grande potencialidade de ganhos na elaboração de mapas de solos e possibilitam melhores entendimentos não só sobre sua distribuição espacial, como também sobre o entendimento de características intrínsecas às classes de solos brasileiras.

Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade de técnicas de MDS no auxílio do delineamento de UM em nível semi-detalhado. Para tal, foram testados algoritmos de modelos preditivos alimentados com dados de amostras de solos oriundas de mapeamento de solos executado segundo metodologia convencional e covariáveis ambientais. As hipóteses testadas foram: i) covariáveis de relevo, posição geográfica, e de levantamento aerogeofísico melhoram a predição de textura; ii) dados de amostras de solos de horizonte A são melhores para calibração dos modelos preditivos; e iii) os modelos são capazes de prever teores de argila e de areia.

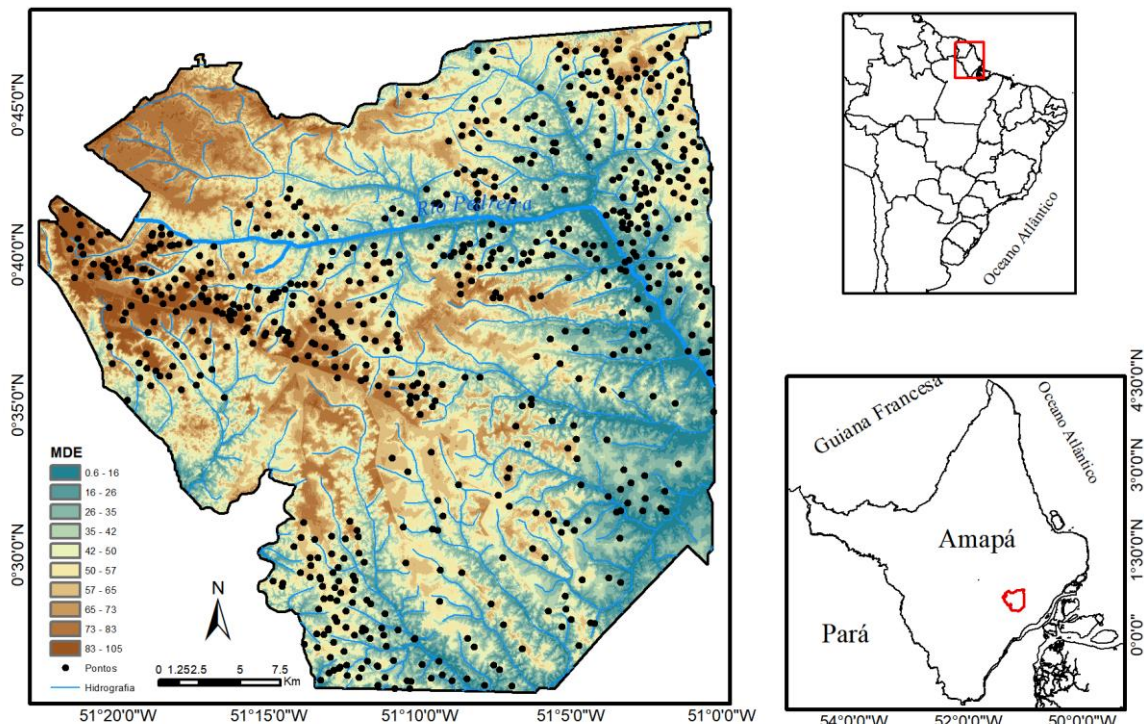
## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

A área de estudo localiza-se na porção sudeste do Amapá (Figura 1), no divisor hidrográfico das bacias dos rios Araguari, Matapi e Pedreira, sendo os dois últimos pertencentes à bacia do rio Amazonas. Está localizada entre as latitudes 0°45' N e 0°25' N, e longitudes 51°00' W e 51°25' W, é caracterizada por relevo suave ondulado, com topos aplainados, cotas altimétricas variando entre 0,6 e 105 metros (Figura 1), e tem aproximadamente 1230 km<sup>2</sup> de área.

Situa-se no Planalto rebaixado da Amazônia, que é constituído por sedimentos terciários do Grupo Barreiras, apresentando caimento suave para o Rio Amazonas. É representado por uma superfície de aplainamento que se encontra parcialmente conservada, e recoberta por crostas ferruginosas. A densidade elevada da rede de drenagem composta por canais curtos e muito ramificados é responsável pelas formas de dissecação do aplainamento em colinas de topo aplainado e interflúvios tabulares. (BRASIL, 1974).

**Figura 1.** Localização da área de estudo e distribuição dos pontos de amostras de solos coletados.



Os sedimentos do Grupo Barreiras ocorrem, em geral, em cotas de 20 a mais de 200 metros de altitude (JACOMINE, 1996), e sua composição é variada apresentando sequência de

sedimentos detríticos, siliciclásticos, de origem fluvial e marinha (ARAI, 2006), pouco ou não consolidados, mal selecionados, de cores variegadas, variando de areias finas a grossas, predominando grãos angulosos, argilas cinza-avermelhadas, com matriz caulínica e ocorrência escassa de estruturas sedimentares (NUNES, 2011).

Os solos de maior ocorrência da área são do grupo dos Latossolos Amarelos Distrocoesos, sendo de dois tipos: Latossolos Amarelos Distrocoesos típicos e Latossolos Amarelos Distrocoesos argissólicos. Para obter representatividade de toda a área de estudo também foram coletadas amostras, em menor quantidade, de outros tipos de solos de menor ocorrência, a saber: Plintossolos Pétricos Concrecionários típicos, Argissolos Amarelos Distrocoesos típicos, Plintossolos Argilúvicos Distróficos típicos, Cambissolos Háplicos Tb Distróficos latossólicos, e Neossolos Quartzarênicos Distróficos típicos.

## **2.2. Banco de dados de solos**

As amostras utilizadas para compor o banco de dados da textura dos solos da área de estudo correspondem a amostras extras e perfis, coletadas em mapeamento de solos executado em nível semi-detalhado (1:30.000) seguindo-se metodologia convencional (EMBRAPA, 1995; IBGE, 2015). Foram utilizadas 707 amostras de horizontes A, com profundidade média de 15 cm, e 667 amostras de horizontes B coletadas em profundidades entre 25 cm e 75 cm, com sua localização indicada na Figura 1.

Todas as amostras tiveram seus teores de areia, silte e argila quantificados segundo Teixeira et al., (2017), após dispersão mecânica e química, em agitador rotativo tipo Wagner com solução de NaOH ( $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ ), sendo a fração areia obtida por tamisação, e as frações silte e argila separadas por sedimentação (silte). Os resultados da análise granulométrica foram organizados inserindo-se as coordenadas geográficas de cada ponto amostrado.

Por se tratar de solos com baixos teores de silte, característica marcante de materiais latossólicos e do material de origem dos mesmos (Grupo Barreiras), foram utilizados apenas os teores de areia e argila nas predições. Mesmo sabendo-se que os valores destas duas variáveis são inversamente proporcionais nesta situação, optou-se por testar se há resposta diferente para cada uma destas frações texturais utilizando como covariáveis dados de levantamento aerogeofísico.

### 2.3. Banco de covariáveis

Foram utilizadas covariáveis que apresentam potencial para predição de textura do solo, sendo divididas em três grupos: covariáveis morfométricas (IM), covariáveis oriundas de levantamento aerogeofísico de magnetometria e gamaespectrometria (AG), e a coordenada geográfica de cada amostra (CG) (Quadro 1).

O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi gerado a partir de levantamento aéreo de radar adquirido e disponibilizado pela empresa Amapá Florestal e Celulose S.A. (AMCEL). Foi utilizada a banda P do levantamento, com resolução espacial de 2.5 metros. As covariáveis do terreno foram extraídas do MDE através do pacote RSAGA (BRENNING et al., 2018) no software R (R CORE TEAM. 2014). Ao todo, 21 covariáveis morfométricas foram geradas.

Os dados de gamaespectrometria e magnetometria utilizados foram os disponibilizados pelo Projeto 1030 – Jari – Rio Negro (Leste), executado pelo Ministério de Minas e Energia através de convênio da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM) e o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (CPRM, 1977). Foram inseridas 11 covariáveis, provenientes de diferentes canais para cada produto deste, a saber: intensidades de Urânio (ub e uc), intensidades de Tório (thb e thc), intensidades de Potássio (kb e kc), magnetometria (magb, magc e magr), e contagem total contabilizada (ctb e ctc).

Considerando que a textura do solo é uma variável do tipo contínua, a posição de cada amostra de solo coletada também foi inserida como covariável nos modelos, através de suas coordenadas geográficas.

Somando-se todas as informações selecionadas foram inseridas 34 covariáveis nos modelos preditivos, que foram recortadas para os limites da área de estudo, e transformadas em arquivos do tipo raster com tamanho de pixel (*cellsize*) de 30 metros.

### 2.4. Arranjo metodológico

Com o objetivo de gerar uma predição confiável, com processamento mais eficiente e acurácia conhecida, foi adotado com conjunto de metodologias que consistiu em um pré

tratamento dos dados, e posterior avaliação do melhor modelo preditivo a ser considerado (Figura 2).

Na primeira etapa, as amostras de solos analisadas e o conjunto de covariáveis foram “empilhados”, para extração das características referentes à cada camada de informação de cada um dos pontos geográficos dos solos coletados, gerando um banco de dados. Neste banco de dados, todas as observações com valores ausentes (NA) foram descartadas.

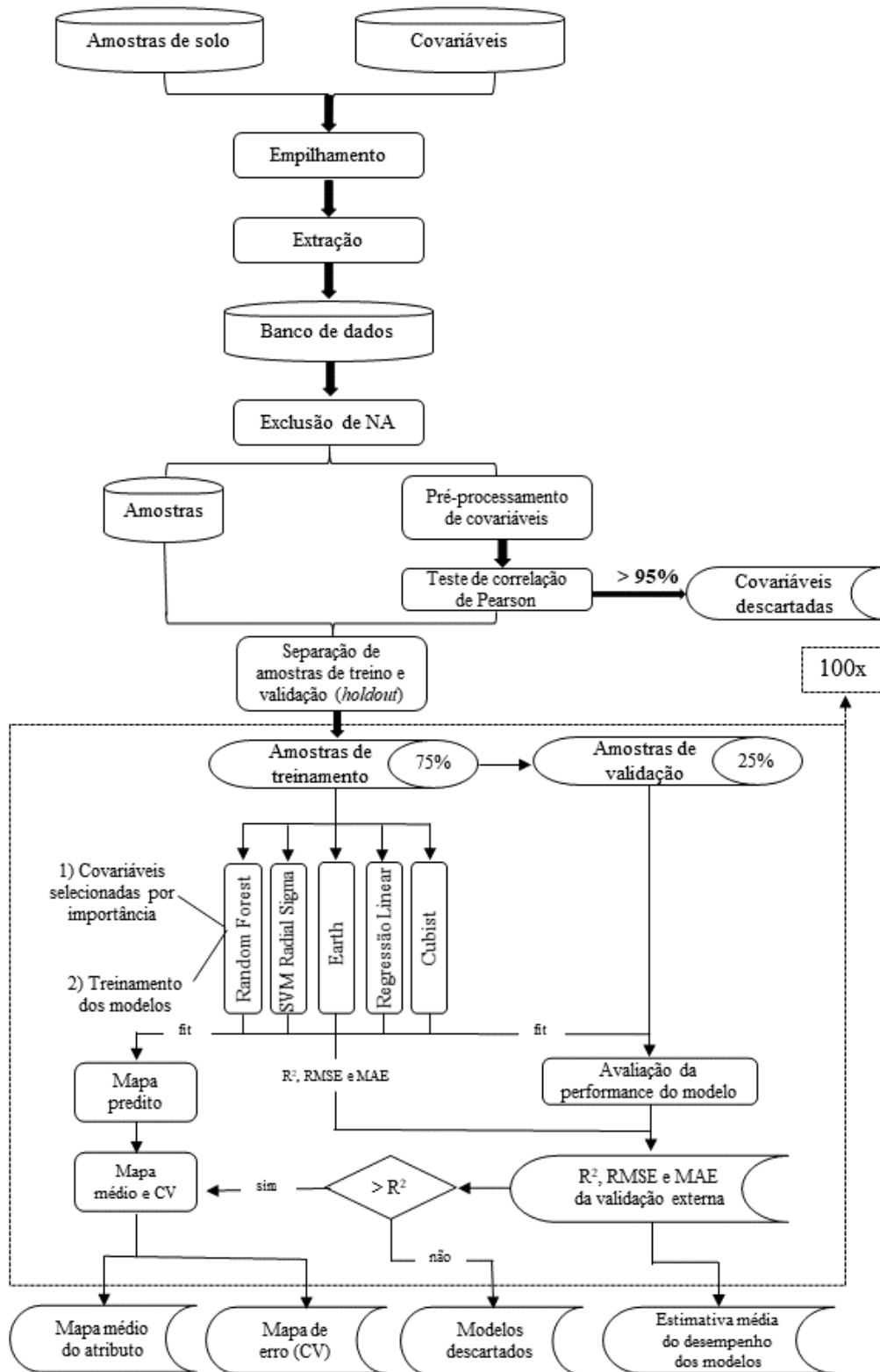
Posteriormente, o conjunto de covariáveis foi submetido a uma etapa de pré-processamento, que consistiu na remoção de covariáveis a partir do coeficiente de correlação de Pearson, sendo retiradas as que apresentaram correlação maior ou igual a 95%. As duplas que apresentavam valores superiores a este linear foram avaliadas verificando sua correlação com todas as outras covariáveis inseridas, a covariável que apresentou maior colinearidade foi removida, sendo o restante reintegrada ao conjunto. Este processo foi feito usando a função `findCorrelation` do pacote `caret` (KUNH et al., 2020).

Isto é importante para reduzir o volume de dados, aumentar a eficiência do processamento, pois elimina covariáveis redundantes para a modelagem, economizando tempo, além de garantir ganho de performance. O segundo método é aplicado após a separação aleatória de amostras de treinamento (75%) e validação (25%) (*Hold-out validation*). O método consiste na eliminação de variáveis pela sua importância chamando *recursive feature elimination* (RFE) contida no pacote `caret` (KHUN et al., 2020). O RFE é um método iterativo do tipo *backforward* que elimina as covariáveis de forma automática a partir da importância do geral de todas covariáveis, sendo a importância calculada com base no algoritmo e no fenômeno natural que deseja modelar (KUNH & JOHNSON, 2013). Com a importância calculada o RFE avalia subgrupos de amostras definidas pelo operador e a importância calculada, sendo o resultado final o subgrupo ideal de covariáveis definido a partir da sua performance de predição. O RFE foi executado usando como base os conjunto de covariáveis que restaram do processo de seleção por correlação, sendo testados no mínimo dezesseis subconjuntos, e o conjunto do total de covariáveis.

**Quadro 1.** Covariáveis inseridas nos modelos preditivos utilizados presente estudo.

<b>Grupo</b>	<b>Covariável</b>	<b>Breve descrição</b>	<b>Abreviação</b>
<b>Levantamento aerogeofísico (AG)</b>	<b>Gamaespectrometria</b>	Intensidade de radiação emitida por U, Th, e K, e contagem total	ub, uc, thb, thc, kb, kc, ctb, etc
	<b>Magnetometria</b>	Medida de anomalias de campo magnético	magb, magc, magr
<b>Índices morfométricos (IM)</b>	<b>Elevação</b>	Modelo digital de terreno, oriundo de levantamento aéreo de radar (banda P) com resolução de 2.5 m	mde
	<b>Declividade</b>	Gradiente de declividade	slope
	<b>Índice de balanço de massa</b>	Áreas de perdas ou acumulação de material transportado	massbalidx
	<b>Aspecto</b>	Faces de exposição do terreno	aspect
	<b>Índice de convergência</b>	Convergência/divergência em relação ao escoamento superficial	convidx
	<b>Aspectos relacionados à curvatura das vertentes</b>	Inclui as curvaturas tangencial, de fluxo, longitudinal, do plano, máxima, mínima, geral, total, transversal, classificação e o perfil de curvatura	curvtang, curvflowline, curvlong, curvplan, curvmax, curvmin, curvgeneral, curvtotal, curvcrosssec, curvclass, curvprofile
	<b>Aquecimento anisotrópico diurno</b>	Aproximação da distribuição anisotrópica de calor diurno	danisoheat
	<b>Ponto médio da encosta</b>	Distância vertical relativa do ponto médio da encosta às direções do topo ou fundo do vale	midslopepos
	<b>Índice de multi-resolução de topos aplainados</b>	Indica áreas aplainadas nos topos da paisagem	mrrtf
	<b>Altitude normalizada</b>	Normalização da altitude da área entre 0 e 1	normheight
<b>Altitude padronizada</b>	Altitude absoluta multiplicada pela Altitude normalizada	standheight	
<b>Posição Geográfica (PG)</b>	<b>Latitude</b>	Coordenada geográfica correspondente à latitude	y
	<b>Longitude</b>	Coordenada geográfica correspondente à longitude	x

**Figura 2.** Fluxograma geral da metodologia empregada na execução da predição das variáveis de interesse para cada conjunto de covariáveis, e avaliação do melhor modelo.



Foram testados cinco algoritmos; Random Forest (RF), Support Vector Machine Radial Sigma (SVM), Earth, Regressão Linear (LM) e Cubist. Cada modelo elenca diferentes graus de importância para as covariáveis inseridas, podendo determinada covariável ser mais importante para um destes e menos importante em outro (GOMES et al., 2019).

O subconjunto ideal foi encontrado para cada modelo via RFE, sendo este conjunto somente usado no treinamento do mesmo modelo. A escolha do subconjunto ideal foi feita por validação cruzada repetida (*repeatedcv*) com 10 folds e 10 repetições. Também foram testados 5 valores de cada um dos hiperparâmetros internos de cada algoritmo testados (*tuneLength*). A métrica para escolha do melhor subconjunto para cada modelo foi o  $R^2$ .

Os resultados gerados pela seleção de covariáveis foi aplicado ao treinamento, validação e posterior espacialização. O treinamento foi feito usando a função *train* do pacote *caret* (KHUN et al., 2020), sendo a otimização do hiperparâmetros do modelo ideal de cada algoritmo feita pela validação cruzada repetida (*repeatedcv*) com 10 folds, 10 repetições e 5 valores de cada um dos hiperparâmetros internos de cada algoritmo (*tuneLength*). O modelo ideal foi usado para validação e predição dos mapas dos teores de areia e argila, sendo a predição feita para os dois melhores modelos que apresentaram maior  $R^2$ .

A fim de avaliar o efeito dos sensores aerogeofísicos na estimativa de areia e argila, o processo de modelagem foi aplicado a dois conjuntos de dados (com e sem dados aerogeofísicos), sendo feito para cada horizonte avaliado (Quadro 2).

## 2.5. Modelos preditivos

Cinco modelos preditivos foram testados e utilizados neste estudo – Random Forest, Support Vector Machine, Linear Model, Earth e Cubist.

O algoritmo Random Forest (RF), desenvolvido por Breiman (2001), é um método do tipo *ensemble* utilizando classificadores do tipo árvore, que se caracterizam pela geração de muitos classificadores e combinação de seus resultados (DIETTERICH, 2000). RF constrói uma grande quantidade de árvores de decisão, externa ao conjunto de dados, a partir de um conjunto de treinamento único, através da utilização de *bagging*, que consiste num meta-algoritmo utilizado para melhorar os modelos de classificação e regressão de acordo com a estabilidade e precisão da classificação, além de reduzir a variância e de ajudar a evitar casos

de *over-fitting*. Esse procedimento extrai amostras aleatoriamente do conjunto de dados de treinamento original, e configurações de *bootstrap* são utilizadas para construir um grande número árvores de decisão no RF, que posteriormente são unidas em uma única predição. Cada árvore é construída a partir de uma amostragem *bootstrap* única nos dados de treinamento original, sendo que cada conjunto de *bootstrap* deixa de fora cerca de um terço das amostras (HASTIE et al., 2009).

**Quadro 2.** Horizonte, variável predita, e conjunto de covariáveis utilizados em cada predição executada nos diferentes modelos.

Horizonte	Variável	Conjunto de covariáveis
<b>A</b>	Argila	PG + IM
	Argila	PG + IM + AG
	Areia	PG + IM
	Areia	PG + IM + AG
<b>B</b>	Argila	PG + IM
	Argila	PG + IM + AG
	Areia	PG + IM
	Areia	PG + IM + AG

PG - Posição geográfica; IM – índices morfométricos; AG – dados aerogeofísicos

No caso do Support Vector Machine (SVM) é um classificador implementado mapeando os dados de treinamento em *feature spaces* (n-dimensões em que se encontram as variáveis) com o auxílio de funções kernel. Ele separa os dados usando um hiperplano de grande margem (CRISTIANINI & TAYLOR, 2000). Para um conjunto de dados de duas classes, ele examina um hiperplano que separa os pontos de dados ordenadamente, com distância máxima para o ponto de dados mais próximo de ambas as classes - essa distância é chamada de margem. Os vetores mais próximos deste hiperplano são chamados de vetores de suporte. Aplicando uma função kernel não linear, que transforma pontos de dados em *feature spaces* de alta dimensão, o SVM também pode tratar problemas de classificação não linear. Algumas funções kernel mais comumente utilizadas incluem: polinomial, função de base radial, linear e sigmóide. De acordo com os diferentes problemas de classificação, diferentes funções do kernel podem ser selecionadas para obter os melhores resultados de classificação.

O terceiro modelo de predição utilizado, Linear Model (LM) (ou Regressão Linear Múltipla), é baseado em regressão linear. Este modelo procura encontrar estimativas dos parâmetros em que a soma dos erros ao quadrado ou a função da soma dos erros ao quadrado é minimizado (KUHN & JOHNSON, 2013). Este modelo pode ser escrito da seguinte forma matricial:

$$V = \alpha + U\beta + \epsilon$$

onde  $\alpha$  e  $\beta$  são vetores dos coeficientes determinados pelo método de mínimos quadrados,  $U$  é a matriz com os valores da covariável, e  $\epsilon$  é o vetor de erro da predição. Assim como nos outros modelos preditivos, são separadas amostras de treinamento e validação aleatoriamente, com objetivo de encontrar o plano que minimiza a soma dos erros ao quadrado entre os dados observados e preditos.

O algoritmo Cubist atua de maneira similar ao Random Forest, porém, mescla métodos de classificadores do tipo árvore com regressão linear múltipla – o que permite analisar relações não lineares dentro do conjunto de dados (KUHN, 2017). Este modelo particiona os dados em subconjuntos, tornando-os mais homogêneos em relação às variáveis a serem preditas e as covariáveis, comparados com a utilização de todo o conjunto de dados. O método ajusta um modelo de regressão para cada subconjunto de dados definido, hierarquiza um conjunto de regras, e ajusta um modelo de regressão para cada um destes subconjuntos.

O Earth consiste em um modelo de splines de regressão múltipla adaptativa, também conhecido pela sigla MARS (Multiple Adaptative Regression Splines). Trata-se de um modelo não-paramétrico de interpolação que modela não-linearidades e interações entre variáveis (ZHANG, 2020). O algoritmo automaticamente cria um modelo de dados particionado, avaliando pontos de corte similares a funções por etapas, e cria uma regressão linear com os dados de interesse (GOH et al. 2018).

## 2.6. Avaliação da performance dos modelos

A performance dos modelos foi avaliada comparando os dados preditos com os dados separados para validação, e a acurácia avaliada a partir dos índices: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e do erro médio absoluto (MAE).

O  $R^2$  representa a relação entre a soma dos quadrados dos resíduos da regressão (SQR) e a soma total dos quadrados (SQT), pela seguinte equação:

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

onde,  $R^2$  é o coeficiente de determinação ( $0 \leq R^2 \leq 1$ );  $y_i$  é o valor observado da variável dependente;  $\hat{y}_i$  é o valor estimado da variável dependente; e  $\bar{y}$  é a média da variável dependente.

O RMSE é calculado pela seguinte equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}$$

em que  $d$  é a diferença entre valores observados e preditos, e  $n$  é o número de amostras. Quanto maiores forem os valores de RMSE, maiores são as discordâncias entre os conjuntos de dados comparados (BHERING et al., 2016), ou seja, maiores as diferenças entre os valores preditos e observados. Quanto maior o  $R^2$  e menores o RMSE e MAE melhor avaliado é o modelo (GOMES et al., 2019).

Para cada modelo e conjunto de dados o processamento de modelagem foi repetido 100 vezes, possibilitando a elaboração de um “mapa médio”, a partir da média destes 100 resultados para cada pixel. Este procedimento foi adotado porque os modelos preditivos selecionam as amostras dos conjuntos de treinamento e validação aleatoriamente, podendo gerar diferentes resultados cada vez que o modelo é executado, e também por tornar possível avaliar performance e estabilidade da predição do algoritmo (KUHN & JOHNSON, 2013).

A performance dos modelos preditivos foi avaliada através da comparação da média dos índices  $R^2$ , RMSE e MAE. Assim, além de aumentar a chance de ter uma maior representatividade real dos dados inseridos para as etapas de treino e validação, este procedimento possibilita gerar um mapa de erro (mapa de coeficiente de variação) a partir do mapa médio do atributo de interesse.

Para conferência dos mapas preditos e avaliação da melhor predição em termos de espacialização, os dados de textura foram convertidos para classes de subgrupamento textural. Foram utilizados mapas elaborados segundo método tradicional de mapeamento de solos, em

nível semi-detalhado (1:30.000), para comparação. As unidades de mapeamento destes mapas de solos foram comparadas com os mapas preditos.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Distribuição dos valores de areia e argila

Os resultados da análise granulométrica são sumariamente apresentados na Figura 3 e no Quadro 3 para os horizontes A e B, respectivamente.

Os teores de argila do conjunto de amostras utilizadas neste estudo variaram de 3.4 a 89.0 dag.kg<sup>-1</sup> nos horizontes superficiais, enquanto em subsuperfície a variação foi entre 0.0 e 89.7 dag.kg<sup>-1</sup> (Quadro 3). Enquanto a média aumenta 8.2 dag.kg<sup>-1</sup> dos horizontes A para os horizontes B, a mediana tem aumento de 10.2 dag.kg<sup>-1</sup>, confirmando tendência de incremento de argila em subsuperfície observada em solos de Tabuleiros Costeiros (Grupo Barreiras) em outras regiões do Brasil (RIBEIRO, 1998; OLIVEIRA, 2000; KER et al., 2017b). Nas duas profundidades o desvio padrão apresenta valores similares, de 16.0 e 17.8 dag.kg<sup>-1</sup>, assim como o coeficiente de variação - indicando variabilidade semelhante.

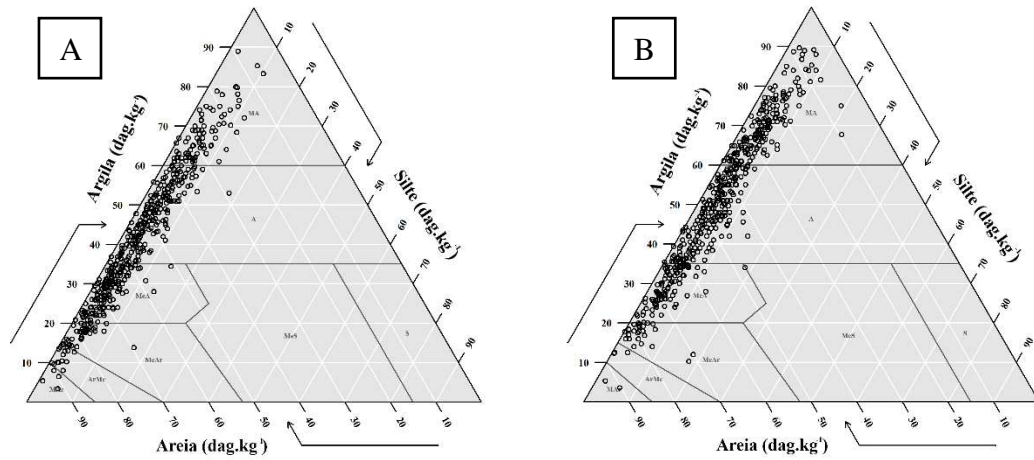
**Quadro 3.** Estatística descritiva dos teores de argila e areia do conjunto de dados utilizado para treinamento e validação dos modelos preditivos utilizados neste estudo.

Horiz.	Var.	Unidade	Min	Q1	Med.	Média	Q3	Máx	DP	CV (%)
<b>A</b> (n = 707)	Argila	(dag.kg <sup>-1</sup> )	3.4	29.6	39.7	41.2	53.0	89.0	16.0	38.8
	Areia	(dag.kg <sup>-1</sup> )	6.3	43.0	56.0	54.8	66.9	93.8	16.6	30.2
<b>B</b> (n = 667)	Argila	(dag.kg <sup>-1</sup> )	0.0	36.0	49.9	49.4	64.0	89.7	17.8	36.1
	Areia	(dag.kg <sup>-1</sup> )	4.9	32.0	45.1	46.0	60.0	92.6	18.0	39.2

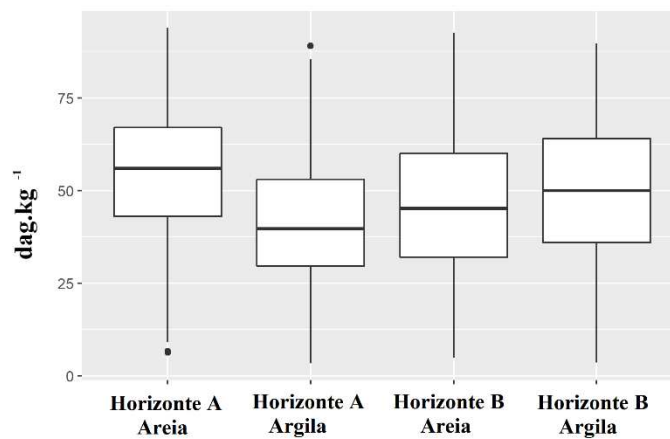
Horiz. – horizonte; n - número de amostras; Var. – variável; Min – mínimo; Q1 – 1º quartil; Med. – mediana; Q3 – 3º quartil; Máx – máximo; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

Quanto à fração areia, como já era esperado, apresentou distribuição inversamente proporcional à argila, com sua média e mediana diminuindo do horizonte A para o horizonte B. De maneira geral, em termos da variabilidade das duas variáveis dentro de cada horizonte, com auxílio da Figura 4 podemos observar que seguem uma tendência semelhante. Percebe-se que há um ligeiro incremento da variabilidade de areia no horizonte B em relação ao horizonte A, que talvez seja explicada pela maior amplitude de seus teores em relação à fração argila.

**Figura 3.** Triângulo textural com os teores de areia, silte e argila das amostras de solos em seus horizontes A (A) e horizontes B (B).



**Figura 4.** Diagrama boxplot dos teores de areia e argila das amostras do banco de dados de solos utilizado no estudo.



### 3.2. Covariáveis selecionadas e performance dos modelos

Os modelos apresentaram divergências quanto ao número de covariáveis utilizadas (Figuras 5 e 6), e também quanto a quais foram selecionadas (Apêndice I) para obtenção de melhores performances. Nos Quadros 4 e 5 são apresentados os resultados da média do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), de raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro médio absoluto (MAE). Em termos gerais, não houve diferenças significantes quando comparados os modelos, dentro das mesmas condições (horizonte utilizado, atributo predito, ou conjunto de covariáveis).

Os melhores valores de  $R^2$  da validação foram obtidos quando utilizado o conjunto de covariáveis com dados aerogeofísicos (PG + IM + AG), tanto na predição de argila quanto de

areia, utilizando o horizonte B. Os modelos Random Forest (RF), Cubist e Support Vector Machine (SVM) se mostraram as melhores opções por apresentaram maior  $R^2$ , e menores RMSE e MAE. Para argila foram obtidos valores de  $R^2$  de 0.374, 0.378 e 0.361, e para areia 0.369, 0.364 e 0.344, respectivamente.

O algoritmo Earth foi o que apresentou pior performance em todos os arranjos experimentais, com os melhores  $R^2$  ocorrendo com amostras de horizonte B, sendo 0.318 e 0.316 para argila e areia, respectivamente. O modelo de Regressão Linear (LM), teve a segunda pior performance quando observada a predição de argila (0.340), porém, para areia apresenta performance similar ao SVM. Porém, foi o modelo que apresentou o maior número de outliers, quando executadas as 100 predições, e estes com os valores mais distantes do seu respectivo conjunto de dados, e assim como o anterior, sua utilização foi descartada.

Em quase todos os casos o modelo RF conseguiu melhor performance quando olhamos o  $R^2$  e RMSE utilizando menos covariáveis, a exceção é para a utilização de dados de horizonte B sem covariáveis de dados aerogeofísicos, onde o Cubist apresenta resultado similar (Figura 6). Destaca-se o menor número de covariáveis utilizados pelo RF nas predições de argila (Figuras 9 e 10). O resultado do MAE nesta etapa acompanha as tendências de performance descritas para  $R^2$ .

Os gráficos de performance dos modelos na etapa de seleção de covariáveis pela técnica de eliminação de variável recursiva (RFE) evidenciam comportamento muito similar entre as predições feitas para as variáveis argila e areia, em todos os casos experimentados.

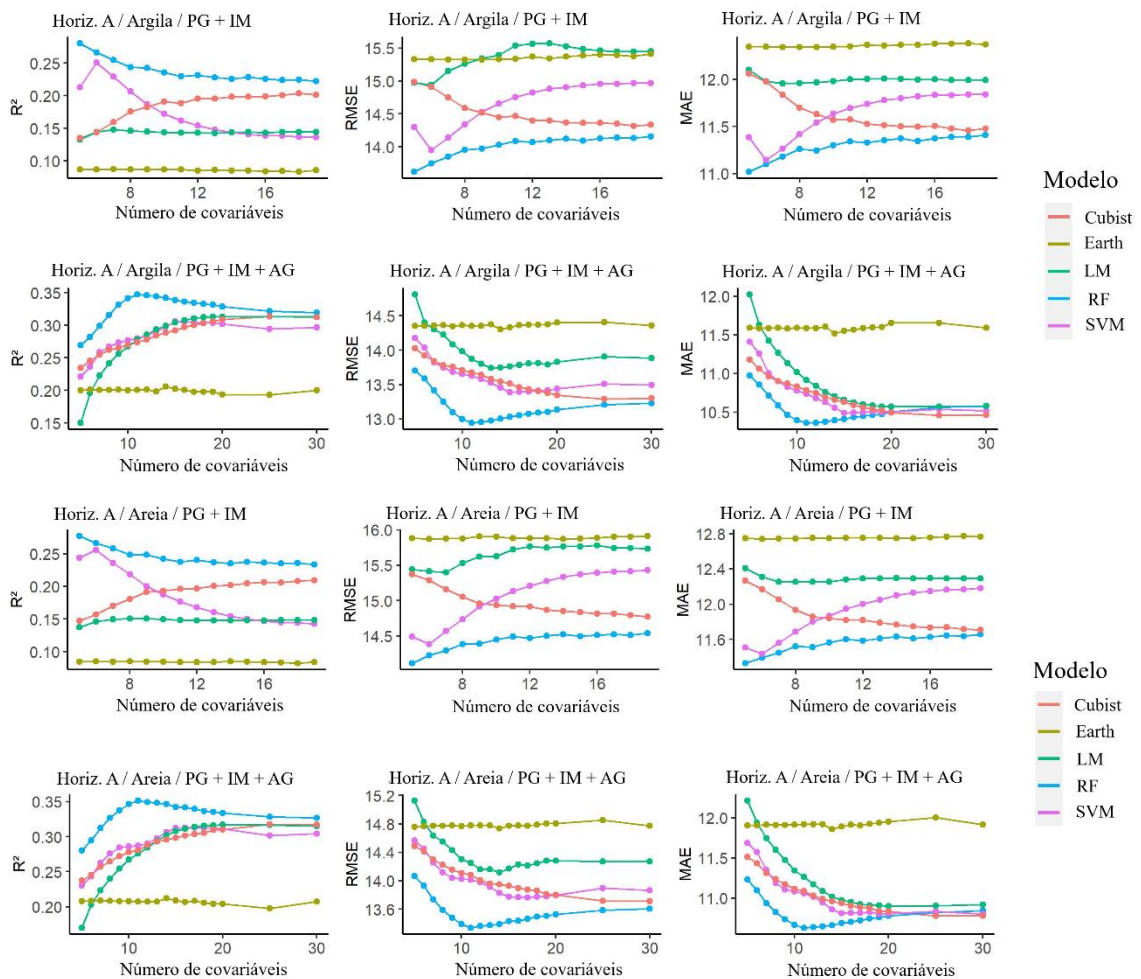
Essa constatação se repete quando observados os diagramas boxplots (Figuras 7 e 8) e os Quadros 4 e 5, correspondentes aos resultados da média dos parâmetros de avaliação de performance de 100 predições realizadas. Independente do modelo utilizado, do tipo de horizonte ou do conjunto de covariáveis, os valores de  $R^2$ , RMSE e MAE são quase idênticos para os dois atributos.

O fato das frações argila e areia apresentarem teores inversamente proporcionais na realidade estudada explica este resultado, pois, se determinada covariável tem correlação com teores de argila automaticamente apresenta correlação negativa com os teores de areia. A utilização da coordenada geográfica como covariável provavelmente é o principal motivo deste comportamento, e esta se mostrou muito importante em todos os modelos (Apêndice I).

Outro exemplo é a conhecida correlação existente entre as frações mais finas do solo e teores medidos de urânio (U) e tório (Th) pela gama espectrometria (MEGUMI & MAMURO, 1977; DICKSON & SCOTT, 1997). Observando os gráficos de importância de covariáveis em todos os modelos, é observado a participação de pelo menos uma covariável de gamaespectrometria com contribuição maior do que 50% na predição. Isso cria um tipo de “espelhamento” quando confrontados os parâmetros de avaliação da performance dos modelos.

Quanto à importância das covariáveis escolhidas pelos modelos nas predições de cada um dos atributos, é verificado que há diferenças tanto no ranqueamento quanto na composição da escolha (Apêndice I). As Figura 9 e 10 ilustra essa situação, mostrando que enquanto o Cubist mantém praticamente a mesma configuração de importância para os dois atributos, o Random Forest altera tanto a ordem quanto a composição do grupo de covariáveis escolhido.

**Figura 5.** Performance dos modelos na etapa de seleção de covariáveis para predição de argila e areia, calibrados com dados de horizonte A, utilizando a técnica RFE.



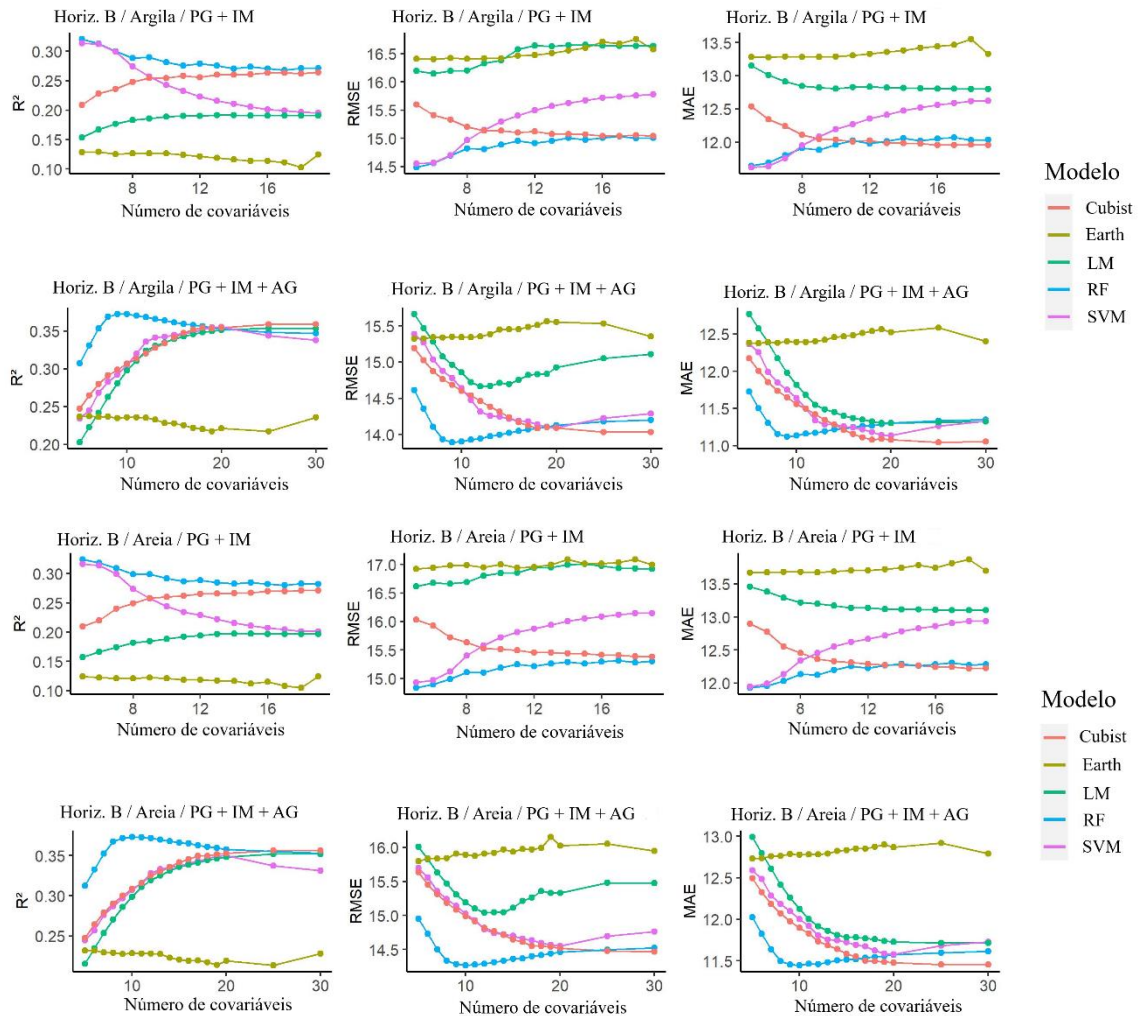
Comparando os resultados obtidos calibrando os modelos com amostras analisadas de horizonte A ou de horizonte B, percebe-se um incremento de  $R^2$  e ligeiro decréscimo de RMSE e MAE, quando utilizadas amostras de subsuperfície (Quadros 4 e 5). Isso acontece em todos os modelos preditivos, para argila e areia, e quando utilizados os dois conjuntos de covariáveis. Esse comportamento surpreendeu as expectativas para as previsões com uso de dados aerogeofísicos, pois era esperado que o horizonte superficial obtivesse melhor performance com uso de gamaespectrometria considerando que esta técnica, teoricamente, acessa os primeiros 30 cm da superfície (DICKSON & SCOTT, 1997).

No gráfico de importância das covariáveis dos modelos e conjunto de covariáveis com melhores performances (Figuras 9 e 10), observa-se que o Random Forest ranqueou potássio (kb) e tório (thc), da gamaespectrometria, como mais importantes na previsão de argila para o horizonte A, enquanto que no horizonte B a posição geográfica (x e y) tiveram maior contribuição. Para areia, existe uma tendência similar, com mais participação de covariáveis de gamaespectrometria no horizonte B, em relação a essa mesma profundidade na previsão de argila.

Já no Cubist, a posição geográfica é o fator de maior importância considerado na previsão, tanto para argila quanto para areia, em qualquer profundidade. Dentre o restante das covariáveis com importância maior do que 50%, mesclam-se os dados dos índices morfométricos e aerogeofísicos, destacando-se a magnetometria com muito mais contribuição do que no modelo anterior.

Os resultados mostram que a utilização de covariáveis oriundas de levantamento aerogeofísico aumentam significativamente os valores de  $R^2$  para os modelos. Independente do atributo predito ou do horizonte utilizado na calibração há incremento no desempenho, porém, não há diminuição significativa nos valores de RMSE e MAE. Os diagramas boxplots da avaliação da performance (Figuras 7 e 8) evidenciam os ganhos de cada algoritmo, com destaque para o Cubist com aumento de quase 10% no valor de  $R^2$ . Resultados similares foram reportados por Loiseau et al., (2020), que verificaram um aumento muito considerável de valores de  $R^2$  quando utilizado conjunto de covariáveis com gamaespectrometria em relação à previsão sem esses dados.

**Figura 6.** Performance média (100 loops de RFE) dos modelos na etapa de seleção de covariáveis para predição de argila e areia, calibrados com dados de horizonte B, utilizando a técnica RFE.



Paul et al., (2020) verificaram que há melhora da performance do modelo ( $R^2$ ) para predição de argila com RF quando utilizadas bandas de Landsat em comparação com covariáveis morfométricas. Maior incremento ainda foi verificado usando como covariável mapeamento de solos existente para a área. No presente estudo, a combinação entre as covariáveis morfométricas e produtos de levantamento aerogeofísico incrementaram os ganhos em performance, porém, a inserção das coordenadas geográficas das amostras do banco de dados de solos parece ter sido um fator de destaque na melhor calibração dos modelos, pelo fato da textura ser uma variável contínua.

Alguns autores verificaram performances semelhantes de RF para predição de argila. Taques (2014) em predição de argila utilizando covariáveis morfométricas,

gamaespectrometria e bandas de Landsat, para área de relevo mais acidentado e com variação de litologia, encontrou valor de  $R^2$  (0.34) pouco abaixo e menor RMSE (8.37) no modelo RF. O mesmo autor encontrou menores valores de  $R^2$  (0.22) e RMSE (8.38) quando a variável predita foi a areia. Bhering et al., (2016) em área com grande variabilidade litológica e diferentes resoluções espaciais de MDE, utilizando RF observaram maiores valores de  $R^2$  (0.40 e 0.44) e RMSE semelhante e maior (14.81 e 18.88), para argila e areia respectivamente. Assim como Chagas et al., (2016) em relevo plano com variabilidade litológica, utilizando bandas Landsat, que encontraram  $R^2$  de 0.56, e menor RMSE (7.39) para argila.

**Quadro 4.** Comparação da performance dos modelos e arranjos experimentais executados para argila, com o valor médio de 100 predições.

Horiz.	Conjunto de covariáveis	Modelo				
		Cubist	Earth	LM	SVM	RF
<b><math>R^2</math></b>						
A	PG + IM	0.209	0.106	0.127	0.280	0.251
	PG + IM + AG	0.325	0.252	0.299	0.282	0.335
B	PG + IM	0.289	0.225	0.175	0.327	0.330
	PG + IM + AG	0.378	0.318	0.340	0.361	0.374
<b>RMSE</b>						
A	PG + IM	14.25	15.17	15.32	13.99	13.55
	PG + IM + AG	13.15	13.93	13.54	13.67	12.99
B	PG + IM	14.73	15.42	16.82	14.42	14.27
	PG + IM + AG	13.81	14.5	15.62	14.04	13.80
<b>MAE</b>						
A	PG + IM	11.40	12.12	12.01	11.13	10.85
	PG + IM + AG	10.35	11.03	10.55	10.62	10.38
B	PG + IM	11.69	12.23	12.72	11.46	11.42
	PG + IM + AG	10.85	11.53	11.32	11.01	11.04

A comparação com estes trabalhos leva a crer que a variabilidade litológica e de cotas altimétricas, tem influência para melhor performance dos modelos de predição – características não encontradas na área de estudo. Na área de estudo, além do relevo suavizado, a litologia é constituída apenas por sedimentos do Grupo Barreiras, que por sua variabilidade granulométrica natural, tornam difícil tanto a utilização de técnicas de MDS quanto o mapeamento convencional.

Outro fator é que os autores citados trabalharam com áreas maiores do que a área objeto desde estudo, contabilizando maior possibilidade de outras características heterogêneas de relevo que podem contribuir para um ganho de performance dos algoritmos.

A verificação da importância e quais covariáveis foram escolhidas é essencial, pois é a etapa da utilização de algoritmos de *machine learning* em que o especialista da área, neste caso o Pedólogo, baseado em seus conhecimentos específicos consegue avaliar se faz sentido a utilização de determinados dados na predição do atributo/variável de interesse na realidade aplicada.

**Quadro 5.** Comparação da performance dos modelos e arranjos experimentais executados para areia, com o valor médio de 100 predições.

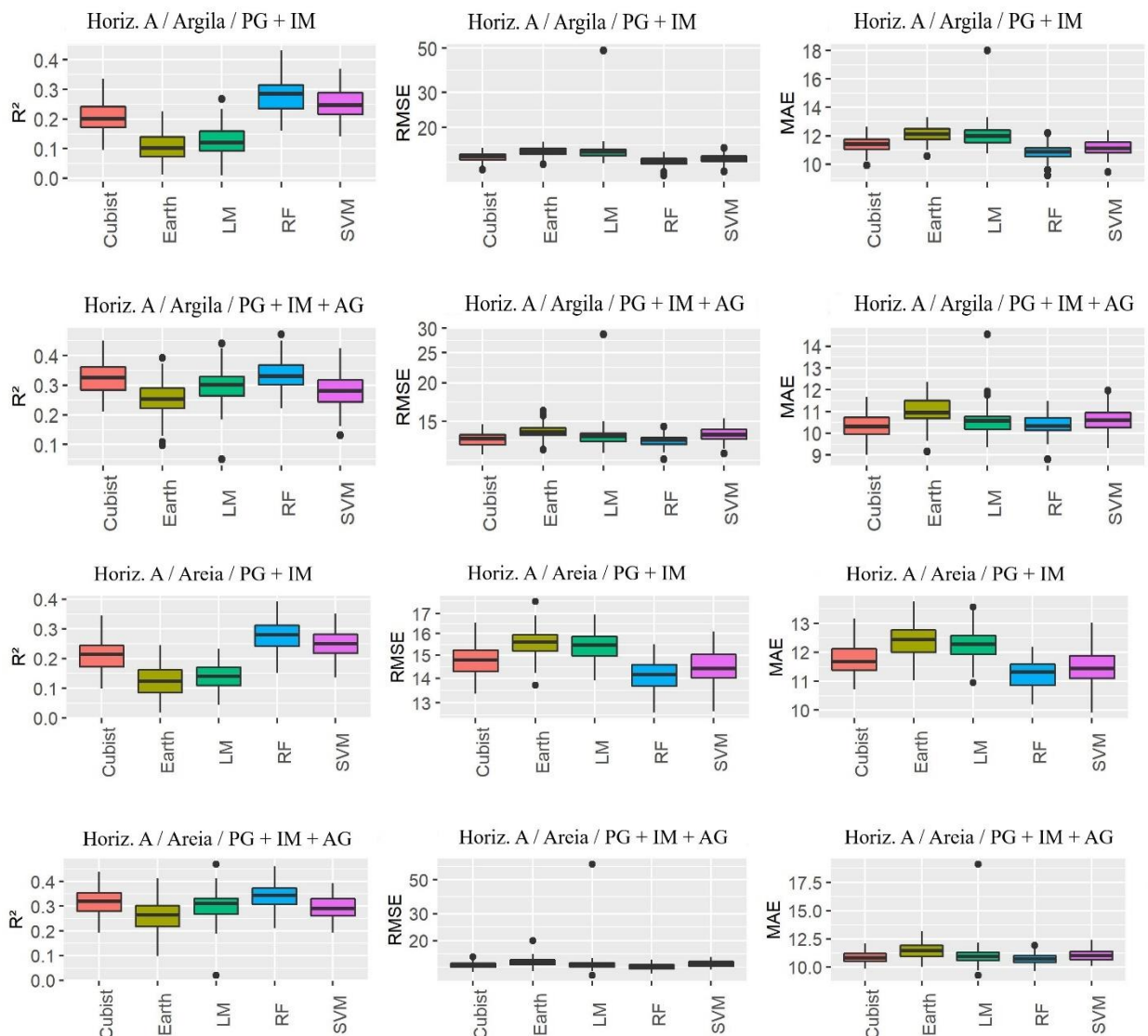
Horiz.	Conjunto de covariáveis	Modelo				
		Cubist	Earth	LM	SVM	RF
<b>R<sup>2</sup></b>						
A	PG + IM	0.210	0.125	0.140	0.253	0.278
	PG + IM + AG	0.317	0.259	0.300	0.291	0.343
B	PG + IM	0.277	0.217	0.176	0.334	0.338
	PG + IM + AG	0.364	0.316	0.340	0.344	0.369
<b>RMSE</b>						
A	PG + IM	14.83	15.58	15.41	14.49	14.11
	PG + IM + AG	13.78	14.44	14.38	14.08	13.43
B	PG + IM	15.40	16.11	16.69	14.84	14.69
	PG + IM + AG	14.44	14.99	14.98	14.71	14.34
<b>MAE</b>						
A	PG + IM	11.76	12.39	12.23	11.49	11.25
	PG + IM + AG	10.87	11.42	11.01	11.01	10.71
B	PG + IM	12.25	12.78	13.12	11.83	11.76
	PG + IM + AG	11.42	11.95	11.66	11.64	11.45

A partir avaliação dos gráficos de importância, mesmo o modelo Support Vector Machine (SVM) apresentando performance semelhante ao Cubist e ao Random Forest, este modelo foi descartado. Baseado no conhecimento de campo e observações feitas durante o mapeamento em nível semi-detalhado da área de estudo, percebe-se que há alguma tendência, mesmo que seja difícil de delimitar os padrões, de relação da textura com o relevo. O SVM elencou como covariáveis mais importantes (acima de 50%) apenas as relacionadas com gamaespectrometria e magnetometria. Do ponto de vista pedológico, apesar de existir

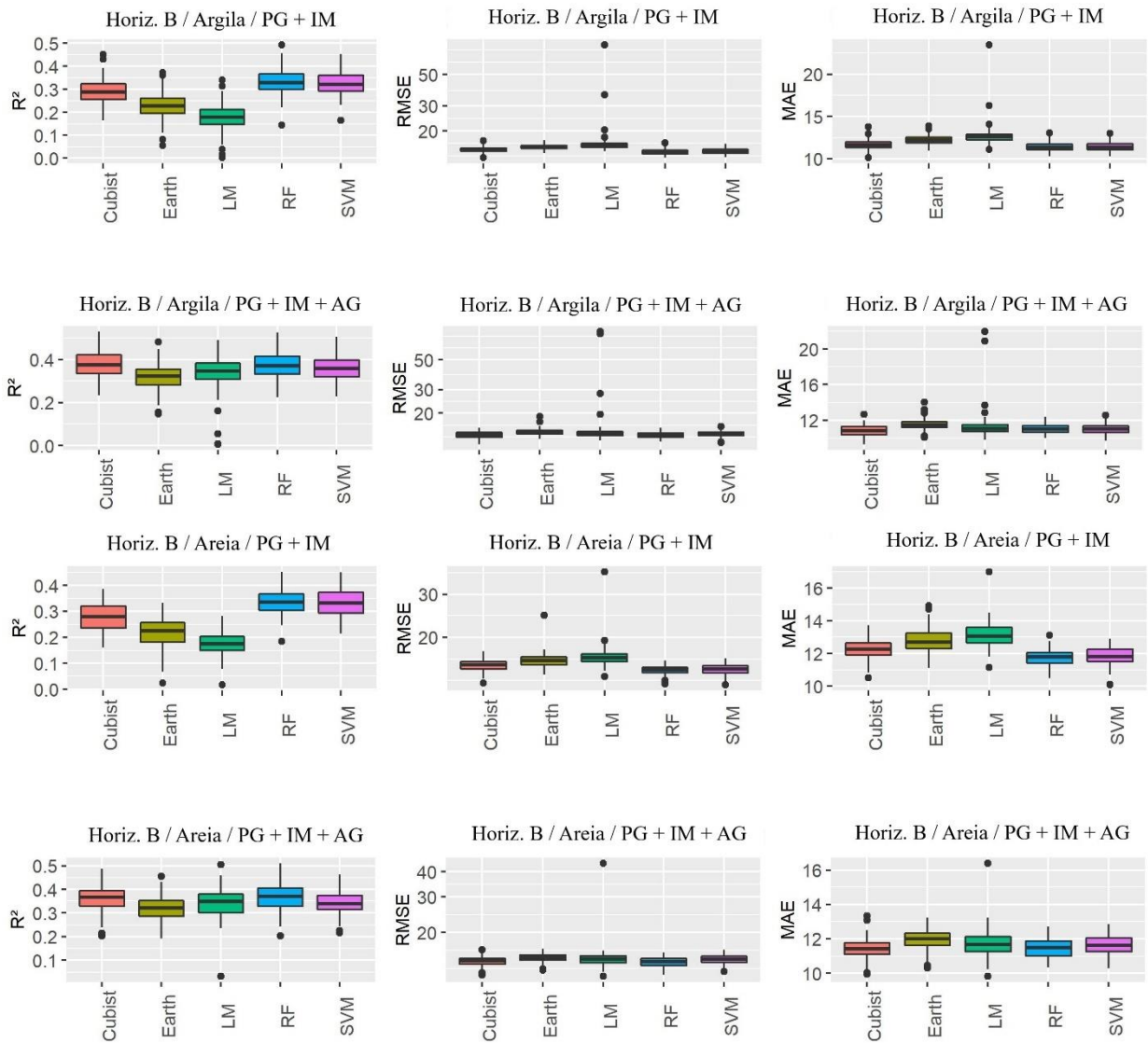
correlação da textura com as covariáveis desta natureza elas, exclusivamente, não explicam a distribuição textural dos solos do local de estudo.

As covariáveis que mais influenciaram nos resultados dos algoritmos de melhor performance deste estudo, considerando importâncias relativas maiores do que 50%, foram: posição geográfica das amostras da base de dados de solos (x e y); modelo digital de elevação (mde); altitude padronizada (standheight); diferentes informações sobre curvatura das vertentes (curvmin, curvmax, curvtang, curvprof, curvgeneral); canais de tório (thb e thc), potássio (kb) e contagem total (ctb e ctc) da gamaespectrometria; e magnetometria (magr e magc).

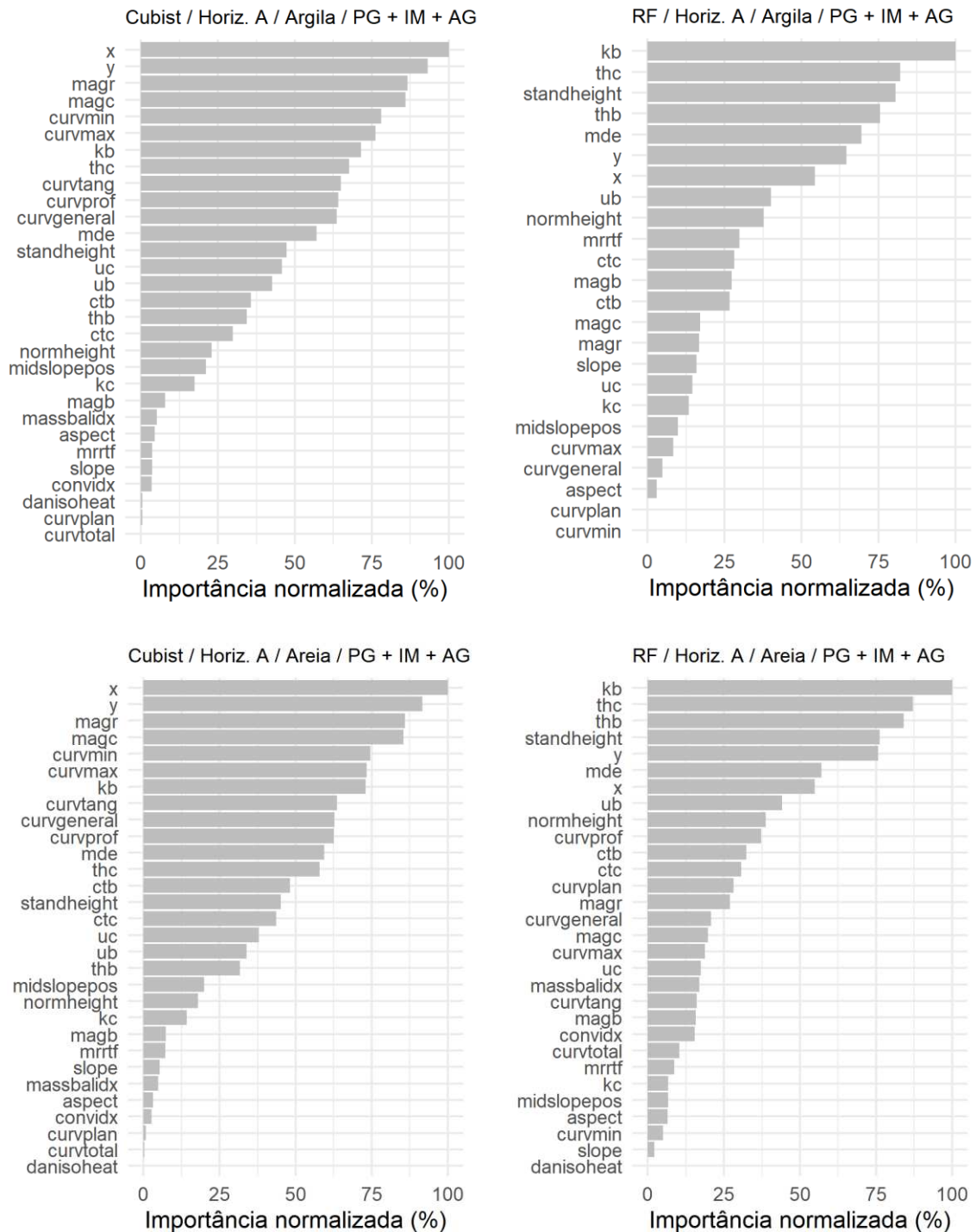
**Figura 7.** Performance dos modelos Cubist, Earth, Regressão Linear (LM), Random Forest (RF) e Support Vector Machine (SVM) na predição de argila e areia utilizando-se amostras de horizonte A, avaliada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz do erro quadrático médio (RMSE), e do erro médio absoluto (MAE) da etapa de validação (*holdout*).



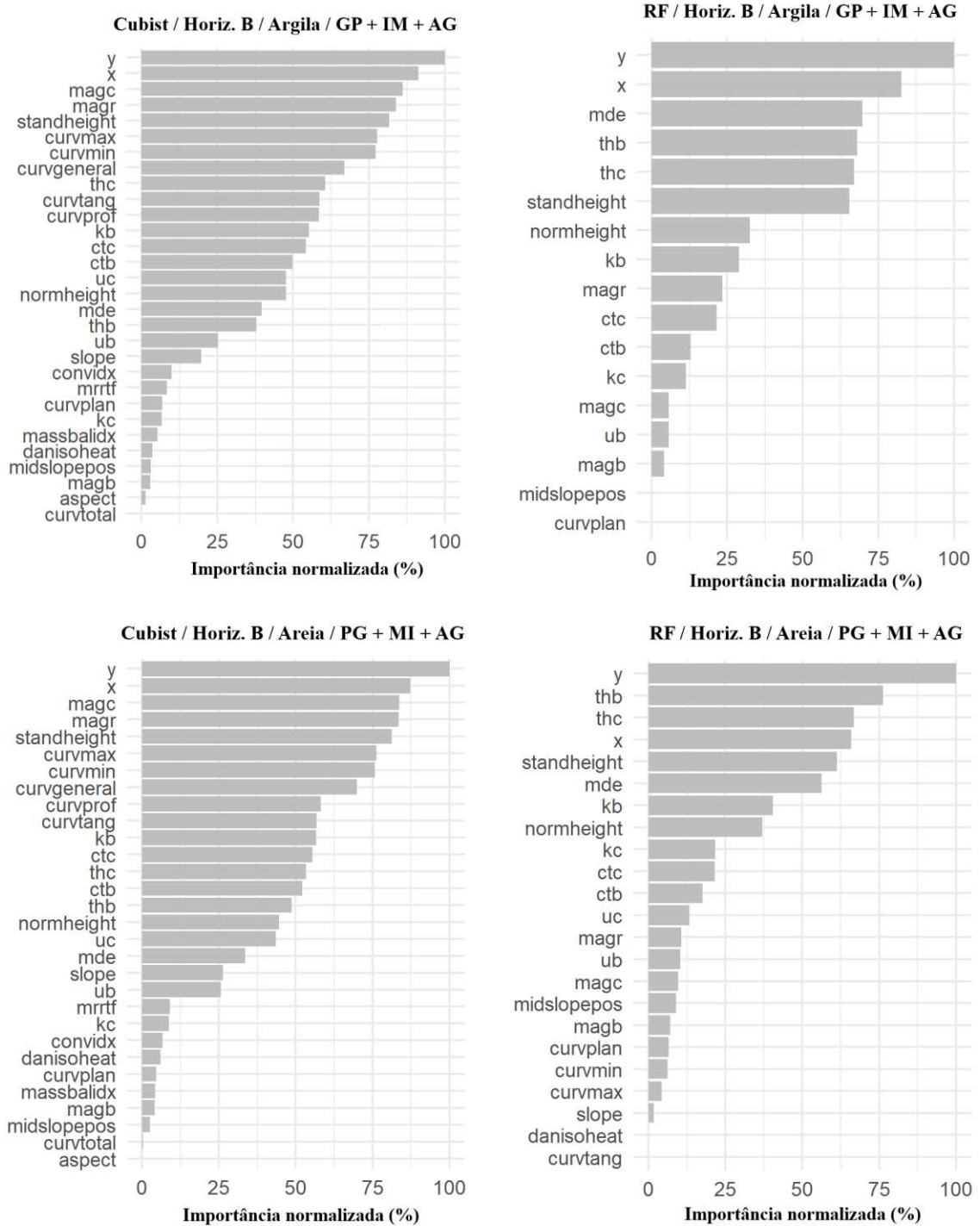
**Figura 8.** Performance dos modelos Cubist, Earth, Regressão Linear (LM), Random Forest (RF) e Support Vector Machine (SVM) na previsão de argila e areia utilizando-se amostras de horizonte B, avaliada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz do erro quadrático médio (RMSE), e do erro médio absoluto (MAE) da etapa de validação (*holdout*).



**Figura 9.** Gráficos de importância relativa das covariáveis selecionadas para predição de argila e areia, calibrados com amostras de horizonte A, nos algoritmos Cubist e Random Forest.



**Figura 10.** Gráficos de importância relativa das covariáveis selecionadas para predição de argila e areia, calibrados com amostras de horizonte B, nos algoritmos Cubist e Random Forest.



### 3.3. Predição dos teores de argila e de areia

Os mapas de distribuição dos teores de argila e areia foram plotados como um mapa médio das 100 predições executadas. Apesar de apresentarem resultados de performance muito semelhantes, os algoritmos Cubist e Random Forest (RF) espacializaram os dados preditos de maneira diferente entre si (Figuras 11 e 12).

Os dois modelos refletiram a dinâmica da textura nos solos da área de estudo, que apresenta incremento de argila em profundidade e teores mais elevados de areia em superfície, como observado através das medianas de cada horizonte nas amostras do banco de dados de solos (Quadro 3).

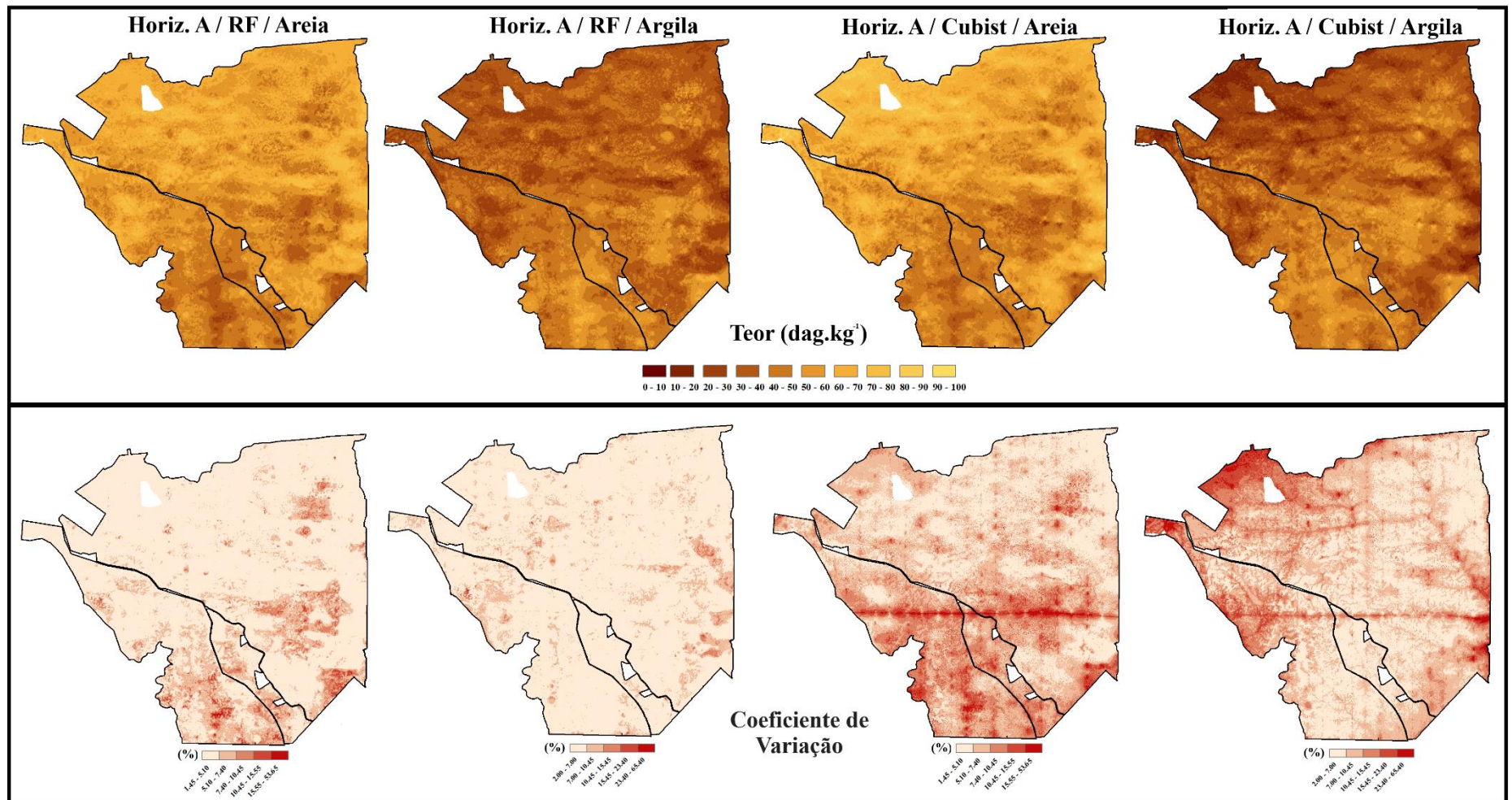
Mesmo sendo métodos diferentes, os dois algoritmos geraram mapas de argila e areia que se complementam, ou seja, conseguiram retratar a natureza inversamente proporcional destes atributos na área de estudo.

Os mapas de coeficiente de variação da predição de cada pixel mostram que o RF teve menor variabilidade em relação ao Cubist para os dois atributos e horizontes. As maiores variabilidades no modelo RF ocorreram em regiões que areia ou argila apresentaram teores mais baixos.

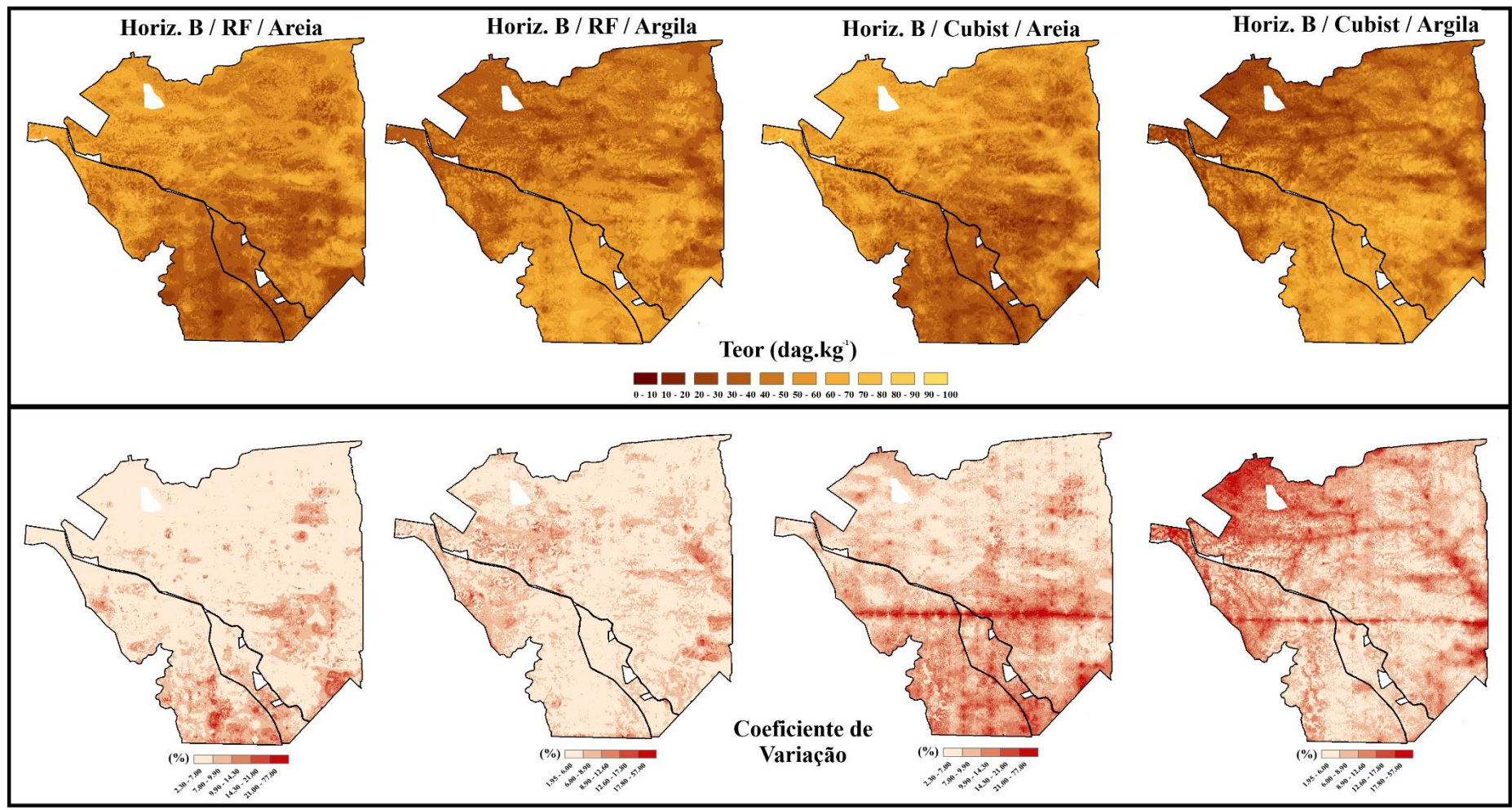
No caso do Cubist, a maior variabilidade também corresponde à locais de teores mais baixos, mas também em regiões com pouca ou nenhuma amostragem de solos, como é o caso de áreas muito próximas da drenagem, e da região noroeste da área. Também fica evidente o grande coeficiente de variação relacionado exatamente às linhas de voo do levantamento aerogeofísico (magnetometria e gamaespectrometria). Através dos mapas de coeficiente de variação gerados por este algoritmo, é possível identificá-las facilmente. Por ter mesclado bem, em maior grau de importância relativa comparando-se com o RF, covariáveis de levantamento aerogeofísico e índices morfométricos, este comportamento não era esperado.

Os mapas de coeficiente de variação são uma poderosa ferramenta na quantificação e sistematização de possíveis erros em um mapeamento. Além disso, tem o potencial de auxiliar a orientar uma futura reamostragem para melhora da performance dos modelos preditivos, e consequentemente, dos mapas de solos.

**Figura 11.** Mapas médios e mapas do coeficiente de variação da distribuição de argila e areia em horizontes A, nos algoritmos Cubist e Random Forest (RF).



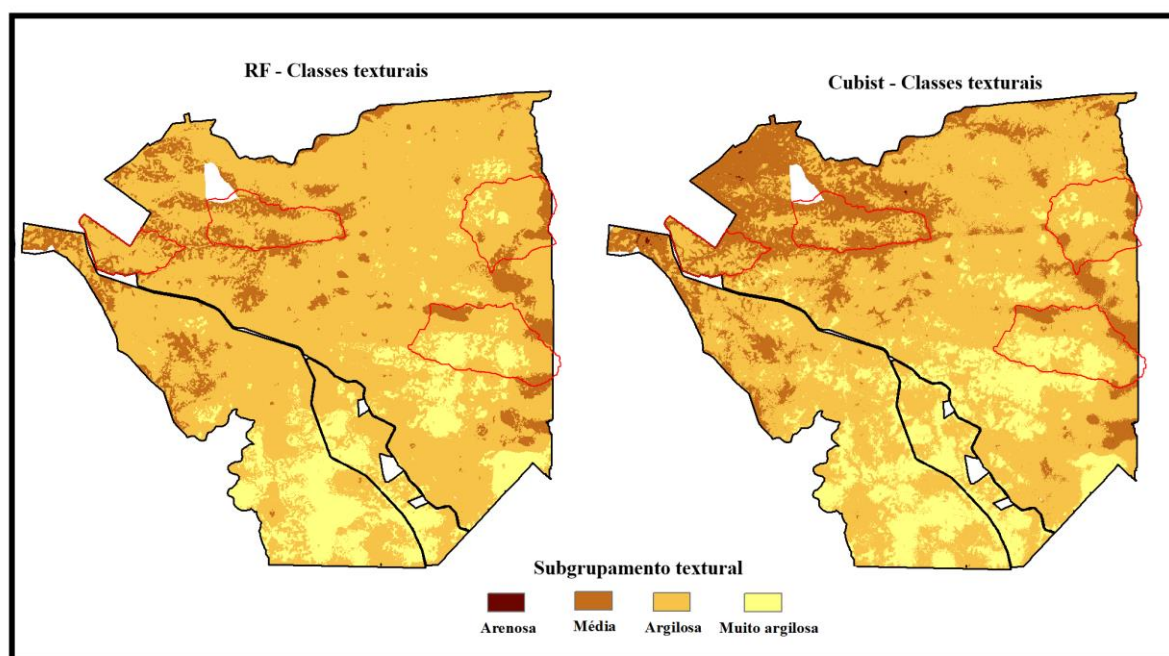
**Figura 12.** Mapas médios e mapas do coeficiente de variação da distribuição de argila e areia em horizontes B, nos algoritmos Cubist e Random Forest (RF).



Para escalas de mapeamento menos detalhadas, os produtos gerados por ambos algoritmos preditores apresentaram desempenho satisfatório. Porém, o objetivo de utilizar um banco de dados de solos tão extenso é testar se as predições executadas também são satisfatórias em nível semi-detalhado. Neste nível de mapeamento de solos, é preferível a utilização de unidades de mapeamento simples, que correspondem a polígonos individuais de cada solo de ocorrência na área, classificado até 5º nível categórico, sendo a textura um dos principais atributos utilizados neste nível categórico da classificação dos solos (IBGE, 2015).

A fim de verificar essa aplicabilidade, os mapas de teores de argila do horizonte B gerados pelo RF e pelo Cubist foram convertidos em mapas de classes de subgrupos texturais – estas utilizadas na definição de unidades de mapeamento simples. Os mapas são apresentados na Figura 13. Como já mencionado os teores de silte são baixos na realidade estudada, sendo utilizadas apenas os subgrupos texturais Arenosa, Média, Argilosa e Muito argilosa.

**Figura 13.** Mapas médios da distribuição de classes de subgrupos texturais, baseado nos mapas de argila em horizontes B, dos algoritmos Cubist e Random Forest (RF). As linhas vermelhas representam limites de glebas com detalhe ampliado em figuras seguintes.



Para comparação em termos de espacialização dos dados, foi feita uma conferência baseada na no mapa de classes de subgrupos texturais de cada modelo, com glebas mapeadas por métodos convencionais de mapeamento de solos em nível semi-detalhado. A

legenda das unidades de mapeamento (UM) utilizadas neste mapeamento é apresentada no Quadro 6. Os mapas de solos representam apenas áreas situadas fora dos limites de área de preservação permanente, ou seja, não foram mapeadas as regiões mais próximas à drenagem.

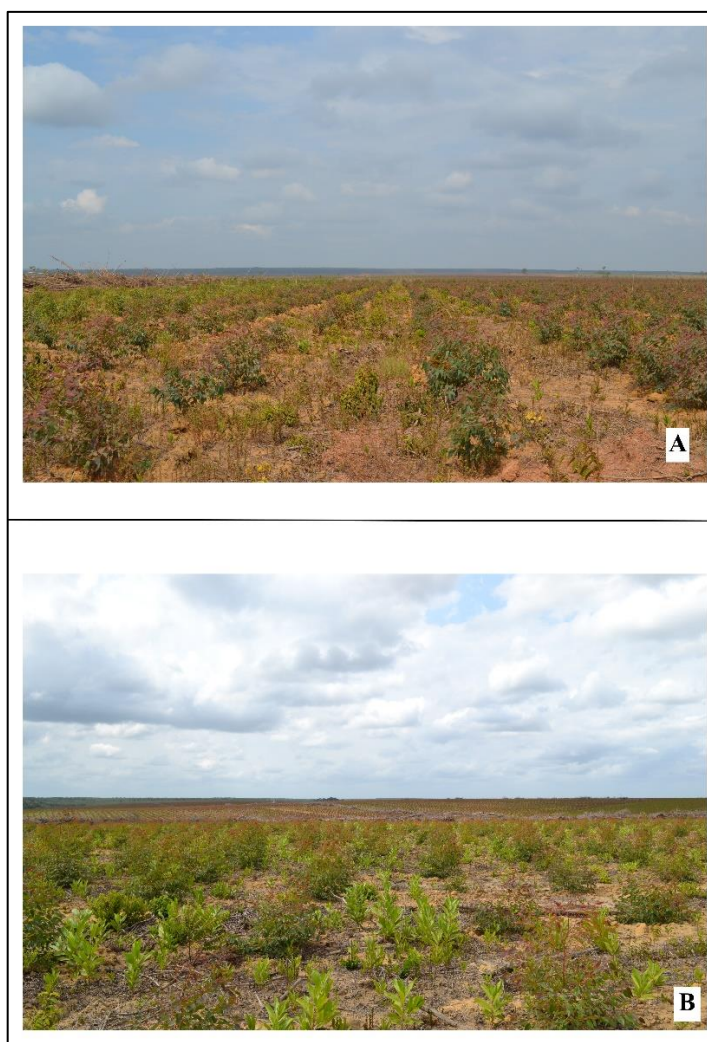
**Quadro 6.** Legenda das unidades de mapeamento (UM) do mapa de solos semi-detalhado (1:30.000) da área de estudo.

<b>UM</b>	<b>Legenda</b>
<b>LAdx5</b>	LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso argissólico, A moderado, textura média, relevo plano a suave ondulado
<b>LAdx6</b>	LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso endopetroplíntico, A moderado, textura argilosa e muito argilosa, relevo plano e suave ondulado + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico endopetroplíntico, A moderado, textura argilosa, relevo suave ondulado a ondulado
<b>LAdx7</b>	LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso típico, A moderado, textura argilosa e muito argilosa, relevo suave ondulado
<b>LAdx9</b>	LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso típico, A moderado, textura argilosa e muito argilosa, relevo plano
<b>LAdx12</b>	LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso típico, A moderado, textura média, relevo plano, fase baixada
<b>LAdx13</b>	LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso câmbico, A moderado, textura muito argilosa, relevo plano
<b>LAdx17</b>	LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso típico, A moderado, textura média, relevo plano a suave ondulado
<b>LAdx19</b>	LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso típico, A moderado, textura argilosa e média, relevo plano a suave ondulado
<b>CXbd1</b>	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico, A moderado, textura argilosa e muito argilosa, relevo suave ondulado a ondulado + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico petroplíntico, A moderado, textura argilosa, relevo suave ondulado a ondulado
<b>PAdx1</b>	ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso típico, A moderado, textura média/argilosa, relevo suave ondulado
<b>PAdx3</b>	ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso típico, A moderado, textura arenosa/média, relevos plano e suave ondulado
<b>PACdx</b>	ARGISSOLO ACINZENTADO Distrocoeso típico, A proeminente, textura muito argilosa e argilosa, relevo plano
<b>FFc1</b>	PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário câmbico ou latossólico, A moderado, relevo suave ondulado a ondulado

A área de estudo se caracteriza como uma realidade difícil de ser mapeada em nível semi-detalhado. A natureza sedimentar do Grupo Barreiras, material de origem dos solos, por

vezes imprime uma variabilidade textural em solos localizados nos mesmos compartimentos de relevo. Através das técnicas convencionais de mapeamentos de solos, conseguimos separar UM de solos, e seus respectivos atributos morfológicos, em diferentes compartimentos da paisagem da região. Porém, é tarefa muito difícil conseguir delinear as unidades de mapeamento, e suas variações texturais, nos topos aplainados que ocorrem na área. A Figura 14 mostra exemplos de topos de Tabuleiros com relevos plano e suave ondulado, evidenciando a falta de estratificadores para auxílio no delineamento das UM.

**Figura 14.** Exemplos de áreas de topo plano (A) e suave ondulado (B), evidenciando a dificuldade de obtenção de estratificadores ambientais para definição das UM baseado em textura.



O Quadro 6 evidencia a dificuldade, pois diante dessa situação nos vemos obrigados a adotar um nível de generalização que inclui duas classes de subgrupamento textural dentro da mesma unidade de mapeamento, o que não é desejável na escala adotada. Ao mesmo tempo, percebe-se que a textura e fase de relevo são os principais fatores de diferenciação entre as UM.

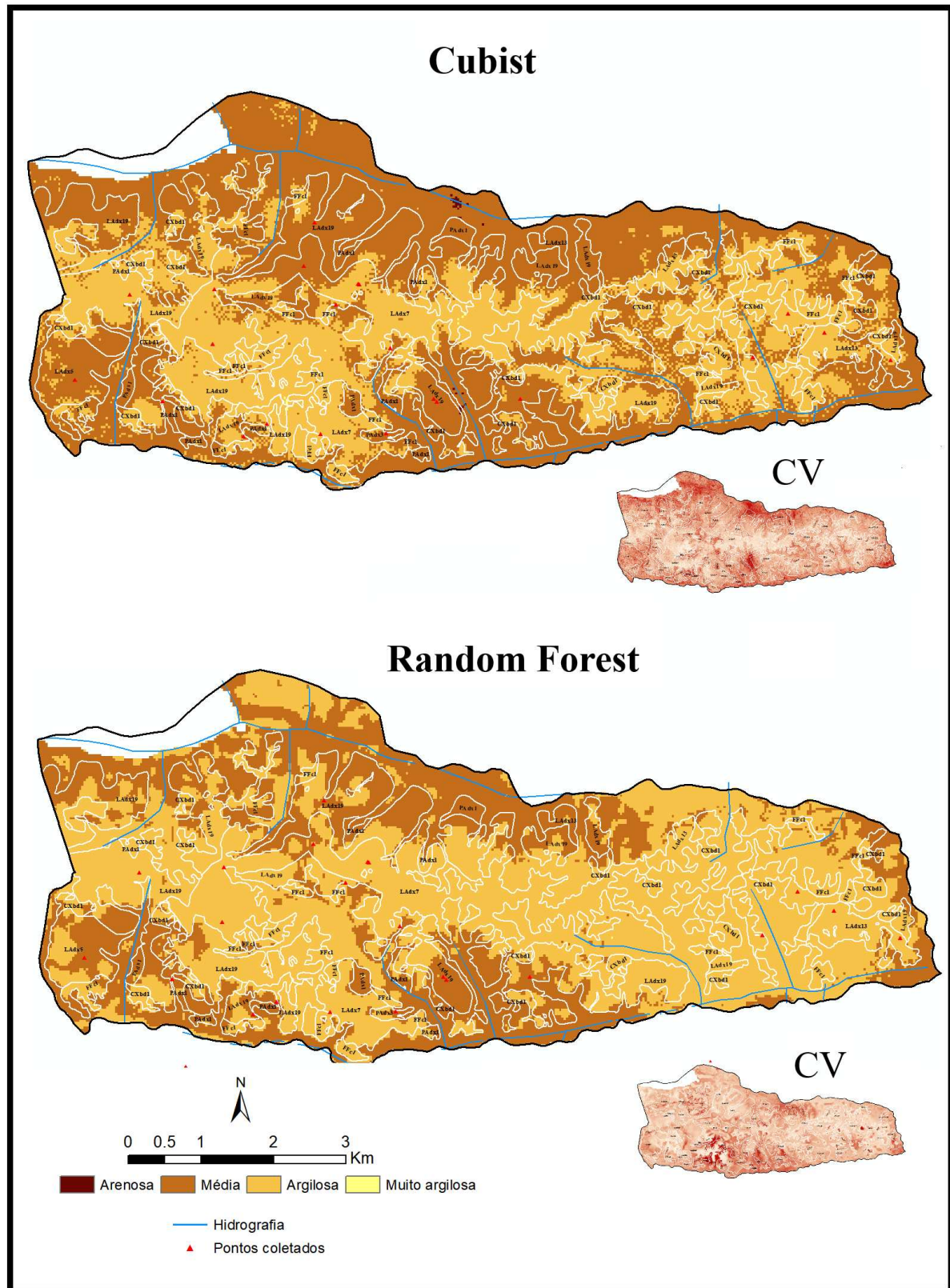
Na Figura 15a foi selecionada uma gleba da área de estudo que possui relevo mais dissecado, em relação ao padrão local. As observações de campo deixam claro um padrão de distribuição de solos em que quanto mais próximo à drenagem maior a tendência de ocorrência de menores teores de argila, e solos com gradiente textural (Argissolos Amarelos Distrocoesos, Argissolos Acinzentados Distrocoesos, e Plintossolos Argilúvicos Tb Distróficos).

Comparando-se os resultados dos dois modelos, neste caso, avalia-se que o Cubist obteve melhor desempenho em demonstrar resultado mais próximo da realidade. Além de seguir a tendência de recortar quase que fielmente as cabeceiras de drenagem com a classe de textura Média (Figura 15a), há boa correlação dos pixels de textura Média com as manchas de LAdx5, UM representada por Latossolos Amarelos Distrocoesos típicos dentro desse subgrupoamento textural. Enquanto que o Random Forest generalizou em excesso as áreas de textura Argilosa, a ponto de plotar esta classe em cima do principal canal de drenagem da gleba, diferente da realidade verificada em campo. A segunda área selecionada, exibida na Figura 15b, é ainda mais dissecada do que a primeira, e os modelos preditivos repetem a tendência observada na primeira (Figura 15a).

Estas duas glebas mencionadas anteriormente, apresentam apenas as classes de subgrupoamento textural média e argilosa, fato confirmado pelos resultados das análises de solo dos pontos coletados nas áreas. Quando observamos glebas em que também ocorre a classe muito argilosa (Figuras 15c e 15d), os modelos apresentaram resultados mais parecidos.



**Figura 15b.** Comparação entre unidades de mapeamento de mapa de solos semi-detalhado em gleba da área de estudo, e os mapas de classe de subgrupo textural preditos e seus respectivos coeficientes de variação.



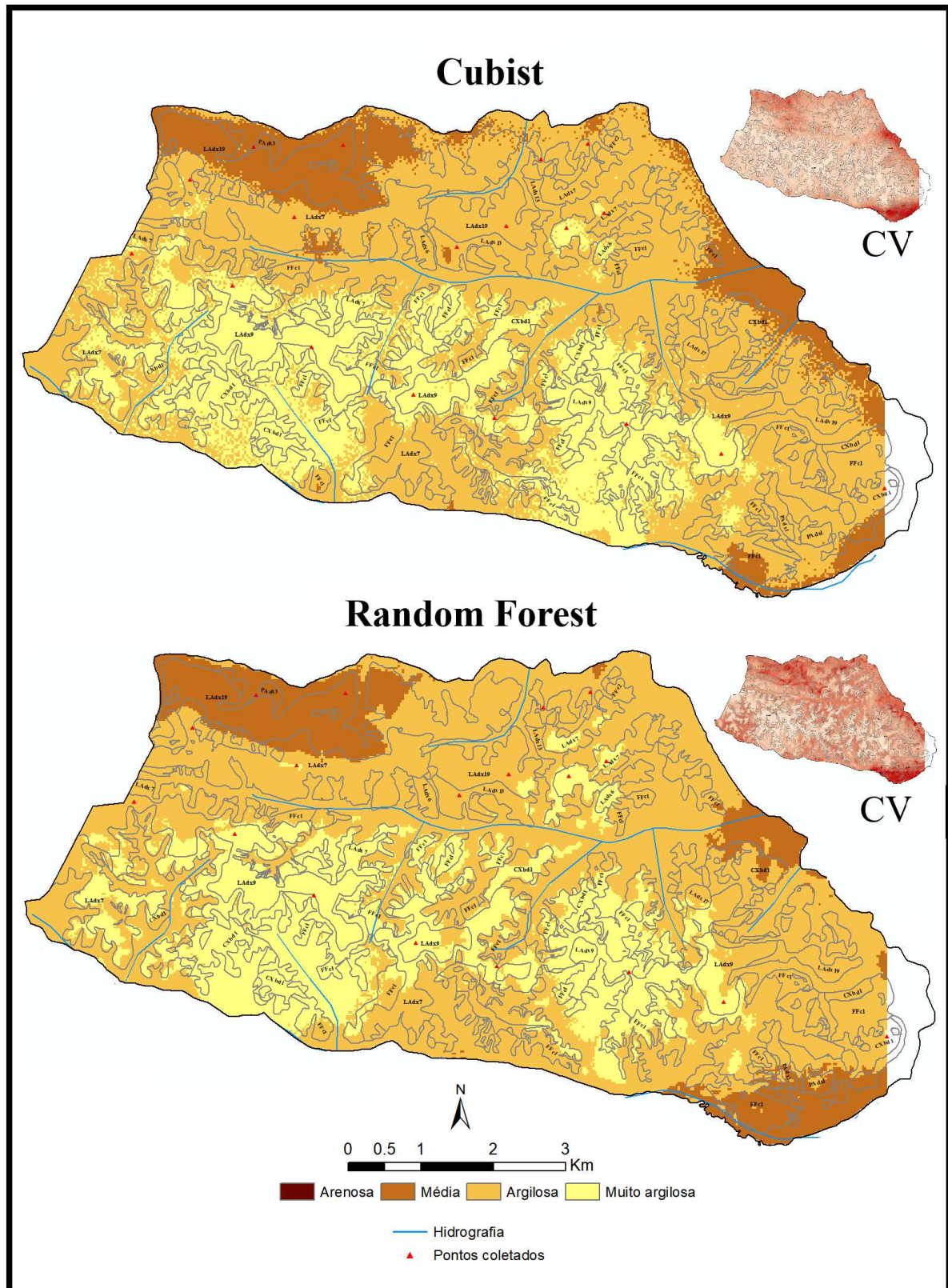
Mesmo sendo duas glebas com padrões de relevo diferenciado, com a Figura 15c apresentando mais entalhamento do que a gleba da Figura 15d, a predição da classe Muito argilosa foi muito similar entre os dois algoritmos, principalmente na segunda, assim como para as outras classes.

Nas situações de topo da paisagem, geralmente aplainados ou suavemente ondulados, a separação das UM pelo subgrupamento textural é tarefa árdua, uma vez que não existem estratificadores ambientais para tal. Nas figuras, estas situações são representadas principalmente pelas UM LAdx7, LAdx9 e LAdx19. No caso das duas primeiras há dificuldade na separação entre as classes Argilosa e Muito argilosa, enquanto na terceira o conflito é entre as classes Média e Argilosa.

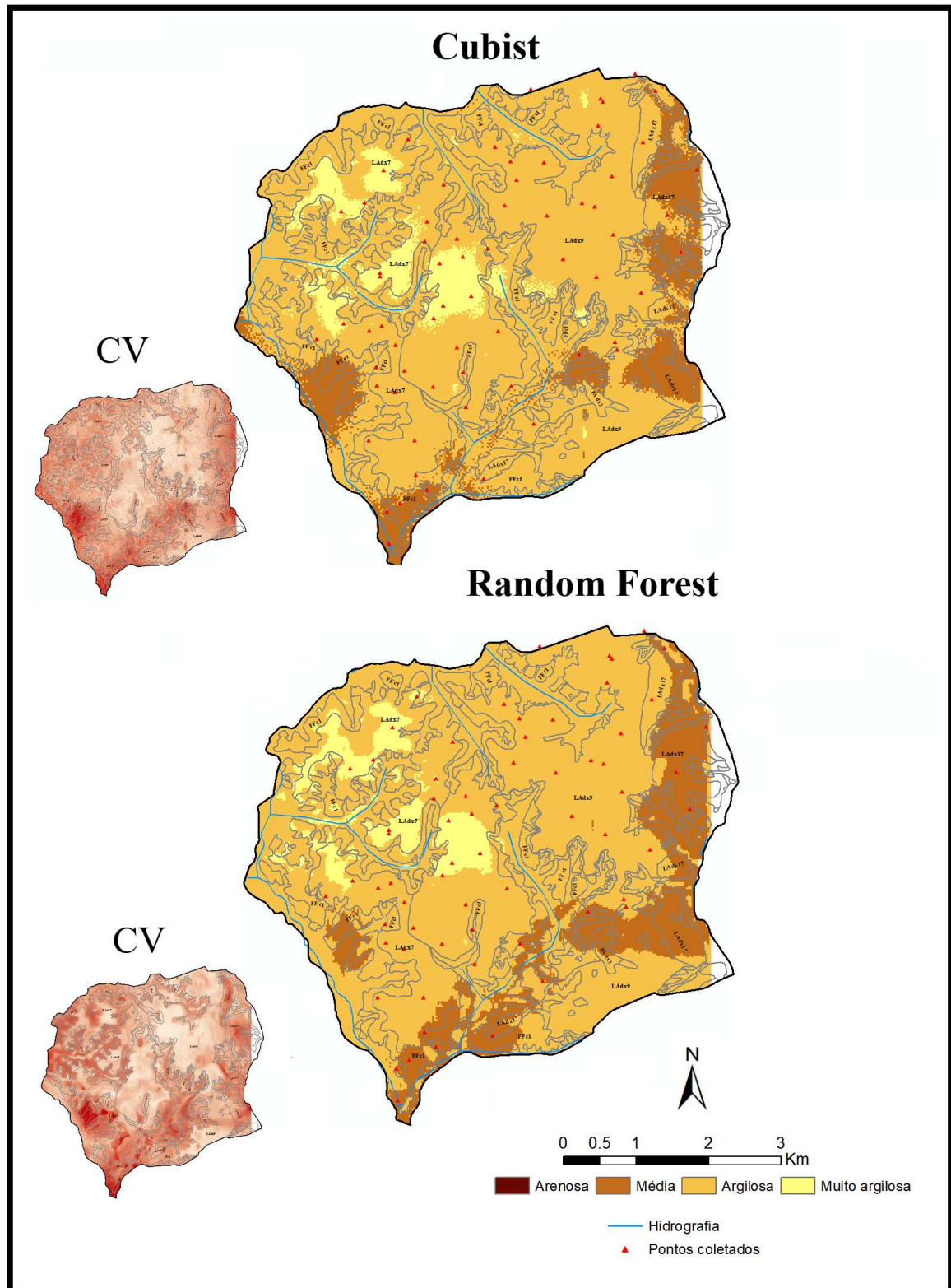
O advento das técnicas de *machine learning*, e a possibilidade de aplicação como foi testado neste estudo, ajuda no delineamento mais preciso em situações deste tipo. No caso da gleba da Figura 15d, fica claro pelos mapas gerados nos dois algoritmos uma mancha de textura Muito argilosa existe no meio de delineamentos das UM LAdx7 e LAdx9, que se situam em topos menos ou mais aplainados, respectivamente. Com a utilização destas predições, é possível separá-la e corrigir o mapa de solos a um novo delineamento com uma UM exclusiva de LAdx textura Muito argilosa, diferente das UM apresentadas no mapa que compreendem à ocorrência de textura argilosa e muito argilosa – situação indesejada na escala de detalhe proposta. Assim como é possível um refinamento dos limites dos delineamentos das UM LAdx9 e LAdx17 à leste desta mesma gleba, a partir dos mapas preditivos gerados.

De maneira geral, os dois modelos apresentaram resultados satisfatórios. Porém, em relevos mais dissecados, o Cubist apresentou melhor desempenho correspondendo mais fielmente à realidade – constatação feita a partir de intensa observação de campo e dados analíticos de amostras coletadas. Para áreas menos dissecadas, e que apresentam a classe textural Muito argilosa, o algoritmo Random Forest tem resultados similares ao Cubist.

**Figura 15c.** Comparação entre unidades de mapeamento de mapa de solos semi-detalhado em gleba da área de estudo, os mapas de classe de subgrupo textural preditos e seus respectivos coeficientes de variação.



**Figura 15d.** Comparação entre unidades de mapeamento de mapa de solos semi-detalhado em gleba da área de estudo, os mapas de classe de subgrupo textural preditos e seus respectivos coeficientes de variação.



#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho mostra que técnicas de mapeamento digital de solos são satisfatórias para auxílio no delineamento de unidades de mapeamento simples, em mapas de solos em nível semi-detalhado (1:30.000), a partir de modelos de predição de textura dos solos.

- O arranjo metodológico permitiu otimizar as predições, testar os melhores algoritmos para a realidade estudada, e predizer os teores de areia e argila associados à sua incerteza.
- As covariáveis mais importantes que influenciam na distribuição textural na área de estudo são posição geográfica das amostras da base de dados de solos; modelo digital de elevação; altitude padronizada; curvatura das vertentes; canais de tório, potássio e contagem total da gamaespectrometria; e magnetometria. As covariáveis de posição geográfica se mostraram entre as mais importantes nas predições de todos os modelos e situações preditivas experimentadas.
- A utilização de dados de horizontes subsuperficiais apresentaram melhores resultados do que amostras de horizontes superficiais.
- No caso estudado, apesar da diferente interação das frações areia e argila com os produtos de levantamento aerogeofísico, foram obtidos os mesmos parâmetros de performance dos modelos para estes dois atributos.
- A utilização de dados de levantamento aerogeofísicos (gamaespectrometria e magnetometria) melhoram a capacidade preditiva dos modelos, melhorando suas performances.
- Os modelos Random Forest e Cubist apresentaram melhores resultados. Mesmo sendo métodos diferentes e utilizarem diferentes covariáveis, chegaram ao mesmo resultado nos parâmetros de avaliação de performance.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAI, M. A Grande elevação eustática do mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. **Geologia USP. Série Científica**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 1-6. 2006.
- BHERING, S.B. et al., Mapeamento digital de areia, argila e carbono orgânico por modelos Random Forest sob diferentes resoluções espaciais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1359-1370. 2016.
- BREIMAN, L. Random Forests. **Machine Learning**, v.45, n.1. p.5-32, 2001.
- BRENNING, A.; BANGS, D.; BECKER, M. RSAGA: **SAGA Geoprocessing and Terrain Analysis**. R package version 1.3.0. 2018. <<https://CRAN.R-project.org/package=RSAGA>>.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. Folha NA/NB 22 Macapá: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. V.6. Rio de Janeiro. 1974.
- CARVALHO JUNIOR, W.; CHAGAS, C.S.; LAGACHERIE, P.; CALDERANO FILHO, B.; BHERING, S. Evaluation of statistical and geostatistical models of digital soil properties mapping in tropical mountain regions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, 2014. p.706-717.
- CHAGAS, C. S.; de CARVALHO JUNIOR, W.; BHERING, S. B., & CALDERANO FILHO, B. Spatial prediction of soil surface texture in a semiarid region using random forest and multiple linear regressions. **Catena**, v. 139, 2016. p.232–240.
- CPRM – Ministério das Minas e Energia. Projeto Jari-Rio Negro (Leste) – Levantamentos aerogamaespectrométrico e aeromagnetométrico – território federal do Amapá. Relatório n.951, v.1, Contrato CPRM/PROSPEC-301/DAD/76 e Termo Aditivo n.1. 1977.
- CRISTIANINI, N. & TAYLOR, J.S. **An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods**. Cambridge University Press. 2000. 189p.
- DICKSON, B.L. & SCOTT, K.M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v.17, 1997. p.187-200.

DIETTERICH, T.G. Ensemble methods in machine learning. **Proceedings of the First International Workshop on Multiple Classifier System**. Springer-Verlag, London. p.1-15. 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. / Santos, H.G. et al.. Brasília: Embrapa – SPI, 1995. 116p.

GOH, A.T.C.; ZHANG, W.; ZHANG, Y.; XIANG, Y. Determination of Earth pressure balance tunnel-related maximum surface settlement: a multivariate adaptive regression splines approach. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v.77, 2018. p.489-500.

GOMES, L.C. et al. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma**, v.340, 2019. p.337-350.

KER, J.C.; MOTTA, P.E.F.; OLIVEIRA, V.A. Levantamentos Pedológicos e a evolução do conhecimento dos solos no Brasil. In: CURI, N.; KER, J.C.; NOVAIS, R.F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C.E.G.R. (ed) **Pedologia – solos dos biomas brasileiros**. 1ª ed. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.1-46. 2017a.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **Overview of supervised learning. The Elements of Statistical Learning**. Springer, p.9-41. 2009.

HENDERSON, B.L.; BUI, E.N.; MORAN, C.J.; SIMON, D.A.P. Australia-wide predictions of soil properties using decision trees. **Geoderma**, v.124, 2005. p.383-398.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico de Pedologia**. 3ª ed, Rio de Janeiro, IBGE, 2015. 430p.

JACOMINE, P. K. T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros. In: REUNIÃO TÉCNICA DOS SOBRE OS SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS. Cruz das Almas, Aracaju. **Pesquisa e desenvolvimento para os tabuleiros costeiros: Anais...** Cruz das Almas: Embrapa: UFBA, p. 13-26. 1996.

KER, J.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; ROMERO, R.E.; CORRÊA, M.M. Solos dos Tabuleiros Costeiros. In: CURI, N.; KER, J.C.; NOVAIS, R.F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER,

C.E.G.R. (ed) **Pedologia – solos dos biomas brasileiros**. 1ª ed. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.467-492. 2017b.

KUHN, M. Caret package. **Journal of Statistical Software**. v.28, n.5. p.1-26, 2008.

KUHN, M. & JOHNSON, K. **Applied Predictive Modeling**. Springer, 2013. 810p.

KUHN, M. **Classification and regression with random forest**. In: R package version 4.6–12. <<http://CRAN.R-project.org/package=randomForest>>. 2018.

KUHN, M., Caret. In: R package version 6.8-86. 2020. <<https://cran.r-project.org/web/packages/caret/caret.pdf>>.

LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A.B., Chapter 1. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for Digital Soil Mapping. In: P. Lagacherie, A.B. McBratney and M. Voltz (Editors), **Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective**. 2007.

LOISEAU, T.; RICHER-DE-FORGES, A.C.; MARTELET, G.; BIALKOWSKI, A.; NEHLIG, P.; ARROUAYS, D. Could airborne gamma-spectrometric data replace lithological maps as covariates for digital soil mapping of topsoil particle-size distribution? A case study in Western France. **Geoderma Regional**, v.22, 2020.

MCBRATNEY, A.B.; ODEH, I.O.A.; BISHOP, T.F.A.; DUNBAR, M.S.; SHATAR, T.M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**. v.97, 2000. p.293-327.

MEGUMI, K. & MAMURO, T. Concentration of uranium series nuclides in soil particles in relation to their size. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v.82, 1977. p.353-356.

NUNES, F.C.; **Grupo Barreiras: características, gênese e evidências de neotectonismo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 31p. - (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Solos, ISSN 1678-0892; 194).

OLIVEIRA, J. de. **Solos coesos dos Tabuleiros Costeiros: limitações agrícolas e manejo**. Salvador, SEAGRI-SPA. 2000. 117p.

PAUL, S. S., COOPS, N. C., JOHNSON, M. S., KRZIC, M., CHANDNA, A., & SMUKLER, S. M. Mapping soil organic carbon and clay using remote sensing to predict soil workability for enhanced climate change adaptation. **Geoderma**, v. 363, 2020. p.1-13.

PINHEIRO, H.S.K.; CARVALHO JUNIOR, W.; CHAGAS, C.S.; ANJOS, L.H.C.; OWENS, P.R. Prediction of topsoil texture through regression trees and multiple linear regressions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.42, 2018. p.1-21.

POLIDORO, J.C. et al. **O Programa Nacional de Solos do Brasil (PronaSolos)**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2016. 53p. (Embrapa Solos. Documentos, 183).

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2014. URL <<http://www.R-project.org/>>.

RIBEIRO, L.P. **Os Latossolos Amarelos do Recôncavo Baiano: gênese, evolução e degradação**. Seplantec, CADCT, 1998. 99p.

TAQUES, R.C. **Modelos pedométricos para espacialização de atributos de solos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. 68p.

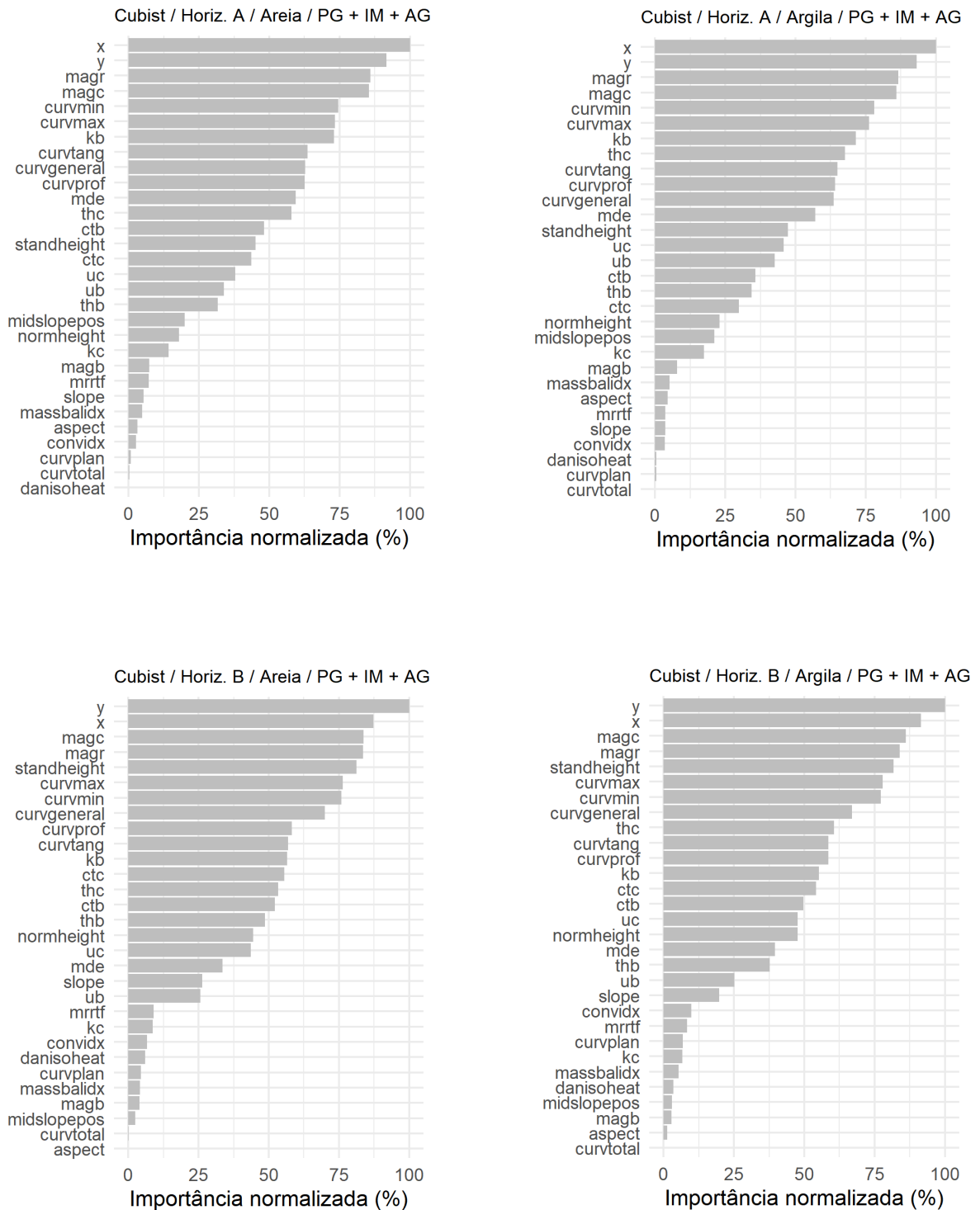
TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. – Brasília: EMBRAPA, 2017. 573p.

VASQUES, G.M.; GRUNWALD, S.; SICKMAN, J.O. Comparison of multivariate methods for inferential modelling of soil carbon using visible-near-infrared spectra. **Geoderma**, v.146, 2008. p.14-25.

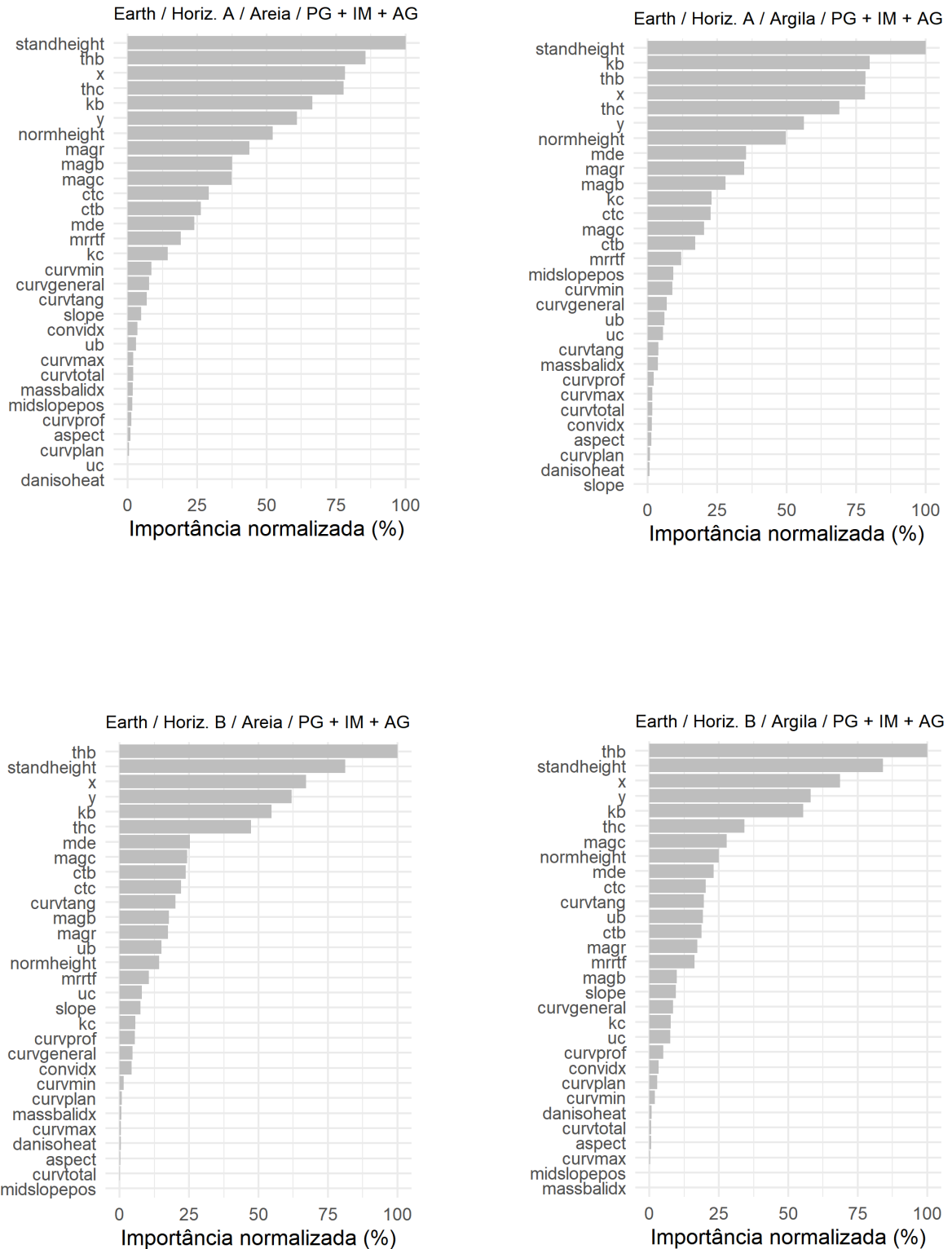
ZHANG, W. MARS. **Applications in Geotechnical Engineering Systems**. Springer Singapore, Singapore, 2020. 240p.

**APÊNDICE I – GRÁFICOS DE IMPORTÂNCIA RELATIVA DE TODOS OS MODELOS PREDITIVOS QUANDO UTILIZADO O CONJUNTO DE COVARIÁVEIS COM DADOS DE LEVANTAMENTO AEROGEOFÍSICO.**

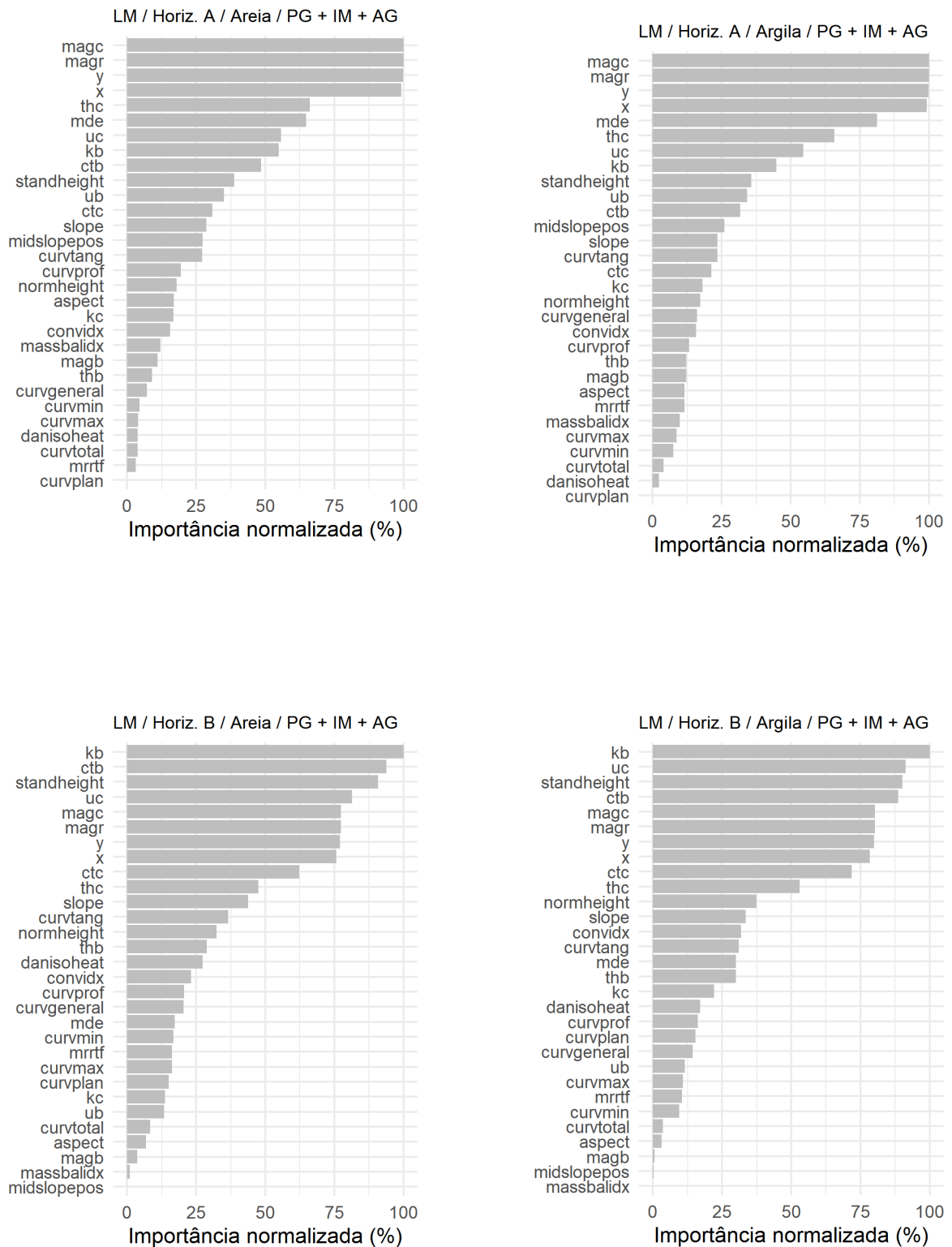
**Figura 1.** Gráficos de importância relativa das covariáveis selecionadas pelo Cubist com as amostras de horizontes A e B, para areia e argila, em cada conjunto de covariáveis testado.



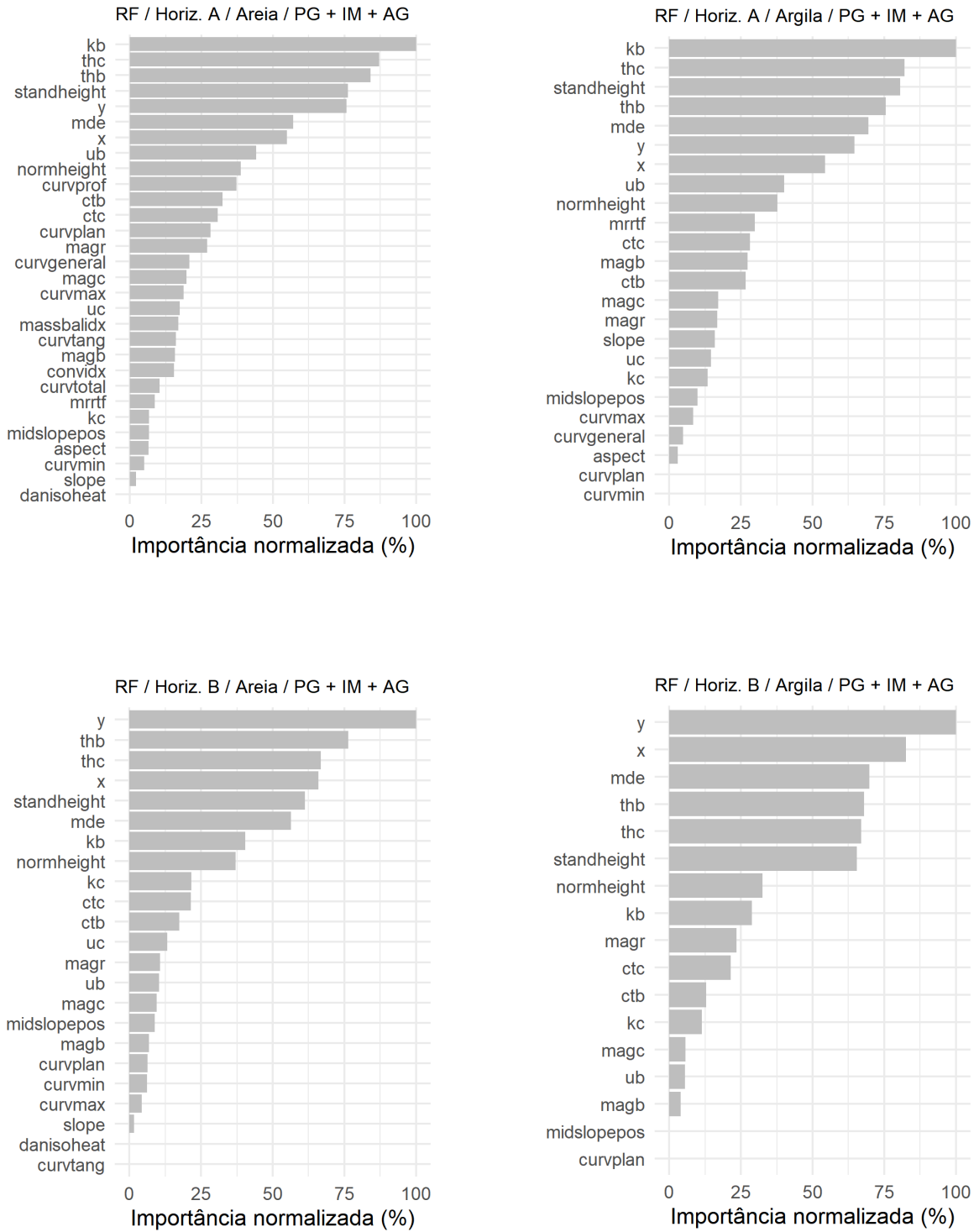
**Figura 2.** Gráficos de importância relativa das covariáveis selecionadas pelo Earth com as amostras de horizontes A e B, para areia e argila, em cada conjunto de covariáveis testado.



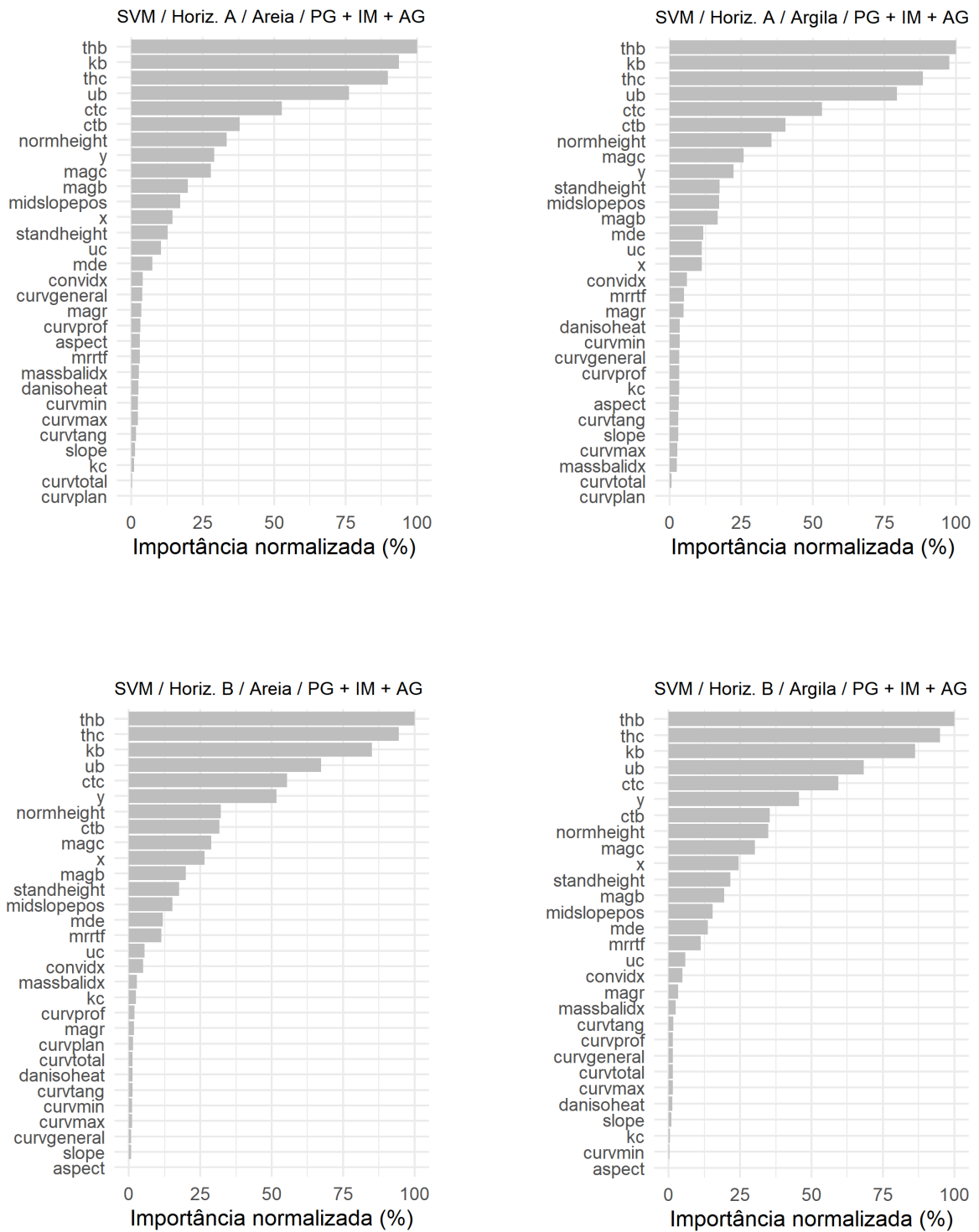
**Figura 3.** Gráficos de importância relativa das covariáveis selecionadas pelo LM com as amostras de horizontes A e B, para areia e argila, em cada conjunto de covariáveis testado.



**Figura 4.** Gráficos de importância relativa das covariáveis selecionadas pelo Random Forest com as amostras de horizontes A e B, para areia e argila, em cada conjunto de covariáveis testado.



**Figura 5.** Gráficos de importância relativa das covariáveis selecionadas pelo Support Vector Machine com as amostras de horizontes A e B, para areia e argila, em cada conjunto de covariáveis testado.



## CAPÍTULO 2

### **CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS EM DIFERENTES COMPARTIMENTOS GEOMORFOLÓGICOS DE TABULEIROS COSTEIROS, DO GRUPO BARREIRAS NO AMAPÁ**

#### **RESUMO**

REIS, João Santiago, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2020. **Caracterização de solos em diferentes compartimentos geomorfológicos de Tabuleiros Costeiros, do Grupo Barreiras no Amapá.** Orientador: João Carlos Ker. Coorientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Os Tabuleiros Costeiros são locais de interesse da ocupação do território brasileiro desde a época da colonização. Seu relevo com formas suaves e planas facilitou a implementação de centros urbanos, e apresenta grandes potencialidades de utilização agrícola, que em parte já é explorada com emprego de alta tecnologia. Os sedimentos argilo-arenosos do Grupo Barreiras, se estendem por toda costa atlântica desde o norte do Rio de Janeiro até o Amapá, sendo a variabilidade dos tipos de solos e granulometria de seus sedimentos característica intrínseca. No estado do Amapá é uma das poucas porções recobertas por fitofisionomias de Cerrado, e pouco se conhece sobre seus solos, necessitando-se de mais informações. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi caracterizar e entender a distribuição dos solos nos Tabuleiros Costeiros do Grupo Barreiras no Amapá, através da investigação de seus atributos físicos, morfológicos, químicos e mineralógicos. Para tal, foram observados 112 perfis de solos distribuídos em Tabuleiros com diferentes níveis de dissecação, onde 10 perfis foram selecionados para análises mais completas. Nos perfis selecionados foram realizadas medidas de análise granulométrica; pH; caracterização do complexo sortivo; carbono orgânico total; mineralogia das frações areia e argila; e dissolução seletiva de Si, Al e Fe por oxalato de amônio, e Fe e Mn por ditionito-citrato-bicarbonato. Os resultados mostram clara diferença de predominância de classes texturais entre os compartimentos geomorfológicos dos Tabuleiros Dissecados (TD) e dos Tabuleiros. A coesão é aspecto recorrente em todos os perfis observados. Os aspectos relacionados à distribuição de carbono orgânico, complexo sortivo, dissoluções seletivas e mineralogia dos solos são similares nos dois ambientes, sendo homogêneos como

um todo. Tratam-se de solos ácidos, distróficos, álicos, com baixa reserva de nutrientes, baixos valores de CTC e baixos teores de carbono orgânico. A mineralogia é composta predominantemente por quartzo na fração areia e caulinita na fração argila, com presença de goethita em menor quantidade. O ambiente de Tabuleiro apresenta maior desenvolvimento de processos pedogenéticos. Considerando seus maiores teores de óxidos de Fe ( $Fe_d$ ), menores tamanhos dos cristais de caulinita (DMC), parece ter havido processos de ferralitização mais intenso, além da constatação de caráter argiluvico (mais expressivo do que nos Tabuleiros Dissecados), pode-se afirmar que estes solos tiveram mais influência de processos pedogenéticos, do que os de Tabuleiros Dissecados. Descarta-se a hipótese de homogeneidade dos solos de Tabuleiros Costeiros do Amapá, sendo reconhecidos dois pedoambiente distintos a depender do grau de dissecação.

**Palavras-chave:** Grupo Barreiras. Tabuleiros Costeiros. Latossolos Amarelos Distrocócosos.

## ABSTRACT

REIS, João Santiago, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, november de 2020. **Caracterização de solos em diferentes compartimentos geomorfológicos de Tabuleiros Costeiros, do Grupo Barreiras no Amapá.** Adviser: João Carlos Ker. Co-adviser: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Coastal Highlands are places of interest in the occupation of Brazilian territory since the time of colonization. Its relief with smooth and flat forms facilitated the implementation of urban centers, and has great potential for agricultural use, which in part is already exploited with high technology use. The clay-sandy sediments from the Barreiras Group, extend throughout the Atlantic coast from the north of Rio de Janeiro state to Amapá, with the variability of soil types and granulometry of its sediments being an intrinsic characteristic. In the Amapá state it is one of the few portions covered by Cerrado pin brazilian territory, and little is known about its soils, requiring more information. In this context, the objective of this study was to characterize and understand the distribution of soils in the Coastal Highlands on Barreiras Group from Amapá, through the investigation of their physical, morphological, chemical and mineralogical attributes. To reach this, 112 soil profiles were observed distributed in highlands with different levels of dissection, where 10 profiles were selected for more complete analyzes. In the selected profiles, measurements of granulometric analysis were performed; pH; characterization of the assortment complex; total organic carbon; mineralogy of the sand and clay fractions; and selective dissolution of Si, Al and Fe by ammonium oxalate, and Fe and Mn by dithionite-citrate-bicarbonate. The results shows a clear difference in the predominance of textural classes between the geomorphological compartments of the Dissected Highlands (TD) and the less dissected Highlands. Cohesion is a recurrent aspect in all observed profiles. The aspects related to the distribution of organic carbon, assortment complex, selective dissolution and soil mineralogy are similar in both environments, being homogeneous as a whole. These are acidic, dystrophic, acidic soils, with low nutrient reserves, low CTC values and low levels of organic carbon. The mineralogy is composed predominantly of quartz in the sand fraction and kaolinite in the clay fraction, with lesser presence of goethite. The Highland environment presents a greater development of pedogenetic processes. Considering its higher levels of Fe oxides ( $Fe_d$ ), smaller sizes of kaolinite crystals (DMC), there seems to have been more intense ferralitization processes, in addition to the observation of an argiluvic character (more expressive than in Dissected Highlands), one can to affirm that these soils had more influence of pedogenetic processes, than those of Dissected Highlands. The hypothesis of homogeneity of the soils of

Amapá Coastal Highlands is discarded, with two distinct pedoenvironments depending on the degree of dissection.

**Keywords:** Barreiras Group. Coastal Highlands. Latossolos Amarelos Distrocoesos

## 1. INTRODUÇÃO

Na zona equatorial brasileira, entre as planícies costeiras da foz do rio Amazonas e as colinas do Escudo Guianense, numa estreita faixa com orientação norte-sul no estado do Amapá, encontram-se Tabuleiros Costeiros (mais ou menos dissecados) correspondentes ao Grupo Barreiras. Esta unidade da paisagem amapaense tem papel relevante na manutenção de um refúgio do bioma Cerrado em meio ao bioma Amazônia (IEPA, 2008).

O Grupo Barreiras corresponde à uma cobertura sedimentar composta por sedimentos argilosos, argilo-arenosos, e arenosos, que se estende por toda a costa Atlântica brasileira desde o norte do Rio de Janeiro até o estado do Amapá (NUNES et al., 2011; MOURA-FÉ, 2014).

Situa-se no Planalto rebaixado da Amazônia, que é constituído por sedimentos terciários do Grupo Barreiras, apresentando caimento suave para o Rio Amazonas. É representado por uma superfície de aplainamento que se encontra parcialmente conservada, e recoberta por crostas ferruginosas. A densidade elevada da rede de drenagem composta por canais curtos e muito ramificados é responsável pelas formas de dissecção do aplainamento em colinas de topo aplainado e interflúvios tabulares. (BRASIL, 1974).

Os sedimentos do Grupo Barreiras ocorrem, em geral, em cotas de 20 a mais de 200 metros de altitude (JACOMINE, 1996), e sua composição é variada apresentando sequência de sedimentos detríticos, siliciclásticos, de origem fluvial e marinha (ARAI, 2006), pouco ou não consolidados, mal selecionados, de cores variegadas, variando de areias finas a grossas, predominando grãos angulosos, argilas cinza-avermelhadas, com matriz caulínica e ocorrência escassa de estruturas sedimentares (NUNES, 2011).

Os solos desenvolvidos a partir desse substrato geralmente caracterizam-se por ser profundos, ácidos, álicos, com baixa capacidade de troca catiônica, pouca diferença morfológica entre horizontes e presença frequente de horizontes coesos (NOGUEIRA & NOGUEIRA, 1996; OLIVEIRA, 2000).

Associado ao relevo de Tabuleiros Costeiros, o Grupo Barreiras no Amapá exhibe certa heterogeneidade quanto aos seus compartimentos geomorfológicos, mas ainda assim é descrito generalizadamente por Brasil (1974) como associado ao Planalto Rebaixado da Amazônia, enquanto trabalhos recentes mais detalhados subdividem a região de interesse em Tabuleiros e Tabuleiros Dissecados (JORGE & TEIXEIRA, 2016). Estudos sobre os solos dessa região

ainda são escassos (SENA, 2016; KER et al., 2017), carecendo de mais informações para melhor entendimento sobre sua gênese e aptidão agrícola.

Os objetivos deste trabalho foram caracterizar e verificar a hipótese de homogeneidade dos Tabuleiros Costeiros presentes sob o Grupo Barreiras no estado do Amapá, visando contribuir com pesquisas relacionadas ao entendimento dos processos pedogenéticos dos solos de dessa região.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

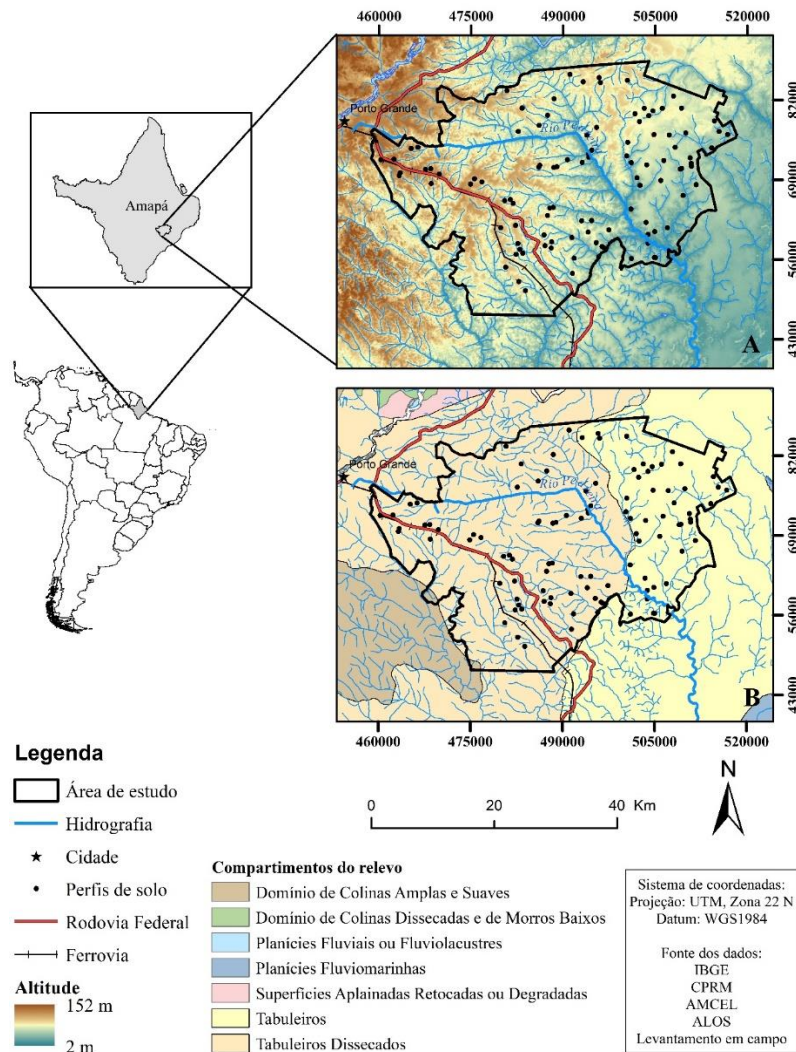
A área de estudo está dentro dos limites dos municípios de Porto Grande, Ferreira Gomes, Macapá e Itaubal, no estado do Amapá (Figura 1). Está inserida no divisor hidrográfico da bacia hidrográfica do rio Araguari, à Norte, e das bacias do rio Pedreira e do rio Matapi, à Sudoeste, sendo as duas últimas pertencentes à bacia hidrográfica do rio Amazonas. A distância do oceano Atlântico, que coincide com a foz do rio Amazonas, ao ponto central da área é de aproximadamente 70 quilômetros.

Foram descritos, coletados e observados um conjunto de 112 perfis de solo distribuídos entre os compartimentos geomorfológicos dos Tabuleiros Dissecados (TD) com 59 perfis, e dos Tabuleiros com 53 perfis.

A região dos Tabuleiros Dissecados ocupa a maior parte da área de estudo e é caracterizado por relevo mais acidentado, com maiores declividades, topos estreitos, maior densidade de drenagem, e cotas altimétricas mais elevadas (entre 100 e 35 m). O compartimento dos Tabuleiros é caracterizado por topos aplainados e encostas mais amplas, vales menos dissecados, e altimetria entre 60 m e 6 m do nível do mar (Figura 2). A separação destes dois compartimentos se dá próximo às margens do rio Pedreira, que apresenta um desvio de seu curso da direção Oeste-Leste para Noroeste-Sudeste próximo à conexão entre os dois ambientes.

A área de trabalho está localizada na plataforma litorânea do Amapá, caracterizada como um monoclinal com mergulho moderado para sudeste. Sobre esta plataforma ocorre uma cobertura sedimentar Cenozóica de largura variável constituída por sedimentos do Terciário, conhecida como Grupo Barreiras, além de sedimentos fluviais e marinhos do Quaternário, que caracterizam juntos a província geológica denominada Coberturas Cenozóicas da plataforma do Amapá (BRASIL, 1974).

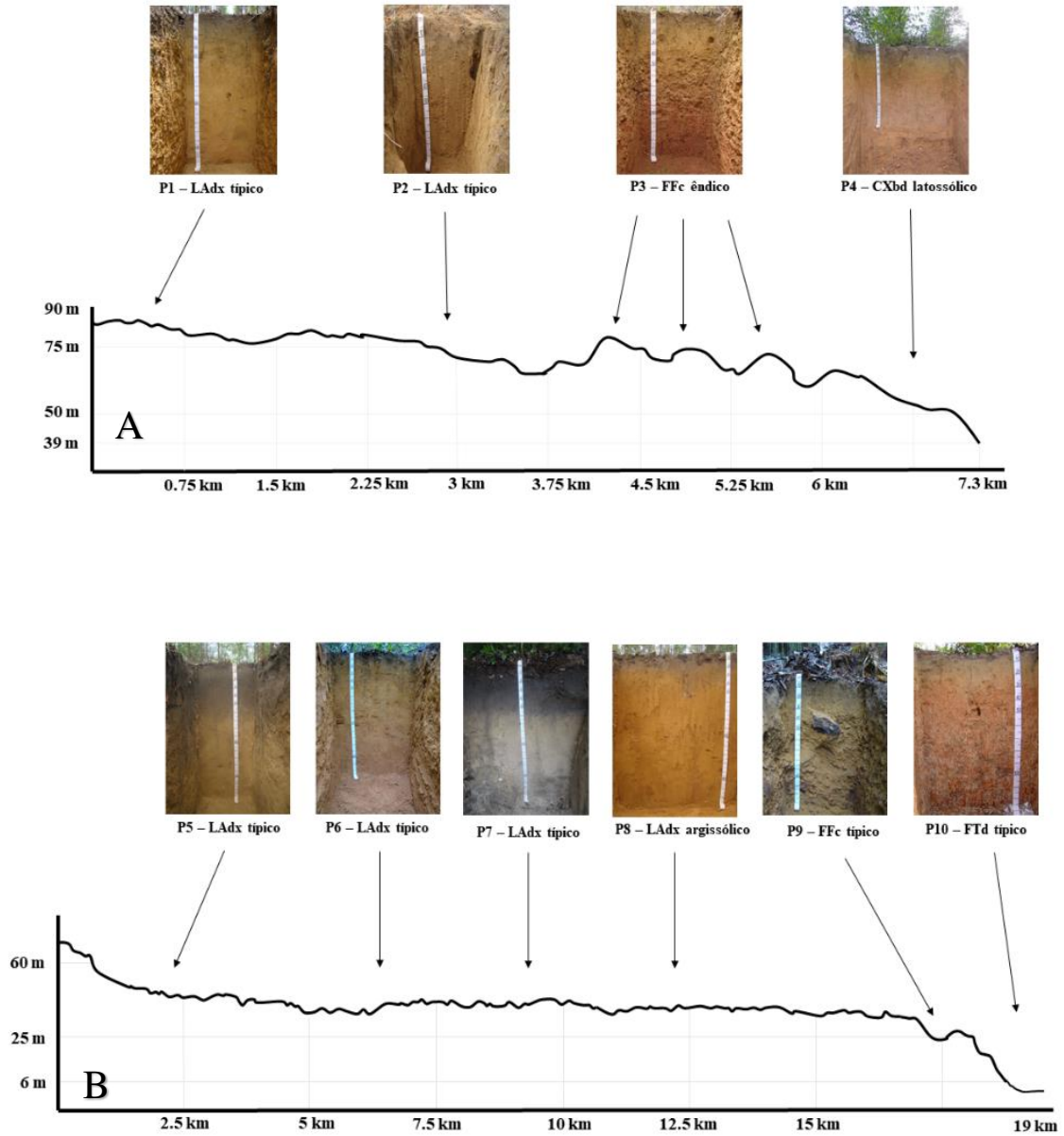
**Figura 1.** Localização da área de estudo, perfis de solo, e modelo digital de elevação (A) evidenciando a diferença de compartimentos geomorfológicos exibida em B.



A coleção de perfis amostrada representa a variabilidade de solos presente na região, em sua maioria Latossolos Amarelos Distrocoesos (LAdx) de diferentes texturas, e em menores proporções Plintossolos Pétricos Concrecionários, Argissolos Amarelos Distrocoesos, Argissolos Acinzentados Distrocoesos, Cambissolos Hápticos Tb Distróficos (CXbd), Plintossolos Argilúvicos, e Neossolos Quartzarênicos.

Nessa coleção, 10 perfis dos solos mais representativos foram selecionados, compondo uma sequência de solos em cada unidade geomorfológica, objetivando extrair informações sobre a gênese dos mesmos (Figura 2). Todos os perfis, exceto o Perfil 2 (Figura 3), foram coletados em área de cultivo intensivo de eucalipto em diferentes situações, desde talhões produtivos atualmente plantados e talhões em pousio sujeitos a regeneração natural.

**Figura 2.** Sequencias de solos selecionadas nos compartimentos de tabuleiros dissecados (A) e tabuleiros (B).



**Figura 3.** Localização do Perfil 2 sob vegetação natural, em fitofisionomia de cerrado *sensu strictu*, típica da região estudada.



## 2.2. Análises em laboratório

Após secagem à sombra, as amostras dos 10 perfis de solos selecionados foram peneirados em malha de 2 mm, e submetidos a análise granulométrica segundo Teixeira et al., (2017). Após dispersão mecânica e química, em agitador rotativo tipo Wagner com solução de NaOH ( $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ ), a fração areia foi obtida por tamisação (malha de 270 mesh), e as frações silte e argila separadas por sedimentação (silte).

A caracterização do complexo sortivo também foi realizada segundo Teixeira et al., (2017). Foram quantificados o pH em água e em solução de KCl  $1 \text{ mol.L}^{-1}$ ; teores disponíveis de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e acidez potencial ( $\text{Al}^{3+}$ ), quantificados por Espectrofotômetro de Absorção Atômica (EAA) e titulação com solução de NaOH  $0,05 \text{ mol.L}^{-1}$  ( $\text{Al}^{3+}$ ), após extração com solução de KCl  $1 \text{ mol.L}^{-1}$ ; teores disponíveis de P,  $\text{K}^+$ , e  $\text{Na}^+$  extraídos por solução ácida Mehlich-1 ( $\text{HCl } 0,05 \text{ mol.L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol.L}^{-1}$ ), e dosagem com fotômetro de chama; e acidez potencial

(H + Al) pelo método do acetato de cálcio (pH 7). O fósforo remanescente (P-rem) foi quantificado agitando-se por o solo com uma solução 0,010 mol.L<sup>-1</sup> de CaCl<sub>2</sub> contendo 60 mg.L<sup>-1</sup> de P.

O carbono orgânico total foi obtido através de oxidação por via úmida, com dicromato de potássio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 0,167 mol.L<sup>-1</sup>) em meio ácido (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, d = 1,84).

De posse desses resultados foram calculados a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva (t) e potencial (T), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), e índice de saturação por sódio (ISNa).

Os teores de silício (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe) presentes em óxidos de Fe, e possíveis argilominerais, com baixo grau de cristalinidade e complexados à matéria orgânica foram extraídos pelo método do oxalato de amônio (0,2 mol.L<sup>-1</sup> - pH 3.0) na ausência de luz (McKEAGUE & DAY, 1966). Os teores de ferro (Fe) e manganês (Mn), presentes em óxidos cristalinos, e pouco cristalinos e complexados à matéria orgânica, foram extraídos através de dissolução pelo método do ditionito citrato bicarbonato (DCB), segundo Mehra & Jackson (1960). As duas análises realizadas na fração terra fina. Foi calculada a relação Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub>, que corresponde à proporção indicativa de cristalinidade dos óxidos de ferro.

A composição mineralógica das frações argila e areia dos horizontes selecionados foi avaliada por difratometria de raios-X (X'Pert Pro Analytical), com tubo de cobalto (Co K $\alpha$ ), após a dispersão das amostras com NaOH 0,1 mol.L<sup>-1</sup> em agitação lenta por 16 horas, e posterior separação por peneiramento (areia) e sedimentação (silte e argila). A fração areia foi analisada com orientação aleatória em lâmina escavada, enquanto a fração argila além de lâmina escavada, também foi analisada em lâminas orientadas (método do esfregaço), em seu estado natural e após desferrificação com DCB.

A partir dos difratogramas obtidos, com auxílio do software Origin(Pro) (2018), foi obtida a largura à meia altura (LMA) e posterior cálculo do diâmetro médio do cristal (DMC) das caulinitas, nas amostras desferrificadas, a partir da equação de Scherrer (PATTERSON, 1939):

$$D (nm) = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}$$

onde,  $D$  – tamanho do cristalito;  $K$  – constante de Scherrer (0.9);  $\lambda$  - comprimento de onda da fonte de raios-X (Co  $K\alpha = 0,7889$  nm);  $\beta$  - LMA (radianos);  $\theta$  – posição do pico (radianos).

Análise de correlação de Pearson com significância de  $p < 0.05$  foi realizada para as variáveis teor de argila, LMA, DMC, P-rem, e extrações por DCB e oxalato e amônio.

Por estarem situação de utilização intensiva por silvicultura, apenas os resultados das análises granulométricas obtidos foram submetidos a análise estatística descritiva, a fim de comparar e caracterizar os diferentes ambientes. A textura dos solos é atributo menos modificável ao longo do tempo em decorrência da ação humana, em relação ao complexo sortivo e teores de carbono orgânico.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Caracterização física e morfológica dos solos

Os solos em questão são desenvolvidos sobre sedimentos de origem fluvial (BIGARELLA & ANDRADE, 1964), em ciclos de deposição que podem resultar em diferenças quanto à sua granulometria. Existe heterogeneidade quanto às características físicas dos solos, sendo observadas diferenças significantes de textura entre os compartimentos de Tabuleiro e TD (Quadro 1), representadas pelos valores de média e mediana.

Os solos em geral apresentam baixos teores de silte, característica comum em materiais latossolizados (KER, 1997; SANTOS et al., 2018). Enquanto há predomínio de textura média nos solos de Tabuleiro, predomina a classe muito argilosa nos TD (Figura 5). Sendo a fração silte sempre baixa, areia e argila são inversamente proporcionais, comportamento que pode ser verificado através da Figura 6.

Observando os dados dos perfis das topossequências selecionadas (Quadros 2 e 3), observa-se que no tabuleiro há uma tendência de aumento da fração areia fina (AF) quanto menor a altitude. Quando analisada a relação AG/AF, percebe-se variação significativa de valores entre perfis sugerindo heterogeneidade lateral do material de origem, o que é esperado diante da natureza sedimentar do Grupo Barreiras.

A amplitude dos valores de areia e argila entre os ambientes comparados não demonstrou variação significativa, sendo praticamente similar. Para silte apresentam valores de

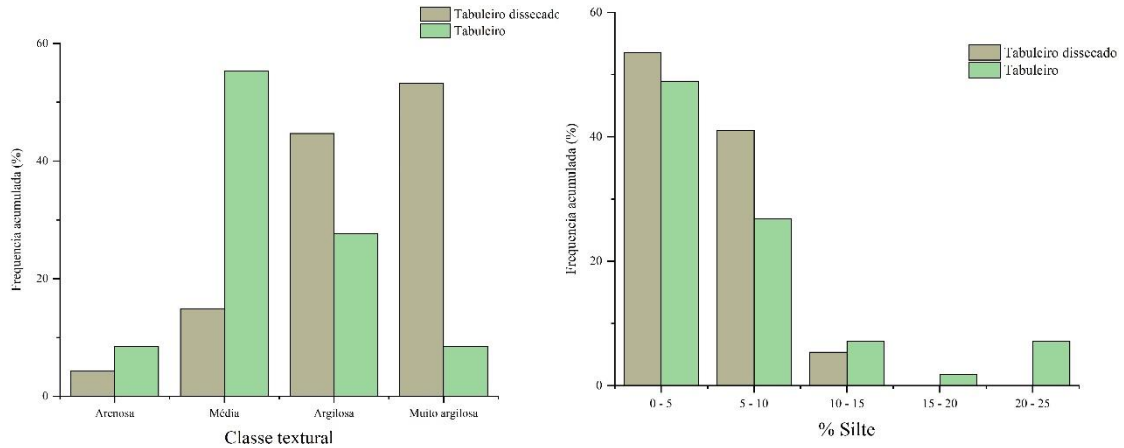
mínimo iguais, porém o valor máximo no Tabuleiro é maior do que o dobro do valor máximo dos Tabuleiros Dissecados.

**Quadro 1.** Estatística descritiva dos atributos físicos estudados nos perfis de solo<sup>1</sup>.

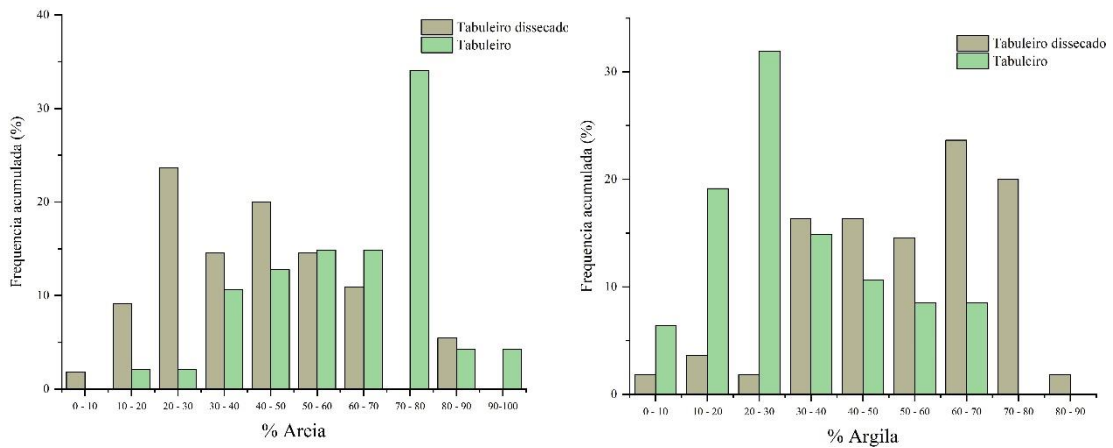
	<b>Areia</b>	<b>Silte</b>	<b>Argila</b>
<b>Todos os perfis (N = 102)</b>			
<b>Média (dag.kg<sup>-1</sup>)</b>	50.2	5.8	43.5
<b>Mediana (dag.kg<sup>-1</sup>)</b>	49.8	4.6	43.9
<b>Min. (dag.kg<sup>-1</sup>)</b>	12.6	0.5	7.0
<b>Máx. (dag.kg<sup>-1</sup>)</b>	91.0	28.2	83.2
<b>DP</b>	20.7	4.9	20.0
<b>Tabuleiro dissecado (N = 55)</b>			
<b>Média (dag.kg<sup>-1</sup>)</b>	40.7	4.8	53.7
<b>Mediana (dag.kg<sup>-1</sup>)</b>	41.1	4.4	53.3
<b>Min. (dag.kg<sup>-1</sup>)</b>	12.6	0.5	9.6
<b>Máx. (dag.kg<sup>-1</sup>)</b>	89.2	12.4	83.2
<b>DP</b>	18.4	3.1	17.5
<b>Tabuleiro (N = 47)</b>			
<b>Média (dag.kg<sup>-1</sup>)</b>	61.1	6.9	31.8
<b>Mediana (dag.kg<sup>-1</sup>)</b>	68.8	5.3	26.8
<b>Min. (dag.kg<sup>-1</sup>)</b>	16.0	0.6	7.0
<b>Máx. (dag.kg<sup>-1</sup>)</b>	91.0	28.2	70.0
<b>DP</b>	17.5	6.2	18.7

1 – Foi considerado apenas um horizonte subsuperficial representativo de cada perfil.  
Min. – menor valor; Máx. – maior valor; DP – desvio padrão

**Figura 4.** Distribuição de classes texturais e fração silte na área de estudo.



**Figura 5.** Distribuição das frações areia e argila na área de estudo.



Todos os horizontes superficiais dos perfis estudados apresentam matiz 10YR, enquanto nos horizontes subsuperficiais também há casos de matiz 7.5YR, e em menor quantidade 5YR.

Alguns Latossolos das duas regiões apresentam variação de matiz dentre os subhorizontes Bw1 e Bw2, como é o caso de P1 (TD) e P6 (Tabuleiro), ambos de textura muito argilosa. Em posições da paisagem favoráveis a acúmulo de água, P7 e P10 contam com os menores cromas, apresentando altos valores no primeiro, e presença de plintita adicionando cor avermelhada (10R 4/8) no segundo.

Perfil P4 conta com altos valor e cromas, e variação de matiz tendendo de mais amarelo (10YR) a vermelho (2.5YR) em subsuperfície. Mesmo que os horizontes C1 e C2 apresentem baixa relação silte/argila (Quadro 2), e baixos teores de silte, o reconhecimento dos mesmos

como horizonte C (e não como Bw) se deu por conta da sua estreita proximidade, expressa pela cor, com os sedimentos do Grupo Barreiras, essencialmente compostos por quartzo e caulinita.

Todos os horizontes A dos perfis selecionados se enquadram na definição de A moderado. Alguns destes horizontes são profundos, mas não atendem ao critério de cor (P4), de estrutura (P5, P7 e P8), ou de carbono orgânico para serem definidos como horizonte A proeminente.

Uma característica da maioria dos solos da região estudada é o incremento de argila em profundidade, insuficiente para caracterizar relação textural B/A que satisfaça os requisitos para definição de horizonte B textural. O gradiente de teor de argila em profundidade é mais expressivo nos solos dos Tabuleiros, sendo representado na coleção de perfis, e ocorrendo caráter argilúvico em alguns dos perfis selecionados (P8 e P10).

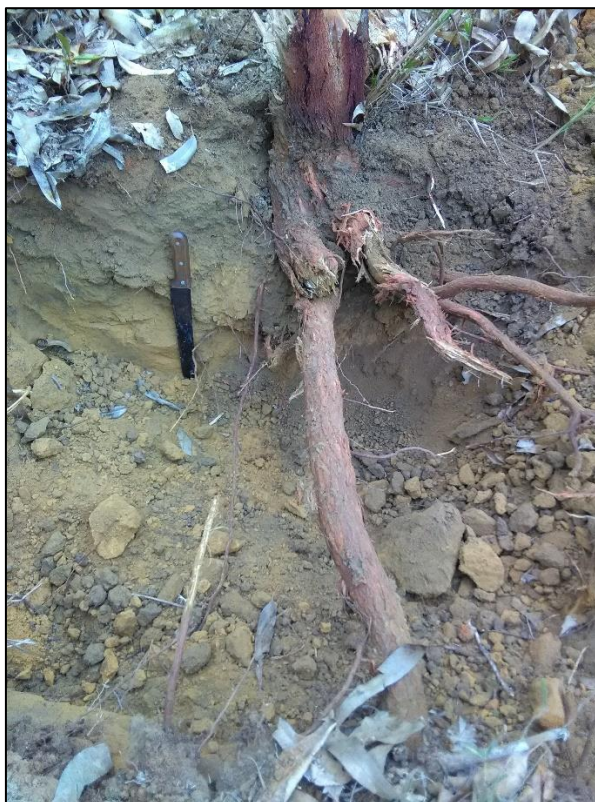
Sena (2016), ao analisar fotomicrografias de perfis de solo na área de estudo, não verificou ocorrência expressiva de processos de argiluviação em perfis de Latossolos Amarelos Distrocosos típicos e Latossolos Amarelos Distrocosos argissólicos. Tal fato, somado à cobertura vegetal natural esparsa típica de cerrado *sensu strictu*, sugere a atuação de processos de elutriação (perda seletiva de argila nos horizontes superficiais) através do impacto das chuvas (pluviosidade local elevada) diretamente sobre o solo e carreamento de material fino nas enxurradas. Porém, em áreas de fitofisionima cerradão também ocorre a tendência à gradiente textural, não podendo ser descartadas as hipóteses de variação de material fino no material de origem, mesmo que os teores de areia sejam constantes em todos perfis (AG/AG também não tem variação significativa) (Quadros 2 e 3).

Como já indicado na classificação dos perfis utilizados neste estudo, assim como em demais do Grupo Barreiras em outras porções do território brasileiro os solos locais apresentam caráter coeso desde os horizontes transicionais AB e/ou BA (Figura 6), neste estudo de caso até profundidades maiores do que 1 metro.

Existem diversas hipóteses para explicar a origem dos horizontes coesos, que perpassam sobre preenchimento de poros por colóides (OLIVEIRA et al., 1968), baixos teores de óxidos de Fe causando arranjo estrutural tendendo a maciço (ACHÁ PANOSO, 1976; RESENDE, 1982; BENNEMA & CAMARGO, 1979), grau de cristalinidade das caulinitas e ajuste face a face (MOREAU, 2001), processos geomorfológicos (ANJOS, 1985; RIBEIRO,

1998), elevados valores de argila dispersa e areia fina (SOUZA, 1996), cimentação fraca por materiais silicosos amorfos (CARVALHO E SILVA, 2001), iluviação de argila fina (CÔRREA et al., 2008), dentre outras.

**Figura 6.** Raiz de eucalipto com dificuldade de penetração, exibindo desenvolvimento lateral, em horizonte coeso de Latossolo Amarelo Distrocoeso típico de textura argilosa.



Porém, assim como no presente trabalho (Quadro 6), Sena (2016) também não verificou teores significativos de silício extraídos por oxalato de amônio refutando as hipóteses de baixo grau de cristalinidade das caulinitas e cimentação pela presença de compostos amorfos de silício. No mesmo estudo citado anteriormente, não é observada diferença expressiva de valores de densidade do solo nos diferentes horizontes em profundidade, e nem entre perfis, mesmo variando os teores de óxidos de Fe (extraído por ditionito-citrato-bicarbonato) entre os solos, assim como verificado no presente estudo. A mesma autora, avaliando a micromorfologia de solos da área de estudo não observou feições de iluviação em fotomicrografias, mas observa diferenças na microestrutura de perfis com menores graus de coesão (microgranular) em relação aos mais coesos (tendendo a maciça).

Esta constatação sugere que para a realidade estudada, o ajuste face a face das caulinitas, ocasionado por ciclos de umedecimento e secagem, pode ser o responsável pela coesão. As

altas temperaturas constantes e pluviosidade provavelmente têm potencial de instituir uma intensa dinâmica de reorganização mecânica da argila nos solos locais, por conta dos grandes aportes de água e rápido tempo de secagem (elevada evapotranspiração). A precipitação pluviométrica na região é entre 2750 a 3500 mm e a temperatura média entre 26 °C e 27 °C, atingindo máximas em torno de 40 °C entre os meses de setembro e novembro (INMET, 2004).

**Quadro 2.** Caracterização física e morfológica dos solos de Tabuleiro Dissecado (TD).

Horizonte	Prof. cm	Cor (úmida)	Composição granulométrica					Classe textural	S/A	AG/AF
			AG	AF	Areia	Silte	Argila			
<b>P1 - LAdx típico – 84 m</b>										
A	0 - 16	10YR 4/2	30.8	11.5	42.3	5.2	52.4	Argila	0.10	2.68
Bw1	43 - 133	10YR 6/6	23.4	7.9	31.3	2.3	66.4	Muito Argilosa	0.03	2.96
Bw2	- 170+	7.5YR 6/6	19.4	8.3	27.7	0.9	71.4	Muito Argilosa	0.01	2.34
<b>P2 – LAdx típico – 69 m</b>										
A	0 - 15	10YR 4/3	43.6	20.3	63.9	0.0	36.1	Argilo-Arenosa	0.00	2.15
BA	- 33	10YR 4/4	39.4	20	59.4	0.7	39.9	Argilo-Arenosa	0.02	1.97
Bw1	-65	10YR 5/6	35.7	18.8	54.5	0.9	44.6	Argilo-Arenosa	0.02	1.90
Bw2	- 95+	10YR 5/6	33.4	17.6	51	0.6	48.4	Argilo-Arenosa	0.01	1.90
<b>P3 - FFc êndico – 66 m</b>										
A	0 - 13	10YR 4/4	30.5	16.1	46.6	5.2	48.3	Argilo-Arenosa	0.11	1.89
Bi	- 42	7.5YR 6/6	23.8	9.6	33.4	4.2	62.4	Muito Argilosa	0.07	2.48
Bc2	90 - 150+	2.5YR 4/4	23	8.9	31.9	11.5	56.6	Argila	0.20	2.58
<b>P4 - CXbd latossólico – 63 m</b>										
A	0 - 19	10YR 5/4	38.6	24.3	62.9	0.2	36.9	Argilo-Arenosa	0.01	1.59
Bi	- 65	10YR 6/6	34.1	28.4	62.5	3.6	33.9	Franco-Argilo-Arenosa	0.11	1.20
C1	- 110	5YR 7/6	27.1	20.1	47.2	2.9	49.8	Argilo-Arenosa	0.06	1.35
C2	- 140+	2.5YR 6/4	27.1	23.9	51	2.8	46.2	Argilo-Arenosa	0.06	1.13

AG – areia grossa; AF – areia fina; S/A – relação silte/argila; AG/AF – relação areia grossa/areia fina; peq – pequeno; gr. – grande; pro. – proeminente; p. – pouco; ab. – abundante.

### 3.2. Características químicas

Quanto ao complexo sortivo (Quadros 4 e 5), os solos apresentam pH ácido, são distróficos, álicos e com baixos teores de nutrientes (SB e P). Há predominância de cargas elétricas negativas, verificado através de valores de  $\Delta\text{pH}$  ( $\text{pH KCl} - \text{pH H}_2\text{O}$ ) negativos, mas apresenta baixos valores de capacidade de troca catiônica. Estas condições talvez expliquem a presença de fitofisionomias de Cerrado, em meio ao bioma Amzônico (IEPA, 2008). Há exceções sobre o caráter álico, como em P8 que se encontra em talhão com cultivo de eucalipto

e recebeu calagem recentemente. Essas características são condizentes com o que foi observado em outras partes do país, sobre solos do Grupo Barreiras (OLIVEIRA et al., 1968; ANJOS, 1985; NOGUEIRA & NOGUEIRA, 1996; MELO et al., 2002; CORRÊA et al., 2008).

Os teores de carbono orgânico são baixos em todos os perfis, e junto com a CTC (T) exibem valores mais elevados no horizonte superficial. Essa correlação explicita a grande contribuição da matéria orgânica do solo nos valores de T de solos tropicais. As altas temperaturas e alta umidade, favorece não só intensos processos de intemperismo, como também a ciclagem e mineralização mais acelerada da matéria orgânica do solo, mantendo baixos teores de carbono orgânico neste ecossistema.

Não há diferença significativa no complexo sortivo entre os perfis de tabuleiro e tabuleiro dissecado. Isso leva a crer que a possível heterogeneidade do material de origem, indicada pela relação AG/AF esteja mais relacionada à textura do que à composição química em geral, ou que o avançado processo de latossolização em clima úmido imprimiu características químicas homogêneas para os solos locais.

### **3.3. Caracterização mineralógica**

Os difratogramas de raios-X das frações areia e argila confirmam a afirmação anterior. Na fração areia, em todos os perfis estudados, o único mineral identificado foi quartzo (Figura 7). Quanto à fração argila foram identificados apenas picos de caulinita e goethita (exceto P10), sendo que nas lâminas orientadas (Figura 8) foi difícil a identificação das reflexões da goethita. Para confirmação da presença de goethita foi analisada a fração argila em amostra em lâmina escavada com orientação aleatória, em que foi possível identificar as reflexões 0,418 nm e 0,258 nm desse mineral (Figura 8).

Nas lâminas de argila orientadas foi recorrente a presença da reflexão 0,448 nm, correspondente ao plano hkl (110), o que não era esperado. Porém, quando analisados os difratogramas das lâminas de argila desferrificadas esse pico desaparece (Figura 10), levantando a hipótese de que houve microagregação causada pela presença de óxidos de ferro, o que dificultou a orientação das partículas de caulinita nas amostras orientadas.

**Quadro 3.** Caracterização física e morfológica dos solos de Tabuleiro.

Horizonte	Composição granulométrica							Classe textural	S/A	AG/AF
	Prof. cm	Cor (úmida)	AG	AF	Areia	Silte	Argila			
<b>P5 - LAdx típico - 58m</b>										
<b>A1</b>	0 - 15	10YR 3/1	61.2	14.5	75.7	4.4	19.9	Franco-Arenosa	0.22	4.22
<b>A2</b>	- 30	10YR 3/1	70.6	8.5	79.1	1.2	19.7	Franco-Arenosa	0.06	8.31
<b>AB</b>	- 58	10YR 3/2	66.6	12.1	78.7	0.4	20.9	Franco-Argilo-Arenosa	0.02	5.50
<b>Bw</b>	- 180	10YR 5/6	61.2	14.9	76.1	1	22.9	Franco-Argilo-Arenosa	0.04	4.11
<b>P6 - LAdx típico - 53m</b>										
<b>A</b>	0 - 10	10YR 4/3	25	14	39	5	56	Argila	0.09	1.79
<b>BA</b>	- 45	10YR 5/6	18.7	12.1	30.8	2.7	66.5	Muito Argilosa	0.04	1.55
<b>Bw1</b>	- 90	7.5YR 5/8	11.4	7.9	19.3	1.2	79.5	Muito Argilosa	0.02	1.44
<b>Bw2</b>	- 180+	5YR 5/6	9.4	7	16.4	2.5	81.1	Muito Argilosa	0.03	1.34
<b>P7 - LAdx típico - 45 m</b>										
<b>A1</b>	0 - 7	10YR 2/1	52.4	10.8	63.2	4.8	32	Franco-Argilo-Arenosa	0.15	4.85
<b>A2</b>	-33	10YR 2/1	46.6	8.4	55	4.7	40.3	Argilo-Arenosa	0.12	5.55
<b>AB</b>	-56	10YR 3/1	48.5	9.3	57.8	5.1	37	Argilo-Arenosa	0.14	5.22
<b>Bw1</b>	-89	10YR 6/3	45.8	9.8	55.6	5	39.4	Argilo-Arenosa	0.13	4.67
<b>Bw2</b>	-150	10YR 7/4	38.3	10.3	48.6	4.9	46.5	Argilo-Arenosa	0.11	3.72
<b>Bw3</b>	-190	10YR 7/2	33.3	9	42.3	6.9	50.7	Argila	0.14	3.70
<b>P8 - LAdx argissólico - 35m</b>										
<b>A</b>	0 - 10	10YR 3/2	46.8	23.4	70.2	17.5	12.2	Franco-Arenosa	1.43	2.00
<b>AB</b>	- 21	10YR 4/4	44.7	35.7	80.4	3.9	15.7	Franco-Arenosa	0.25	1.25
<b>Bw1</b>	- 110	7.5YR 5/6	45.2	27.2	72.4	7.2	20.5	Franco-Argilo-Arenosa	0.35	1.66
<b>Bw2</b>	- 180+	7.5YR 5/6	36.3	29.6	65.9	7.5	26.7	Franco-Argilo-Arenosa	0.28	1.23
<b>P9 - FFc típico - 31m</b>										
<b>A</b>	0 - 15	10YR 4/4	41.8	30.6	72.4	3.6	24	Franco-Argilo-Arenosa	0.15	1.37
<b>Bi</b>	- 45	7.5YR 5/6	38.6	27.2	65.8	5.6	28.6	Franco-Argilo-Arenosa	0.20	1.42
<b>Bc</b>	- 100+		-	-	-	-	-	-	-	-
<b>P10 - FTd típico - 25m</b>										
<b>A</b>	0 - 10	10YR 4/2	25.7	46.5	72.2	8.6	19.2	Franco-Arenosa	0.45	0.55
<b>Bf1</b>	- 25	10YR 5/4 (peq. pro. p. 10R 4/8)	19.1	43.5	62.6	10	27.4	Franco-Argilo-Arenosa	0.36	0.44
<b>Bf2</b>	- 140+	10YR 6/3 (gr. pro. ab. 10R 4/8)	12.8	22.2	35	17.6	47.5	Argila	0.37	0.58

AG – areia grossa; AF – areia fina; S/A – relação silte/argila; AG/AF – relação areia grossa/areia fina; peq – pequeno; gr. – grande; pro. – proeminente; p. – pouco; ab. – abundante.

**Quadro 4.** Complexo sortivo, pH e carbono orgânico dos solos de Tabuleiro Dissecado (TD).

Horiz <sup>1</sup>	pH		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	SB	Al <sup>3+</sup>	H+Al	T	V	m	C org.	P
	H <sub>2</sub> O	KCl											
<b>P1 - LAdx típico - 84m</b>													
A	4.25	3.77	0.34	0.22	0.08	0.61	1.26	6.40	7.01	8.70	67.40	1.44	1.40
Bw1	4.92	4.69	0.07	0.02	0.01	0.10	0.00	1.60	1.70	5.90	0.00	0.23	0.10
Bw2	4.75	4.60	0.08	0.02	0.00	0.10	0.00	1.50	1.60	6.20	0.00	0.15	0.20
<b>P2 - LAdx típico - 64m</b>													
A	4.77	3.94	0.11	0.08	0.03	0.21	0.63	3.70	3.91	5.40	75.00	1.06	0.20
BA	4.47	4.10	0.08	0.02	0.01	0.11	0.45	2.20	2.31	4.80	80.40	0.60	0.20
Bw1	4.80	4.25	0.07	0.01	0.00	0.08	0.27	1.60	1.68	4.80	77.10	0.30	0.20
Bw2	4.75	4.32	0.07	0.02	0.00	0.09	0.18	1.50	1.59	5.70	66.70	0.23	0.30
<b>P3 - FFc êndico - 66m</b>													
A	4.94	3.94	0.08	0.06	0.04	4.40	0.72	4.40	4.57	3.70	80.90	1.68	1.44
Bi	4.79	4.35	0.09	0.01	0.00	1.90	0.18	1.90	2.00	5.00	64.30	0.26	0.23
Bc2	4.77	4.34	0.10	0.02	0.00	1.30	0.09	1.30	1.42	8.50	42.90	0.18	0.15
<b>P4 - CXbd latossólico - 63m</b>													
A	5.50	4.35	1.04	0.37	0.26	1.43	0.00	2.60	4.03	35.50	0.00	0.77	1.40
Bi	4.47	4.30	0.13	0.11	0.03	0.26	0.54	2.20	2.46	10.60	67.50	0.44	0.26
C1	4.77	4.17	0.10	0.08	0.02	0.19	0.27	1.30	1.49	12.80	58.70	0.26	0.15
C2	4.62	4.12	0.08	0.02	0.04	0.12	0.36	0.90	1.02	11.80	75.00	0.26	0.15

1 – Horiz – horizonte; SB – soma de bases (SB = Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup>); T – capacidade de troca catiônica a pH 7.0 (T = SB + H+Al); V – saturação por bases (V = 100.SB/T); m – saturação por alumínio (m = 100.Al<sup>3+</sup>/SB+Al<sup>3+</sup>); C org. – carbono orgânico.

**Quadro 5.** Complexo sortivo, pH e carbono orgânico dos solos de Tabuleiro.

Horiz <sup>1</sup>	pH		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	SB	Al <sup>3+</sup>	H+Al	T	V	m	C org	P
	H <sub>2</sub> O	KCl											
<b>P5 - LAdx típico – 58 m</b>													
<b>A1</b>	4.22	3.65	0.23	0.08	0.06	0.35	1.17	5.80	6.15	5.70	77.00	1.05	1.10
<b>A2</b>	4.40	3.92	0.09	0.03	0.01	0.13	0.81	3.30	3.43	3.80	86.20	0.53	1.10
<b>AB</b>	4.59	3.94	0.12	0.03	0.02	0.16	0.63	3.10	3.26	4.90	79.70	0.45	1.90
<b>Bw</b>	4.94	4.25	0.09	0.03	0.01	0.13	0.18	1.00	1.13	11.50	58.10	0.00	0.20
<b>P6 - LAdx típico – 53 m</b>													
<b>A</b>	4.73	3.36	0.26	0.26	0.06	0.55	0.90	5.50	6.05	9.10	62.10	2.10	0.40
<b>BA</b>	5.14	4.64	0.08	0.14	0.01	0.23	0.00	2.10	2.33	9.90	0.00	0.75	0.40
<b>Bw1</b>	5.23	4.77	0.09	0.03	0.01	0.13	0.00	1.60	1.73	7.50	0.00	0.38	0.20
<b>Bw2</b>	5.06	4.74	0.12	0.03	0.00	0.15	0.00	1.60	1.75	8.60	0.00	0.23	0.20
<b>P7 - LAdx típico - 45 m</b>													
<b>A1</b>	3.70	3.42	0.20	0.11	0.08	0.36	2.16	10.70	11.06	3.30	85.70	2.62	2.10
<b>A2</b>	4.17	3.70	0.15	0.11	0.03	0.28	1.80	8.70	8.98	3.10	86.50	1.65	1.20
<b>AB</b>	4.49	3.81	0.13	0.07	0.03	0.22	1.44	5.90	6.12	3.60	86.70	0.90	1.10
<b>Bw1</b>	4.81	3.90	0.15	0.07	0.02	0.23	0.72	2.40	2.63	8.70	75.80	0.30	0.20
<b>Bw2</b>	4.83	3.87	0.14	0.10	0.01	0.25	0.99	2.40	2.65	9.40	79.80	0.30	0.10
<b>Bw3</b>	4.84	3.86	0.16	0.06	0.02	0.23	0.99	2.70	2.93	7.80	81.10	0.30	0.20
<b>P8 - LAdx argissólico – 35 m</b>													
<b>A</b>	7.50	7.32	5.60	0.57	0.07	6.21	0.00	0.00	6.21	100.00	0.00	1.13	5.20
<b>AB</b>	6.58	5.85	2.70	0.49	0.03	3.21	0.00	0.90	4.11	78.10	0.00	0.30	1.80
<b>Bw1</b>	6.85	6.46	0.94	0.38	0.03	1.34	0.00	0.40	1.74	77.00	0.00	0.08	0.30
<b>Bw2</b>	5.27	4.58	0.35	0.21	0.02	0.57	0.00	1.20	1.77	32.20	0.00	0.15	0.20
<b>P9 - FFc típico – 25 m</b>													
<b>A</b>	4.29	3.75	0.21	0.14	0.04	0.38	0.90	4.70	5.08	7.50	70.30	0.97	1.20
<b>Bi</b>	4.88	4.10	0.18	0.07	0.01	0.26	0.45	2.20	2.46	10.60	63.40	0.30	0.10
<b>P10 - FTd típico – 14 m</b>													
<b>A</b>	5.02	3.95	1.49	0.51	0.10	2.06	0.54	5.00	7.06	29.20	20.80	1.74	2.20
<b>Bf1</b>	4.56	3.79	0.14	0.11	0.03	0.27	1.71	3.70	3.97	6.80	86.40	0.53	0.70
<b>Bf2</b>	4.73	3.65	0.36	0.22	0.10	0.64	3.95	5.90	6.54	9.80	86.10	0.23	0.40

1 – Horiz – horizonte; SB – soma de bases (SB = Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup>); T – capacidade de troca catiônica a pH 7.0 (T = SB + H+Al); V – saturação por bases (V = 100.SB/T); m – saturação por alumínio (m = 100.Al<sup>3+</sup>/SB+Al<sup>3+</sup>); C org. – carbono orgânico.

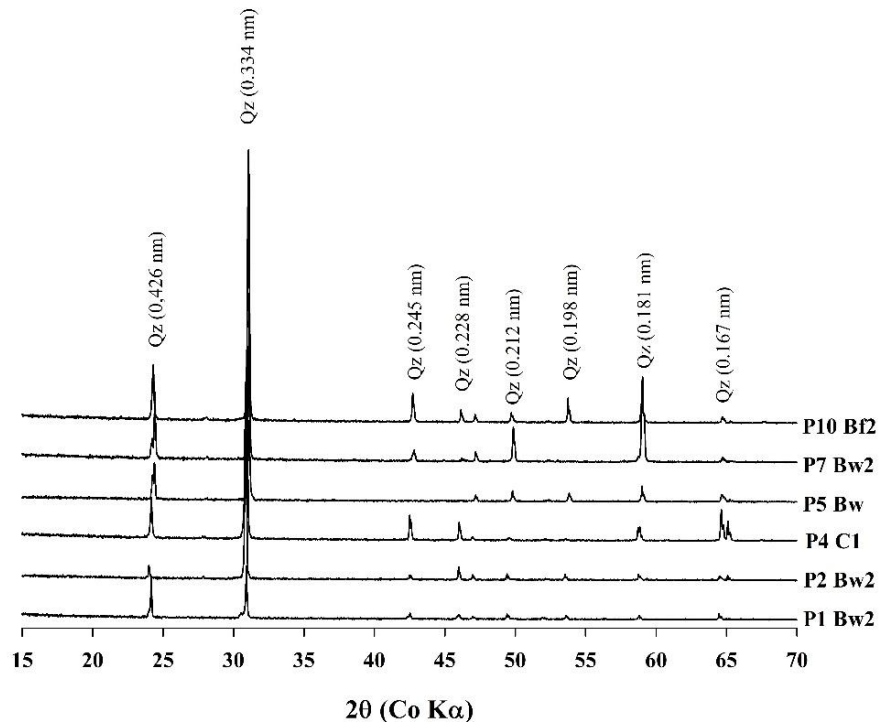
Nas lâminas desferrificadas, FTd (P10) apresentou outras reflexões além dos picos de caulinita, porém, análises complementares ainda serão realizadas para confirmação de quais argilominerais se tratam. Para a reflexão 1.425 nm, também presente em P7, todo o contexto de material latossolizado leva a crer que se trate de vermiculita com hidróxi entre camadas (VHE), argilomineral silicatado do tipo 2:1 comum em Latossolos e solos mais intemperizados (RESENDE et al., 2011). Já para as reflexões 0.990 nm, 0.499nm, e 0.336 nm, será preciso realizar os tratamentos específicos para identificação de minerais 2:1, pois podem corresponder à diferentes tipos de micas, interestratificadas ou não. A presença desse argilomineral em P10 - Bf2 talvez explique os maiores valores de T encontrados entre os horizontes subsuperficiais.

Não foi observada diferença expressiva de composição mineralógica entre perfis. Também não foi observada diferença de argilominerais entre horizontes, tampouco variação significativa de tamanho do cristal de caulinita indicado pelo diâmetro médio do cristal (DMC) entre os horizontes do mesmo perfil (Quadro 6). Porém, há pequena diferença de DMC entre os solos de tabuleiro dissecado (P1 a P4) e os solos de tabuleiro (P5 a P10), sendo DMC maior nos primeiros.

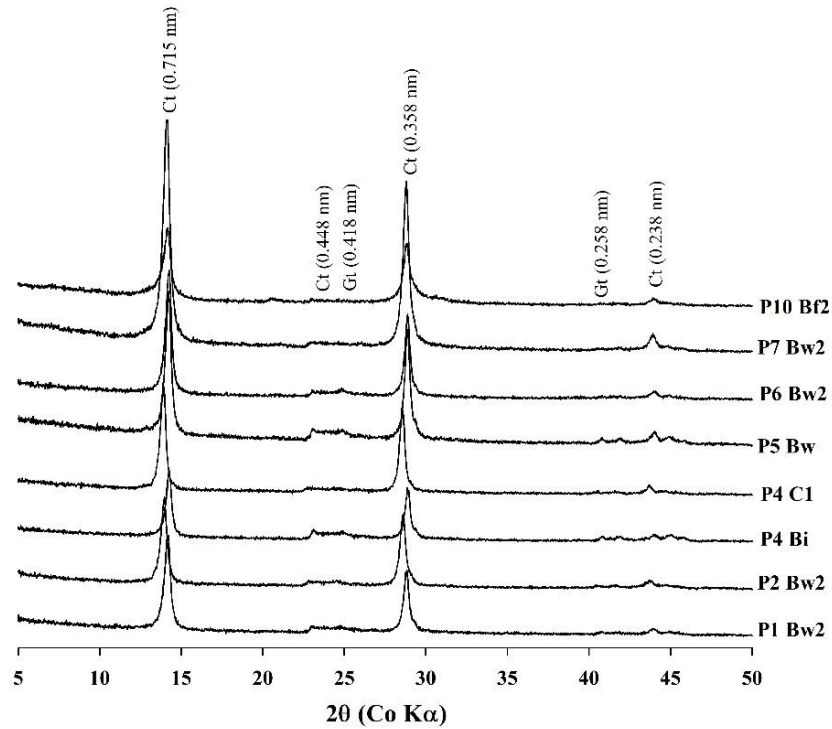
Nos perfis que apresentam maior diferença de cor entre seus horizontes subsuperficiais (P1, P4 e P6) há aumento de DMC em profundidade. No caso de P1, há ligeiro aumento de 19.34 nm para 19.45 nm de Bw1 em relação a Bw2. Já no P6 o aumento é mais significativo, de 18.58 nm em Bw1 para 20.41 nm em Bw2. Esse fato corrobora a idéia de que existem Latossolos com diferentes graus de desenvolvimento na área, sendo esses dois perfis com menor desenvolvimento pedogenético em Bw2 do que os demais, que apresentam horizontes Bw bem formados e profundos.

No perfil P4, o horizonte C1 apresenta o maior DMC das caulinitas entre todos os horizontes estudados, sugerindo menor atuação de processos pedogenéticos, e herança do material de origem essencialmente caulínico. Melo et al., (2002) estudando solos do Grupo Barreiras no Espírito Santo encontrou valores de DMC mais elevados, chegando à valores semelhantes a C1 apenas a aproximadamente 7 metros de profundidade. Corrêa et al., (2008) com solos dos estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia, Sergipe, e Amazonas, encontraram valores de DMC de caulinita superiores aos deste estudo.

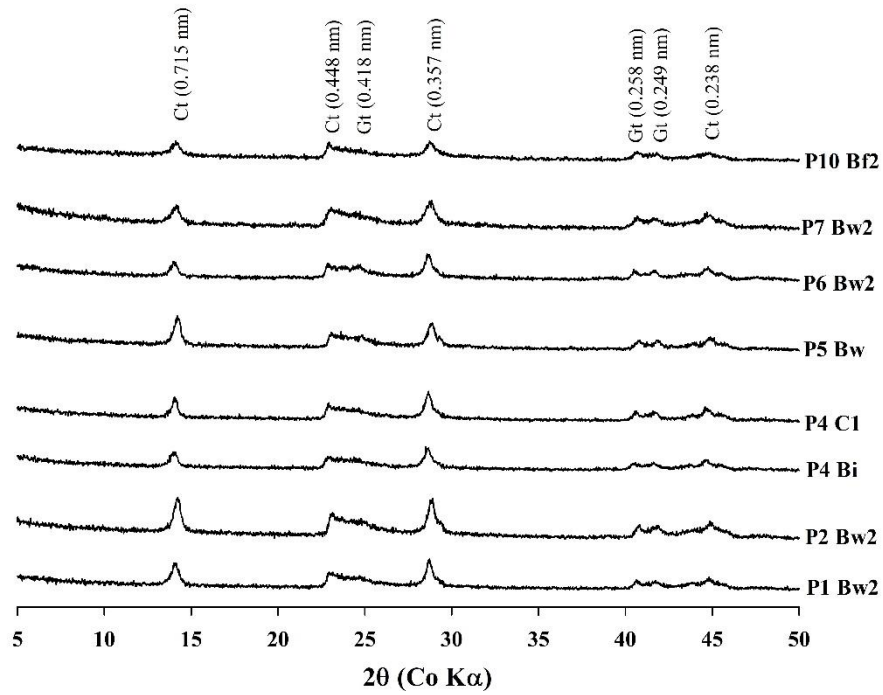
**Figura 7.** Difratomogramas de raios-X da fração areia de horizontes selecionados.



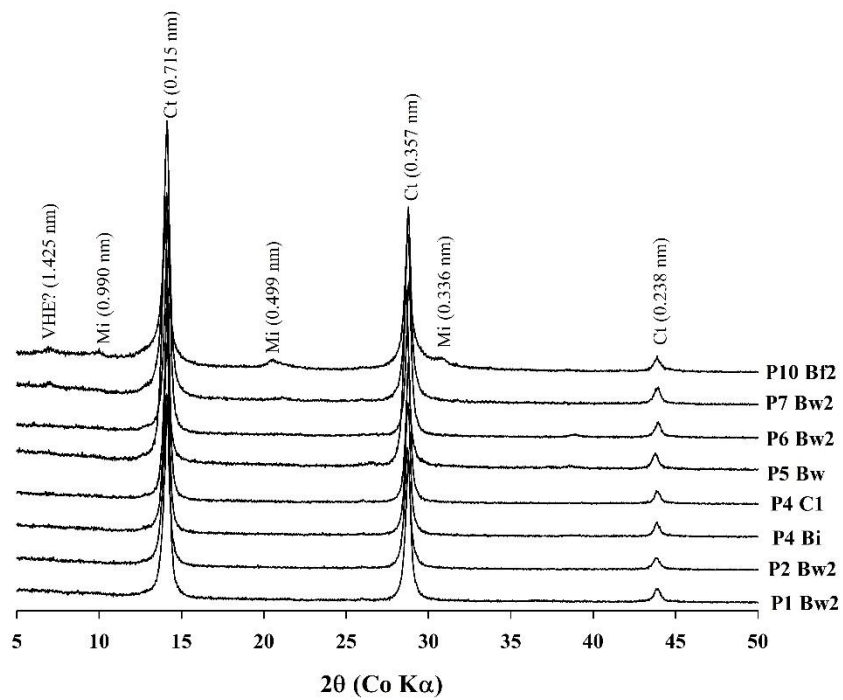
**Figura 8.** Difratomogramas de raios-X da fração argila em lâminas orientadas de horizontes selecionados.



**Figura 9.** Difratogramas de raios-X da fração argila em lâminas escavadas de horizontes selecionados.



**Figura 10.** Difratogramas de raios-X da fração argila em lâminas orientadas e desferrificadas de horizontes selecionados.



Isso sugere duas hipóteses – uma de que as condições climáticas equatoriais aos quais estão submetidos os solos do Amapá determinaram maior alteração das caulinitas, diminuindo seu tamanho durante processos de pedogênese; e/ou de que os sedimentos do Grupó Barreiras amapaense foram mais intensamente intemperizados antes de serem depositados como cobertura sedimentar, contando com menores cristais de caulinita.

Os teores de ferro extraído por DCB ( $Fe_d$ ) apresentam correlação com teores de argila (Quadro 7), e é notável os teores mais elevados nos solos de tabuleiro (P5 a P10). Neste ambiente, ocorrem solos de textura média (P8) com  $Fe_d$  no mesmo patamar do que os solos argilosos de tabuleiro dissecado. Ambos em condição de drenagem deficiente, P7 conta com os menores valores de  $Fe_d$ , enquanto P10 apresenta teores parecidos com solos de topo (P5) por conta da presença de plintita.

O perfil mais argiloso dentre os solos estudados (P6) exhibe os maiores teores de  $Fe_d$ , porém, também conta com um dos teores de  $Fe_o$  mais elevado dentre os horizontes subsuperficiais, ficando abaixo apenas do P10. Ainda assim apresenta relação  $Fe_o/Fe_d$  indicando predominância de óxidos de Fe bem cristalizados, coerente com sua posição topográfica e semelhante ao restante dos perfis de Latossolos.

Os teores de  $Si_o$  foram parecidos em todos os perfis e entre horizontes, assim como o DMC da caulinita, descartando as hipóteses de presença de Si amorfo e/ou diferentes graus de cristalinidade da caulinita contribuindo para o caráter coeso presente nos solos.

Outra variável que apresentou correlação com teores de argila foi  $Al_o$ , que dentre os elementos extraídos por oxalato de amônio teve teores mais elevados. Também foi verificada correlação negativa significativa entre  $Al_o$  e fósforo remanescente (P-rem). Considerando que o  $Al_o$  advém de caulinitas com baixo grau de cristalinidade, é possível que essa correlação esteja indicando adsorção de P em grupos Al-OH da camada octaédrica desses minerais, como sugerido por Singh & Gilkes (1992) que observaram que quanto maior a superfície específica e a desordem estrutural das caulinitas, maior a adsorção de P.

**Quadro 6.** Extrações seletivas através de oxalato de amônio e DCB, LMA, DMC, e P-rem dos solos estudados.

Horiz. <sup>1</sup>	Si <sub>o</sub>	Al <sub>o</sub>	Mn <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>	LMA (001)	DMC nm	Argila dag.kg <sup>-1</sup>	P-rem mg.dm <sup>-3</sup>
<b>P1 - LAdx típico - 84m</b>										
<b>Bw1</b>	0.08	0.98	0.01	0.09	9.43	0.01	0.505	19.34	66.4	5.5
<b>Bw2</b>	0.10	0.93	0.02	0.09	10.16	0.01	0.511	19.45	71.4	6.9
<b>P2 - LAdx típico - 69m</b>										
<b>BA</b>	0.10	0.76	0.02	0.17	8.50	0.02	0.486	20.07	39.9	22.2
<b>Bw1</b>	0.10	0.69	0.02	0.07	7.37	0.01	0.487	19.84	44.6	13.9
<b>Bw2</b>	0.14	0.89	0.02	0.07	8.86	0.01	0.515	18.89	48.4	8.7
<b>P4 - CXbd latossólico - 63m</b>										
<b>Bi</b>	0.09	0.64	0.03	0.29	5.62	0.05	0.464	20.89	33.9	17.5
<b>C1</b>	0.06	0.49	0.02	0.05	4.90	0.01	0.443	21.89	49.8	30.1
<b>P5 - LAdx típico - 58m</b>										
<b>A2</b>	0.03	0.48	0.02	0.23	3.75	0.06	0.459	20.99	19.7	31.7
<b>AB</b>	0.00	0.54	0.02	0.27	4.13	0.06	0.467	20.75	20.9	21.0
<b>Bw</b>	0.06	0.39	0.02	0.07	3.92	0.02	0.480	20.08	22.9	23.5
<b>P6 - LAdx típico - 53m</b>										
<b>BA</b>	0.12	1.02	0.03	0.24	27.47	0.01	0.486	20.07	66.5	8.0
<b>Bw1</b>	0.00	1.14	0.03	0.15	24.04	0.01	0.529	18.58	79.5	3.1
<b>Bw2</b>	0.14	0.98	0.03	0.13	27.85	0.00	0.479	20.41	81.1	3.9
<b>P7 - LAdx típico - 45 m</b>										
<b>AB</b>	0.00	1.26	0.02	0.34	3.44	0.10	0.549	18.23	37.0	10.0
<b>Bw1</b>	0.13	0.59	0.01	0.08	2.39	0.03	0.552	18.11	39.4	14.0
<b>Bw2</b>	0.13	0.76	0.01	0.09	1.07	0.08	0.571	17.70	46.5	13.3
<b>Bw3</b>	0.14	0.72	0.02	0.07	0.83	0.09	0.576	17.48	50.7	10.6
<b>P8 - LAdx argissólico - 35m</b>										
<b>A</b>	0.10	0.18	0.04	0.77	9.78	0.08	0.552	17.73	12.2	28.2
<b>Bw2</b>	0.12	0.36	0.02	0.06	10.99	0.01	0.593	16.74	26.7	12.6
<b>P9 - FFe típico - 31m</b>										
<b>A</b>	0.00	0.57	0.03	0.50	12.44	0.04	0.506	19.37	24.0	17.8
<b>Bi</b>	0.15	0.59	0.03	0.13	14.39	0.01	0.533	18.44	28.6	11.0
<b>P10 - FTd típico - 25m</b>										
<b>A</b>	0.06	0.49	0.03	0.86	2.02	0.43	0.585	16.86	19.2	33.8
<b>Bf1</b>	0.01	0.67	0.02	0.91	3.77	0.24	0.613	15.96	27.4	19.0
<b>Bf2</b>	0.13	0.47	0.02	0.27	4.06	0.07	0.655	15.07	47.5	11.0

1 - Horiz – Horizonte; Si<sub>o</sub> – Si extraído por oxalato de amônio; Al<sub>o</sub> - Al extraído por oxalato de amônio; Fe<sub>o</sub> - Fe extraído por oxalato de amônio; Mn<sub>d</sub> – Mn extraído por DCB; Fe<sub>d</sub> – Fe extraído por DCB; LMA (001) – largura a meia altura do pico 001 da caulinita; DMC – diâmetro médio do cristal de caulinita; P-rem – fósforo remanescente.

Mesmo com os mais baixos teores de  $Fe_d$ , P7 apresenta baixos valores de DMC da caulinita e P-rem, sugerindo adsorção de P por outro mineral além dos óxidos de Fe. Por outro lado, P8 apresenta teores elevados de  $Fe_d$ , baixos valores de DMC da caulinita, e P-rem semelhante a P7, tornando mais difícil a elaboração de um modelo que explique, para os solos estudados, a adsorção de P.

O Quadro 7 apresenta a análise de correlação de Pearson realizada para as variáveis DMC da caulinita, LMA, Argila, P-rem, e elementos extraídos por oxalato de amônio e DCB. Além de  $Al_o$ , os teores de argila apresentaram correlações significativas com  $Fe_d$ ,  $Fe_o/Fe_d$  (negativa), e  $Fe_o$  (negativa), sugerindo que quanto maior o teor de argila, maior o teor de óxidos de Fe cristalinos. P-rem tem correlação negativa significativa com teores de  $Fe_d$ , e positiva com  $Fe_d/Fe_o$ , levando a crer que quanto maior a proporção de óxidos de Fe cristalinos, maior a adsorção de P nos solos.

**Quadro 7.** Correlação de Pearson com valores significantes marcados para  $p < 0.05$ .

	$Si_o$	$Al_o$	$Mn_d$	$Fe_o$	$Fe_d$	$Fe_o/Fe_d$
<b>DMC</b>	-.0075	.0990	.0949	-.2901	.2238	<b>-.4458</b>
	p=.969	p=.603	p=.618	p=.120	p=.234	<b>p=.014</b>
<b>LMA(001)</b>	-.0038	-.1177	-.1364	.2741	-.2629	<b>.4520</b>
	p=.984	p=.536	p=.472	p=.143	p=.160	<b>p=.012</b>
<b>Argila</b>	.1575	<b>.5916</b>	-.1169	<b>-.3938</b>	<b>.6033</b>	<b>-.4088</b>
	p=.406	<b>p=.001</b>	p=.538	<b>p=.031</b>	<b>p=.000</b>	<b>p=.025</b>
<b>P-rem</b>	-.0094	<b>-.4530</b>	.1721	<b>.3667</b>	<b>-.4747</b>	<b>.3679</b>
	p=.961	<b>p=.012</b>	p=.363	<b>p=.046</b>	<b>p=.008</b>	<b>p=.045</b>

$Si_o$  – Si extraído por oxalato de amônio;  $Al_o$  - Al extraído por oxalato de amônio;  $Fe_o$  - Fe extraído por oxalato de amônio;  $Mn_d$  – Mn extraído por DCB;  $Fe_d$  – Fe extraído por DCB; LMA – largura a meia altura do pico 001 da caulinita; DMC – diâmetro médio do cristal de caulinita; P-rem – fósforo remanescente.

A correlação que mais chama atenção do ponto de vista mineralógico é a significância negativa entre DMC das caulinitas e  $Fe_o/Fe_d$ , indicando que quanto maior a proporção de óxidos

de Fe cristalinos, maior o DMC das caulinitas. Quando observados os dados do Quadro 6, percebe-se que dois dos perfis com menor DMC estão em condição de drenagem deficiente (P7 e P10), e apresentam os maiores valores de  $Fe_o/Fe_d$  entre horizontes subsuperficiais, corroborando a hipótese amplamente reconhecida de que tanto os óxidos de Fe quanto a caulinita são menos estáveis em condições de saturação de água sazonal ou permanente (DIXON, 1989).

### **3.4. Considerações sobre a distribuição da cobertura pedológica**

A partir de observação de produtos de sensoriamento e extenso percorrido de campo é possível identificar diferentes padrões entre os compartimentos dos Tabuleiros Dissecados (TD) e Tabuleiros. A Figura 1 evidencia a diferença da densidade de drenagem e do grau de entalhamento das vertentes entre ambos, que resulta em diferentes extensões de topos. Isso reflete na proporção de área de distribuição dos tipos de solos, sendo maior a área de Latossolos Amarelos Distrocóses nos Tabuleiros em relação aos TD. Assim como são observados mais Cambissolos Háplicos Tb Distróficos nos TD, onde o horizonte C está mais perto da superfície e aflora relativamente com mais frequência.

Esta distribuição de tipos de solos em decorrência do grau de entalhamento das vertentes é compreensível ao se considerar os diferentes balanços entre morfogênese e pedogênese. Nos Tabuleiros os topos mais amplos de relevo plano favorecem a infiltração de água, e conseqüente aprofundamento do manto latossólico resultando em horizontes Bw mais profundos, e possibilidade de maior desenvolvimento de processo pedogenéticos – também evidenciados pela maior ocorrência de caráter argilúvico nesta região. Enquanto nos TD o maior entalhamento da paisagem, com topos menos amplos e maior densidade de drenagem, favorecem processos erosivos que tendem a trazer o horizonte C e horizontes pedogeneticamente menos desenvolvidos para mais próximo da superfície. Pode-se afirmar, que em determinado grau, há um controle geomorfológico sobre a distribuição dos tipos de solo locais.

É comum e recorrente em algumas partes dos Tabuleiros Costeiros (Grupo Barreiras) em outras regiões do Brasil a ocorrência de Espodossolos, como verificado por Filizola et al., (2001), Ucha et al., (2002), Moreau et al., (2006), Corrêa et al., (2008), e Oliveira et al., (2010). Diferente destas regiões onde foram desenvolvidos os trabalhos citados anteriormente, em toda a área deste estudo não foi observada a ocorrência de Espodossolos. Existem manchas de

pequena extensão relacionadas a Neossolos Quartzarênicos, ou seja, existem solos arenosos, mas, que não passaram por processo de podzolização para formação de horizonte B espódico. Este fato levanta questionamentos quanto às condições de formação de Espodosolos em Tabuleiros Costeiros. Tanto o regime climático (temperaturas e pluviosidade), quanto o tipo de vegetação natural são diferentes na área de estudo em relação aos artigos citados, suscitando hipóteses relacionadas à influência destes fatores nos processos de podzolização, que merecem estudos dedicados à esta temática.

**Figura 11.** Ambientes de topo dos Tabuleiros (menos dissecados) e dos TD, onde ocorrem os Latossolos Amarelos Distrocoesos.

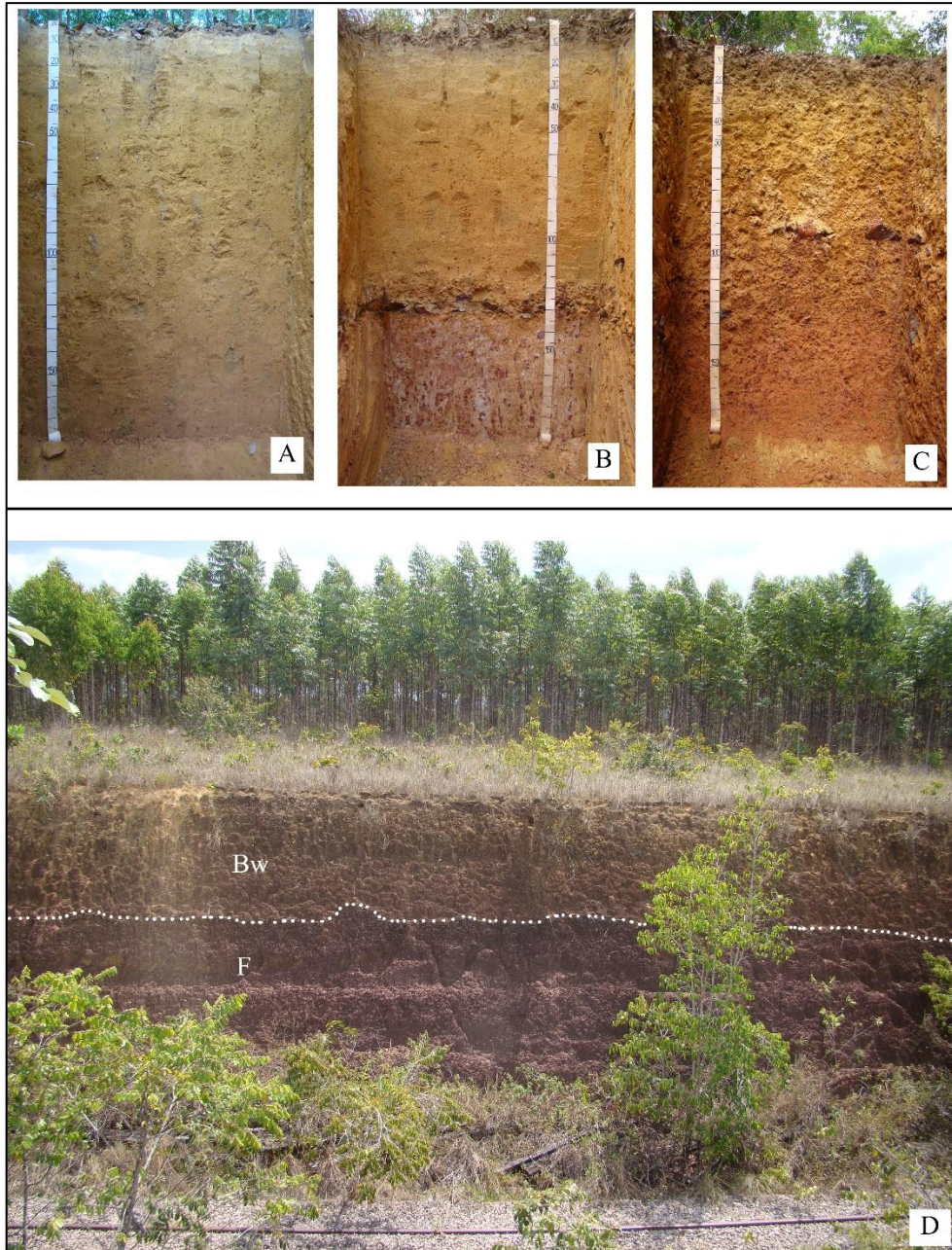


**Figura 12.** Perfis de Latossolos Amarelos Distrocoesos presentes nos compartimentos dos Tabuleiros Dissecados (A, B e C) e dos Tabuleiros (D, E e F)



A Figura 12 mostra perfis localizados no TD (A, B e C), nos Tabuleiros (D, E, e F), e que representam a variabilidade dos solos em posição de topo, majoritariamente ocupados por LAdx típicos ou LAdx argissólicos – este segundo tipo predominante dos Tabuleiros. Dentre os LAdx, P7 (Figura 12 - D) representa áreas levemente abaciadas com tendência à direção do fluxo de água, e apresenta morfologia condizente com saturação de água pretérita.

**Figura 13.** Contato abrupto entre manto latossólico profundo e horizonte concrecionário em topo da paisagem (D), e perfis representativos da transição de solos até a sua borda. Latossolo Amarelo Distrocoeso típico em posição de topo (A) em transição (B) até Plintossolo Pétrico Concrecionário típico (C), no ambiente de Tabuleiros Dissecados.



À medida que caminhamos na direção da borda dos topos, o horizonte concrecionário fica mais próximo à superfície (Figura 13). Os Plintossolos Pétricos Concrecionários (FFc) ocupam áreas de morros isolados em topografia acidentada de topos abaulados e estreitos, ou em desníveis mais acentuados das encostas nas bordas de topos aplainados (Figura 14), e estão representados pelos perfis P3 e P9, em seu respectivo compartimento geomorfológico.

**Figura 14.** Morfologia de paisagem típica de ocorrência de Plintossolos Pétricos Concrecionários típicos, com horizonte concrecionário desde a superfície.

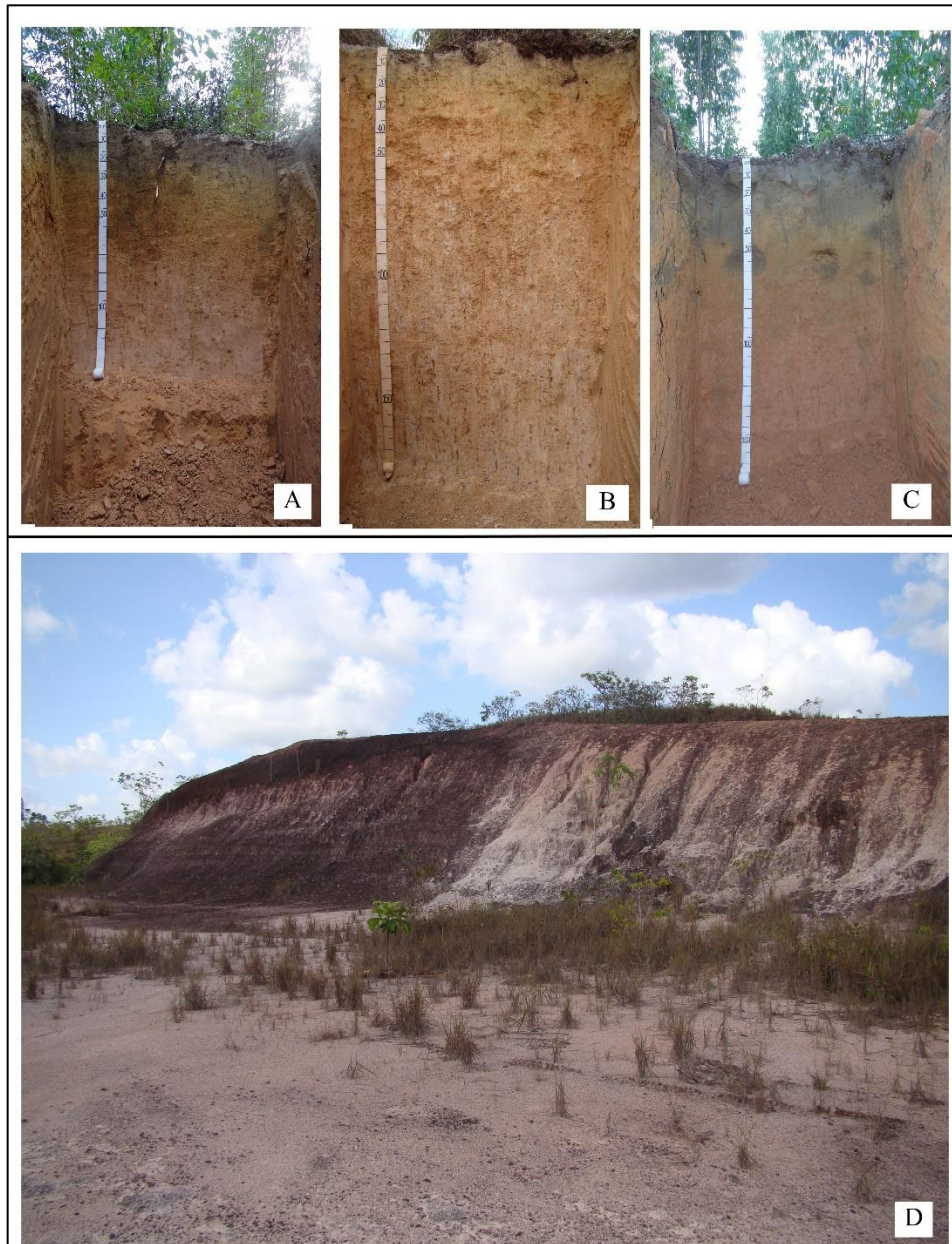


A região estudada apresenta como característica marcante um extenso manto latossólico, de coloração amarelada e profundidade variável, que apresenta contato abrupto com horizontes concrecionários ou transição gradual para horizonte mais parecido com seu material de origem - sedimentos inconsolidados areno-argilosos compostos essencialmente por quartzo e caulinita.

Em situações de vertentes declivosas, principalmente dos Tabuleiros Dissecados, ocorrem os Cambissolos Háplicos Tb Distróficos latossólicos(P4) (Figura 15), sempre de textura argilosa ou muito argilosa. A erosão do manto latossólico nessa situação de declive faz com que horizonte B tenha todas as características químicas, e algumas morfológicas e físicas, de horizontes Bw mas com profundidade insuficiente para definição como tal, sendo identificados como horizontes B incipiente nestes locais.

Os solos das amplas baixadas dos Tabuleiros estão representados pelo Plintossolo Argilúvico Distrófico típico (P10 - FTd). Também ocorrem Gleissolos e Organossolos nas proximidades dos canais fluviais, mas como a drenagem da região é muito encaixada são situações muito pequenas e pouco representativas em termos de área.

**Figura 15.** Raro afloramento de horizonte C (D), e perfis de Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico, de ocorrência em vertentes declivosas – mais comuns nos TD.



Também é evidente a diferença de altitude relativa (Figura 2) entre os dois compartimentos geomorfológicos. Os dois ambientes parecem estar em diferentes estágios de evolução pedológica, em que é difícil afirmar se o controle sob a dinâmica da gênese dos solos é resultado da heterogeneidade do material de origem, ou se tem mais influência da morfologia da paisagem. Por outro lado, é possível que a própria cobertura pedológica também exerça controle estrutural sobre as formas do relevo, como pode ser observado nas áreas de ocorrência

de FFc, que sustentam encostas declivosas nas bordas dos tabuleiros ou morros isolados com topos abaulados.

Quando observados separadamente e comparados os compartimentos geomorfológicos dos tabuleiros dissecados e tabuleiros, percebe-se que nos solos há diferenças – mais ou menos sutis – entre estes dois ambientes, descartando a hipótese de homogeneidade dos Tabuleiros Costeiros do Grupo Barreiras do estado do Amapá.

#### 4. CONCLUSÕES

Diante do exposto, conclui-se que os Tabuleiros Costeiros do Grupo Barreiras no Amapá apresentam características pedológicas heterogêneas em seus compartimentos geomorfológicos de Tabuleiros Dissecados e Tabuleiros.

- A frequência de classes texturais entre os dois ambientes apresenta-se inversamente proporcional. Os dois compartimentos apresentam clara diferença no predomínio de subgrupos texturais, indicados pelas médias e medianas das amostras submetidas a análise granulométricas. Enquanto nos Tabuleiros predomina a textura Média, nos Tabuleiros dissecados predomina a textura Argilosa e ocorre textura Muito argilosa com maior frequência.
- Os solos dos dois ambientes são homogêneos em termos das características de seus complexos sortivos. A natureza do material de origem e o processo de latossolização em clima úmido tendem a condicionar solos ácidos, distróficos, álicos e com baixa capacidade de troca catiônica.
- Não foi identificada variabilidade de composição mineralógica entre os pedoambientes. A fração areia conta exclusivamente com presença de quartzo, enquanto a fração argila tem presença predominante de caulinita, conta com goethita em menor quantidade, e possíveis traços de argilominerais 2:1 nos solos de baixada.
- Há diferentes graus de evolução de horizontes B latossólicos (Bw) entre os Latossolos Amarelos Distrocosos, indicados pela morfologia e diâmetro médio do cristal de caulinita.
- O ambiente de Tabuleiro apresenta maior desenvolvimento de processos pedogenéticos. Considerando seus maiores teores de óxidos de Fe ( $Fe_d$ ), menores tamanhos dos cristais de caulinita (DMC) que sugerem processos de ferralitização, e a presença de caráter argiluvico (mais expressivo do que nos Tabuleiros Dissecados), pode-se afirmar que os solos de Tabuleiro experimentaram com mais intensidade processos de transformação em relação ao seu material de origem. No caso dos tabuleiros dissecados, talvez pela maior altimetria, os processos de morfogênese atuam de tal maneira que inibem o mesmo ritmo de pedogênese dos Tabuleiros.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHÁ PANOSO, L. **Latosolo Vermelho-Amarelo de "Tabuleiro" do Espírito Santo: formação, características e classificação.** Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1976. 116p. (Tese de Livre Docência).
- ANJOS, L.H.C. **Caracterização, gênese, classificação e aptidão agrícola de uma sequência de solos do Terciário na região de Campos-RJ.** Itaguaí, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1985. 194p. (Dissertação de Mestrado).
- BENNEMA, J.; CAMARGO, M. N. Some remarks on Brazilian latosols in relation to the oxisols of soil taxonomy. In: **Internation soil classification workshop, 2.** Malaysia, 1978. Proceedings. Bangkok, SSD - LDD, 1979. p. 233-235.
- BIGARELLA, J.J. & ANDRADE, G.O. Considerações sobre a estratigrafia dos sedimentos cenozoicos em Pernambuco (Grupo Barreiras). Univ. Recife **Arq. Inst. Ci. Terra**, v.2, p1-14, 1964.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Folha NA/NB 22 Macapá:** geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. V.6. Rio de Janeiro. 1974.
- CORRÊA, M.M.; KER, J.C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M.P.F.; CURTI, N. Propriedades cristalográficas de caulinitas de solos do ambiente de Tabuleiros Costeiros, Amazônia e Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1857-1872. 2008.
- DIXON, J.B. Kaolin and serpentine group minerals. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B. (ed) **Minerals in soil environments.** 2<sup>a</sup> ed. Madison. Soil Science Society of America, p.467-525. 1989.
- FILIZOLA, H.F.; LAMOTTE, M.; FRITSCH, E.; BOULET, R.; ARAUJO FILHO, J.C.; SILVA, F.B.R.; LEPRUN, J.C. Os fragipãs e duripãs das depressões dos Tabuleiros Costeiros do nordeste brasileiro: uma proposta de evolução. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.947-963. 2001.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. 2004. Disponível em <[www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br)>. Acesso em: 10/11/2020.

INSTITUTO DE PESQUISAS CIENTÍFICAS E TECNOLÓGICAS DO ESTADO DO AMAPÁ – IEPA. **Macrodiagnóstico do estado do Amapá – Primeira Aproximação do ZEE**. 3ª ed., Macapá, 2008. 142p.

JORGE, X.S. & TEIXEIRA, S. G. **Geodiversidade do estado do Amapá**. Belém, CPRM, 2016. 138p.

KER, J.C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**. v.5, n.1. 1997.

KER, J.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; ROMERO, R.E.; CORRÊA, M.M. Solos dos Tabuleiros Costeiros. In: CURI, N.; KER, J.C.; NOVAIS, R.F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C.E.G.R. (ed) **Pedologia – solos dos biomas brasileiros**. 1ª ed. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.467-492. 2017.

McKEAGUE, J. A. & J. H. DAY. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal of Soil Science**. Ottawa. v. 46, p.13-32, 1966.

MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxides removal from soils and clays by a dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, 7:317-327. 1960.

MELO, V.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; SINGH, B.; NOVAIS, R.F.; FONTES, M.P.F. Propriedades químicas a cristalográficas da caulinita e dos óxidos de ferro em sedimentos do Grupo Barreiras no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.53-64. 2002.

MOREAU, A.M.S.S. **Gênese, química e micromorfologia de horizontes coeso, fragipã e duripã em solos do Tabuleiro Costeiro no sul da Bahia**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2001. 139p. (Tese de Doutorado).

MOREAU, A.M.S.S.; KER, J.C.; COSTA, L.M. da; GOMES, F.H. Caracterização de solos de duas topossequências em Tabuleiros Costeiros do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.1007-1009. 2006.

MOURA-FÉ, M. M.de. Barreiras: série, grupo ou formação? **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.7, n.6, p.1055-1061. 2014.

NOGUEIRA, L.R.Q. & NOGUEIRA, L.C. **Reunião técnica sobre solos coesos dos Tabuleiros Costeiros – Pesquisa e desenvolvimento para os tabuleiros costeiros – Anais**. EMBRAPA-CPATC/EMBRAPA-CNPMF/EAUFBA/IGUFBA, Cruz das Almas, 1996. 80p.

NUNES, F. C.; SILVA, E. F.; VILAS BOAS, G. S. Grupo Barreiras: Características, Gênese e Evidências de Neotectonismo. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento** (Embrapa Solos. Online), v. 194, p.1-31. 2011.

OLIVEIRA, L.B.; DANTAS, H.S.; CAMPELO, A.B.; GALVÃO, S.J.; GOMES, I.F. Caracterização de adensamento no subsolo de uma área de tabuleiro da Estação Experimental do Curado, Recife. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p.207-214. 1968.

OLIVEIRA, J. de. **Solos coesos dos Tabuleiros Costeiros: limitações agrícolas e manejo**. Salvador, SEAGRI-SPA. 2000. 117p.

OLIVEIRA, A.P. de.; KER, J.C.; SILVA, I.R. da.; FONTES, M.P.F.; OLIVEIRA, A.P. de.; NEVES, A.T.G. Spodosols pedogenesis under Barreiras formation and sandbank environments in the south of Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.847-860. 2010.

Origin(Pro), Version 2018. OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA. 2018.

PATTERSON, A.L. The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination. **Physical Review**, v.56, p.978-982. 1939.

RESENDE, M. **Pedologia**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 100p.

RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J.C.; REZENDE, S.B. **Mineralogia de Solos Brasileiros – Interpretações e Aplicações**. 2ª ed. Lavras, MG. UFLA. 2011. 205p.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.; ANJOS, L.H.C et al. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed. – Brasília, Embrapa. 2018. 356p.

SENA, N.C. **Solos desenvolvidos sobre sedimentos da Formação Barreiras no estado do Amapá**. 2016. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. 90p.

SILVA, A.J.N. da. & CARVALHO, F.G. de. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.853-862. 2007.

SINGH, B. & GILKES, R.J. Properties of soil kaolinites from south-western Australia. **Journal of Soil Science**, v.43, p.463-472. 1992.

SOUZA, L.S. Uso e manejo dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: **REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS**, Cruz das Almas, 1996. Anais. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1996. p.36-75.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. – Brasília: EMBRAPA, 2017. 573p.

UCHA, J.M.; BOTELHO, M.; VILAS BOAS, G.S.; RIBEIRO, L.P.; SANTANA, P.S. Uso do radar penetrante no solo (GPR) na investigação dos solos dos Tabuleiros Costeiros no litoral norte do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.373-380. 2002

VASQUES, G.M.; GRUNWALD, S.; SICKMAN, J.O. Comparison of multivariate methods for inferential modeling soil carbono using visible/near-infrared spectra. **Geoderma**, v.146, 2008. p.14-25.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; CARDOSO, E. J.; PROCHNOW, L. I. (org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, 2005. v.4, p.145-192.

## CONCLUSÃO GERAL

- A aplicação de técnicas de Mapeamento Digital de Solos obteve resultados satisfatórios no sentido de melhorar o delineamento de unidades de mapeamento em locais de difícil delimitação baseada apenas com o uso de modelos mentais e estratificadores ambientais de campo e escritório. A metodologia utilizada permitiu avaliar qual os melhores modelos a serem utilizados, e quantificar a incerteza das predições.
- A etapa de conferência da importância das covariáveis escolhidas por cada algoritmo mostrou-se muito relevante. Os modelos gerados pelo Support Vector Machine apresentaram avaliação de performance similar às do Cubist e Random Forest, porém, utilizou apenas de dados dos levantamentos aerogeofísicos entre as covariáveis mais importantes para explicar a distribuição textural. Baseado no conhecimento de campo da área, é possível perceber que há influência de covariáveis relacionadas ao terreno, e a posição geográfica das amostras do banco de dados de solos também são muito importantes por textura ser uma variável contínua na paisagem. Assim, sendo conceitualmente equivocado do ponto de vista da Pedologia, alocar tanto peso apenas para os produtos de gamaespectrometria e magnetometria.
- Os solos da região apresentam características químicas, físicas, morfológicas e mineralógicas semelhantes a outros solos em Tabuleiros Costeiros do Grupo Barreiras da costa atlântica brasileira. A coesão está sempre presente, menos pronunciada em solos com menores teores de argila.
- Há diferenciação de pedoambiente dentro dos solos do Grupo Barreiras no Amapá, caracterizado por diferença de textura, entre Tabuleiros Costeiros dissecados e Tabuleiros Costeiros mais conservados. No segundo ambiente, a pedogênese parece ter sido mais intensa, sendo identificado caráter argilúvico (não necessariamente por processo de iluviação) e indícios de latossolização mais intensa, em relação aos Tabuleiros Costeiros mais dissecados.