

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

DEBORAH NATALIE COLLYER MONTEIRO

CARACTERIZAÇÃO PEDOLÓGICA ASSOCIADA AO MAPEAMENTO  
DIGITAL DE SOLOS POR GEOESTATÍSTICA E ESPECTROSCOPIA NA  
REGIÃO DO PARQUE NACIONAL DE ANAVILHANAS (AM)

MANAUS - AM

2023

DEBORAH NATALIE COLLYER MONTEIRO

CARACTERIZAÇÃO PEDOLÓGICA ASSOCIADA AO MAPEAMENTO  
DIGITAL DE SOLOS POR GEOESTATÍSTICA E ESPECTROSCOPIA NA  
REGIÃO DO PARQUE NACIONAL DE ANAVILHANAS (AM)

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Geociências, da Universidade  
Federal do Amazonas, para defesa da mestranda da  
pós-graduação, área de concentração em Geociências.

ORIENTADOR: PROF. DR. RAIMUNDO HUMBERTO CAVALCANTE LIMA  
COORIENTADOR: PROF. DR. RAUL ROBERTO POPPIEL

MANAUS - AM

2023

## Ficha Catalográfica

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

M775c Monteiro, Deborah Natalie Collyer  
Caracterização pedológica associada ao mapeamento digital de solos por geoestatística e espectroscopia na região do Parque Nacional de Anavilhanas (AM) / Deborah Natalie Collyer Monteiro .  
2023  
111 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Raimundo Humberto Cavalcante Lima  
Coorientador: Raul Roberto Poppiel  
Dissertação (Mestrado em Geociências - Geologia Regional) -  
Universidade Federal do Amazonas.

1. Mapeamento Digital . 2. Geoestatística . 3. Espectroscopia. 4. Meio Ambiente. 5. Geotecnologias. I. Lima, Raimundo Humberto Cavalcante. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

DEBORAH NATALIE COLLYER MONTEIRO

CARACTERIZAÇÃO PEDOLÓGICA ASSOCIADA AO MAPEAMENTO  
DIGITAL DE SOLOS POR GEOESTATÍSTICA E ESPECTROSCOPIA NA  
REGIÃO DO PARQUE NACIONAL DE ANAVILHANAS (AM)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Geociências, área de concentração em Geociências.

Aprovada em: 11 de abril de 2023.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Raimundo Humberto Cavalcante Lima, Presidente.

Universidade Federal do Amazonas, PPGGEO



Prof. Dr. Rogério Ribeiro Marinho, Membro.

Universidade Federal do Amazonas, PPGGEOG

Documento assinado digitalmente  
 AFRANIO FERREIRA NEVES JUNIOR  
Data: 13/04/2023 17:31:33-0300  
Verifique em <https://validar.itf.gov.br>

Prof. Dr. Afrânio Ferreira Neves Jr., Membro.

Universidade Federal do Amazonas, FCA

Este trabalho é dedicado à minha família, em especial a minha mãe Celeste Collyer e minhas filhas Nathalie e Larissa Fadul.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus e minha família, pelo apoio em alguns momentos difíceis e no auxílio para realização deste trabalho, em especial minha mãe Celeste Collyer e minhas filhas Nathalie e Larissa Fadul.

Aos professores Drs. Humberto Lima e Raul Poppiel, pela orientação, ensinamentos, críticas construtivas para a realização deste trabalho.

Aos professores Drs. Solange Costa e José Demattê, pela orientação, disponibilidade, e valiosas sugestões durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Colega Erick Taylor pela ajuda na coleta de amostras em campo.

À Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao CNPQ pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Projeto TAR, por incentivos financeiros para realização do treinamento PROBASE - Esalq-USP em Piracicaba/SP

Ao Laboratório de Solos – Esalq-USP pela realização sem custo das análises espectrais química por fluorescência de raios-x das amostras da área de estudo.

Ao Superintendente da CPRM Sr. Marcelo Motta pela autorização sem custo das análises mineralógicas por difração de raios-X

À minhas amigas Rosemary Rocha, Joemes Simas e Rubia Raulino pelo companheirismo, ajuda e incentivos constantes durante a minha jornada no decorrer do curso de mestrado.

## RESUMO

O conhecimento das propriedades do solo gera dados e pode auxiliar no planejamento do uso da terra, conservação, produção e na tomada de decisões em ecossistemas e área social. O bioma amazônico é um dos mais biodiversos do mundo coberto por uma grande geodiversidade em uma região de difícil acesso e pouca infraestrutura, o que leva à necessidade de levantamentos de solo mais detalhados e atualizados. Portanto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial de novas geotecnologias como espectroscopia para caracterização de solos e geoestatística para mapeamento de atributos no Parque Nacional de Anavilhanas (PNA), no estado do Amazonas, norte do Brasil. Para isto, quinze locais cobrindo diferentes solos foram selecionados de acordo com um mapa pedológico legado, onde 43 amostras de solo foram coletadas a 20 cm de profundidade intervalo até 100 cm de profundidade. Essas amostras foram submetidas a análises física (areia, silte, argila), química (silício, alumínio, ferro e titânio), análise mineralógica e espectral por sensor remoto próximo na região 350-2500 nm do espectro eletromagnético. Inicialmente, os dados foram analisados por meio do coeficiente de Pearson, por meio do qual foi observado o grau de associação entre as propriedades do solo e o relevo. Posteriormente, os dados que mostraram uma certo grau de significância foram submetidos à análise de estatística descritiva e verificação da Normalidade. Em seguida foi realizada análise geoestatística, e foram construídos semivariogramas para os atributos físico-químico e covariáveis do relevo e selecionados os melhores modelos, para interpolação. Os atributos areia, silte, argila, Si, Al, Fe e Ti, juntamente com as covariáveis do relevo declividade, curvatura vertical e relevo sombreado apresentaram dependência espacial. Os dados do solo na profundidade de 0-20 cm e covariáveis do relevo foram mapeados por Krigagem Ordinária usando QGIS 3.16. Mapas de solo krigados foram agrupados com k-means resultaram 05 unidades pedológicas caracterizadas por tipo de solo, textura, sua química e mineralogia, assim como características do relevo. Os dados espectrais mostraram a presença de caulinita e hidróxidos de óxido de ferro nos solos estudados. A geoestatística e espectroscopia auxiliam na caracterização do solo atributos e mapeamento das unidades via geotecnologias e pode subsidiar outras iniciativas em regiões de difícil acesso e falta de dados.

Palavras-chave: Mapeamento Digital, Geoestatística, Espectroscopia, Meio Ambiente, Geotecnologias

## ABSTRACT

Knowledge of soil properties generates data and can help in land use planning, conservation, production and decision-making in ecosystems and the social area. The Amazon biome is one of the most biodiverse in the world, covered by great geodiversity in a region of difficult access and little infrastructure, which leads to the need for more detailed and updated soil surveys. Therefore, the present study aimed to evaluate the potential of new geotechnologies such as spectroscopy for soil characterization and geostatistics for mapping attributes in the Anavilhanas National Park (PNA), in the state of Amazonas, northern Brazil. For this, fifteen sites covering different soils were selected according to a legacy pedological map, where 43 soil samples were collected at 20 cm depth range up to 100 cm depth. These samples were submitted to physical analysis (sand, silt, clay), chemical analysis (silicon, aluminum, iron and titanium), mineralogical and spectral analysis by near remote sensor in the region 350-2500 nm of the electromagnetic spectrum. Initially, the data were analyzed using Pearson's coefficient, through which the degree of association between soil properties and relief was observed. Subsequently, the data that showed a certain degree of significance were submitted to descriptive statistical analysis and verification of Normality. Then, a geostatistical analysis was carried out, and semivariograms were constructed for the physical-chemical attributes and relief covariates, and the best models were selected for interpolation. The attributes sand, silt, clay, Si, Al, Fe and Ti, together with the relief covariates slope, vertical curvature and shaded relief showed spatial dependence. Soil data at depth 0-20 cm and relief covariates were mapped by Ordinary Kriging using QGIS 3.16. Kriging soil maps were grouped with k-means and resulted in 05 pedological units characterized by soil type, texture, chemistry and mineralogy, as well as relief characteristics. Spectral data showed the presence of kaolinite and iron oxide hydroxides in the studied soils. Geostatistics and spectroscopy help in the characterization of soil attributes and mapping of units via geotechnologies and can subsidize other initiatives in regions of difficult access and lack of data.

Keyword: Digital Mapping, Geostatistics, Spectroscopy, Environment, Geotechnologie



## LISTA DE FIGURAS – DISSERTAÇÃO

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Mapa de Localização da área de pesquisa.....   | 16 |
| Figura 2: Fórmulas das famílias da transformação Johnson.....  | 20 |
| Figura 3: Ponto de curvatura Elbow.....  | 24 |
| Figura 4: Espectro Eletromagnético, com suas diversas faixas.....  | 27 |
| Figura 5: Aspectos Qualitativos de curvas espectrais na região do VIS-NIR e SWIR.....                                    | 30 |
| Figura 6: Mapa Geológico da área de estudo.....  | 33 |
| Figura 7: Mapa Pedológico do Parque Nacional de Anavilhanas.....   | 35 |
| Figura 8: Mapa de pontos de coleta de amostras na área de pesquisa.....  | 38 |
| Figura 9: Pontos de coleta de amostras.....  | 39 |
| Figura 10: Material para coleta de amostras.....   | 40 |
| Figura 11: Amostragem na área de estudo.....   | 40 |
| Figura 12: Prancha de amostras para análise no espectrorradiômetro.....  | 44 |
| Figura 13: Esquema da geometria de aquisição de dados – Fieldspec.....   | 44 |
| Figura 14: Curvas Espectrais, amostras textura arenosa – Areia >90%.....   | 54 |
| Figura 15: Curvas Espectrais, amostras textura arenosa – Areia <90%.....   | 55 |
| Figura 16: Curvas Espectrais, amostras textura média.....  | 55 |
| Figura 17: Curvas Espectrais, amostras textura argilosa, baixo teor de ferro.....  | 56 |
| Figura 18: Curvas Espectrais, amostras textura argilosa, alto teor de ferro.....   | 57 |
| Figura 19: Mapa preditos dos atributos físicos da área de estudo.....  | 61 |
| Figura 20: Mapa preditos dos atributos químicos da área de estudo.....   | 62 |
| Figura 21: Mapa preditos das covariáveis do relevo da área de estudo.....  | 64 |
| Figura 22: Análise de número ótimo de cluster pelo método Elbow dos atributos físico-químicoe covariáveis do relevo..... | 65 |
| Figura 23: Mapa de Zonas Pedologicamente semelhantes.....  | 68 |

## **LISTA DE TABELAS – DISSERTAÇÃO**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Principais feições de absorção na região do VIS-NIR e SWIR.....  | 29 |
| Tabela 2: Conjunto amostral com devido georreferenciamento na área de estudo.....                                  | 48 |
| Tabela 3: Descrição macroscópica textural e de cor dos materiais coletados nos pontos da área de estudo.....       | 48 |
| Tabela 4: Análise físico-química e mineralógica das amostras da área de estudo.....                                | 51 |
| Tabela 5: Matriz de correlação de Pearson entre atributos dos solos da área de estudo e covariáveis do relevo..... | 58 |
| Tabela 6: Resultados da análise estatística dos atributos de interesse da área de estudo.....                      | 59 |
| Tabela 7: Resultados da análise geostatística dos atributos físico-químico e covariáveis do relevo.....            | 60 |

## **LISTA DE FIGURAS – ARTIGO**

|  |     |
|--|-----|
| Figure 1: Map of the study area and sampling locations, Anavilhanas National Park and surroundings – Amazonas.....                         | 84  |
| Figure 2: Spectral curves (350-2,500 nm) of the soils of the study area.....   | 93  |
| Figure 3: Graphs of the normal distribution of the physicochemical attributes of the soil of the studied area.....                         | 96  |
| Figure 4: Graphs of the normal distribution of the covariates of the relief of the studied area.....                                       | 96  |
| Figure 5: Models of experimental semivariograms of the covariates of the relief.....   | 98  |
| Figure 6: Models of the experimental semivariograms of the physicochemical attributes of the study area.....                               | 98  |
| Figure 7: Map of the predicted physicochemical attributes of the study area.....   | 100 |
| Figure 8: Maps of the predicted covariates of the relief of the study area.....  | 101 |
| Figure 9: Determination of the number of clusters via the elbow method of the physicochemical attributes and covariates of the relief..... | 102 |
| Figure 10: Representative sample points of Zone .....  | 104 |

## **LISTA DE TABELAS – ARTIGO**

|   |    |
|---|----|
| Table 1: Geomorphometric attributes extracted from the DEM of the study area.....                   | 86 |
| Table 2: Physicochemical and mineralogical analysis of samples from the study area.....             | 90 |
| Table 3: Pearson correlation matrix for soil attributes of the study area and relief covariates.... | 94 |
| Table 4: Results of statistical analysis of the attributes of interest of the studied area.....     | 95 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|         |   |
|---------|---|
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas                  |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária               |
| IBGE    | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística           |
| ICMBIO  | Instituto Chico Mendes Biodiversidade                     |
| MDE     | Modelo Digital de Elevação                                |
| PNA     | Parque Nacional de Anavilhanas                            |
| PROBASE | Programa Brasileiro de Análise de Solo via Espectroscopia |
| SiBCS   | Sistema Brasileiro de Classificação de Solo               |
| REM     | Radiação eletromagnética                                  |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>14</b> |
| 1.1 Apresentação .....  | 14        |
| 1.2.1 Localização e Vias de Acesso .....                                  | 16        |
| <b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                                     | <b>17</b> |
| 2.1 Mapeamento Digital de Solos .....                                     | 17        |
| 2.2 Estatística Descritiva e Geoestatística.....                          | 18        |
| 2.2.1 Análise descritiva de dados.....                                    | 18        |
| 2.2.2 Análise de Correlação de Pearson .....                              | 20        |
| 2.3 Geoestatística .....  | 21        |
| 2.3.1 Krigagem Ordinária .....  | 22        |
| 2.4 Técnicas de Agrupamento.....  | 24        |
| 2.4.1 Método Elbow para determinação do número ótimo de agrupamentos..... | 24        |
| 2.4.2 Análise de Agrupamento.....   | 24        |
| 2.5 Fundamentos da Espectroscopia .....                                   | 26        |
| 2.5.1 Interação da Radiação Eletromagnética com atributos do solo .....   | 27        |
| 2.5.2 Interpretação morfológica de espectros de solo.....                 | 29        |
| <b>3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>                         | <b>30</b> |
| 3.2 Geologia e Geomorfologia .....  | 31        |
| 3.3 Classes de Solos .....  | 34        |
| 3.4 Clima .....   | 36        |
| 3.5 Hidrografia .....   | 36        |
| <b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>   | <b>37</b> |
| 4.1 Análise Cartográfica.....   | 37        |
| 4.2 Trabalho de campo e coleta de amostras.....                           | 37        |
| 4.3 Análises Físico-Química e Mineralógicas.....                          | 41        |
| 4.4 Análise das Covariáveis do Relevo.....                                | 42        |
| 4.1 Análises Espectrais em laboratório .....                              | 43        |
| 4.2 Análises descritiva e Geoestatística .....                            | 45        |
| 4.3 Mapa de atributos dos solos e relevo e Mapa de Zonas Pedológicas..... | 46        |
| <b>5. RESULTADOS.....</b>   | <b>46</b> |
| <b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                      | <b>70</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b> | <b>71</b> |
| <b>ANEXO – ARTIGO CIENTÍFICO.....</b>     | <b>79</b> |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

O conhecimento sobre as características gerais e a distribuição dos solos são de grande importância para fins de uso, manejo e conservação, pois tal meio influencia no desenvolvimento sustentável, na ocupação e desenvolvimento de uma região, e o uso incorreto deste recurso pode gerar grandes impactos negativos ao meio ambiente. Então a necessidade de compreensão dos atributos do solo é crescente, porém a ausência de estudos mais detalhados exige tempo, mão de obra especializada e recursos financeiros.

Neste contexto, novas ferramentas que facilitem a aquisição de dados pedológicos estão sendo propostas e utilizadas (DUNN, 2002; LEE, 2003; MOUAZEN, 2007; KWEON, 2008; GENÚ, 2013; VASQUES, 2014; DEMATTÊ e TERRA, 2014; DEMATTÊ, 2020) tais como a espectroscopia de reflectância e mapeamento digital associada a técnicas de Geoestatística mostram-se uma alternativa de otimização do tempo e produzindo resultados satisfatórios quando aplicada corretamente em mapeamentos pedológicos. Além de produzir bons resultados é considerada uma técnica de uso rápido e atende aos preceitos do desenvolvimento sustentável. O uso do Geoprocessamento desempenha um papel fundamental na análise e interpretação de dados geoespaciais, essa tecnologia pode auxiliar na tomada de decisões sustentáveis, fornecendo informações precisas para a gestão ambiental. Por meio do Geoprocessamento é possível mapear áreas de conservação, identificar ecossistemas frágeis entre outras coisas. Essas informações são essenciais para a preservação da biodiversidade e para o desenvolvimento de estratégias de conservação eficazes.

O Mapeamento da variabilidade espacial de atributos do solo vem sendo intensamente estudada por meio da Geoestatística, visando melhor analisar o comportamento da distribuição destes (LIMA & SILANS, 1999; VIEIRA, 2000). Uma das formas de se caracterizar o solo é por meio de seus atributos físicos e químicos, que apresentam inúmeras aplicações e são estudadas com diferentes abordagens e ênfases, tais como a avaliação do efeito da curvatura do terreno sobre a variabilidade espacial de atributos físicos CAMARGO et al. (2010). Nielsen & Wendroth (2003) destacam o uso da ferramenta Geoestatística para estudar a variabilidade espacial e posterior construção dos mapas de predição, por meio da técnica de Krigagem, que é uma alternativa para estimar atributos em áreas não amostradas, para obter as

zonas homogêneas que possibilitem um manejo diferenciado da área.

Na região do Parque Nacional de Anavilhanas PNA ocorrem diversos tipos de solos, porém possui poucas informações detalhadas sobre suas propriedades físico-químicas e mineralógicas, devido sua grande extensão, densa vegetação e dificuldade de acesso. Os custos elevados necessários à realização de mapeamentos por métodos tradicionais levam a procurar soluções menos onerosas, que demandam menos logística e são capazes de fornecer dados indiretos que auxiliem os trabalhos de campo.

Atualmente a principal fonte de informações pedológicas do Parque Nacional de Anavilhanas é o mapa de solos, em escala 1:550.000, do Plano de Manejo do Parque Nacional de Anavilhanas (PNA), realizado pelo ICMBio (DE CONSERVAÇÃO AMBIENTAL, 2017). Justifica-se a importância da pesquisa para o PNA como contribuição ao seu ordenamento territorial por meio de instrumentos de gestão territorial visando à conservação da geodiversidade e preservação da biodiversidade, à valorização social e às práticas de desenvolvimento sustentável.

Diante desse relato, pretendeu-se neste trabalho obter mapas que representem a distribuição espacial de classes e atributos do solo e relevo por mapeamento digital utilizando técnicas de geostatística e análise espectral do solo na área do Parque Nacional de Anavilhanas(AM).

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral foi caracterizar os solos do Parque Nacional de Anavilhanas (PNA) e seus arredores, localizados no estado do Amazonas, por meio da aplicação de técnicas de mapeamento digital e espectroscopia de reflectância, a fim de obter informações precisas sobre suas propriedades pedológicas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os atributos físico-químicos, mineralógicos e covariáveis do relevo da área de estudo;
- Elaborar mapas preditivos dos atributos físico-químicos do solo e das covariáveis do relevo, utilizando técnicas de modelagem e interpolação espacial.
- Elaborar Mapa Digital de atributos dos solos separados em zonas

pedologicamente semelhantes, por meio de técnicas de agrupamento com base em dados físico-químico, mineralógicos e espectrais da área de estudo.

- Analisar o comportamento espectral dos solos da região de Anavilhanas nas bandas do visível e infravermelho (350-2500 nm).

### 1.3 Localização e Vias de Acesso

A área de estudo localiza-se no baixo curso do rio Negro, 40 km a montante da cidade de Manaus na região do Parque Nacional de Anavilhanas - PNA e seus arredores (Figura 1) e faz parte do Mosaico de Áreas Protegidas do Baixo Rio Negro (BRASIL, 2017).

O acesso a área de estudo pode ser realizado por via fluvial a partir de Manaus, em lanchas rápidas ou barcos regionais com deslocamento até a cidade de Novo Airão que dura de 3 a 9 horas. A sede do parque em Novo Airão também pode ser acessada por via terrestre num percurso de 195 km nas rodovias AM-070 e AM-352, com duração média de 3 horas.

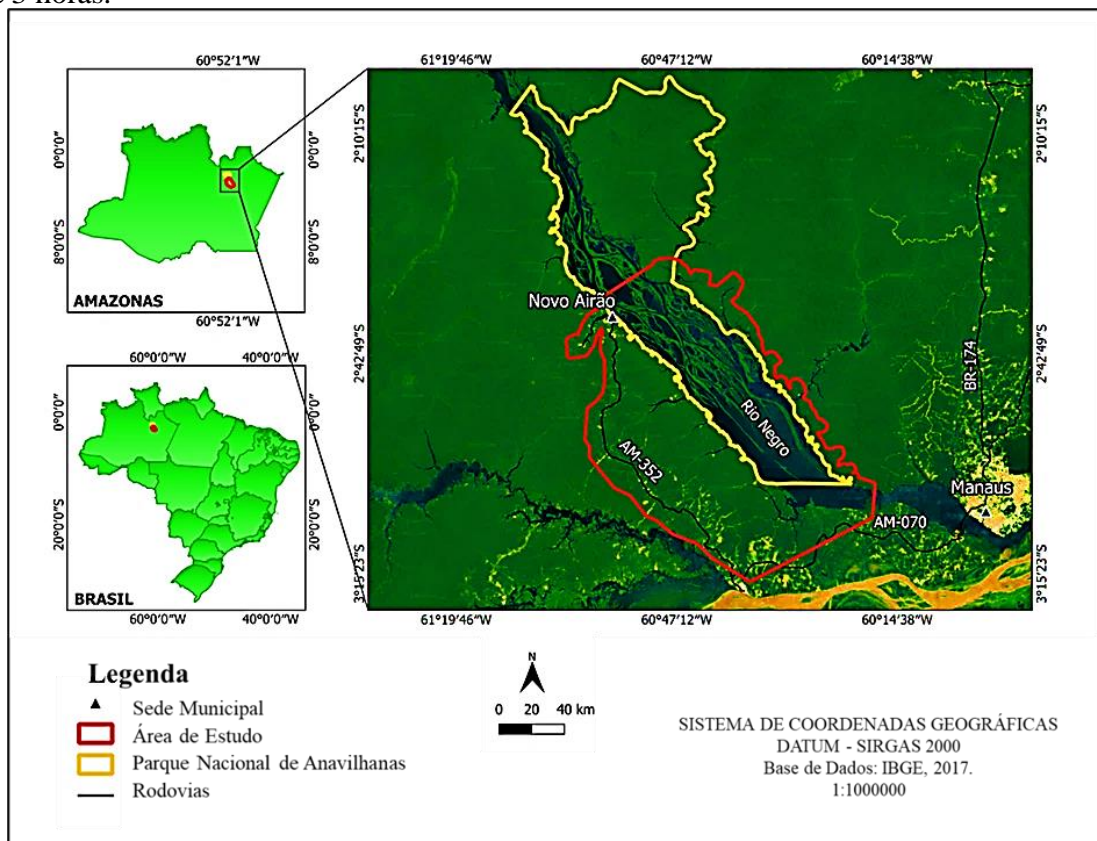


Figura 1: Mapa de localização da área de pesquisa, base de dados IBGE, 2017.



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Mapeamento Digital de Solos

A predição e o Mapeamento Digital de Solos (MDS) – Digital Soil Mapping – tiveram suas bases estabelecidas por MCBRATNEY et al. (2003) e definidas por LAGACHERIE & MCBRATNEY (2006) como “a criação e a população de sistemas de informação espacial de solos por meio de modelos numéricos visando inferir as variações espaciais e temporais de classes e propriedades do solo, a partir de observações, conhecimento e dados de covariáveis ambientais relacionados”. O MDS foi desenvolvido na busca de soluções para as incertezas comuns no método tradicional. Neste contexto, novas abordagens de modelagem quantitativa dos solos têm sido propostas, a fim de descrever, classificar e estudar os padrões de variação espacial dos solos na paisagem, objetivando melhorar o conhecimento da variabilidade espacial dos solos, da precisão e da qualidade da informação, através de diversas técnicas quantitativas, chamadas no conjunto, de Pedometria (“Pedometrics”) (WEBSTER, 1984). O MDS é realizado através do uso de funções de predição espacial de solos (FPES). Tais funções constituem um método de ajuste das relações quantitativas existentes entre o solo e o ambiente em que o mesmo ocorre. A estrutura das FPES é simplificada por  $S = f(s, c, o, r, p, a, n)$  que constitui o modelo scorpan, onde  $S$  = classe ou propriedade do solo a ser predita em função de  $s$  = informação do solo previamente disponível,  $c$  = clima,  $o$  = organismos,  $r$  = relevo,  $p$  = material de origem,  $a$  = tempo, e  $n$  = posição espacial MCBRATNEY et al. (2003). Esse modelo constitui uma generalização do bastante conhecido modelo clorpt (JENNY, 1941):  $S = f(cl, o, r, p, t)$ , onde  $S$  = solo, função de  $cl$  = clima,  $o$  = organismos,  $r$  = relevo,  $p$  = material de origem e  $t$  = tempo). A abordagem scorpan permite prever as propriedades do solo levando em consideração a variabilidade espacial. Além disso, os produtos gerados por MDS incluem os conceitos de incerteza e acurácia associados às FPES (SAMUEL-ROSA et al. 2012; MCBRATNEY et al. 2000).

Embora diversas metodologias tenham sido elaboradas, ainda não há procedimentos, padrões ou protocolos estabelecidos e aceitos para a geração de MDS. É difícil listar o melhor método de previsão de solos, cuja precisão seja alta, principalmente quando os estudos abordam extrapolação da informação para áreas adjacentes não mapeadas. As relações solo-paisagem variam nas diferentes paisagens, dificultando a

adoção de um método padrão.

## 2.2 Estatística Descritiva e Geoestatística

### 2.2.1 Análise descritiva de dados

Uma grande quantidade de métodos estatísticos supõe que os dados provenham de uma distribuição normal, pois este fato permite que seja realizada a maioria das técnicas de inferência estatística conhecidas. Para avaliar o atendimento à esta suposição, existem testes não-paramétricos como Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises, Anderson-Darling e Shapiro-Wilk, que verificam se a distribuição de um conjunto de dados adere à Distribuição Normal. Neste trabalho utilizou-se o teste de Anderson-Darling, este teste compara o ECDF (função de distribuição acumulada empírica) de seus dados de amostra com a distribuição esperada se os dados foram normais. Se esta diferença observada é adequadamente grande, você deve rejeitar a hipótese nula de normalidade população.

Toda variável aleatória, assume uma determinada distribuição de frequências na população, que podem ter formas variadas (CALLEGARI-JACQUES, 2003). Na literatura estatística encontra-se muitas distribuições teóricas. Essas são modelos que procuram representar o comportamento de determinado evento em função da frequência de sua ocorrência. No caso das variáveis contínuas, esse evento será um intervalo de valores. As distribuições de frequências são, na verdade, distribuições de probabilidade, onde para um evento teremos uma probabilidade de ocorrência associada. Em outras palavras, a partir de uma distribuição de probabilidade completamente especificada, pode-se calcular a probabilidade de uma variável aleatória assumir determinado intervalo de valores.

#### Teste de Anderson-Darling

Proposto por Anderson & Darling (1952) o teste de Anderson-Darling é mais utilizado quando o conjunto amostral é superior a 25 amostras. Este teste é baseado na função de distribuição empírica, a ideia é que dada a função de distribuição sob hipóteses nula, os dados podem ser transformados à distribuição uniforme. Os dados transformados podem então serem testados para uniformidade.

A estatística de Anderson-Darling mede o quão bem os dados seguem uma distribuição em particular. Para um conjunto de dados e distribuição especificados, quanto

melhor a distribuição se ajusta aos dados, menor será essa estatística. Por exemplo, você pode usar a estatística de Anderson-Darling para determinar se os dados atendem à suposição de normalidade para um teste t.

De acordo com Montgomery (2015), “o valor P ou p-value é o menor nível de significância que conduz à rejeição da hipótese nula com os dados fornecidos”. Moraes (2006) cita, em outras palavras, que “p-value é a probabilidade de que a estatística de teste assumira um valor, no mínimo, tão extremo quanto o valor observado da estatística para que a hipótese nula seja considerada verdadeira”. O procedimento de teste de Anderson-Darling realiza uma comparação de uma função de distribuição cumulativa observada com uma função de distribuição cumulativa esperada. Poderá rejeitar a hipótese nula se a distribuição se apresentar de uma forma específica em que a estatística de teste AD for maior do que um valor crítico, sendo que estes valores críticos são tabelados para determinados tamanhos de amostra (MORAES, 2006). Estes testes e as relações com o valor de P constituem os testes de hipóteses que serão norteadores das simulações dos dados reais. Para tanto, serão consideradas as seguintes hipóteses:

- a) H<sub>0</sub> (hipótese nula): Os dados seguem a distribuição normal;
- b) H<sub>1</sub> (hipótese alternativa): Os dados não seguem a distribuição normal.

Essas prerrogativas definidas são comparadas e fazem uma relação entre o valor de P em relação ao valor do nível de significância atribuída ( $\alpha$ ) e, por fim, uma relação em relação ao valor do teste de Anderson Darling, através do indicador AD. Em geral adota que, quando o valor P for maior que  $\alpha$ , a hipótese nula não poderá ser rejeitada e tenderá à normalidade da distribuição dos dados.

A interpretação dos resultados são dados pelo software Minitab que exibe um gráfico de probabilidade normal e um valor-p para os dados originais e transformados. Se os dados são normais, os pontos no gráfico seguem uma linha aproximadamente reta dentro dos limites de confiança e o valor-p é maior do que o nível de alfa. Para avaliar o ajuste de distribuição, normalmente, é utilizado um nível alfa de 0,05 ou 0,10.

Moraes (2006) cita que: “as técnicas de transformação de variáveis em modelos estatísticos podem ser úteis para melhorar a interpretação dos dados e a sua aderência a modelos hipotéticos”. Dentre as transformações, os métodos mais comuns aplicados são as transformações de Johnson e a transformação de Box-Cox (KORKUSUZ, 2011). Muitos

testes estatísticos são baseados na suposição de normalidade, e, quando os dados se afastam desta distribuição, uma transformação poderia adequar os dados a uma distribuição similar a normal CHEN et al. (2003).

Neste estudo foi utilizado a Transformação de Johnson que consiste em converter uma variável  $x$  para uma distribuição normal padronizada. As transformações incluem, segundo Moraes (2006), três famílias de distribuição:

- a) Família SB (onde o índice B provém de bounded ou limitado);
- b) Família SL (onde o índice L significa Lognormal);
- c) Família SU (onde o índice U provém de unbounded ou ilimitado)”.

Para Johnson (1949), “a transformação é definida por uma das três fórmulas a partir da determinação dos parâmetros  $\gamma$ ,  $\eta$ ,  $\varepsilon$  e  $\lambda$ ”. As três fórmulas de transformação para a normal reduzida são mostradas na figura 2.

| Família | Transformação  | Parâmetros  |
|---------|--|---|
| $S_B$   | $\gamma + \eta \cdot \ln \left[ \frac{x - \varepsilon}{\lambda + \varepsilon - x} \right]$ | $\eta, \lambda > 0$<br>$-\infty < \gamma < \infty$<br>$-\infty < \varepsilon < \infty$<br>$\varepsilon < x < \varepsilon + \lambda$ |
| $S_L$   | $\gamma + \eta \cdot \ln (x - \varepsilon)$  | $\eta > 0$<br>$-\infty < \gamma < \infty$<br>$-\infty < \varepsilon < \infty$<br>$\varepsilon < x$                                  |
| $S_U$   | $\gamma + \eta \cdot \sin h^{-1} \left[ \frac{x - \varepsilon}{\lambda} \right]$           | $\eta, \lambda > 0$<br>$-\infty < \gamma < \infty$<br>$-\infty < \varepsilon < \infty$<br>$\varepsilon < x < \varepsilon + \lambda$ |

Legenda:

- $x$ : Variável a ser transformada
- $\varepsilon$ : Parâmetro de localização da transformação de Johnson
- $\gamma$ : Parâmetro de forma da transformação de Johnson
- $\eta$ : Parâmetro de forma da transformação de Johnson ( $\eta > 0$ )
- $\lambda$ : Parâmetro de escala da transformação de Johnson ( $\lambda > 0$ )

Figura 2: Fórmulas das famílias da transformação Johnson, Fonte: Adaptado de Moraes (2006).

### 2.2.2 Análise de Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson é uma técnica que mede a relação estatística entre duas variáveis contínuas. Garson (2009) afirma que correlação “é uma medida de associação bivariada (força) do grau de relacionamento entre duas variáveis”. Para Moore e

Kirkland (2007), “A correlação mensura a direção (se positiva ou negativa) e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas”. O coeficiente de correlação de Pearson tem o objetivo de indicar como as duas variáveis associadas estão entre si, porém ainda não há um consenso para sua interpretação.

Todavia, como valores extremos (0 ou 1) dificilmente são encontrados na prática é importante discutir como os pesquisadores podem interpretar a magnitude dos coeficientes.

Para Cohen (1988), valores entre:

- 0,10 à 0,29 (pequenos);
- 0,30 à 0,49 (médios);
- 0,50 à 1,00 (grandes).

Dancey e Reidy (2005) apontam para uma classificação ligeiramente diferente:

- 0,10 à 0,30 (fraco);
- 0,40 à 0,60 (moderado);
- 0,70 à 1,00 (forte).

Segundo Hopkins (2008) estabelece classes para o Coeficiente de Correlação:

- 0,0 à 0,10 (Muito baixa);
- 0,11 à 0,30 (Baixa);
- 0,31 à 0,50 (Moderada);
- 0,51 à 0,70 (Alta);
- 0,70 à 0,90 (Muito alta);
- 0,90 à 1,00 (Extremamente Alta).

### 2.3 Geoestatística

A teoria das variáveis regionalizadas, desenvolvida por Krige (1951), concluiu que somente a informação dada pela variância dos dados é insuficiente para explicar um fenômeno em estudo. Para tal, seria necessário levar em consideração a distância entre as observações. A partir daí surgiu o conceito de Geoestatística.

Segundo Landim (1998), a geoestatística é um ramo da estatística que une o conceito de variáveis aleatórias com o conceito de variáveis regionalizadas, gerando um novo conceito de funções aleatórias, que são posteriormente processadas por aplicativos computacionais.

Vieira & Dechen (2010) relataram que a geoestatística é uma ferramenta adequada e fundamental para a análise de atributos variáveis no espaço, que apresentam algum grau de organização ou continuidade detectáveis por medidas de dependência espacial. Contudo, uma vez conhecido o modelo da dependência espacial é possível mapear a área estudada e quando um determinado atributo do solo varia de um local para outro, com algum grau de organização ou continuidade expresso por meio da dependência espacial, a estatística clássica deve ser aliada a geoestatística CAMPOS et al. (2008).

A geoestatística se diferencia de outros métodos estatísticos, pois são consideradas as coordenadas geográficas dos pontos amostrados, a geoestatística se utiliza dessas informações para se conhecer a estrutura da variação BERNER et al. (2007).

Através da Geoestatística é possível conhecer a continuidade de uma variável de interesse em toda uma área de estudo, demonstrando a variação espacial da propriedade por meio de mapas de variabilidade. Pois uma das grandes aplicações da geoestatística é a possibilidade de construção de mapas temáticos que permitam analisar a variável em estudo (LEMOS FILHO et al. (2008).

Na literatura sobre estudos de distribuição espacial de solos, existem vários métodos geoestatísticos de interpolação, um dos métodos que possui resultados comprovados e aplicabilidade, é a Krigagem que é um estimador linear não viciado que leva em consideração a estrutura de variabilidade encontrada para o atributo (VIEIRA, 2000; MELLO et al. 2003).

Neste contexto a krigagem é uma técnica usada na geoestatística com o objetivo de estimar valores para locais onde os mesmos não foram medidos a partir de valores adjacentes interdependente (VIEIRA, 2000).

### 2.3.1 Krigagem Ordinária

A Krigagem compreende um conjunto de técnicas de estimação e predição de superfícies baseada na modelagem da estrutura de correlação espacial. Etapas empregadas

nas técnicas de Krigagem incluem:

- a) análise exploratória dos dados;
- b) análise estrutural (modelagem da estrutura de correlação espacial);
- c) interpolação estatística da superfície.

O procedimento de interpolação é chamado de krigagem em honra a Daniel Krige, o pioneiro em introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas em mineração. O que diferencia a krigagem de outros métodos de interpolação é a estimação de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado.

Além disso, a krigagem também fornece estimadores com propriedades de não tendenciosidade e eficiência. A estrutura teórica da krigagem está baseada no conceito de variável regionalizada, desenvolvida por Georges Matheron. Uma variável regionalizada é uma variável distribuída no espaço (ou tempo) cujos valores são considerados como realizações de uma função aleatória (ou processo aleatório, ou campo aleatório, ou processo estocástico). Esta teoria permite incluir hipóteses estatísticas em processos espaciais locais. A variação espacial de uma variável regionalizada pode ser expressa pela soma de três componentes:

- a) uma componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante;
- b) uma componente aleatória, espacialmente correlacionada;
- c) um ruído aleatório ou erro residual.

A Krigagem é um método de estimativa ou predição espacial que se baseia numa série de técnicas de análise de regressão, visando estimar o valor de um fenômeno em posições não amostradas, empregando informação proveniente de dados amostrados a variável em posições vizinhas (LANDIM, 2006). Inicialmente aplicado em estudos meteorológicos, expandiu-se em 1963 à diversas áreas, principalmente nas ciências ambientais, quando foi adaptado à indústria mineradora para tornar mais lucrativos o processo de exploração (KRIVORUCHKO & GOTWAY, 2004).

## 2.3.2 Técnicas de Agrupamento

### 2.3.2.1 Método Elbow para determinação do número ótimo de agrupamentos

Na análise de clusterização, um problema fundamental é determinar a melhor estimativa do número de grupos. Devido à falta de conhecimento prévio do domínio, é difícil escolher um número apropriado, especialmente quando os dados têm muitas dimensões, quando os clusters diferem amplamente em forma, tamanho e densidade ou quando existe sobreposição entre os grupos (JOSÉ-GARCÍA; GÓMEZ-FLORES, 2016). No método proposto, a localização de um valor  $k$  ideal é realizada pelo método conhecido como *Elbow*. suponha que o agrupamento é realizado pelo algoritmo K-Means, em que uma série de quantidade de centroides é experimentada e depois plotada em um gráfico no qual se torna possível avaliar o ponto em que o aumento deste número traz um benefício pequeno para métricas como SSW. Os resultados da simulação mostram que, no final da execução, em algum momento o ganho marginal cairá drasticamente, o que resulta um ângulo no gráfico. O valor de  $k$  correto, isto é, o número de clusters mais adequado, é escolhido neste ponto, daí o critério de cotovelo - Elbow curve (BHOLOWALIA & KUMAR, 2014).

Na Figura 3 pode-se visualizar o ponto de curvatura (inflexão) em que é assumida a quantidade ideal de grupos, neste caso igual a 6.

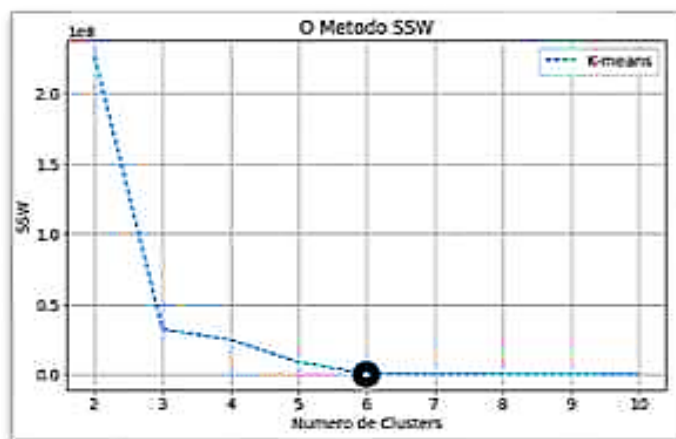


Figura 3: Ponto de curvatura Elbow, onde é determinado a quantidade ideal de clustering dos dados selecionado.

### 2.3.2.2 Análise de Agrupamento



Análise de Agrupamentos (Cluster) é um conjunto de técnicas com objetivo principal de identificar grupos/classes com características similares. Neste trabalho foi abordado o agrupamento K-Means e método Ward e foi utilizado método elbow para identificar o número ótimo para agrupamento.

Segundo Malhotra (2006), a análise de agrupamento, ou análise de clusters, é uma técnica usada para classificar objetos ou casos em grupos relativamente homogêneos chamados de agrupamentos ou conglomerados. Assim, os objetos em cada agrupamento tendem a ser semelhantes entre si, mas diferentes de objetos em outros agrupamentos.

Conforme Hair et al. (2005), as características de cada objeto são combinadas em uma medida de semelhança, que pode ser de similaridade ou dissimilaridade, calculada para todos os pares de objetos, possibilitando a comparação de qualquer objeto com outro pela medida de dissimilaridade e a associação dos objetos semelhantes por meio da análise de agrupamento. As medidas de distância representam a similaridade, que é representada pela proximidade entre as observações ao longo das variáveis. A distância euclidiana é a medida de distância mais frequentemente empregada quando todas as variáveis são quantitativas

#### *Método K-means*

O algoritmo K-Means é muito conhecido pela sua capacidade de aplicação em grandes conjuntos de dados para resolver problemas de clustering MACQUEEN et al. (1967). É amplamente utilizado porque pode ser facilmente implementado e apresenta os resultados rapidamente. No entanto, o usuário deve especificar o número de Clusters a priori (MOHD et al. 2012) (NANDA & PANDA, 2014). O ponto médio de cada agrupamento é comumente chamado de centroide (ARORA & VARSHNEY et al. 2016). Este é um ponto artificial gerado aleatoriamente e que possui o mesmo número de dimensões dos dados a serem agrupados. O método divide as amostras em  $K$  grupos de variância igual, com  $nk$  elementos, minimizando um critério conhecido como inércia ou a soma do quadrado das distâncias de cada ponto ao centro do agrupamento. Em outras palavras, o algoritmo procura minimizar o somatório da distância interna (Sum of Squares Within Clusters - SSW) entre os dados e os centroides. A ideia por trás do K-Means inicia-se com a geração aleatória da posição dos centros. Em seguida aloca-se os dados em cada grupo, de modo que uma determinada amostra pertencerá ao cluster ao qual ele apresenta a menor distância ao respectivo centroide. Terminada esta fase, recalcula-se a nova posição

dos centroides, para que ele se desloque para o centro geométrico do cluster formado na iteração corrente SANTOS et al. (2017).

## 2.4 Fundamentos da Espectroscopia

Historicamente, a espectroscopia teve origem a partir do estudo da luz visível dispersa de acordo com seu comprimento de onda, por um prisma. Mais tarde, o conceito foi bastante ampliado para compreender qualquer interação com energia eletromagnética em uma função de seu comprimento de onda ou frequência.

A radiação eletromagnética - REM mais comum é a luz do Sol que ilumina a superfície da Terra. Radiação ultravioleta, visível, infravermelho de ondas curtas, infravermelho termal e de micro-ondas, são algumas das denominações dadas pelo homem para fins práticos a uma divisão do espectro em regiões ou intervalos espectrais os quais podem ser identificados pelos seus comprimentos de onda, medidos em sistemas métricos (MENESES & MADEIRA NETTO 2001).

As ondas eletromagnéticas podem ser classificadas e organizadas de acordo com seus comprimentos de onda e suas frequências. Essa classificação é conhecida como espectro eletromagnético, este é dividido em 07 tipos de ondas, sendo elas: raios-gama, raios-X, ultravioleta, luz visível, infravermelho e ondas de rádio (Figura 4).

A espectroscopia de reflectância é uma técnica analítica que tem sido difundida na área da Geociências e aplicada a estudos de mineralogia, vegetação, rochas e solos, tendo também contribuído na ciência de análises do solo através da quantificação dos atributos pedológicos, predominantemente em ambientes tropicais úmidos. As faixas espectrais comumente utilizadas na estimativa de propriedades do solo correspondem a 400-700 nm (visível-Vis), 700-1100 nm (infravermelho próximo-NIR) e 1100-2500 nm (infravermelho de ondas curtas - SWIR) (DEMATTE et al. 2019; ROSSEL & WEBSTER, 2012).

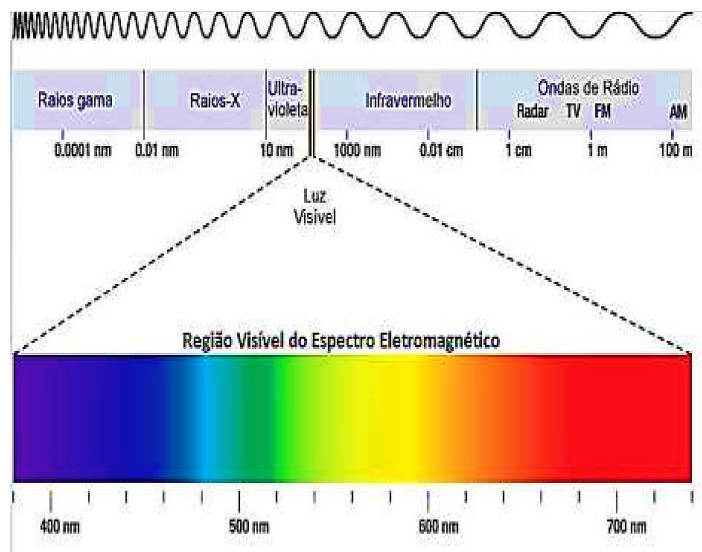


Figura 4: Espectro Eletromagnético, com suas diversas faixas, (Fonte: Google)

#### 2.4.1. Interação da Radiação Eletromagnética com atributos do solo

A energia eletromagnética incidente sobre a superfície do solo terá uma parte absorvida e outra refletida e/ou transmitida. A absorção da energia pelo solo nos diversos comprimentos de onda ocorre em função dos diversos materiais componentes do solo, os quais individualmente absorvem ou refletem a energia de forma distinta nos diferentes comprimentos de onda (BAUMGARDNER et al. 1996; STONER & BAUMGARDNER, 1981).

A interação entre a REM e os constituintes do solo pode ocorrer em níveis moleculares e atômicos, é afetado por diversos fatores dentre os quais destacam-se: a cor do solo, o tipo do solo (latossolo, litossolo, podzólico), o teor de matéria orgânica nele presente, o teor de ferro, a composição mineralógica do solo (presença ou ausência de minerais escuros), o teor de umidade, e a sua textura (distribuição de tamanho das partículas presentes no solo, ou proporção de argila, silte e areia). E dessa interação obtemos as curvas espectrais, que podem ser avaliadas pela intensidade de reflectância, feições de absorção e a forma das curvas. De forma geral, em solos quanto maior for o teor de matéria orgânica, argila e ferro menor a intensidade de reflectância, em relação a umidade, quanto mais úmido o solo, maior a energia absorvida e menor a intensidade de reflectância.

A seguir algumas características da interação da REM com os atributos do solo, que

são expressas nas curvas espectrais:

- Material de Origem: o solo é o produto do intemperismo em rochas, portanto os minerais presentes no solo apresentam curvas espectrais características de diferentes materiais de origem, ou seja, de diferentes tipos de rochas.

- Matéria Orgânica: esta absorve energia, conseqüentemente diminuiu a intensidade de reflectância (COLEMAN & MONTGOMERY, 1987).

- Óxidos de Ferro: as diferentes cores dos óxidos de ferro são devidas à absorção seletiva da luz na região do visível, causada pela transição dos elétrons nas camadas orbitais. Desta forma, a presença de óxidos de ferro nos solos influencia seu comportamento espectral.

A presença de óxidos de ferro (goethita e hematita) causa uma absorção (concauidade) na região de 850 nm (VITORELLO & GALVÃO, 1996). A Goethita forma um pequeno ombro próximo a 650 nm e entre 400 e 600 nm e concauidade mais estreita, apresenta maior reflectância que a hematita (KOSMAS et al. 1984; VITORELLO & GALVÃO, 1996), sendo que a presença destes óxidos de ferro no solo influencia o comportamento da curva espectral principalmente na região do visível e infravermelho próximo (DEMATTE & GARCIA, 1999).

- Mineralogia e Granulometria: o conhecimento da composição mineralógica é essencial para avaliar o comportamento espectral dos solos, devido às várias feições de absorção e a influência no albedo que lhe conferem as curvas espectrais.

O tipo de argilomineral presente na amostra influencia a reflectância na faixa de 500 a 2.500 nm MATHEWS et al. (1973). As bandas de absorção em 1.400 e 1.900 nm são atribuídas à vibração molecular dos grupos OH<sup>-</sup> da água adsorvida aos argilominerais (HUNT, 1979; LINDBERG; SNYDER, 1972), e a absorção no comprimento de onda de 2265 nm é devido a presença da gibbsita (HUNT; SALISBURY; LENHOFF, 1971).

Na curva espectral da caulinita, a forte absorção ocorrida na região de 2.200 nm é indicativa da influência da hidroxila estrutural. A illita mostrou baixa reflectância para comprimentos de onda menores que 1.700 nm, além de baixa intensidade de absorção nas bandas de água e hidroxila, quando comparadas com as amostras de caulinita e nontronita.

O Quartzo apresenta alta intensidade de reflectância, solos arenosos apresentam angulação mais acentuada em sentido positivo crescente de intensidade de reflectância.

Enquanto solos argilosos absorvem mais energia, conseqüentemente menor

intensidade de reflectância.

| <b>Constituintes do Solo</b> | <b>Comprimento de onda de absorção (nm)</b> |
|------------------------------|---|
| Água                         | 1915, 1455, 1380, 1135, 940                 |
| Hidroxilas                   | 1400, 930, 700                              |
| Goethita                     | 434, 480, 650, 920                          |
| Hematita                     | 404, 444, 529, 650                          |
| Caulinita                    | 1395, 1415, 2160, 2208                      |
| Esmectita                    | 2206, 2230                                  |
| Ilita                        | 2206, 2340, 2450                            |
| Gibbsita                     | 2265  |

Tabela 1: Principais feições de absorção na região do VIS-NIR e SWIR. Fonte: Modificado de ROSSEL & BEHRENS (2010).

#### 2.4.2 Interpretação morfológica de espectros de solo

As curvas espectrais do solo podem ser caracterizadas de forma qualitativa e quantitativa, a seguir, apresentamos alguns exemplos de curvas espectrais descritas qualitativamente. Demattê et al. (2014) desenvolveu um sistema de classificação morfológico para as curvas espectrais, onde considera-se a forma (côncava, convexa ou plana), o albedo (alta ou baixa intensidade) e a inclinação da curva (ascendente, plana ou descendente), essas são características para descrever as curvas espectrais qualitativamente (Figura 5).

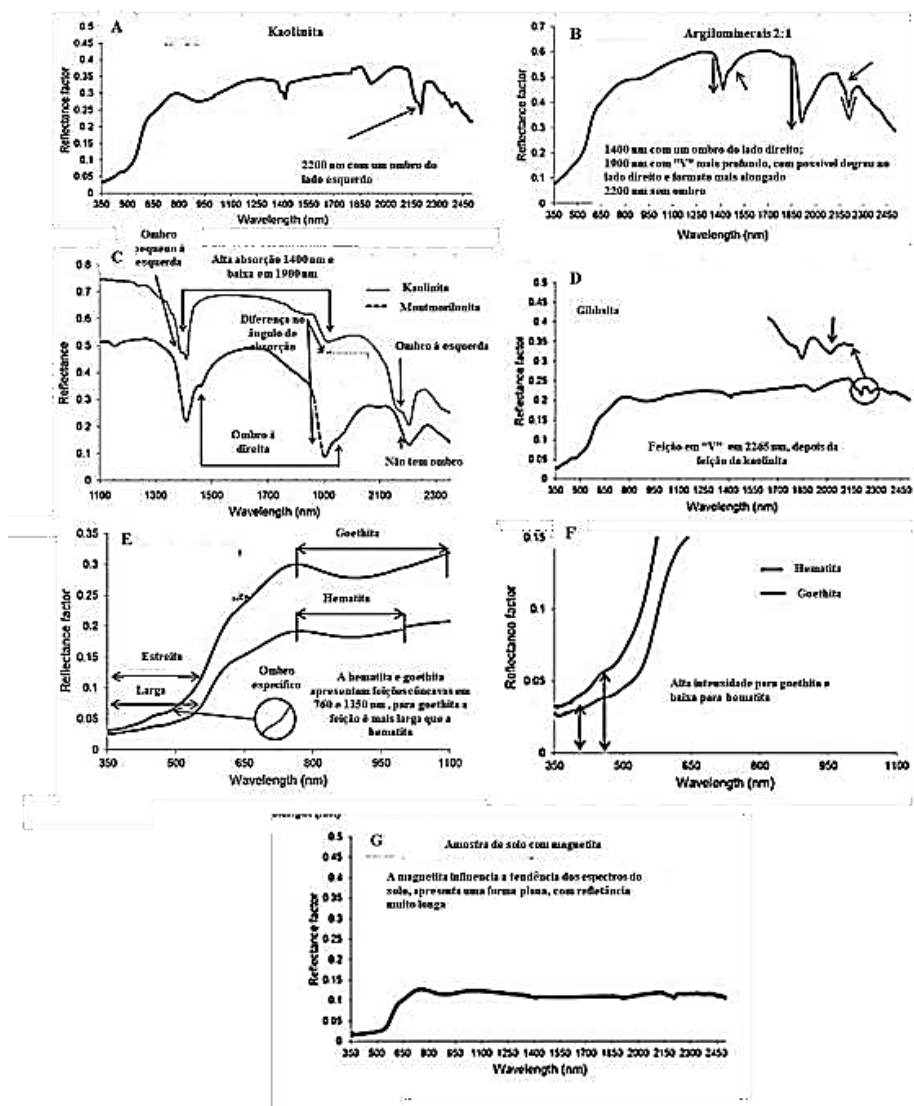


Figura 5: Aspectos Qualitativos de curvas espectrais na região do VIS-NIR e SWIR A- presença de kaolinita, B- argilominerais tipo 2:1, C – Diferença entre a kaolinita e montmorilonita, D – Aspectos da Gibbsita, E e F – Principais diferenças entre a hematita e goethita e G – Solo sobre influência da magnetita (DEMATTÊ, 2014).

### 3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1 Parque Nacional de Anavilhanas – PNA

O PNA é uma unidade de conservação federal, criada inicialmente como Estação Ecológica em 1981, com o objetivo preservar o arquipélago fluvial de Anavilhanas e suas diversas formações florestais. Encontrar-se sob a administração do ICMBio, que em conjunto com outras instituições desenvolvem ações de gestão a partir da sede do parque,

na cidade de Novo Airão. O PNA é destinado à realização de pesquisas científicas, desenvolvimento de atividades de educação e interpretação ambiental, recreação em contato com a natureza e turismo ecológico (BRASIL, 2000). O PNA também é sítio da convenção Ramsar, Patrimônio Natural da Humanidade e Reserva da Biosfera pela UNESCO, e umas das unidades de conservação federais prioritárias para estruturação da visitação por parte do ICMBio.

Em relação a sua gênese, uma das hipóteses para formação do arquipélago foi explicada pelo Projeto RADAMBRASIL (DNPM, 1978). Os autores sugerem que o rio Negro apresenta falhamentos que seguem, preferencialmente, a direção noroeste  $\pm$  sudeste (NO  $\pm$  SE), conferindo a retilineidade do rio e a configuração de suas margens escarpadas no trecho do Arquipélago de Anavilhanas. Em termos de sedimentação, os autores acreditam que o processo, no trecho do Arquipélago de Anavilhanas, seria explicado a partir de depósitos lineares fluviais e, sedimentação à jusante das ilhas seria e desses depósitos posteriormente reentalhados por furos. A caracterização morfológico-morfométrica de Anavilhanas inclui diques marginais, depósitos de canais e de barras de meandros abandonados e lagos. Ao longo dos tributários dos principais rios, desenvolve-se sedimentos aluviais recentes compostos por areias, siltes e argilas (SILVA, 2005 apud ALVES, 2013).

### 3.2 Geologia e Geomorfologia

O Plano de Manejo do ICMBio descreve que todo o complexo de terras do PNA encontra-se na unidade morfoestrutural do planalto do Uatumã-Jari, de idade neopleitocênica. A adjetivação Uatumã-Jari dá uma ideia de seu posicionamento geográfico. Seu limite norte é marcado pelo Planalto Setentrional da Bacia Sedimentar do Amazonas e pela Depressão do Rio Branco - Rio Negro, onde o rio Negro faz o limite. A unidade ultrapassa esse rio para oeste, onde se limita com a Depressão do Negro-Japurá. Esse contato é marcado pelo rio Jaú a noroeste e rio Manacapuru a sudoeste. Seu contato ao sul com a Planície Amazônica (inclusive à foz do rio Negro) é marcado por desníveis que chegam a alcançar algumas dezenas de metros. Os relevos que compõem as unidades geomorfológicas da área do PNA possuem altimetria entre 50 e 150 m e estão talhados sobre os sedimentos da formação Alter do Chão, em sua maior parte. A região do rio Negro apresenta dois tipos de paisagens fisicamente bem diferenciadas: os Igapós e a Terra Firme.

Nos Igapós predominam solos mais jovens, formados a partir de sedimentos do Quaternário. Na Terra Firme, em geral, predominam solos mais evoluídos, formados a partir de sedimentos ou rochas do Período Neógeno ou ainda mais antigos. Os solos de Terra Firme são geralmente cobertos por uma densa floresta e apresentam boas características físicas, mas, geralmente, apresentam baixa fertilidade química natural, por serem solos bastante intemperizados e lixiviados (SIOLI,1991). De maneira geral, nas áreas fora do PNA, o empobrecimento desses solos ocorre, principalmente, pela perda de matéria orgânica, devido a derrubadas e queimadas de árvores e introdução de culturas anuais e pastagens.

De acordo com Barbosa (2015), os litotipos aflorantes na área de estudo são representados, principalmente, pelas Formações Alter do Chão, Novo Remanso e Depósitos Quaternários do rio Negro e serão descritos a seguir. Na figura 6 pode-se observar a geologia da área conforme IBGE, 2017.

- Formação Alter do Chão

A área de estudo é composta predominantemente pelos sedimentos da Formação Alter do Chão que foi definida por Kistler (1954) e pertence ao Grupo Javari CUNHA et al. (2006). Esta formação é constituída principalmente por arenitos feldspáticos/cauliníticos, quartzo-arenitos e conglomerados com estratificações cruzadas, acanaladas e tabulares, que foram interpretadas como depósitos de canais fluviais com fácies subordinadas de siltitos, folhelhos e argilitos relacionados a ambiente lacustre (CAPUTO 1984, VIEIRA 1999, NOGUEIRA et al. 1999, CUNHA et al. 2006, PAZ & CUNHA 2009).



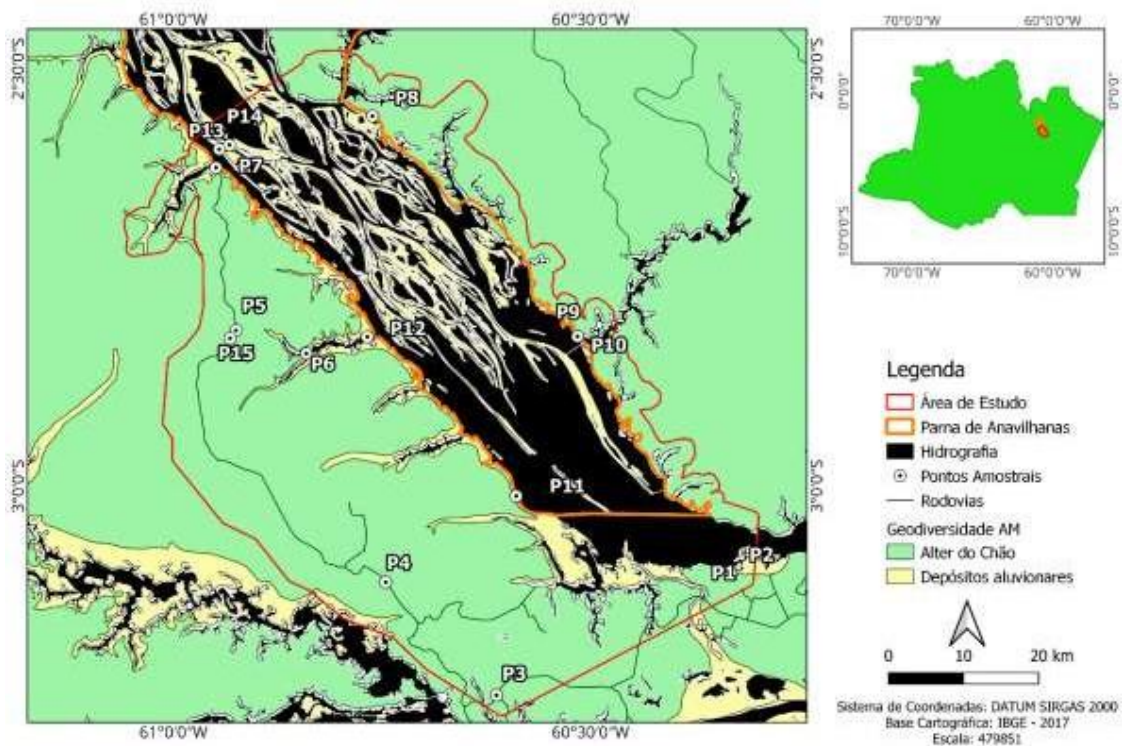


Figura 6: Mapa Geológico da área de estudo, Fonte: Modificado de IBGE 2017.

Dino et al. (2000) reconheceram duas sequências distintas para Formação Alter do Chão: a sequência 1 (inferior), caracterizada por influxo de terrígenos associados a ciclos de um paleossistema fluvial meandrante que evoluem para anastomosados com retrabalhamento eólico, onde foram atribuídas idades palinológicas correspondentes ao Alagoas (Aptiano) Superior - Albiano. Enquanto, para a sequência 2 (superior), composta de ciclos progradacionais flúvio-deltáicos-lacustre, corresponde ao Cenomaniano Superior.

#### - Formação Novo Remanso

Estudos mais recentes nas proximidades de Manaus propõem o termo informal “Formação Novo Remanso” aos depósitos siliciclásticos sobrepostos discordantemente, de forma irregular, às rochas cretáceas da Formação Alter do Chão, abrindo uma nova perspectiva para interpretações paleogeográficas e paleoambientais para a Bacia do Amazonas (ROZO, 2004; ROZO et al. 2005; NOGUEIRA et al. 2006; SOARES, 2007; ABINADER, 2008; ANDRADE et al. 2009; DINO et al. 2006, 2012).

Estudos palinoestratigráficos e análises de fácies em depósitos sedimentares a sudoeste de Manaus realizados por Dino et al. (2012), identificaram e subdividiram a Formação Novo Remanso em duas porções (inferior e superior), limitadas no topo e na base por superfícies de descontinuidades (Crosta Lateríticas). Estes autores descrevem a predominância de fácies arenosas, com fácies pelítica e conglomeráticas subordinadas, constituindo barras em pontal e planície aluvial relacionadas a um paleossistema fluvial meandrante.

#### - Depósitos Aluvionares

Estudos geológicos e/ou geomorfológicos relacionados à sedimentação quaternária do rio Negro, ainda, são escassos e, os trabalhos disponíveis mostram diferenças na nomenclatura litoestratigráfica atribuída às unidades, bem como nos limites propostos. O detalhamento geológico e/ou geomorfológico iniciou com a implantação do Projeto RADAM BRASIL (1978), sendo posteriormente complementado com os trabalhos de Bezerra (2003), Latrubesse & Franzinelli (2005), Soares et al. (2010), Alves, (2013) e Barbosa, (2015).

### 3.3 Classes de Solos

Uma classificação do solo pode fornecer informações importantes sobre suas características químicas e físicas. Deste modo, levando-se em consideração a definição de solo e a sua formação, tem-se uma grande diversidade de tipos de solos, sendo a classificação dos solos brasileiros mais empregada baseada no Manual de Classificação de Solos da Embrapa (EMBRAPA 2006).

Em termo de distribuição pedogeográfica, a unidade de solo de maior ocorrência na Amazônia é o latossolo amarelo representando grande parte da área de estudo. Caracteriza-se pelo avançado estágio de intemperização, muito evoluído, resultante da variação de fortemente bem drenados (Figura 7).

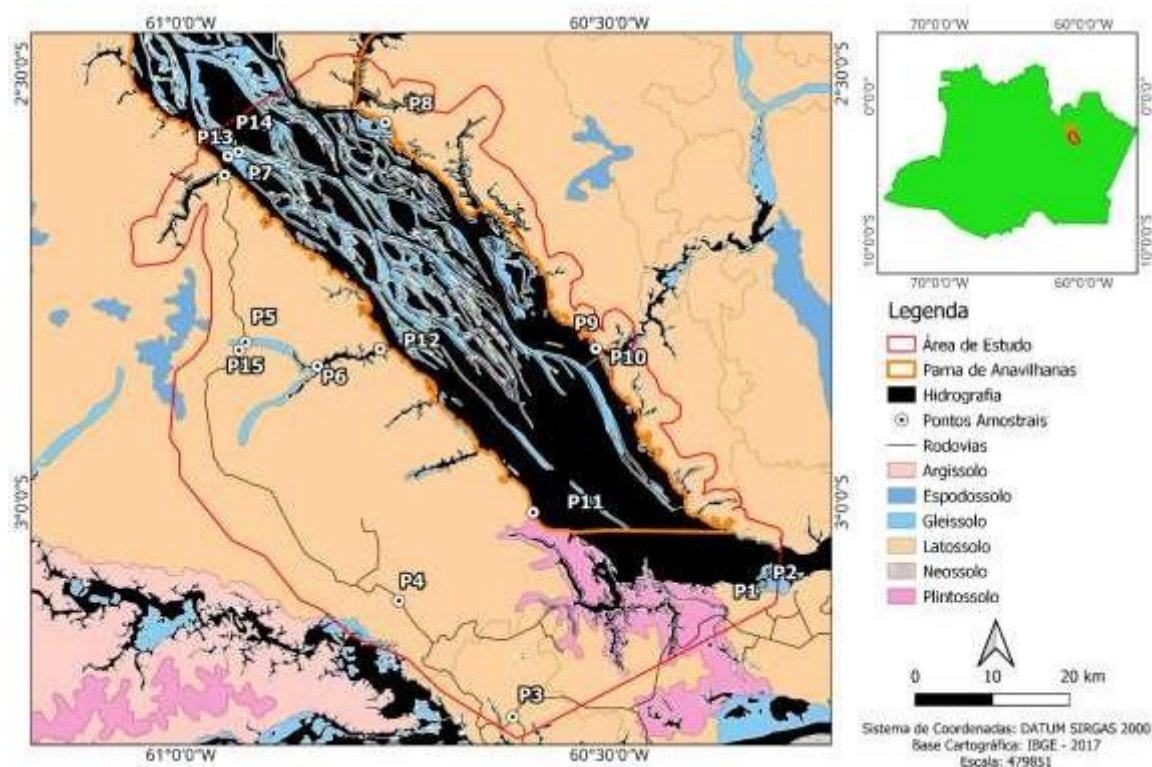


Figura 7: Mapa Pedológico do Parque Nacional de Anavilhanas, Fonte: IBGE, 2017.

Os solos no PNA, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (2015), são definidos como latossolos amarelos átricos e latossolos amarelos distróficos, que predominam na maior parte da Terra Firme. Caracterizam-se por serem solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, como resultado das transformações no material constitutivo. Desenvolvem-se sobre os sedimentos da Formação Alter do Chão, em relevo suave ondulado a forte ondulado, com textura desde média a muito argilosa.

Nas áreas mais acidentadas, estão marcados os plintossolos argilúvicos alíticos, que são solos minerais de coloração pálida, formados sob condições de restrição à percolação da água, sujeitos ao efeito temporário de excesso de umidade; de maneira geral, imperfeitamente ou mal drenados, apresentando excessiva plintização, ou seja, acumulação de óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ), sendo de baixa fertilidade.

Nas áreas de planície e ilhas do PNA ocorrem sedimentos recentes não consolidados referentes ao Quaternário. Os solos destacados incluem espodosolos

humilúvicos hidro hiperesessos, que são compostos por minerais, com textura predominantemente arenosa, de tonalidade que varia entre tons de cinza e vermelho, associando-se a relevo plano, suave ondulado e depressões.

Também ocorrem no PNA, os gleissolos háplicos taetróficos e os gleissolos háplicos Tb distróficos, que são solos constituídos por minerais ou material orgânico pouco espesso, também denominados solos aluviais.

### 3.4 Clima

A região do PNA apresenta clima tropical chuvoso, caracterizado por temperaturas elevadas e precipitação pluvial abundante e bem distribuída ao longo do ano. De acordo com a escala de Köppen, o clima na região pertence ao tipo Af (clima Tropical Chuvoso). O clima da bacia é caracterizado pela intensa precipitação, com média anual de 2.500 mm por ano e temperatura média de 26 °C (CANDIDO; SOUZA, 2016). Segundo Sorí, et al., 2018 os valores de precipitação aumentam na direção noroeste (3.500 mm na fronteira com a Colômbia), com maior e menor precipitação ocorrendo em maio e outubro, respectivamente. A precipitação é oriunda principalmente do Atlântico Tropical Norte e com intensa reciclagem pela floresta por meio da evapotranspiração (SALATI e MARQUES, 1984; SORÍ et al. 2017). De acordo com Alves (2013), a vazante do rio começa a partir de julho com pico em outubro, chegando a valores de vazão correspondentes a cerca de 25 cm por dia, sendo a velocidade de vazante maior que a velocidade de enchente.

### 3.5 Hidrografia

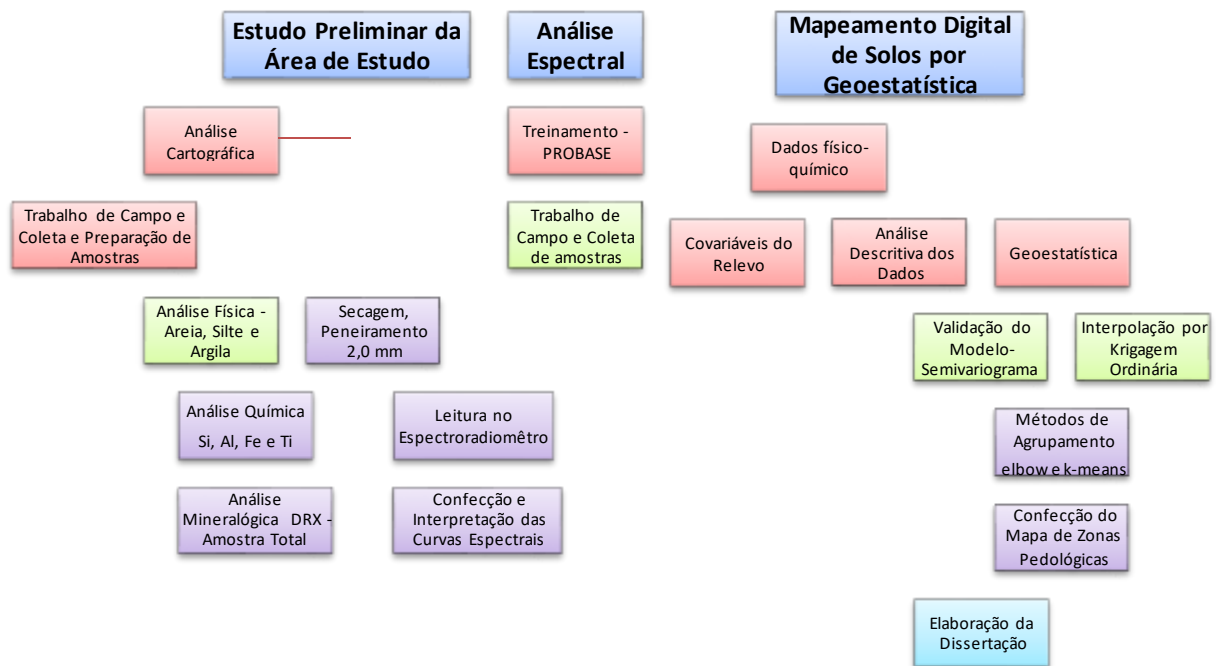
A bacia do rio Negro tem uma extensão de 2250 km e uma variedade de padrões de canais, com alcances variando de canal único a complexos sistemas de ramificações nos dois maiores arquipélagos da Bacia Amazônica, o Mariuá e Anavilhanas (LATRUBESSE & FRANZINELLI, 2005; LATRUBESSE & STEVAUX, 2015; MARINHO et al. 2020). O arquipélago de

Anavilhanas, onde localiza-se a área de estudo é composto por um complexo sistema de drenagem com aproximadamente 400 ilhas (MONTERO & LATRUBESSE, 2013), essas ilhas são elevadas e estreitas, compostas por depósitos de sedimentos finos e

com a presença de lagos seu interior (ALVES, 2013; LATRUBESSE; FRANZINELLI, 2005).

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos nesta pesquisa de mestrado, os seguintes métodos foram utilizados e podem ser observados no organograma abaixo.



##### 4.1 Análise Cartográfica

Nesta etapa foram levantadas bases cartográficas, topográficas e mapas geológicos da região que serviram de referência para construção do mapa geológico, pedológico e de localização deste trabalho. As informações obtidas foram integradas digitalmente através dos softwares QGIS 3.16, e AVENZA MAPS que permitiram a compilação e manipulação dos dados gerais para confecção do layout final dos mapas.

##### 4.2 Trabalho de campo e coleta de amostras

Conforme mencionado anteriormente, a área de estudo localiza-se na região do baixo curso do Rio Negro, a noroeste de Manaus. Os trabalhos de campo foram



realizados, principalmente, por via fluvial pelo rio Negro, em uma embarcação tipo voadeira que permitiu alcançar na totalidade a área pesquisada.

Na etapa de campo, que se constituíram em visitas em locais da área de estudo, com o intuito de fotografar, georreferenciar e coletar amostras de solos (Figura 8), foi realizada em novembro de 2019, no período de vazante do rio Negro, pois é melhor para amostragem de solo e sedimentos em áreas as margens do rio e igarapés, pois em outros períodos os afloramentos estariam alagados.

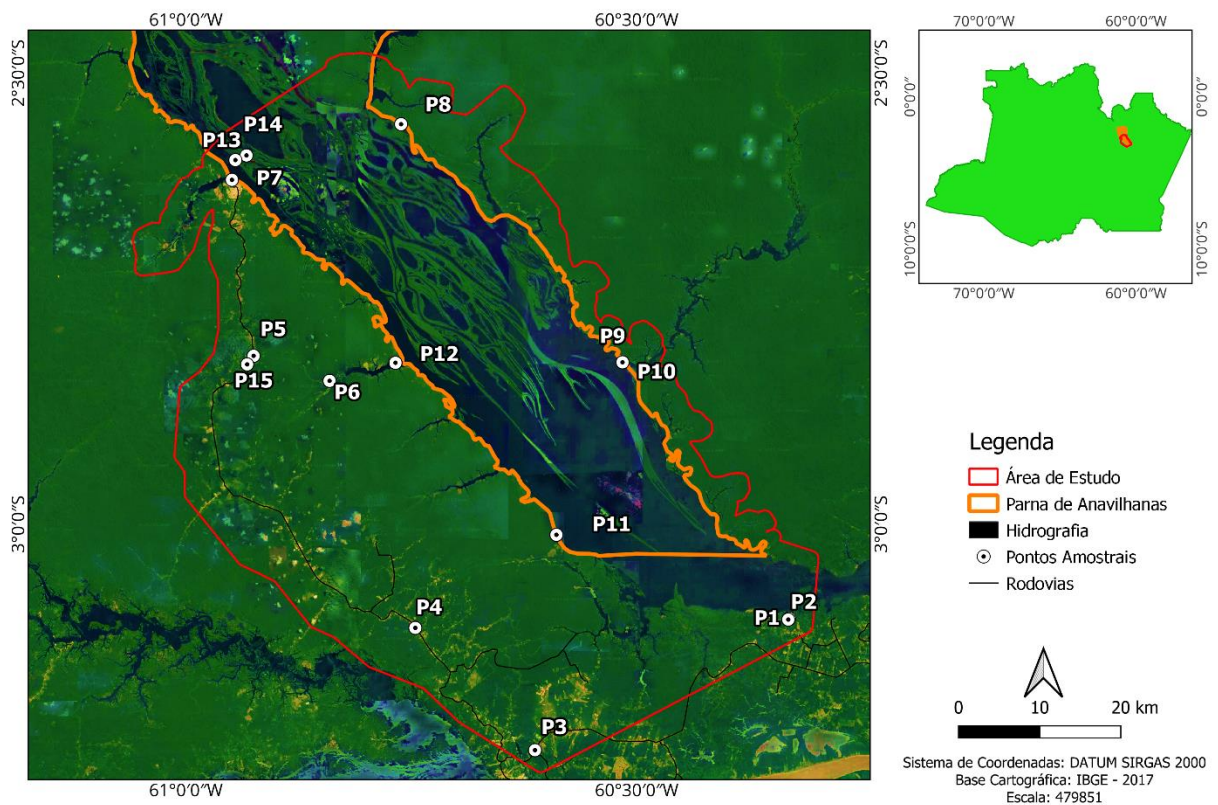


Figura 8: Mapa de pontos de coleta de amostras na área de pesquisa.

Nesta etapa foram visitados 15 pontos com coletas sistemáticas totalizando 43 amostras, utilizadas, como alíquotas, para análises física, mineralógica, química e espectrais. Buscou-se coletar amostras de diferentes tipos de solos (Figura 9).

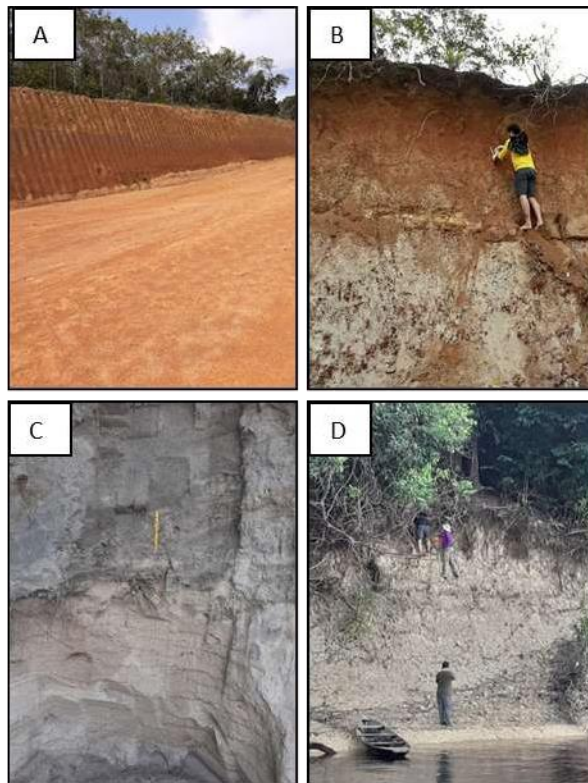


Figura 9: Pontos de coleta de amostras, A – Amostra representativa de Latossolos, B- Amostra representativa de Plintossolos, C- Amostra representativa de Espodosolos e D – Amostra representativa de Gleissolos da área de pesquisa.

Para amostragem foi utilizado, principalmente, sondagens a trado que seguiram as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 09603/86 (NB 1030).

A sondagem iniciou-se utilizando uma cavadeira para escavação do terreno e algumas vezes foi usado, também, uma ponteira, complementados pelos seguintes materiais: lona, cavadeira, trado, cruzetas, hastes, luvas, chaves de grifo, trena e ponteira (Figura 10).



Figura 10: Material para coleta de amostras, A – Amostra coletadas com trado e B - Amostras coletadas com boca de lobo e ponteira.

Os materiais retirados do amostrador de sondagem foram depositados sobre uma lona, para evitar o contato com o solo superficial do lugar. Foram agrupados e coletados de acordo com a profundidade (a cada 20 cm), ou pela classificação tátil visual, quando detectada alguma mudança entre as amostras, sempre identificando as profundidades de início e término de cada material, gerando assim, a descrição do perfil de sondagem executado em campo (Figura 11).



Figura 11: Amostragem na área de estudo, A - Coleta de amostras a cada 0,20 m e B - Coletade amostras em afloramentos em diferentes horizontes pedológicos.



Após a coleta de amostras, estas foram acondicionadas em sacos plásticos e identificadas, posteriormente em laboratório iniciou-se a etapa de preparação de amostras, que consistiu em secagem à uma temperatura ambiente e desagregação, passaram por processos de quarteamento e pulverização, foram divididas em cinco partes, onde uma alíquota foi preservada para arquivo e as outras para as análises mineralógica, granulométrica, química e espectral.

#### 4.3 Análises Físico-Química e Mineralógicas

##### - Análise Física

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de alta rotação, por 15 min, conforme método proposto em Embrapa (1997). A fração argila foi separada por sedimentação; a areia, determinada por tamisação e o silte, calculado por diferença. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Solos da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Amazonas-UFAM.

##### - Análise Química

As análises químicas dos teores de Si, Al, Fe e Ti foram determinados por meio da técnica de fluorescência de raios X (XRF). Nesta técnica, a amostra é irradiada com um feixe de energia de um dado comprimento de onda (RX) entre 0,1 e 100 Å. A radiação absorvida faz com que a amostra emita uma radiação secundária peculiar aos elementos presentes na amostra. Foram analisadas 43 amostras por fluorescência de raios X no Laboratório de Solos da Esalq-USP.

A espectroscopia de fluorescência de XRF é uma técnica utilizada para identificar e quantificar as concentrações dos elementos presentes em amostras sólidas, líquidos, pós etc. O espectrômetro de fluorescência mede a energia individual da radiação fluorescente produzida pela amostra quando irradiada SKOOG et al. (2002). Cada elemento da amostra emitirá radiação característica única diretamente proporcional à concentração do elemento na amostra. A composição química dos elementos presentes em maiores quantidades na amostra foi determinada por meio da técnica de fluorescência de

raios X (XRF).

#### - Análise Mineralógica

A difratometria de Raios-X (XRD) é uma técnica de análise não destrutiva, rápida e muito versátil. Fornece informações mais amplas e detalhadas quanto à qualificação, caracterização dos minerais presentes na amostra. SCHNITZER et al.; (1990). A identificação dos minerais foi feita em Difratorômetro de raios-x modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da PANalytical, com Goniômetro PW 3050/60 (Theta/Theta) e com tubo de raios-x cerâmico de anodo de Cu ( $K\alpha 1,5406 \text{ \AA}$ ), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200W, 60kv. O detector utilizado é do tipo RTMS, Pixel/1D em amostras totais. As amostras totais foram secas a temperatura ambiente, em seguida pulverizadas em moinho de bolas do laboratório de Laminação da Ufam. A identificação dos minerais foi feita pela comparação do difratograma obtido com padrões (fichas do banco de dados do ICDD-PDF (International Center for Diffraction Data – Powder Diffraction File). As análises foram realizadas pelo laboratório de Análises Minerais – LAMIN do Serviço Geológico do Brasil - CPRM - Manaus.

#### 4.4 Análise das Covariáveis do Relevo

O aperfeiçoamento de técnicas de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica contribuíram para a obtenção de informações do relevo. Por exemplo, os métodos automáticos de extração de variáveis morfométricas facilitaram a compreensão da influência dos atributos do relevo na formação e evolução dos solos (VIDAL-TORRADO et al.; 2005; VALERIANO, 2008; AGUILAR-MUÑOZ, 2009).

Os procedimentos técnicos adotados para a descrição do relevo consistem na extração de Informações Geomorfológicas da área de estudo por meio do Sistema de Informação Geográfica-SIG da plataforma Google Earth Engine, onde obteve-se o Modelo Digital de Elevação – MDE de resolução espacial de 30 m da área de estudo e posteriormente do MDE foi extraído os atributos morfométricos do terreno usando a interface de programação Java Script disponível como editor de código online do Google Earth Engine - GEE. O Terrain Analysis in GEE - TAGEE. Que são Aspecto, Elevação, Curvaturas, Relevo Sombreamento, Declividade etc.

Foram gerados valores numéricos dos atributos do terreno e imagens Raster, os valores numéricos foram inseridos em tabela do Excel para utilização na análise de correlação com outras variáveis ambientais e mapa preditos da área de estudo.

#### 4.5 Análises Espectrais em laboratório

Nesta etapa foi realizado os procedimentos laboratoriais, onde as amostras foram secas em estufa a 60°C por 24h e, em seguida peneiradas em malha de peneira de 2mm. Foram enviadas 43 amostras ao laboratório do Departamento de Ciências do Solo na ESALQ/USP num quantitativo de alíquotas de 50g para cada amostra. De acordo com os procedimentos e diretrizes repassadas pelo laboratório, as amostras foram pesadas e acondicionadas em placas de petri de 13,5 cm de diâmetro (Figura 12), utilizou-se uma placa-padrão branca, com 100 % de reflectância e foi realizada a leitura espectral das amostras. A relação entre a energia refletida pelo alvo e a energia refletida pela placa de referência gerou o fator de reflectância bidirecional. As amostras foram lidas por meio do espectrorradiômetros FieldSpec de faixa espectral entre 250 nm e 2500 nm com a resolução de 1 nm. A geometria do sistema baseia-se no posicionamento da lâmpada halógena perpendicular à amostra e com distância de 27 cm e o sensor a 61 cm fazendo o ângulo de 15° em relação a amostra.

O procedimento é exemplificado na Figura 13, adaptada de Demattê et al. (1999). Com as curvas espectrais obtidas foi possível relacionar a associação dos níveis de reflectância com os aspectos texturais, químicos e mineralógicos dos solos da região do PNA, definindo um padrão espectral para o material estudado.



Figura 12: Prancha de amostras da área de estudo para análise no espectrorradiômetro.



Figura 13: Esquema representativo da geometria de aquisição de dados, equipamento FieldSpec. Fonte: Poppiel, 2019.

Para obter conhecimentos dos métodos, técnicas e equipamentos necessários para realização de um bom trabalho e com qualidade nas análises espectrais foi imprescindível a participação da mestrandia nos treinamentos PROBASE 1, 2 e 3 – Programa Brasileiro de Análise de Solo via Espectroscopia realizado pela Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz – FEALQ/USP, coordenado pelo Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MELO DEMATTÊ e auxiliares no ano de 2019. O treinamento foi realizado no laboratório de

Ciência do Solo da ESALQ/USP localizado na cidade de Piracicaba (SP) e contou, para cobrir os gastos de passagem aéreas e hospedagem, com auxílio financeiro da PROEG/UFAM e PPGGEO/UFAM – PROJETO TAR.

#### 4.6 Análises descritiva e Geoestatística

Os atributos físico-químico e covariáveis do relevo foram analisados pelo coeficiente de Pearson, para determinar o grau de correlação linear entre os dados, no qual os que apresentaram valor do coeficiente de correlação igual ou superior 0,40 foram selecionados para análise estatística descritiva calculando-se a média, mediana, desvio padrão, variância, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose.

O conjunto amostral foi submetido a hipótese de normalidade dos dados, que foi realizada pelo teste de Anderson-Darling, os dados que não seguiram uma distribuição normal foram transformados por Johnson no software Minitab Statistical. Com os dados normalizados, foi feita uma análise preliminar de autocorrelação espacial, onde foi utilizado o Índice Global de Moran, esse índice forneceu um valor único como mensuração da associação espacial para todo o conjunto de dados.

As técnicas de análise exploratória de dados visam identificar a estrutura de correlação espacial, ou seja, a medida estatística, associada à covariância espacial, que melhor descreva os dados, a fim de estimar a magnitude da autocorrelação espacial entre as áreas. Para tanto, uma das ferramentas disponíveis são o Índice de Moran e o Variograma (CÂMARA et al., 2002).

O índice de Moran fornece uma medida geral da associação espacial existente no conjunto de dados, cujo valor varia de -1 a 1, os valores próximos de zero estão relacionados à inexistência de autocorrelação espacial, valores positivos indicam correlação positiva e valores negativos autocorrelação negativa (ALMEIDA, 2012).

Para validação do Mapas temáticos foi elaborada a modelagem por meio dos semivariogramas considerando os valores de  $R^2$  (coeficiente de determinação do modelo) e RMSE (raiz quadrada do erro quadrático médio) para avaliar o desempenho dos métodos e escolha do modelo. A análise de dependência espacial foi realizada por meio do ajuste dos dados ao modelo de semivariograma experimental, de acordo com a teoria das variáveis regionalizadas, determinando-se os coeficientes de efeito pepita ( $C_0$ ),

variância (C), patamar( $C_0 + C$ ) e alcance (A), utilizando o plugin Smart-Map no software QGIS.

A distância a partir da qual o valor da semivariância se torna aproximadamente constante é chamada de alcance da dependência espacial (A). Os semivariogramas ajustados foram utilizados para estimar os valores em locais não amostrados (GOOVAERSTS, 1997), utilizando-se o interpolador de Krigagem ordinária.

A krigagem usa a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima (VIEIRA, 2000). A krigagem ordinária é uma das técnicas mais utilizadas dentre os métodos geoestatísticos, principalmente quando se trata de estudos envolvendo as variáveis ambientais (SCHLOEDER, et al. 2001; LANDIM, 2006; LIMA, et al. 2014). A krigagem ordinária utiliza a média móvel de um estimador linear, com mínima variância para interpolação do atributo medido em posições não amostradas (FELGUEIRAS, et al. 2002; SILVA, et al. 2011).

#### 4.7 Mapa de atributos dos solos e relevo e Mapa de Zonas Pedológicas

Para elaboração do Mapas preditos dos atributos físico-químico e relevo, utilizou-se os dados das amostras que foram coletadas no intervalo de 0,0 – 0,20 m. Foram adicionados 50 pontos aleatórios com intuito de melhorar a interpolação, esses pontos foram agrupados pelo vizinho mais próximo e feita a interpolação por krigagem ordinária no software QGIS 3.16. Enquanto para confecção do Mapa de Zonas Pedológicas utilizou-se como base os mapas preditos de atributos físico-químico e covariáveis do relevo e correlacionou com dados mineralógicos e espectrais para finalização as zonas no Software QGIS 3.16. As zonas também foram definidas por análise de agrupamento K-means e o método Elbow no QGIS 3.16, também se observou visualmente os dados espectrais e mineralógicos para auxiliar na delimitação das unidades.

## 5. RESULTADOS

Os resultados consistiram no conjunto de dados das análises físico-química, mineralógica, espectral e, análises de dados da estatística descritiva e geoestatística, que culminaram para a elaboração de mapas preditos dos atributos dos solos e relevo e

geração final do mapa de zonas pedologicamente semelhantes.

Apresentamos o conjunto amostral com suas respectivas coordenadas geográficas e unidades litológicas, conforme base de dados do IBGE, 2017 (Tabela 2).

Enquanto em termos geomorfológicos identificamos que na área de estudo existem duas geoformas distintas: o Planalto Uatumã-Jari e a Planície Amazônica, os pontos amostrais representativos da unidade geomorfológica Planalto Uatumã-Jari (terra firme) são P3, P4, P8, P10 e P15. Na Planície Amazônica (planícies de inundação e margens do rio negro) os pontos amostrais são denominados de P1, P2, P5, P6, P7, P9, P11, P12, P13 e P14 (IBGE, 2017).

Na caracterização pedológica, os resultados mostraram-se similares aos dados do projeto Radambrasil, na década de 70, porém discordaram quando classificado como latossolo em áreas de margens de rios e igarapés, e no caso desta pesquisa, em escala de maior detalhe, foi definido como sedimentos recentes pertencentes aos Depósitos Sedimentares Quaternários concordando com trabalhos anteriores (SILVA, 2005).

| <b>Unidades Litológicas</b>                   | <b>Pontos</b> | <b>Coordenadas Geográficas</b> |                | <b>Amostras</b> |
|---|---------------|--------------------------------|----------------|-----------------|
| <b>Formações Alter do Chão e Novo Remanso</b> | P1            | 03°06'20,6" S                  | 60°19'54,1" W  | 02              |
|   | P2            | 03°06'15,9" S                  | 60°19'50,8" W  | 03              |
|   | P3            | 03°15'01,8" S                  | 60°36'45,5" W  | 03              |
|   | P4            | 03°06'54,0" S                  | 60°44'43,8" W  | 02              |
|   | P5            | 02°48'48,1" S                  | 60°55'29,5" W  | 04              |
|   | P8            | 02°33'23,6" S                  | 60°45'40,5" W  | 03              |
|   | P9            | 02°49'13,9" S                  | 60°30'56,0" W  | 02              |
|   | P15           | 02°49'22,2" S                  | 60°55'55,3" W  | 03              |
| <b>Depósitos Aluvionares</b>                  | P5            | 02°48'48,1" S                  | 60°55'29,5" W  | 04              |
|   | P6            | 02°50'27,9" S                  | 60°50'26,1" W  | 05              |
|   | P7            | 02°37'05,8" S                  | 60°56'56,04" W | 03              |
|   | P10           | 02°49'14,2" S                  | 60°30'55,6" W  | 03              |
|   | P11           | 03°00'42,3" S                  | 60°35'20,0" W  | 04              |
|   | P12           | 02°49'15,9" S                  | 60°46'03,0" W  | 02              |
|   | P13           | 02°35'46,7" S                  | 60°56'42,1" W  | 03              |

|     |               |               |    |
|-----|---------------|---------------|----|
| P14 | 02°35'28,6" S | 60°55'57,9" W | 02 |
|-----|---------------|---------------|----|

Tabela 2: Conjunto amostral com devido georreferenciamento na área de estudo.

A descrição textural e as características individualizadas macroscopicamente das amostras quanto a cor, presença de matéria orgânica e mineralogia vistas a olho nu, visualiza-se na tabela 3. Macroscopicamente as amostras coletadas ao longo da área de estudo apresentaram características litológicas distintas. Na maioria dos pontos apresentaram material friável e somente na amostra (P2-3) alta plasticidade, material variando de arenoso a argiloso, por vezes cores variando entre esbranquiçado, creme a vermelho.

| Pontos     | Intervalo (m) | Amostras | Descrição  |
|------------|---------------|----------|--|
| <b>P 1</b> | 0,0 – 0,20    | P1-1     | Material argiloso, friável, de coloração marrom, com restos de matéria orgânica.   |
|            | 0,40 – 0,60   | P1-2     | Material argiloso, friável, de coloração marrom, boa plasticidade.   |
| <b>P 2</b> | 0,0 – 0,20    | P2-1     | Material areno-argiloso, friável, de granulometria areia fina a média, coloração cinza escuro, com restos de raízes.   |
|            | 2,0 – 2,2     | P2-2     | Material areno-argiloso, friável, de granulometria areia fina a média, com presença de seixos, coloração esbranquiçada, com tons avermelhados, típicos do horizonte mosqueado. |
|            | 2,6 – 2,77    | P2-3     | Material argiloso, ótima plasticidade, com presença de seixos de argila, coloração branca acinzentada.   |
| <b>P 3</b> | 0,0 -0,20     | P3-1     | Material areno-argiloso, friável, de granulometria areia fina a média, coloração marrom, apresenta raízes.   |
|            | 2,0 – 2,5     | P3-2     | Material areno-argiloso, friável, de granulometria areia fina a média, laranja - avermelhado, fragmentos de crosta ferruginosa de aproximadamente 0,60cm.                      |
|            | 3,0 - 3,5     | P3-3     | Material areno-argiloso, friável, de granulometria areia fina a média, laranja - avermelhado, fragmentos de crosta ferruginosa   |
| <b>P 4</b> | 0,0 - 2,0     | P4-1     | Material arenoso, coloração branca acinzentada com laminações de minerais escuros.   |
|            | 2,0 - 3,0     | P4-2     | Material arenoso, areia fina a média coloração branca acinzentada.   |
| <b>P 5</b> | 0,0 – 0,20    | P5-1     | Material arenoso, areia fina a média, coloração cinza, presença de matéria orgânica, friável.  |
|            | 0,20 – 0,40   | P5-2     | Material arenoso, areia fina a média, coloração branca acinzentada, friável.   |
|            | 0,40 – 0,60   | P5-3     | Material arenoso, areia fina a média, coloração branca acinzentada, friável.   |
|            | 1,5 – 1,80    | P5-4     | Material arenoso, arenito com seixo de quartzo, coloração marrom.  |



|            |             |       |   |
|------------|-------------|-------|---|
| <b>P6</b>  | 0,0 – 0,20  | P6-1  | Material arenoso, areia fina a média, coloração cinza amarronzado.  |
|            | 0,20 – 0,40 | P6-2  | Material arenoso, areia fina a média, coloração cinza amarronzado.  |
|            | 0,40 – 0,60 | P6-3  | Material areno-argiloso, areia fina a média, grãos médios de quartzo, coloração cinza amarronzado.                            |
|            | 0,60 – 0,80 | P6-4  | Material areno-argiloso, areia fina a média, grãos médios de quartzo, coloração cinza amarronzado.                            |
|            | 0,80 – 1,0  | P6-5  | Material arenoso, areia fina, pouca argila, cor cinza amarronzado.  |
| <b>P7</b>  | 0,0 – 0,20  | P7-1  | Material arenoso, areia fina a média, cor branca amarelada.   |
|            | 0,40 – 0,60 | P7-2  | Material arenoso, areia fina a média, cor branca amarelada.   |
|            | 0,80 – 1,0  | P7-3  | Material arenoso, areia fina a média, cor branca amarelada.   |
| <b>P8</b>  | 0,0 – 0,20  | P8-1  | Material argilo-arenoso, coloração laranja, com matéria orgânica, friável.  |
|            | 0,40 – 0,60 | P8-2  | Material argilo-arenoso, coloração laranja, friável.  |
|            | 0,80 – 1,0  | P8-3  | Material argilo-arenoso, coloração laranja, friável.  |
| <b>P9</b>  | 0,0 – 0,20  | P9-1  | Material argilo-arenoso, coloração laranja, friável.  |
|            | 1,0 – 1,20  | P9-2  | Material argilo-arenoso, coloração laranja, friável, representativo do horizonte mosqueado, fragmentos de crosta ferruginosa. |
| <b>P10</b> | 0,0 – 0,20  | P10-1 | Material arenoso, areia fina a média, cor branca amarelada.   |
|            | 0,40 – 0,60 | P10-2 | Material arenoso, areia fina a média, cor branca amarelada.   |
|            | 0,80 – 1,0  | P10-3 | Material arenoso, areia fina a média, cor branca amarelada.   |
| <b>P11</b> | 0,0 – 1,0   | P11-1 | Material areno-argiloso, friável, de granulometria areia fina a média, coloração cinza escuro, com restos de raízes.          |
|            | 1,0 – 1,5   | P11-2 | Material argiloso, com concreções ferruginosas, coloração avermelhada.  |
|            | 1,5 – 4,0   | P11-3 | Material argiloso, com concreções ferruginosas, coloração branca avermelhada.   |
|            | 4,0 – 6,0   | P11-4 | Material argiloso, com concreções ferruginosas, coloração esbranquiçada, com bioturbações.                                    |
| <b>P12</b> | 0,0 – 0,50  | P12-1 | Material areno-argiloso, friável, de granulometria areia fina a média, coloração cinza, com restos de raízes.                 |
|            | 2,0 – 4,0   | P12-2 | Material argiloso, com concreções ferruginosas, coloração avermelhada.  |
| <b>P13</b> | 0,0 – 0,20  | P13-1 | Material arenoso, areia fina a média, cor branca amarelada.   |
|            | 0,40 – 0,60 | P13-2 | Material arenoso, areia fina a média, cor branca amarelada.   |
| <b>P14</b> | 0,0 – 0,20  | P14-1 | Material argiloso, coloração cinza esbranquiçada, com bioturbações, boa plasticidade.   |
|            | 6,8 – 7,0   | P14-2 | Material argiloso, coloração cinza esbranquiçada, com bioturbações, boa   |

|            |             |       |   |
|------------|-------------|-------|---|
|            |             |       | plasticidade.   |
| <b>P15</b> | 0,0 – 0,20  | P15-1 | Material arenoso, areia fina a média, cor branca amarelada. |
|            | 0,40 – 0,60 | P15-2 | Material arenoso, areia fina a média, cor branca amarelada. |
|            | 0,80 – 1,0  | P15-1 | Material arenoso, areia fina a média, cor branca amarelada. |

Tabela 3: Descrição macroscópica textural e de cor dos materiais coletados nos pontos da área de estudo.

Os resultados das análises físico-química e mineralógica, estão reunidos na tabela 4 e discutidos posteriormente.

| Pontos | Profundidade (m) | Granulometria <sup>1</sup> (%) |       |        | Classe textural <sup>1</sup> SiBCS | Composição Química <sup>2</sup> (%) |      |     |      | Fases Mineralis <sup>3</sup> ICDD-PDF |
|--------|------------------|--------------------------------|-------|--------|------------------------------------|-------------------------------------|------|-----|------|---------------------------------------|
|        |                  | Areia                          | Silte | Argila |                                    | Al                                  | Si   | Ti  | Fe   |                                       |
| P1-1   | 0,0 - 0,2        | 36,9                           | 15,2  | 47,8   | Argilosa                           | 11,5                                | 10,6 | 0,8 | 6,2  | qz, k, gb                             |
| P1-2   | 0,4 - 0,6        | 35,3                           | 16,3  | 48,4   |                                    | 11,5                                | 10,3 | 0,9 | 6,8  |                                       |
| P2-1   | 0,0 - 0,2        | 67,2                           | 6,2   | 26,5   | Média                              | 10,5                                | 16,6 | 0,5 | 1,4  | qz, k, ru                             |
| P2-2   | 2,0 - 2,2        | 66,0                           | 4,8   | 29,2   |                                    | 14,3                                | 14,3 | 0,4 | 2,6  |                                       |
| P2-3   | 2,6 - 2,7        | 59,7                           | 6,6   | 33,5   |                                    | 12,3                                | 19,8 | 0,3 | 1,2  |                                       |
| P3-1   | 0,0 - 0,2        | 37,0                           | 14,5  | 48,3   | Argilosa                           | 11,1                                | 9,9  | 1,5 | 11,0 | qz, k, he                             |
| P3-2   | 2,0 - 2,5        | 31,0                           | 12,0  | 57,0   |                                    | 13,1                                | 9,1  | 1,6 | 7,8  |                                       |
| P3-3   | 3,0 - 3,5        | 20,4                           | 22,3  | 57,2   |                                    | 7,9                                 | 5,9  | 0,5 | 38,0 |                                       |
| P4-1   | 0,0 - 0,2        | 96,6                           | 1,3   | 2,0    | Arenosa                            | 0,0                                 | 29,6 | 0,0 | 0,1  | qz                                    |
| P4-2   | 2,0 - 3,0        | 98,0                           | 0,5   | 1,5    |                                    | 0,0                                 | 30,4 | 0,1 | 0,1  |                                       |
| P5-1   | 0,0 - 0,2        | 94,8                           | 1,9   | 3,1    | Arenosa                            | 0,0                                 | 29,5 | 0,3 | 0,1  | qz, k                                 |
| P5-2   | 0,2 - 0,4        | 96,8                           | 2,2   | 1,0    |                                    | 0,0                                 | 29,1 | 0,1 | 0,2  |                                       |
| P5-3   | 0,4 - 0,6        | 96,0                           | 1,9   | 1,9    | Arenosa                            | 0,0                                 | 28,8 | 0,3 | 0,1  | qz, k, gb                             |
| P5-4   | 1,5 - 1,8        | 85,3                           | 4,0   | 10,6   |                                    | 0,0                                 | 29,9 | 0,1 | 0,4  |                                       |
| P6-1   | 0,0 - 0,2        | 92,0                           | 1,4   | 5,4    |                                    | 2,2                                 | 25,5 | 0,3 | 0,2  |                                       |
| P6-2   | 0,2 - 0,4        | 89,5                           | 2,5   | 8,0    | Arenosa                            | 4,0                                 | 23,0 | 0,4 | 0,1  | qz, k, gb                             |
| P6-3   | 0,4 - 0,6        | 73,3                           | 5,8   | 20,7   |                                    | 6,0                                 | 21,8 | 0,6 | 0,4  |                                       |
| P6-4   | 0,6 - 0,8        | 77,2                           | 5,3   | 17,3   |                                    | 8,6                                 | 19,3 | 0,7 | 0,3  |                                       |
| P6-5   | 0,8 - 1,0        | 90,5                           | 1,9   | 7,5    |                                    | 2,0                                 | 27,0 | 0,3 | 0,2  |                                       |

|       |           |      |      |      |          |      |      |     |     |                              |
|-------|-----------|------|------|------|----------|------|------|-----|-----|------------------------------|
| P7-1  | 0,0 - 0,2 | 86,3 | 3,4  | 10,1 |          | 2,8  | 25,2 | 0,2 | 1,7 |                              |
| P7-2  | 0,4 - 0,6 | 73,1 | 4,8  | 21,9 | Arenosa  | 4,6  | 19,4 | 1,1 | 4,9 | qz, k, gb                    |
| P7-3  | 0,8 - 1,0 | 86,0 | 2,0  | 12,0 |          | 8,6  | 13,9 | 0,6 | 6,1 |                              |
| P8-1  | 0,0 - 0,2 | 52,7 | 7,7  | 39,4 |          | 13,5 | 12,3 | 0,8 | 2,6 |                              |
| P8-2  | 0,4 - 0,6 | 45,1 | 8,7  | 46,0 | Argilosa | 15,5 | 13,0 | 0,9 | 3,2 | qz, k, gb                    |
| P8-3  | 0,8 - 1,0 | 38,1 | 7,1  | 54,8 |          | 15,4 | 13,0 | 0,9 | 3,2 |                              |
| P9-1  | 0,0 - 0,2 | 77,4 | 3,8  | 18,8 | Média    | 11,5 | 13,4 | 0,1 | 5,5 | qz, k, go                    |
| P9-2  | 1,0 - 1,2 | 74,8 | 3,4  | 21,7 |          | 14,5 | 17,7 | 0,1 | 1,4 |                              |
| P10-1 | 0,0 - 0,2 | 85,3 | 3,9  | 10,7 |          | 1,3  | 21,5 | 0,4 | 6,5 |                              |
| P10-2 | 0,4 - 0,6 | 94,0 | 1,0  | 5,0  | Arenosa  | 1,9  | 26,2 | 0,1 | 1,3 | qz, k, mg                    |
| P10-3 | 0,8 - 1,0 | 89,3 | 1,7  | 8,8  |          | 6,7  | 24,1 | 0,3 | 0,5 |                              |
| P11-1 | 0,0 - 1,0 | 38,1 | 14,8 | 47,0 |          | 10,8 | 11,6 | 0,5 | 8,4 |                              |
| P11-2 | 1,0 - 1,5 | 16,5 | 31,7 | 51,8 | Argilosa | 10,9 | 12,4 | 0,4 | 7,6 | qz, k, he                    |
| P11-3 | 1,5 - 4,0 | 28,5 | 12,9 | 58,4 |          | 16,6 | 12,3 | 0,7 | 4,5 |                              |
| P11-4 | 4,0 - 6,0 | 30,3 | 11,5 | 58,1 |          | 16,8 | 12,5 | 1,1 | 1,4 |                              |
| P12-1 | 0,0 - 0,5 | 74,0 | 4,0  | 21,9 | Média    | 8,9  | 21,2 | 0,4 | 0,8 | qz, k, gb,<br>he             |
| P12-2 | 2,0 - 4,0 | 73,0 | 1,0  | 6,0  |          | 7,5  | 19,8 | 0,1 | 3,3 |                              |
| P13-1 | 0,0 - 0,2 | 94,4 | 2,0  | 3,5  | Arenosa  | 0,5  | 27,7 | 0,1 | 0,3 | qz, k, ru,<br>fcp            |
| P13-2 | 0,4 - 0,6 | 98,0 | 0,5  | 1,5  |          | 0,0  | 28,4 | 0,2 | 0,4 |                              |
| P14-1 | 0,0 - 0,2 | 45,8 | 10,8 | 43,2 | Média    | 10,9 | 16,8 | 0,5 | 2,2 | qz, k, il,<br>gb, ru,<br>fcp |
| P15-1 | 0,0 - 0,2 | 87,9 | 3,1  | 9,7  |          | 0,0  | 27,0 | 0,0 | 0,1 |                              |
| P15-2 | 0,4 - 0,6 | 98,0 | 0,5  | 1,5  | Arenosa  | 0,0  | 28,9 | 0,0 | 0,1 | qz, k                        |
| P15-3 | 0,8 - 1,0 | 93,9 | 2,1  | 3,9  |          | 0,0  | 29,9 | 0,0 | 0,1 |                              |

Tabela 4: Análise físico-química e mineralógica das amostras da área de estudo.

<sup>1</sup> - Análises realizadas em laboratório tradicional; <sup>2</sup> - análises realizadas por fluorescência de raios-X; <sup>3</sup>- análises realizadas por difração de raios -X. qz - quartzo, k - caulinita, gb – gibbissita, ru – rutilo, he – hematita, go – goethita, il – ilita, mg – magnetita, fcp – feldspato potássico.

Nos resultados de granulometria observou-se que na textura arenosa, predomina quartzo, e baixos teores de silte e argila. Localizam-se, predominantemente, em relevo planona porção oeste e, às margens dos rios e igarapés, correspondendo a espodossolos e aos depósitos aluvionares depositados no período Holoceno, respectivamente. Podendo correlacionar com trabalho de Quesada, et al. (2011) que identificou Espodossolo (Podzol), em áreas da bacia do rio Negro situado principalmente na região do alto Rio Negro, que apresenta grande quantidade de quartzo e são desprovidos de argila.

A predominância de textura argilosa foi identificada na porção mais ao sul da área de estudo, correlacionou-se aos latossolos que encontram-se em áreas de relevo plano a suave ondulado, onde há maior infiltração de água e condições que facilitam a

dissolução de óxidos de ferro em áreas de baixa elevação. Concordando com estudo realizado por Riker et al., 2008 que observa as amostras argilosas, na área de pesquisa.

Nesta pesquisa observou-se que em zonas de planície de inundação fluvial (várzea), terraços fluviais, ilhas do arquipélago, predominam as frações mais finas, silte e argila, correspondendo aos solos hidromórficos Gleissolos, as condições de paisagem propiciam o acúmulo de sedimentos e drenagem lenta, contribuindo para a formação destes solos concordando com estudos realizados por Quesada, 2011 que identificou os solos ao longo da planície dos Rios Negro e Branco classificados como Gleissolos, apresentam coloração cinza e permanecem saturados por longos períodos. Também ocorre nessas zonas os plintossolos, que segundo a literatura, camadas de petroplintita nas áreas de encosta, ocorrem possivelmente em razão da drenagem mais acentuada, o que resulta em menor infiltração e um menor teor de umidade nos perfis das encostas. As análises dos elementos químicos Si, Fe, Al e Ti, foram selecionados para este estudo pois são os elementos com maiores teores nas amostras, com exceção do titânio, sendo este selecionado pois é indicador de processos de intemperização na região amazônica. Teores mais elevados de sílica foram detectados nos pontos P4, P5, P6, P7, P10, P13 e P15 correspondendo aos espodosolos e as zonas de depósitos aluvionares holocênicos, enquanto o elemento ferro foi mais expressivo nos pontos P3, P7, P9, P10 e P11. O alumínio variou de 0,0 a 15,5 % nas amostras, enquanto o titânio mostrou-se com teores mais elevados em torno de 1,0 % nos pontos P1, P3 e P7.

Mineralogicamente, os solos de terra firme são compostos por caulinita, quartzo, gibbsita, hematita, associados a zonas bem drenadas desenvolvidos em sedimentos mais antigos. Na várzea, onde ocorrem as deposições mais recentes, com períodos de inundações sazonais, identificou-se uma diversidade mineralógica composta por quartzo, caulinita, illita, gibbsita, rutilo e feldspato potássico. A fase mineral referente a hematita foi identificada, em teores mais elevados, nos pontos P3, P10, P11 e P12, e correspondem a latossolos e plintossolos. Nestes pontos foi possível identificar fragmentos de crostas ferruginosas. No ponto P10, também foram identificados teores baixos de magnetita. Essas fases minerais também foram identificadas na região por Rodrigues et al, 2015.

Provavelmente, a ocorrência de hematita está associada a possível gênese dos latossolos amazônicos, os quais teriam sido formados, segundo diversos autores (Irion, 1978 e 1984; Lucas et al.; 1989; Costa, 1991; Horbe e Costa, 1997), por meio da

destruição de crostas ferruginosas lateríticas formadas em períodos mais secos.

Descrição das curvas espectrais dos solos em estudo.

As curvas espectrais elaboradas para 15 pontos foram individualizadas em 3 classes texturais: arenosa, argilosa e média.

#### *Textura Arenosa*

A textura arenosa é constituída com mais 90% de quartzo com intensidade que não ultrapassam 0,6% de reflectância, em curvas formadas com inclinação ascendentes e planas. Essa característica é típica de textura arenosa e, também, pode estar associado a ausência de matéria orgânica, como constatado em campo. Com exceção da amostra P15-1 que apresentou menor intensidade e, provavelmente, está relacionado à presença de matéria orgânica. Correlacionou-se, também, as curvas espectrais com os espodosolos caracterizados granulometricamente por textura arenosa (Figura 14).

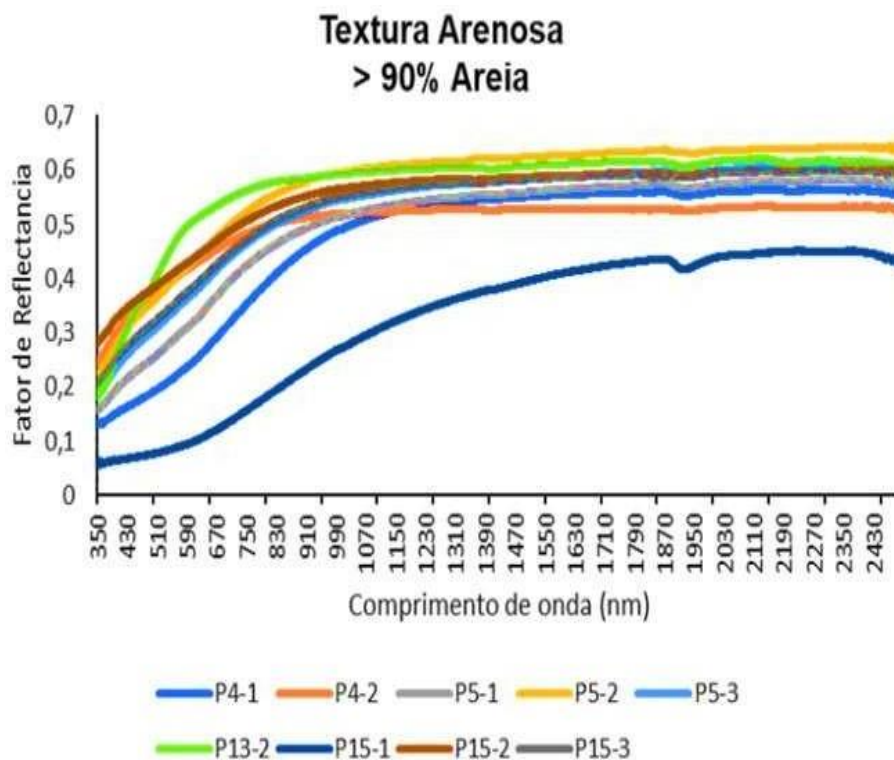


Figura 14: Curvas Espectrais, amostras textura arenosa – Areia >90%.

Amostras com textura arenosa, porém com teor areia menor do que 90% em curvas mostrando formas ascendentes, planas e descendentes. Essa variação das formas, decerto está relacionado ao menor teor de quartzo. Também, foi possível observar outros minerais constituintes que apresentam curvas características dos óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e goethita), nas feições concavas e convexas na região espectral de 420 a 950 nm. Já em 2200nm identificou-se caulinita caracterizada por degrau ou ombro do lado esquerdo da zona de absorção deste argilomineral (Figura 15).

Observou-se por difratometria de raios X presença da gibbsita e magnetita no ponto P10, o mesmo não acontecendo quando analisado a curva espectral, certamente, por essa amostra está correlacionada a solos arenosos no período Quaternário, ou seja, são solos recentes.

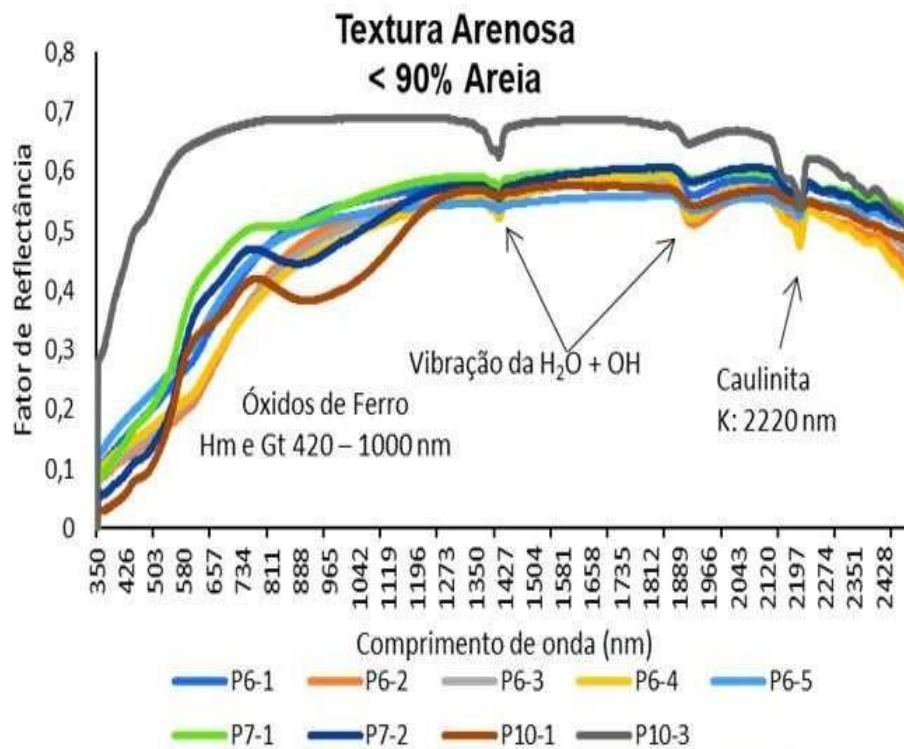


Figura 15: Curvas Espectrais, amostras textura arenosa – Areia < 90%.

### Textura Média

Amostras com textura média estão exemplificadas na figura 16, vê-se uma intensidade de reflectância na faixa de 0,7, diferente das amostras argilosas que apresentam menor intensidade, sendo as demais características similares a amostras argilosas com baixo teor de ferro. As curvas espectrais mostram-se na forma ascendente e descendente com absorções características, também, de hematita, goethita, caulinita.

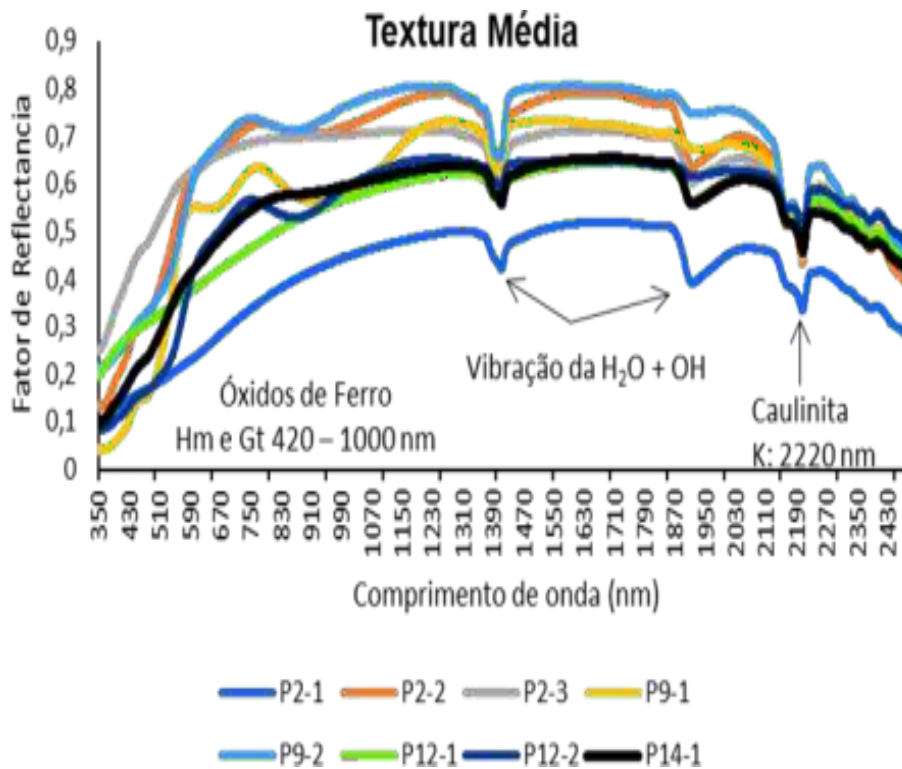


Figura 16: Curvas Espectrais, amostras textura média.

### Textura Argilosa

A figura 17 compreende amostras com textura argilosa com intensidade em torno de 0,6 e os albedos com inclinação ascendentes e descendentes, apresentam feições características discretas de hematita e goethita na região 420 a 950 nm,

caulinita em 2200nm, foram correlacionados a latossolos.

Amostras que também apresentaram textura argilosa, porém com teores mais elevados de Fe e, foi possível observar absorções mais pronunciadas de goethita na região 480 nm e hematita a 650 nm. Considerou-se que a forma côncava na região 750 a 1150 nm foram relacionados tanto a hematita como goethita. Foram correlacionados a solos Plintossolos e Latossolos com presença de concreções ferruginosas (Figura 18).

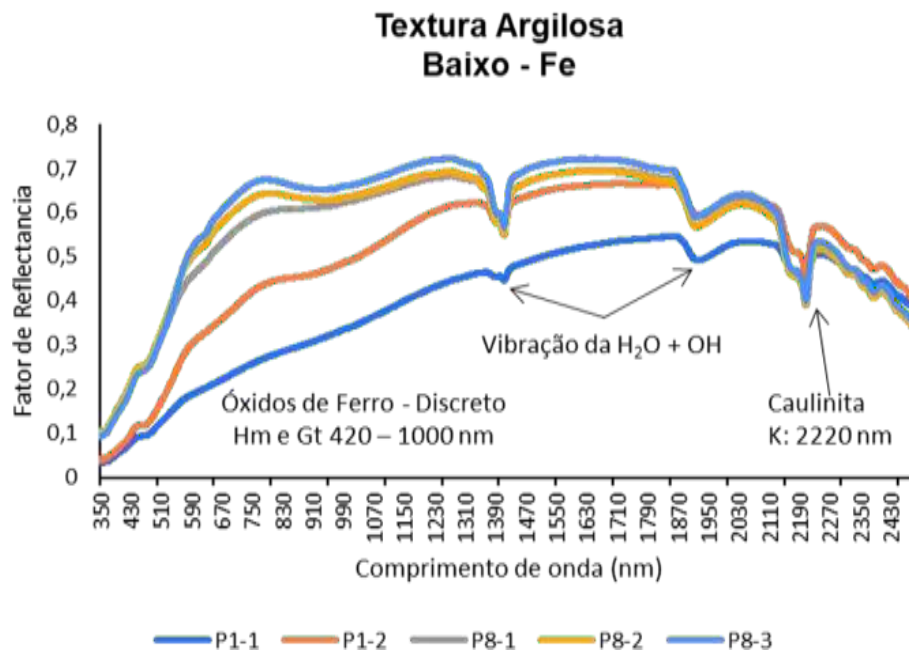


Figura 17: Curvas Espectrais, amostras textura argilosa, baixo teor de ferro.



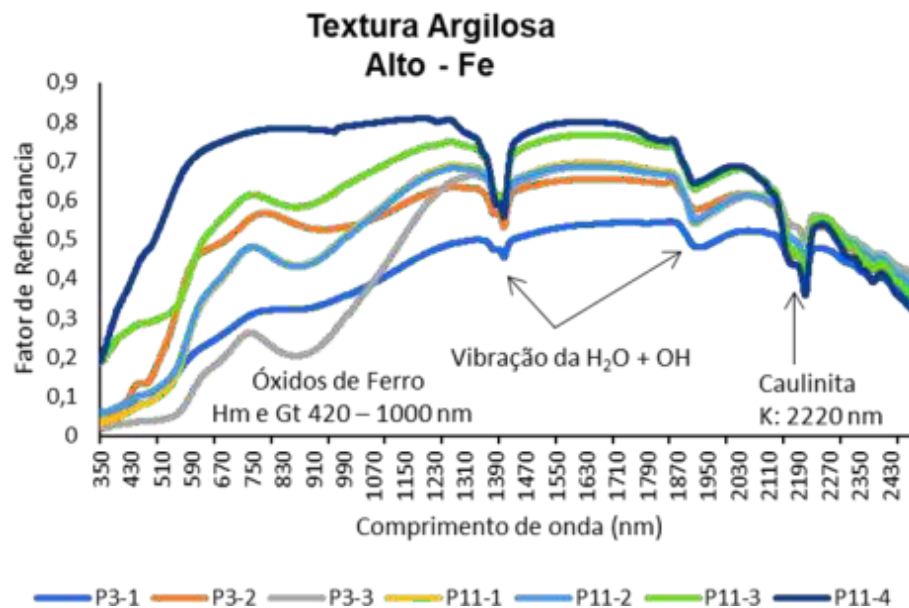


Figura 18: Curvas Espectrais, amostras textura argilosa, alto teor de ferro.

Segundo Stoner (1979) a diminuição no tamanho das partículas de areia, ou seja, o aumento da proporção de areia fina e areia muito fina na composição do solo, tende a aumentar a reflectância dos solos arenosos. Também solos arenosos cuja composição mineralógica seja rica em quartzo, são solos que apresentam baixos teores de matéria orgânica e de óxidos de ferro e água, o que favorece o aumento da reflectância (Dalmolin et al., 2005). Porém nesta pesquisa não notamos diferenças significativas em relação a reflectância nas diferentes texturas.

#### Análise descritiva de dados e Geoestatística

A análise estatística dos dados foi processada em três etapas. A primeira fase consistiu na análise da correlação entre os dados, na segunda fase foi realizada a análise estatística clássica. E na terceira fase, foram utilizados métodos geoestatísticos.

Para verificar se havia correlação entre os atributos físico-químicos com as covariáveis do relevo, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson, onde observou-se uma correlação moderada a baixa (Tabela 5).

| Correlação Pearson | Areia        | Silte        | Argila       | Si           | Al           | Fe           | Ti           |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Elevação           | -0,07        | 0,16         | 0,05         | 0,06         | -0,21        | 0,18         | 0,21         |
| Aspecto            | 0,27         | -0,33        | -0,25        | 0,07         | -0,01        | -0,04        | -0,12        |
| Hillshade          | <b>0,55</b>  | <b>-0,63</b> | <b>-0,53</b> | <b>0,49</b>  | <b>-0,39</b> | <b>-0,44</b> | <b>-0,19</b> |
| Norte              | 0,12         | -0,26        | -0,08        | -0,04        | 0,14         | -0,1         | -0,13        |
| Eastness           | -0,28        | 0,33         | 0,27         | -0,01        | 0,03         | -0,03        | 0,05         |
| Shapeindex         | <b>-0,50</b> | <b>0,57</b>  | <b>0,48</b>  | <b>-0,44</b> | <b>0,34</b>  | <b>0,37</b>  | <b>0,40</b>  |
| Slope              | <b>-0,54</b> | <b>0,59</b>  | <b>0,52</b>  | <b>0,50</b>  | <b>0,42</b>  | <b>0,47</b>  | <b>0,14</b>  |
| C Gaussiana        | -0,2         | 0,22         | 0,19         | -0,18        | 0,15         | 0,09         | 0,22         |
| C Horizontal       | 0,02         | 0,08         | -0,04        | 0,08         | -0,16        | 0,12         | -0,15        |
| C Vertical         | <b>-0,63</b> | <b>0,66</b>  | <b>0,61</b>  | <b>-0,48</b> | <b>0,41</b>  | <b>0,33</b>  | <b>0,68</b>  |
| C Máxima           | -0,33        | 0,39         | 0,31         | -0,25        | 0,19         | 0,21         | 0,21         |
| C Média            | -0,49        | 0,57         | 0,47         | -0,35        | 0,25         | 0,32         | 0,47         |
| C Mínima           | -0,52        | 0,59         | 0,49         | -0,35        | 0,25         | 0,35         | 0,57         |

Tabela 5: Matriz de correlação de Pearson entre atributos dos solos da área de estudo e covariáveis do relevo.

Os atributos selecionados para as próximas etapas apresentaram na sua grande maioria correlação entre si igual ou superior 0,40 e são eles Areia, Silte, Argila, Si, Al, Fe, Ti, relevo sombreado, Índice de forma, declividade e curvatura vertical.

Análise Estatística Clássica visou caracterizar a forma de distribuição dos dados de interesse, o modelo teórico mais comum de distribuição de probabilidade é a distribuição normal. Para isso os estimadores básicos calculados para uma distribuição normal foram média, mediana, desvio padrão, variância, assimetria, curtose e teste de normalidade (Tabela 6). Observou-se que os valores da média e mediana tem valores próximos, caracterizando distribuição normal dos dados. Vale ressaltar que esses valores já estão transformados para seguir a distribuição normal. Valores com curtose negativa apresentam frequência platicúrtica, exceção do Ti que tem curtose positiva e frequência leptocúrtica. Dados de assimetria indicaram que mediana maior que a média, mostrando assim tendência para concentração de valores maiores que a média, indicando maior variabilidade. confirmado pelo teste de Anderson- Darling, a 5% de probabilidade (\*) (Valor-p).

| <b>Estatística Descritiva</b> | <b>Média</b> | <b>Mediana</b> | <b>Desvio Padrão</b> | <b>Variância</b> | <b>Assimetria</b> | <b>Curtose</b> | <b>Valor-p (*)</b> |
|-------------------------------|--------------|----------------|----------------------|------------------|-------------------|----------------|--------------------|
| Areia                         | 0,07         | 0,13           | 1,08                 | 1,18             | 0,13              | -0,33          | 0,82               |
| Silte                         | 4,38         | 4,60           | 0,83                 | 0,7              | -0,18             | -1,62          | 0,13               |
| Argila                        | -0,09        | -0,16          | 1,08                 | 1,16             | -0,008            | -0,28          | 0,90               |
| Si                            | 19,9         | 21,2           | 7,26                 | 52,73            | -0,03             | -1,67          | 0,14               |
| Al                            | -0,09        | 0,37           | 1,10                 | 1,21             | -0,37             | -0,46          | 0,05               |
| Fe                            | 0,07         | 0,05           | 0,93                 | 0,87             | 0,27              | -1,02          | 0,44               |
| Ti                            | 0,42         | 0,40           | 0,38                 | 0,15             | 1,55              | 3,29           | 0,07               |
| Elevação                      | -0,08        | -0,11          | 1,01                 | 1,03             | -0,33             | -0,3           | 0,46               |
| Hillshade                     | 0,03         | -0,14          | 0,98                 | 0,97             | -0,08             | -0,26          | 0,90               |
| Shapeindex                    | 0,04         | 0,08           | 1,11                 | 1,23             | -0,07             | 0,25           | 0,97               |
| Slope                         | 33598        | 32359          | 15496                | 2401             | 0,53              | -0,61          | 0,39               |
| C Vertical                    | -291753      | -311165        | 247587               | 6129             | 1,26              | 1,89           | 0,12               |

Tabela 6: Resultados da análise estatística dos atributos de interesse da área de estudo.

Os resultados da análise geoestatística, os modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas ajustados aos dados dos atributos físico-químicos do solo e covariáveis do relevo estão descritos na Tabela 7. Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de semivariância são definidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (efeito pepita-Co; variância-C; patamar-Co + C e alcance-A) (TRANGMAR, et al., 1985).

Nota-se que, na maioria dos dados, o índice de Moran acima de 0,70 positivo indica uma boa autocorrelação, a covariável elevação apresentou maior correlação e índice de forma e curvatura vertical com valores acima de 0,60 positivo foi considerado uma correlação moderada. Os valores de patamar da areia, argila, Si, Al, Fe, declividade e curvatura vertical teve valores acima de 1,0, pois são os dados com distribuição normal, não houve nenhum tipo de transformação para normalizar, enquanto os outros apresentam valores menores que 1, pois foram transformados por Johnson para seguir uma distribuição normal. O modelo do semivariograma foi escolhido com base nos resultados de RMSE e R2, que devem possuir os menores valores entre os modelos.

| Validação  | I. Moran | Efeito Pepita (Co) | Patamar (Co+C) | Alcance (A) | RMSE | R2   | Modelo         |
|------------|----------|--------------------|----------------|-------------|------|------|----------------|
| Areia      | 0,77     | 0,015              | <b>1.40</b>    | 24888       | 0,61 | 0,72 | Gaussiano      |
| Silte      | 0,77     | 0,005              | 0.78           | 29353       | 0,77 | 0,76 | Gaussiano      |
| Argila     | 0,77     | 0,000              | <b>1.32</b>    | 24086       | 0,   | 0,73 | Linear Patamar |
| Si         | 0,76     | 0,251              | <b>58.92</b>   | 29415       | 345  | 0,77 | Gaussiano      |
| Al         | 0,75     | 0,000              | <b>1.73</b>    | 31976       | 0,40 | 0,88 | Gaussiano      |
| Fe         | 0,79     | 0,049              | <b>1.09</b>    | 41342       | 0,40 | 0,80 | Gaussiano      |
| Ti         | 0,71     | 0,006              | 0.08           | 36140       | 0,11 | 0,81 | Gaussiano      |
| Elevação   | 0,81     | 0,000              | 0.83           | 50813       | 0,46 | 0,70 | Exponencial    |
| Hillshade  | 0,74     | 0,213              | 0.99           | 50813       | 0,55 | 0,56 | Gaussiano      |
| Shapeindex | 0,66     | 0,139              | 0.82           | 17354       | 0,83 | 0,28 | Linear Patamar |
| Slope      | 0,74     | 4545               | <b>2.59</b>    | 36582       | 956  | 0,56 | Linear Patamar |
| C Vertical | 0,61     | 1555               | <b>3.93</b>    | 26695       | 963  | 0,00 | Gaussiano      |

Tabela 7: Resultados da análise geoestatística dos atributos físico-químico e covariáveis do relevo.

### Mapas preditos dos atributos físico-químico e covariáveis do relevo.

Nos mapas de distribuição espacial obtidos dos atributos físico-químico e covariáveis de relevo, nota-se a variabilidade espacial da areia situa-se predominantemente na região oeste da área de estudo e tem valores que variam de aproximadamente de 39 a 92 %, enquanto a argila está distribuída espacialmente tanto nas porções norte, sul e leste do mapa com teores que variam 4 a 44%. O silte varia de 1 a 14 % e predomina na região sudeste. As zonas de argila e silte localizam-se na margem esquerda do rio Negro e estão diretamente ligadas ao grande aporte de sedimentos finos e velocidade mais lenta de fluxo oriundos do rio Branco, conforme já estudado por MARINHO, 2019. Enquanto na margem direita o fluxo de sedimento é menor, pois está associado a rochas antigas do Escudo das Guianas, fluindo com baixa declividade (ICMBio, 2017). Em relação a elevação, não há uma variação de cota significativa valores entre 14 e 37 metros. Os teores de areia tenderam a ser maiores nas cotas acima de 30 m, quando comparados aos demais, provavelmente, sob influência do substrato geológico, uma vez que a declividade e o fator topografia não são expressivos a ponto de transportar a partículas finas das partes mais altas (Figura 19).

## MAPAS PREDITOS DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

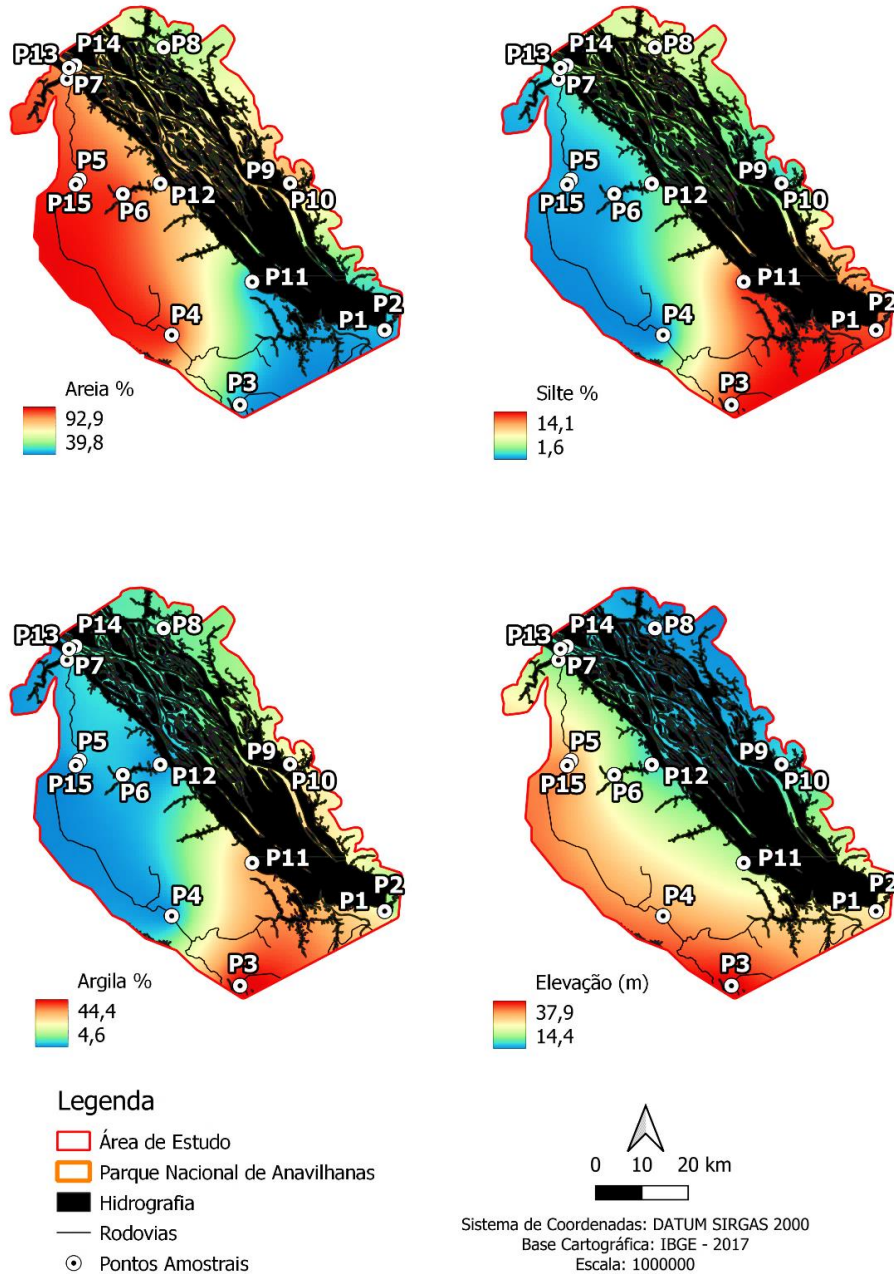


Figura 19: Mapas preditos dos atributos físicos do solo da área de estudo.

Os mapas dos atributos químicos apresentaram correlação com os mapas das variáveis física, a distribuição espacial da Si é similar ao mapa predito da areia, pois esta é constituída principalmente de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Os Mapas preditos de argila e silte são mais

similares aos mapas de Al e Fe, pois nessas zonas de distribuição espacial de argila e silte ocorrem minerais que tem na sua constituição Al e Fe. Os valores mais elevados de Ti foram observados em solos que possuem petroplintita ou concreções ferruginosas, evidenciando processos de lateritização (Figura 20).

### MAPAS PREDITOS DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

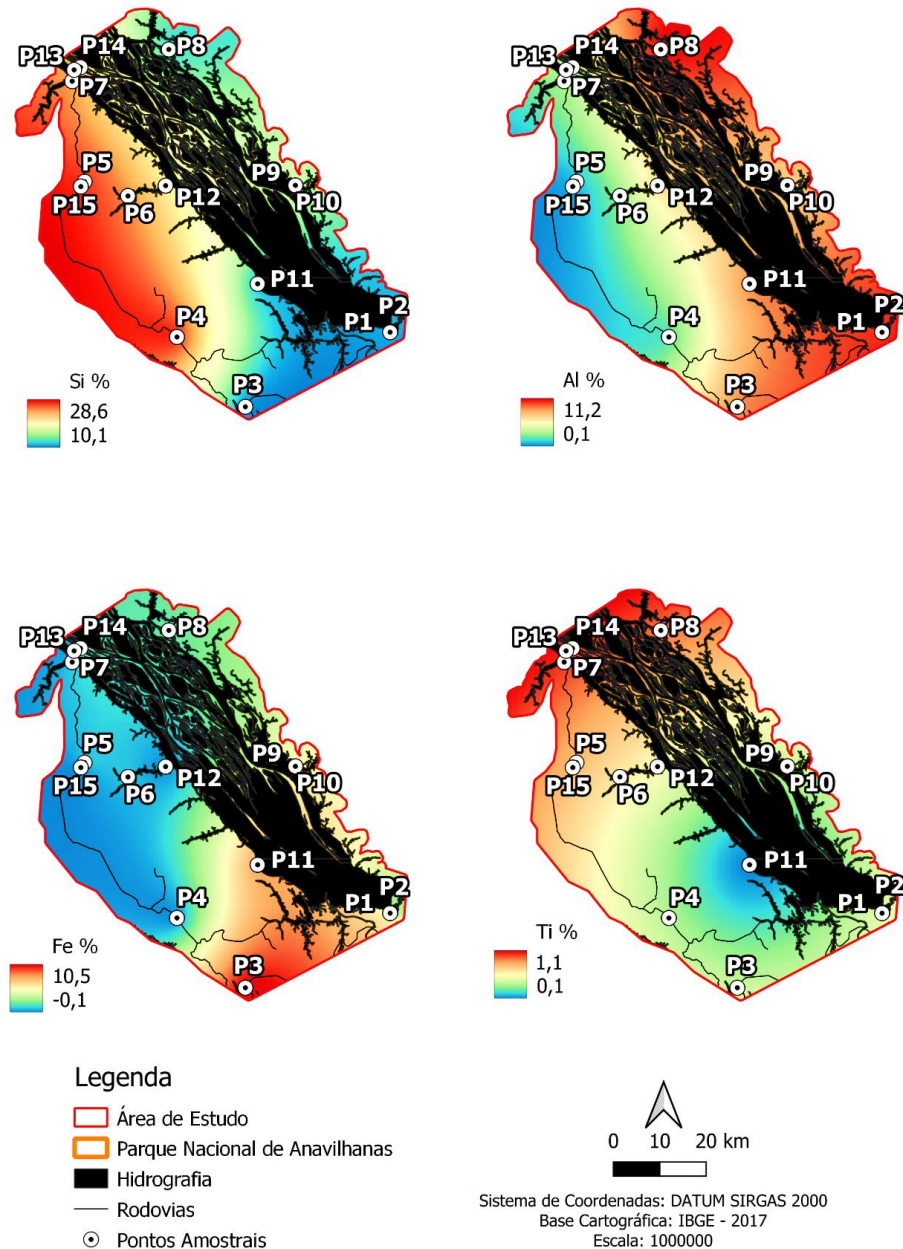


Figura 20: Mapas preditos dos atributos químicos do solo da área de estudo.

O relevo é considerado um importante fator na formação do solo, pois é responsável pelo controle da dinâmica dos fluxos de água na paisagem, como lixiviação, atua também nos processos erosivos e condições de drenagem SANTOS et al. (2010). Os pontos mais altos da paisagem devido ao distanciamento do lençol freático possuem boas condições de drenagem e, quando associados a baixas declividades, favorecem a maior infiltração da água, esses pontos estão associados às zonas arenosas e correspondem à áreas de terra firme.

Por outro lado, pontos de paisagem com boa drenagem, porém, com maiores declives, intensificam o escoamento superficial da água em detrimento a infiltração, o que aumenta a taxa de erosão, promovendo o rejuvenescimento do solo, estas áreas estão associadas as zonas mais argilosas e siltosas nas áreas de várzea. Já os pontos mais baixos da paisagem, apesar da menor declividade, estão mais próximos do lençol freático, sendo normalmente mal ou muito mal drenados, com condições anaeróbicas na maior parte do ano, estão associados às ilhas do PNA que são representadas pelos gleissolos, os valores de hillshade mostram-se inversamente proporcional aos dados da declividade (Figura 21).



## MAPAS PREDITOS DAS COVARIÁVEIS DO RELEVO

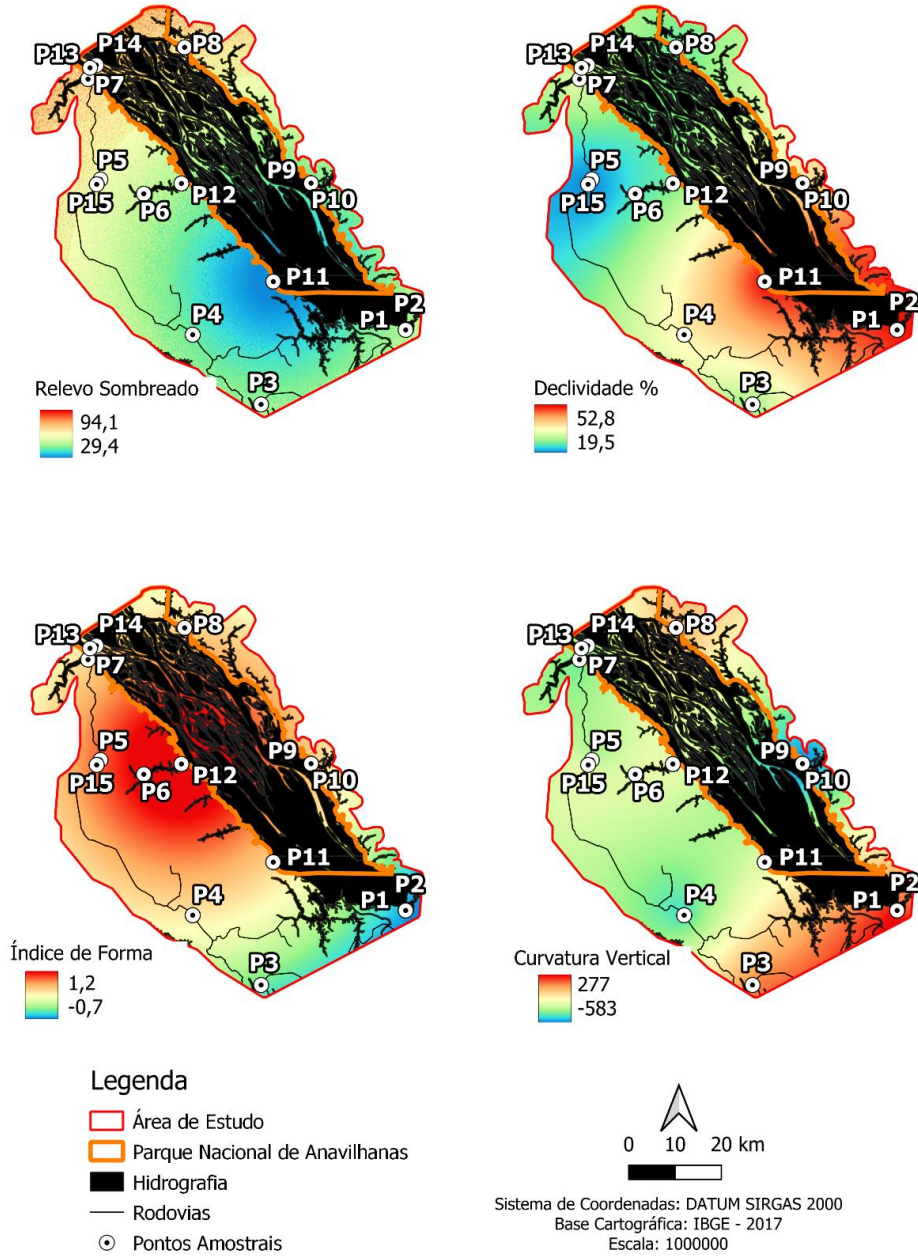


Figura 21: Mapas Preditos das covariáveis do relevo da área de estudo.



## Mapa de Unidades Pedológicas

Pelo agrupamento K-means, foram identificados 5 Grupos, a partir da análise do método elbow, que definiu melhor o número ótimo de agrupamento. Novamente foram selecionados somente os atributos de solos que apresentaram correlação espacial de moderada a forte, sendo definido o número ótimo de agrupamento em 5, então delimitamos Zona 1 - solos argilosos: pontos P1, P2, P3, P11; Zona 2 - solos arenosos: pontos P4, P5, P6 e P15; Zona 3 - solos arenosos e hidromórficos: P7, P13 e P14; Zona 4 - solos arenosos a areno-argilosos: P9 e P10; Zona 5 - solos argilosos: P8 (Figura 22).

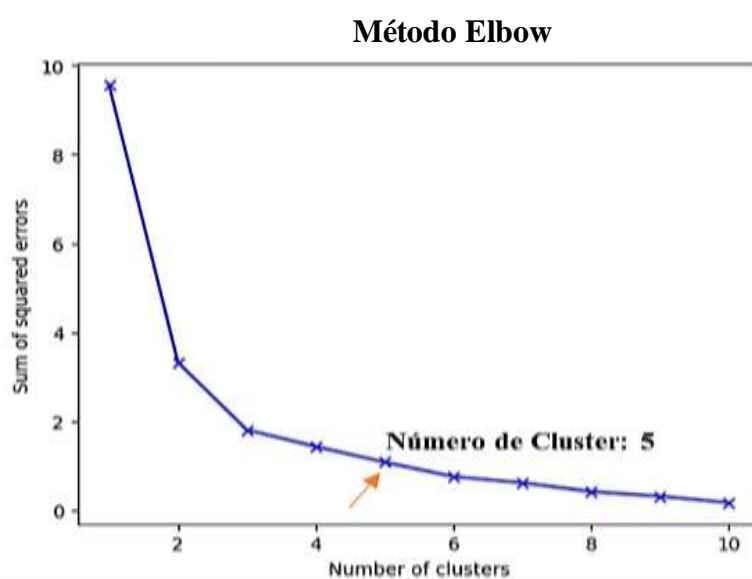


Figura 22: Análise de número ótimo de cluster pelo método Elbow dos atributos físico-químico e covariáveis do relevo.

A partir dos resultados das análises granulométricas e químicas associadas as análises espectrais e de agrupamento k-means foi confeccionado um mapa de zonas com suas características pedológicas, no qual identificou-se 5 áreas de um modo que se percebe melhores solos da região em estudo (Figura 23).

**Zona 1 - solos argilosos:** Representada pelos pontos P1, P2, P3, P11, apresentando solos com textura, predominantemente, argilosa, originados das rochas das Formações Alter do Chão e Novo Remanso. São zonas com alta elevação e declividade,

solos bem-drenados em terra firme da bacia sedimentar do Amazonas. Observa-se que os materiais mais consistentes, estruturados e de coloração vermelho amarela estão relacionados aos perfis mais profundo caracterizados como argissolos e latossolos, compostos mineralogicamente por caulinita e hematita. No P2, também, identifica-se minerais de gibbsita e pequenas porções de rutílo. Já o P11 está associado a um plintossolo que difere dos demais por apresentar menor elevação e alta declividade com relevo sombreado em uma faixa intermediária dificultando a drenagem e mostrando formação de nódulos ferruginosos.

**Zona 2 - solos arenosos:** Abrange os pontos P4, P5, P6 e P15, representam uma zona com altitudes mais elevadas e baixa declividade facilitando a ação do intemperismo e lixiviação. É constituída por materiais mais friáveis, inconsolidados, mostrando cores escuras em superfície e subsuperfície e pálidas em profundidades. São descritos como espodosolos caracterizados por solos distróficos com um horizonte de coloração clara com alta porcentagem de areia abaixo de um horizonte escuro com alto teor de matéria orgânica. A mineralogia dos solos nos pontos P4 e P5 é predominante quartzosa e nos pontos P6 e P15 apresentam quartzo e porções de caulinita.

**Zona 3 - solos arenosos e hidromórficos:** É representada pelos pontos P7, P13 e P14, onde os solos estão correlacionados, litologicamente, aos depósitos aluvionares quaternários recentes e sedimentos da formação Alter do Chão. Observa-se que os pontos P7 e P13 possuem textura arenosa, composta por quartzo, caulinita e gibbsita. Este agrupamento está relacionado a sedimentos depositados nas margens de igarapés e rios, alagáveis em determinados períodos por estarem em cotas baixas e cujos solos apresentam porosidade elevada, textura arenosa fina à média, coloração cinza a branca. Já no ponto P14, representando os solos das ilhas do arquipélago de Anavilhanas tem textura média, composto por quartzo, caulinita, illita, feldspato potássico, gibbsita, mica, caracterizado como um gleissolo.

De modo geral, os solos que ocorrem nesta zona têm relação direta com a mudança de relevo, que condiciona a drenagem, posicionamento do nível do lençol freático refletindo na alta mobilidade dos elementos químicos, principalmente, os

derivados de rochas das Formações Alter do Chão e Novo Remanso. O grau de desenvolvimento dos perfis que está associado à presença e profundidade de solos mosqueados e horizontes lateríticos comprovam o desenvolvimento dos processos de intemperismo e lixiviação, relacionado, também ao clima e condições ambientais da região.

**Zona 4 - solos arenosos a areno-argilosos:** Constituída pelos pontos P9 e P10, estes perfis estão localizados geograficamente próximos sendo que o ponto P9 é representado por sedimentos da Formação Alter do Chão e o ponto P10 por depósitos aluvionares. Apresentam perfis com textura média a arenosa, compostos por quartzo e caulinita e, no ponto P10 ocorrência de pequenas porções de magnetita, que reflete um intenso processo de intemperização nesta zona. O ponto P9 apresenta espessura centimétrica à métrica e está descrito na literatura como latossolo desenvolvidos em áreas elevadas em ambiente de terra firme, posicionados, preferencialmente, sobre a formação Alter do Chão.

**Zona 5 - solos argilosos:** Esta zona é representada pelo P8 posicionados em locais com baixo relevo e alta declividade e referente aos latossolos. Localiza-se na margem esquerda do rio Negro caracterizados por solos com textura argilosa compostos por quartzo, caulinita e gibbsita originados de sedimentos da Formação Alter do Chão.

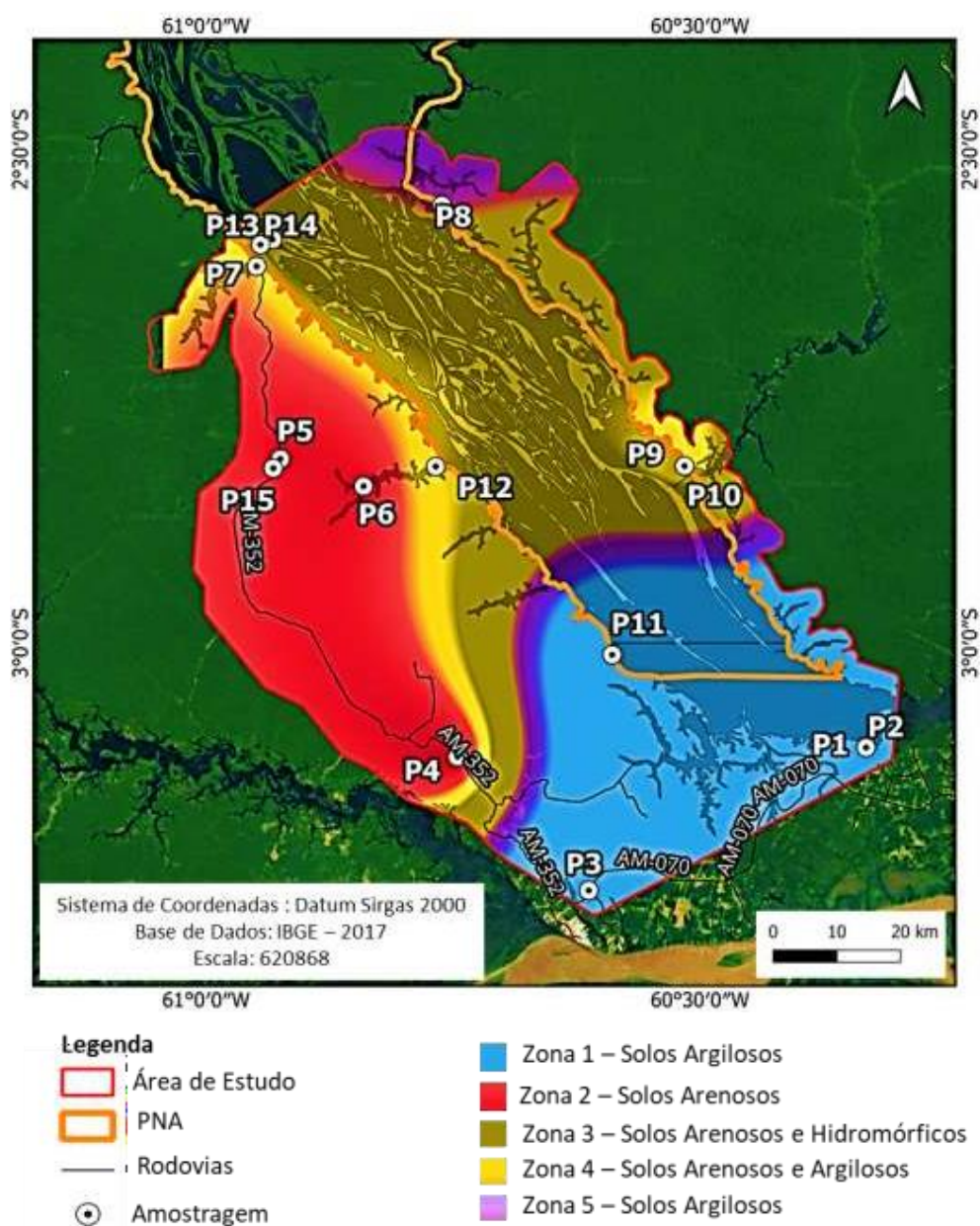


Figura 23: Mapa de Zonas Pedologicamente semelhantes.

A presente pesquisa foi desenvolvida para ampliar o conhecimento e a distribuição espacial a respeito das propriedades dos solos na região do Parque Nacional de Anavilhanas e entorno, visto que os mapeamentos pedológicos disponíveis foram gerados particularmente na década de 1970 em escalas de pouco detalhamento. Também teve como objetivo fornecer subsídios significativos para a compreensão de um conflito

existente no PNA e entorno relacionado a extração ilegal de areia, cujo pesquisa pode contribuir na reavaliação do Plano de Manejo e no monitoramento ambiental.

Os fatores de formação e processos pedogenéticos justificam a diversidade de classes de solos com características morfológicas, químicas e físicas variadas, mesmo em pequenas áreas geográficas SANTOS et al. (2015). Numa paisagem natural, o solo apresenta ampla variabilidade dos seus atributos tanto no sentido espacial como no volumétrico, resultante da interação dos processos que comandam os fatores de sua formação (BOUMA, 2006). O solo, por ser um corpo tridimensional formado pela ação de vários fatores e processos, apresenta uma variação de suas características ao longo da paisagem ABREU et al. (2003).

Vários autores encontraram relação entre a variabilidade espacial dos atributos do solo e as formas da paisagem (SOUZA et al. 2006; MONTANARI et al. 2005; LEÃO, 2004; SOUZA et al. 2004). A variabilidade espacial dos atributos do solo e as formas da paisagem e, em relação aos solos amazônicos não há diferenciação, apesar da variedade de ecossistemas na região (BOUMA & FINKE, 1993).

De um modo geral as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos amazônicos estão relacionados ao seu material de origem, relevo e clima, a geomorfologia possui um caráter extremamente importante na distribuição espacial destes solos (Figuras 19 e 20), onde áreas com altimetria elevada e baixa declividade estão geralmente associados a latossolos, em locais com valores intermediários de elevação e baixa declividade ocorrem os espodosolos. Na planície de inundação (várzea) predominam-se gleissolos e os solos jovens de sedimentação holocênica conforme indicado no mapa de unidades pedológicas (Figura 7).

As construções dos mapas com os valores obtidos por meio da krigagem (Figuras 19, 20 e 21) são importantes para verificação e interpretação da variabilidade espacial, além de ser uma técnica em que se pode realizar a predição de características dos solos em locais onde não houve coleta de amostras e são úteis nas tomadas de decisões, já a interpretação dos espectros permitiu a identificação mineralógica e textura das amostras esta frase ficou fora de contexto.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A espectroscopia permitiu obter uma análise de solo de parâmetros de difícil aquisição na região de estudo, tais como a mineralogia. A utilização dos modelos de elevação e derivados, auxiliou na espacialização dos atributos. Ambas as técnicas convergiram a um produto único, o mapa de unidades pedológicas, as quais apresentaram características físicas, químicas, mineralógicas e de relevo diferenciadas.

A obtenção do mapa de zonas homólogas forneceu subsídios significativos para a identificação e compreensão dos diversos tipos de solo que ocorrem na área e entorno do Parque Nacional de Anavilhanas.

Vale ressaltar que, dependendo da região de estudo deve-se levar em consideração os períodos de sazonalidade dos rios, como também, aumentar a grade de pontos amostrais, visto que neste trabalho foram visitados 15 pontos e, para uma melhor interpolação por krigagem foram gerados 50 pontos aleatórios.

A geoestatística auxiliou no mapeamento de atributos do solo em locais onde não houve coleta de amostras e a espectroscopia foi importante pois expressou dados de difícil mensuração na região, como mineralogia e textura, com bastante rapidez. Através destas informações, os atributos do solo puderam ser avaliados dando subsídios ao mapeamento. Tais dados fundamentaram a compartimentação em zonas pedológicas caracterizadas por meio das análises física, química, mineralógica e identificação do relevo.

Com as técnicas de agrupamento foram identificados cinco (05) Zonas Pedologicamente análogas. Os dados espectrais e o mapeamento digital se mostraram positivos, evidenciando que a técnica de espectroscopia e de mapeamento digital por técnicas de geoestatística são uma excelente alternativa, para identificar texturas dos solos e seus minerais com baixo custo, otimização de tempo e que atende aos preceitos do desenvolvimento sustentável.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABINADER, H.D. (2008). Depósitos cenozoicos da porção oeste da Bacia do Amazonas. Dissertação (Mestrado). Manaus: Programa de Pós-graduação em Geociências – UFAM.
- ABREU, S. L. D., REICHERT, J. M., SILVA, V. R. D., REINERT, D. J., & BLUME, E. (2003). Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. *Ciência Rural*, 33, 275-282.
- AGUILAR-MUÑOZ, V. (2009). Análise geomorfológica de dados SRTM aplicada ao estudo das relações solo-relevo. São José dos Campos: INPE.
- ALMEIDA, E. (2012). *Econometria Espacial*. Alínea: Campinas/Sp – Ufjf.Br.
- ALVES, N.S. (2013). Mapeamento hidromorfodinâmico do Complexo Fluvial de Anavilhanas: contribuição aos estudos de Geomorfologia Fluvial de rios Amazônicos. Tese Usp.
- ANDERSON, T.W. & DARLING, D.A. (1952). Asymptotic theory of certain goodness-of-fit criteria based on stochastic processes. *Annals of Mathematical Statistics*, 23, 193– 212.
- ANDRADE, L.S. et. al. (2009). Estratigrafia de subsuperfície da sequência sedimentar cretácea e neógena na cidade de Manaus. XI Simpósio de Geologia da Amazônia. Manaus: SBG.
- ARORA, P.; VARSHNEY, S. et al. (2016). Analysis of k-means and k-medoids algorithm for big data. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 78, p. 507–512.
- ARRUDA, G.P. DE.; DEMATTÊ, J.A.M.; & CHAGAS, C. DA S. (2013). Mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais com base na relação solo-paisagem. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 37(Rev. Bras. Ciênc. Solo, 2013 37(2)), 327–338.
- BARBOSA, R.O. (2015). Estudos sedimentológicos e estratigráficos dos depósitos sedimentares quaternários do Arquipélago de Anavilhanas município de Novo Airão (Amazônia Central).
- BAUMGARDNER, M. F. et. al. (1996). Reflectance properties soils. *Advances in Agronomy* 38, 1-43.
- BERNER, P.G.M.; VIEIRA, S.R.; LIMA, E.; & ANJOS, L.H.C.D. (2007). Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 837-844.
- BEZERRA, P.E.L. (2003). *Compartimentação Morfotectônica Do Interflúvio Solimões – Negro*. Tese De Doutorado. Curso De Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro De Ciências, Ufpa.
- BHLOWALIA, P.; KUMAR, A. (2014). Ebc-means: A clustering technique based on Elbow method and k-means in wsn. *International Journal of Computer Applications*, Citeseer, v. 105, n. 9.
- BOUMA, J. (2006). *Hydropedology as a powerful tool to environmental policy research*, *Geoderma*, 131, 275– 286.
- BOUMA, J., & FINKE, P. A. (1993). Origin and nature of soil resource variability. In *Proceedings of Soil Specific Crop Management: A Workshop on Research and Development Issues* (pp. 1-13). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America
- BRASIL. Lei N°9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da

- Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 19 de jul. 2000.
- BRASIL. Portaria Nº 483, de 14 de dezembro de 2010. Reconhece o Mosaico do Baixo Rio Negro. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 15 de dezembro de 2010.
- CALLEGARI-JACQUES, S.M. (2003) Bioestatística princípios e aplicações. Porto Alegre: Artmed.
- CAMARGO, L.A.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T. (2010). Spatial variability of physical attributes of Alfisol under diferente hillslope curvatures. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n.3, p. 617-630.
- CAMPOS, M.C.C.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M.V.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M.; BARBIERI, D.M. (2008). Variação espacial da perda de solo por erosão em diferentes superfícies geomórficas. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.38, n.9.
- CANDIDO, L. A.; SOUZA, J. M. Prováveis alterações na temperatura e precipitação na bacia do Rio Negro nos cenários de mudanças climáticas. In: FERREIRA, S. J. F.; SILVA, M. L. DA; PASCOALOTO, D. (Eds.) *Amazônia das Águas: Qualidade, Ecologia e Educação Ambiental*. Manaus: Valer/FAPEAM/INPA, 2016.
- CAPUTO, M.V. (1984). *Stratigraphy, Tectonics, Paleoclimatology And Paleogeography Of Northern Basins Of Brazil*. Tese de Doutorado. Universidade da Califórnia, Santa Bárbara, Ca. 583 P.
- CHAGAS, C.S. (2006). Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros. Viçosa 223p.
- COHEN, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, NJ, Erlbaum.
- COLEMAN, T.L.; MONTGOMERY, O.L. (1987). Soil moisture, organic matter and iron content effect on the spectral characteristics of selected Vertisols and Alfisols in Alabama. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Bethesda, v. 53, p. 1659-1663.
- COSTA, M.L. (1991). Mineralogia, geoquímica, gênese e epigênese dos lateritos de Jandiá. *Geochimica Brasiliensis*, 4(1):85-110.
- CUNHA, P.R.C.; MELO, J.H.G.; SILVA, O.B. (2006). Bacia Do Amazonas. In: *Boletim De Geociências Da Petrobrás*. Rio De Janeiro, V.15, N. 2, P. 227-251.
- DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; KLAMT, E.; DICK, D. P. (2005). Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 481-489, mar./abr.
- DANCEY, C.; REIDY, J. (2006). *Estatística sem matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows*. Porto Alegre, Artmed.
- DEMATTE, J.A.M.; DOTTO, A.C.; PAIVA, A.F.; SATO, M.V.; DALMOLIN, R.S.; MARIA DO SOCORRO, B.; DO COUTO, H.T.Z. (2019). A Biblioteca Espectral de Solos Brasileiro (BSSL): Visão Geral, Aplicação e Desafios. *Geoderma*, 354, 113793.
- DEMATTE, J.A.M.; GARCIA, G.J. (1999). Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.63, p.327-342.
- DEMATTE, J.A.M.; NANNI, M.R. (2003). Weathering sequence of soils developed from basalt as evaluated by laboratory (IRIS), airborne (AVIRIS) and orbital (TM) sensors. *International Journal of Remote Sensing*, v.24, p.4715-4738.



- DEMATTE, J.A.M.; SAFANELLI, J. L.; POPPIEL, R.R.; RIZZO, R.; SILVERO, N.E.Q.; MENDES, W.D.S.; LISBOA, C. J. D. S. (2020). Bare earth's surface spectra as a proxy for soil Resource monitoring. *Scientific Reports*, 10(1), 1-11.
- DEMATTE, J.A.M.; TERRA, F.S. (2014). Spectral Pedology: A new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations. *Geoderma* 218, 190-200.
- DEMATTE, J.A.M.; TERRA, F.S. QUARTAROLI, C.F. Spectral behavior of some modal soil profiles from São Paulo State, Brasil, *Bragantia* 71, 413-423.
- DIAS, M. A. (2014). Mapeamento de Antropossolos na Porção Norte do Bairro de Santa Felicidade – Curitiba/PR. Monografia de conclusão do curso de Geografia (Departamento de Geografia da UFPR).
- DINO, R.; SOARES E.A.A.; RICOMMINI C.; ANTONIOLI, L.; NOGUEIRA A.C.R. (2006). Caracterização Palinoestratigráfica de Depósitos Miocênos da Bacia do Amazonas, Região de Manacapuru, Am. In: *Simpósio Do Cretáceo do Brasil, 7.; Simpósio do Terciário Do Brasil, 1. Serra Negra. Boletim De Resumos. Serra Negra: Igce/Unesp.43P*
- DUNN, B.W.; BEECHER, H.G.; BATTEN, G. D; CIAVARELLA, S. (2002). The potential of near-infrared reflectance spectroscopy for soil analysis - a case study from the Riverine Plain of south eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, v.42, p.607-614.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2006). Sistema Brasileiro de classificação de Solos. 2. ed. Brasília, DF, 286 p.
- GALLANT, J.C.; WILSON, J.P. (2000). Primary topographic attributes. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Eds.). *Terrain Analysis: Principles and applications*. New York: John Wiley, p.51-85.
- GARSON, G.D. (2009). *Statnotes: Topics in Multivariate Analysis*. Disponível em <http://faculty.chass.ncsu.edu/garson/PA765/statnote.htm>.
- GENÚ, A.M.; ROBERTS, D.; DEMATTE, J.A.M. (2013a). The use of multiple endmember spectral mixture analysis for the mapping of soil attributes using Aster imagery. *Acta Scientiarum Agronomy* 35, 377-386.
- GOOVAERST, P. (1997). *Geoestatística para avaliação de Recursos Naturais*. Oxford University Press on Demand. Books. Google. com.
- HAIR Jr.; J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.T. & BLACK, W.C. (2005). *Análise Multivariada de dados*. Porto Alegre, Bookman.
- HOFIG, P.; GIASSON, E.; VENDRAME, P.R.S. (2014). Mapeamento Digital de Solos com Base na Extrapolação de Mapas entre Áreas Fisiograficamente Semelhantes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49, 958-966, Embrapa – Secretaria de Pesquisa e Desenvolvimento, Pesquisa Agropecuária Brasileira.
- HOPKINS, A. L. (2008). Network pharmacology: the next paradigm in drug discovery. *Nat. Chem. Biol.* 4, 682–690.
- HORBE, A. M. C.; & COSTA, M. L. D. (1997). Solos gerados a partir do Intemperismo de Crostas Lateríticas Sílico-Ferruginosas. *Acta Amazônica*, 27, 241-256.
- HUNT, G.R. (1979). Near-infrared (1.3-2.5  $\mu\text{m}$ ) spectra of alteration minerals – potential for use in remote sensing. *Geophysics*, Tulsa, v. 44, n. 12, p. 1974-1986.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W.; LENHOFF, C.J. (1971) Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides. *Mod.*

- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018). Desbravar, Conhecer, Mapear: Memórias do Projeto Radam/Radambrasil Ibge, Gerência de Biblioteca e Acervos Especiais, Rio De Janeiro, Brasil, 364 Págs.
- IRION, G.; (1982). Mineralogical and Geochemica contribution to Climatic History in Central Amazonia during quarternary time. *Tropical Ecology* 23: 76–85.
- JOSÉ-GARCÍA, A.; GÓMEZ-FLORES, W. (1954). Automatic clustering using nature inspired metaheuristics: A survey. *Applied Soft Computing*, Elsevier, v. 41, p. 192–213, 2016.
- KISTLER, P. (1954). Historical Resumé of the Amazon Basin. Belém, PETROBRAS-RENOR, (Relatório Técnico Interno, 104-A).
- KORKUSUZ, D. (2011). Process capability analysis for non-normal/ processes with lower specification limits. Chalmers University of Technology. Gothenburg, Sweden.
- KOSMAS, C.S.; CURI, N.; BRYANT, R.B.; FRANZMEIER, D.P. (1984). Caracterização de minerais de óxido de ferro por espectroscopia visível de segunda derivada. *Soil Science Society of America Journal*, 48 (2), 401-405.
- KRIGE, D.G. (1951). Uma abordagem estatística para alguns problemas básicos de avaliação de minas em Witwatersrand. *Jornal do Instituto de Mineração e Metalurgia da África Austral*, 52 (6), 119-139.
- KRIVORUCHKO, K. e GOTWAY, C. (2004). Creating exposure maps using kriging. *Public Health GIS News and Information*, 56:11 – 16.
- KWEON, G.; LUND, E.; MAXTON, C.; DRUMMOND, P.; JENSEN, K. (2008). In situ measurement of soil properties using a probe-based VIS-NIR spectrophotometer. St Joseph: ASABE. (ASABE Paper No. 084399, 2008).
- LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A.B; VOLTZ, B.T. (2006). *Digital Soil Mapping an Introductory Perspective*, Elsevier, Pp. 39-601.
- LANDIM, P.M.B. (1998). *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo: Fundação Editora da UNESP.
- LANDIM, P.M.B. (2006). Sobre geoestatística e mapas. *Terra e Didática*, v. 2, n. 1, p. 19-33.
- LATRUBESSE, E.M. & FRANZINELLIE. (2005). The Late Quaternary Evolution of the Negro River, Amazon, Brazil: Implications For Island And Floodplain Formation In Large Ana branching Tropical Systems. *Geomorphology*, V. 70, P. 372-397.
- LATRUBESSE, E.M. & STEVAUX, J.C. (2015) The Anavilhanas and Mariuá archipelagos: Fluvial wonders from the Negro River, Amazon Basin. In: Vieira, B.C., Salgado, A.A.R. & Santos, L.J.C. (Eds.) *Landscapes and Landforms of Brazil*. Dordrecht: Springer, pp. 157–169. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0\\_14](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_14)
- LEÃO, M. G. A. (2004). *Relação entre atributos de uma vertente com Latossolos e qualidade de frutos cítricos*. Jaboticabal. 119f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista.
- LEE, W.S.; SANCHEZ, T.F.; MYLAVARAPU, R.S.; CHOE, J.S. (2003). Estimating Chemical properties of florida soils using spectral reflectance. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v.46, p.1443-1453.
- LEMO FILHO, L.C.A. et al.. (2008). Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). *Revista Ciência Agronômica*, v. 39, n. 02, p. 193-202.
- LIMA, C.A.G. & SILANS, A.P. (1999). Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. *Pesq. Agropec. Bras.*; 34:2311- 2320.

- LIMA, G.C.; SILVA, M.L.N.; OLIVEIRA, M.S.; CURI, N.; SILVA, M.A.; OLIVEIRA, A. H. (2014). Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e Mata Atlântica na escala de Microbacia Hidrográfica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, V. 18, N. 5, P. 517-526.
- LINDBERG, J.D.; SNYDER, D.G. (1972) Diffuse reflectance spectra of several clay minerals. *American Mineralogist.*; v.57, p.485-493.
- LUCAS, Y.; KOBILSEK, B.; CHAUVEL, A. (1989). Structure, Génesis, and present evolution of Amazonian bauxites developed on Sediments. In: Intern. Cong. Icsoba 6, Poços de Caldas, Brazil.
- MACQUEEN, J. et al. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: OAKLAND, CA, USA. Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability. [S.l.], v. 1, n. 14, p. 281–297.
- MALHOTRA, N. (2006). Pesquisa de marketing: uma orientação aplicada. Trad. Laura Bocco. 4 ed. Porto Alegre: Bookman.
- MARINHO, R.R. (2019). Integração de dados de campo e sensoriamento remoto no estudo do fluxo de água e matéria no arquipélago de Anavilhanas, Rio Negro - Amazonas, Brasil. / Rogério Ribeiro Marinho; orientador Naziano Pantoja Filizola Junior; coorientador Jean-Michel Martinez. -- Manaus: [s.l.], 2019. 160 f.
- MARINHO, R.R., FILIZOLA, N.P. & CREMON, E.H. (2020). Analysis of suspended sediment in the Anavilhanas Archipelago, Rio Negro, Amazon Basin. *Water*, 12(4), 1073. Available from: <https://doi.org/10.3390/w12041073>
- MATHEWS, H.L.; CONNINGHAM, R.L.; PETERSEN, G.W. (1973). Spectral Reflectance of selected Pennsylvania Soils. *Soil Proceedings*, Madison, v.37, p.421-424.
- MCBRATNEY, A.B., ODEH, I.O., BISHOP, T.F., DUNBAR, M.S., & SHATAR, T.M. (2000). Uma visão geral das técnicas pedométricas para uso em levantamento de solo. *Geoderma*, 97 (3-4), 293-327.
- MCBRATNEY, A.B.; MENDONÇA SANTOS, M.I.; & MINASNY, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52.
- MELLO, C.R.; LIMA, J.M.; SILVA, A.M.; MELLO, J.M.; OLIVEIRA, M.S. (2003). Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas Intensas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 27, no. 5, pp. 925-933. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000500017>
- MENESES, P.R. & MADEIRA NETTO, J.S. (2001). Sensoriamento remoto: Reflectância dos alvos naturais. Brasília, UnB/Embrapa Cerrados, 262p.
- MINASNY, B. MCBRATNEY, A.B. (2016). Digital soil mapping: A brief history and some lessons, *Geoderma*, Volume 264, Part B, Pages 301-311, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma>.
- MOHD, W. et. al. (2012). An improved parameter less data clustering technique based on maximum distance of data and lioyd k-means algorithm. *Procedia Technology*, Elsevier, v. 1, p. 367–371.
- MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. (2005). Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.40, p.69-77.
- MONTERO, J. C.; LATRUBESSE, E. M. The igapó of the Negro River in central Amazonia: Linking late-successional inundation forest with fluvial geomorphology. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 46, p. 137 -149. 2013.

- MOORE, D.S. & KIRKLAND, S. (2007). A prática básica da estatística (Vol. 2). Nova York: WH Freeman.
- MORAES, C.F.; FERREIRA, J.R.; & BALESTRASSI, P.P. (2006). Análise crítica da aplicação de métodos estatísticos em processos definidos por dados que não apresentaram distribuição normal. *Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas*. MOUAZEN, A.M.; MALEKI, M.R.; DE BAERDEMAEKER, J; RAMON, H. (2007). On-line measurement of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor. *Soil and Tillage Research*, v.93, p.13-27.
- NANDA, S.J.; PANDA, G.A. (2014). Survey on nature inspired metaheuristic algorithms for partitional clustering. *Swarm and Evolutionary computation*, Elsevier, v. 16, p. 1–18.
- NEUMANN, M.R.B. (2012). Mapeamento digital de solos no Distrito Federal. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília.
- NIELSEN, D.R E WENDROTH, O. (2003). Estatísticas Espaciais e Temporais: Amostragem de Solos de Campo e Sua Vegetação. Catena Verlag.
- NOGUEIRA, A.C.R.; HORBE, A.M.C.; PAZ, J.D.S.; MOTTA, M.B.; ROZO, J.M.G. (2006). O Neógeno da Amazônia Ocidental. IX Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém: SBG.
- NOGUEIRA, A.C.R.; VIEIRA, L.C.; SUGUIO, K. (1999). Paleossolos da Formação Alter do Chão, Cretáceo-Terciário da Bacia do Amazonas, regiões de Presidente Figueiredo e Manaus. In Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, 5, Serra Negra, Resumos...Serra Negra, v. 1, p. 261- 266.
- PAZ, J.D.S; CUNHA, E. F.S. (2009). Análise de fácies da formação Alter do Chão, Km 46, BR - 174. Simpósio de Geologia da Amazônia, Manaus/AM.
- ROSSEL, R.V. & WEBSTER, R. (2012). Prevendo as propriedades do solo a partir do banco de dados espectroscópico de infravermelho visível-próximo do solo australiano. *European Journal of Soil Science*, 63 (6), 848-860.
- ROZO J.M.G. (2004). Evolução holocênica do Rio Amazonas entre a ilha do Careiro e a foz do Rio Madeira. Dissertação (Mestrado). Instituto de Ciências Exatas – Universidade Federal do Amazonas, Manaus. 93 p.
- ROZO, J.M.G.; NOGUEIRA, A.C.R, CARVALHO, A. S. (2005). Análise Multitemporal do Sistema Fluvial do Amazonas entre a Ilha do Careiro e a Foz do Rio Madeira. In: Xii Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia...Anais...Inpe, P.1875-1882.
- SALATI, E.; MARQUES, J. (1984). Climatology of the Amazon region. In: Sioli, H. (Ed.), *The Amazon Limnology and Landscape Ecology of Mighty Tropical River and Its Basins*, Vol. 56, Springer Netherlands, Dordrecht, p.85–126.
- SAMUEL-ROSA, A. S. Funções de predição espacial de propriedades do solo. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria. 201p. 2012.
- SANTOS, P. et al. (2017). Application of pso-based clustering algorithms on educational databases. In: IEEE. 2017 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI). [S.l.], 1-6p.
- SANTOS, R.D., SANTOS, H.G., KER, J.C., ANJOS, L.H.C., SHIMIZU, S.H. (2015). Manual de descrição e coleta de solo de campo. 7. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

- SCHLOEDER, C.A.; ZIMMERMAN, N.E.; & JACOBS, M.J. (2001). Comparison of Methods for Interpolating Soil Properties using limited data. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), 470-479.
- SILVA, A.M.; ALVARES, C.A. (2005). Levantamento de Informações e Estruturação de um banco dados sobre a erodibilidade de classes de solos no Estado de São Paulo. *Revista de Geociências-Unesp/Sp*.
- SILVA, C. L. (2005). Análise da tectônica cenozóica da região de Manaus e adjacências. Rio Claro, 278 p. (Tese de doutoramento, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista)..
- SILVA, C.C.; COELHO, R.M.; OLIVEIRA, S.R.M.; ADAMI, S.F. (2013). Mapeamento pedológico digital da Folha Botucatu (SF-22-Z-B-VI-3): Treinamento de dados em mapa tradicional e validação de campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.846-857.
- SIOLI H. (1991). *Amazônia Fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais*. 3.ed.; Petrópolis, Edit. Vozes, 72 p.
- SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T.A. (2002). *Princípios de Análise Instrumental*, 5ª ed.; Bookman, São Paulo.
- SOARES, E.A.A. (2007). Depósitos Pleistocenos da região de confluência dos rios Negro e Solimões, Amazonas. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 205 p.
- SOARES, E.A.A.; SILVA, J.H.A.; TEIXEIRA, S.G, RIKER, S.R.L. (2010b) Sedimentação Quaternária as Regiões De Caapiranga, Anamá, Anorí e Berurí, Amazônia Ocidental. In: *Congresso Brasileiro De Geologia*. 45. 2010. Belém/Pa. Anais (Cd-Rom).
- SORÍ, R.; MARENGO, J.; NIETO, R.; DRUNOND, A.; GIMENO, L. (2017). Drought and wet episodes in Amazonia: the role of atmospheric moisture transport. *Proceedings of First International Electronic Conference on the Hydrological Cycle*: 4846.
- SORÍ, R.; MARENGO, J.; NIETO, R.; DRUNOND, A.; GIMENO, L. (2018). The atmospheric branch of the hydrological cycle over the Negro and Madeira river basins in the Amazon region. *Water*, 10(6), 738. Available from: <https://doi.org/10.3390/w10060738>
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. (2004). Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo decana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, v.24, p.309-319.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES-JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMPOS, M. C. C. (2006). Amostragem de solo para determinação de atributos químicos e físicos em área com variação nas formas do relevo. *Revista Científica, Jaboticabal*, v. 34, n. 2, p. 249-256.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F. (1981). Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v.45, p.1161-1165.
- STONER, L.K. (1979). Physicochemical, site and bi-directional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils. 132f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Purdue University.
- TEN CATEN, A. et al. (2011c) Componentes principais como preditores no mapeamento digital de classes de solos. *Ciência Rural*, v.41, n.7, p. 1170-1176.
- TEN CATEN, A. et al. Extrapolação das relações solo-paisagem a partir de uma área de referência. *Ciência Rural*, v.41, n.5, p. 812-816, 2011b.

- TESKE, R.; GIASSON, E.; BAGATINI, T. (2015). Comparação de esquemas de amostragem para treinamento de modelos preditores no mapeamento digital de classes de solos. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, vol.39, n.1, pp.14-20. ISSN 0100- 0683. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150344>.
- TRANGMAR, B. B; YOST, R. S.; UEHARA, G. (1985). Application of geostatistical to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*; New York, v.38, n.1, p. 45- 93.
- VALERIANO, M.M.; ROSSETTI, D.F. (2008). Topographic modeling of Marajó Island with SRTM data. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 9, p. 53-63.
- VASQUES, G.M.; DEMATTÊ, J.A.M.; VISCARRA ROSSEL, R.; RAMIREZ LOPEZ, L.; TERRA, F.S. (2014). Soil classification using visible/near-infrared diffuse reflectancespectra from multiple depths. *Geoderma* 223-225, 73-78.
- VICENTE, G. Z.; LIMA, C. G. R.; & MARQUES, S. M. (2018). Variabilidade espacial e temporal do Nitrato e Cloreto no Sistema Aquífero Bauru, estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas*, 32(3), 295–306. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i3.29099>.
- VIDAL-TORRADO, P. et al. (2005). Conceitos e aplicações das relações Pedologia Geomorfologia em regiões tropicais úmidas. *Tópicos Ciência do Solo*, vol. 4.
- VIEIRA, L.C. (1999). Depósitos fluviais da Formação Alter do Chão, Cretáceo-Terciário da Bacia do Amazonas. Trabalho Final de Graduação (TFG), Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 62 p.
- VIEIRA, S.R. (2000). Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do Solo. *Tópicos em Ciência do Solo*, V.1, 1-54.
- VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F.; SIQUEIRA, G.M.; & DUFRANC, G. (2011). Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. *Bragantia*, 70, 185-195.
- VISCARRA ROSSEL, R.A.; BEHRENS, T. (2010). Using data mining to model ant interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma* 18 (1-2), 46-54.
- VITORELLO, I.; GALVÃO, L. S. (1996). Spectral properties of geologic materials in the 400 to 2500 nm range: review for applications to mineral exploration and lithologic mapping. *Photo Interpretation*, Paris, v. 34, n. 2, p. 77- 99.
- WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advances in Soil Science*, New York, v. 3, p. 1-70, 1984.
- ZHANG, G.; LIU, F.; SONG, X. (2017). Recent progress and future prospect of digital soil mapping: A review. *Journal of Integrative Agriculture*, v. 16, n. 12, p. 2871–2885.

## ANEXO – ARTIGO CIENTÍFICO

### COMPROVANTE DE SUBMISSÃO

### SAMES-D-23-00104 - Confirming your submission to Journal of South American Earth Sciences

Journal of South American Earth  
Sciences

25 de fevereiro de 2023 às  
11:33

<em@editorialmanager.com>

Responder a: Journal of South American Earth Sciences

<support@elsevier.com> Para: Deborah Natalie Collyer Monteiro

<deborahncmonteiro@gmail.com>

### **Traditional and spectral soil characterization for attributes kriging in the region of the Anavilhanas National Park, Amazonas.**

Monteiro, D. N. C.<sup>1</sup>; Lima, R. H. C.<sup>1,2</sup>; Poppiel, R. R.<sup>3</sup>; Demattê, J. A. M.<sup>4</sup>; Costa, S. dos S.<sup>2</sup>

- 1 Graduate Program in Geosciences, Federal University of Amazonas, Brazil; [deborahncmonteiro@gmail.com](mailto:deborahncmonteiro@gmail.com)
- 2 Department of Geosciences, Federal University of Amazonas, Brazil; [humbertoclima@ufam.edu.br](mailto:humbertoclima@ufam.edu.br), [solangecosta@ufam.edu.br](mailto:solangecosta@ufam.edu.br)
- 3 Institut of Geoscience, University of Brasília, Brasília 70.910-900, Brazil; [raul.poppiel@unb.br](mailto:raul.poppiel@unb.br)
- 4 Department of Soil Science, Luiz de Queiroz College of Agriculture, University of São Paulo, Brazil; [jamdemat@usp.br](mailto:jamdemat@usp.br)

#### **ABSTRACT:**

Knowledge of soil properties generates data and can assist in land-use planning, conservation, production, and aids in decision-making in ecosystems and in the social area. The Amazon biome is one of the most biodiverse in the World covered by a great geodiversity in a region of difficult access and little infrastructure, which leads to the need for more detailed and updated soil surveys. The present study aimed to evaluate the potential of new geotechnologies as spectroscopy for soil characterization and Geostatistics for attributes mapping in the Anavilhanas National Park (ANP), in the state of Amazonas, northern Brazil. Fifteen locations covering different soils were selected according to a legacy pedological map where 43 soil samples were collected at 20 cm depth interval up to 100 cm depth. These samples were submitted to physical (sand, silt, clay), chemical (silicon, aluminum, iron and titanium), mineralogical and spectral analysis by remote sensing techniques in the region 350-2500 nm of the electromagnetic spectrum. Initially, the data were analyzed using Pearson's coefficient, through which the degree of association between soil properties and relief was observed. Subsequently, the data that showed a certain degree of significance were submitted to descriptive statistical analysis that allowed verifying the presence of trends and the presence of discrepant data. Soil data at 0-20 cm depth were mapped with Ordinary Kriging and a 30 m digital elevation model (DEM) using QGIS 3.16. Optimal models were fitted using the experimental semivariograms and selected by cross-validation. Kriged soil maps were clustered with k-means into pedological units. The attributes sand, silt, clay, Si, Al, Fe and Ti showed spatial dependence. Spectral data showed the presence of kaolinite and iron oxide hydroxides in the soils studied. A map with five pedological units with distinct characteristics was obtained. Geostatistics and spectroscopy assisted in the characterization of soil attributes and mapping of the units via geotechnologies and can support other initiatives in regions of difficult access and lack of data.

**Keywords:** 1. Digital Mapping 2. Geostatistics 3. Spectroscopy, Environment, Geotechnologies

## **1. Introduction**

Brazil is recognized for its advances in soil knowledge and agricultural management systems, but still lacks information on the properties and distribution of soil at a more detailed level. It is thus necessary to understand the soil-landscape relationships in each Brazilian biome by incorporating solid multidisciplinary training such as soil mapping and pedometrics for soil scientists and pedologists (Demattê et al.; 2022).

Traditional soil surveys in Brazil have covered almost the entire country, and these mostly involve small-scale mapping, with the exception of the Amazon region, which is poorly covered by soil surveys (Mendonça-Santos e Santos, 2006). The lack of detailed pedological information in the Amazon can be explained by the fact that it is a region with some of the greatest geodiversity and biodiversity on the planet. Performing pedological mapping in this type of place is not an easy task, mainly due to the complexity of ecosystems, dense vegetation, extensive territorial area, difficulty of access, seasonal water levels of rivers, and lack of specialists in soil science. These factors added to the logistics in the Amazon, which most of the time is via waterways, increase the costs of projects, thus making research in this region difficult.

The most widely recognized and available information on soils in the study area was carried out in the 1970s through the RADAMBRASIL Project (IBGE, 2018). Pedological mapping uses traditional techniques, such as soil analysis in traditional laboratories, but cannot meet the demand for soil data in the Amazon due to the factors already mentioned. In light of the foregoing, there is a need to use technologies that assist in this problem by facilitating data acquisition at low cost and reducing time spent.

This study proposes the use of geotechnologies for pedological characterization, such as digital mapping of soils through geostatistics and spectroscopy via proximal sensing. The use of these techniques in the Amazon region is scarce, so the use of these two technologies was intended to add to the knowledge of soils in the Anavilhanas National Park and surroundings, in the state of Amazonas.

Digital soil mapping (DSM) has emerged as an alternative to facilitate soil surveying, increasing its feasibility and facilitating its interpretation through the use of



information directly linked to the relief, along with digital elevation models (DEM), which in turn are important sources for predictive variables for MDS (Hofig et al.; 2014). Geostatistics associated with DSM becomes an important tool in the characterization and mapping of soil attributes because it aims to measure the properties of soils and considers the spatial location of the phenomenon under study in large areas with scarce data (Kumar et al.; 2012). For some decades, the mapping of soil attributes with the aid of kriging (Odeh et al.; 1995; Walter et al.; 2001) has been known to be useful since it seeks to predict values in places where information was not collected through data interpolation and can help in pedological mapping. Geospatial soil information is critical for agricultural policy formulation and decision making, analysis of land-use suitability, sustainable soil management, environmental assessment, and other research topics that are vitally important to agriculture and the economy (Poppiel et al.; 2016). While digital soil mapping using geostatistics seeks spatialization, soil reflectance spectroscopy focuses on extracting information from soil samples, similar to what is performed in a traditional laboratory. Studies that use reflectance spectroscopy as a technique to obtain data for predicting soil properties have grown significantly in the last decade and have achieved good results. These studies are related to the reduction of sampling costs, as well as the reduction of time dedicated to field and laboratory activities (Kweon et al.; 2008; Genú et al.; 2013; Demattê e Silva Terra, 2014; Vasques et al.; 2014; Demattê et al.; 2014; Ramaroson et al.; 2018; Costa, 2020; Demattê et al.; 2020, Coblinski, 2021).

The Anavilhanas National Park (ANP), located in the municipalities of Manaus and Novo Airão (Amazonas state), is an integral conservation unit (CU). That was created with the objective of preserving the Anavilhanas River archipelago and producing knowledge through scientific research with actions aimed at the sustainable development of riverine communities of the Negro River that border the park. It is worth noting that the CU's management plan does not include information on soils on a scale compatible with its needs, as there is a lack of more detailed information on the spatial variability of the physicochemical properties, relief, mineralogy and spectral data of the constituent soils of the park, despite the encouragement of research over the last 10 years in the state of Amazonas.

Therefore, the objective of the research was to evaluate the potential of the use

of spectroscopy for soil characterization and the use of geostatistics for the digital mapping of soils in the area of Anavilhanas National Park and its surroundings. It is expected that the strategy used in the research will be able to contribute, at the survey level, to decision-making regarding environmental monitoring of the ANP and its surroundings.

## **2. Materials and Methods**

### **2.1 Context of the study area**

The study was developed in the Anavilhanas National Park (ANP) and its surrounding communities, in an area of 425.000 ha. The ANP is located in the basin of the Negro River, which is one of the largest tributaries of the Amazon River. In this region, the climate is tropical humid with an average rainfall greater than 2,000 mm/year, which is typical of tropical forests where temperature and precipitation have low annual variation. The region is also characterized by constantly high humidity, with annual averages being between 85 and 95% (Alves, 2013). The predominant vegetation cover is dense forest, though the park has river and lake ecosystems with more than 400 islands and is considered the second largest archipelago in the world. The area has two distinct geomorphological units: the Uatumã-Jari Plateau and the Amazonian Plain with an altitude of between 30 and 150 m (IBGE, 2010).

The area is part of the Amazon basin, limited to the north by the Guiana shield and to the south by the Brazilian shield (Caputo, 1984), the main geological units being represented by the Alter do Chão formation and the Quaternary sedimentary deposits of the Negro River (Horbe et al.; 2001; Riker, 2008; Abinader, 2008; Barbosa, 2015; Soares, 2016).

The Alter do Chão formation presents sandstones and pelites with intense red coloration that include kaolinitic feldspathic arenites, quartz-sandstones and intercalations of claystone, siltstone and conglomerates (Cunha et al.; 1994; Kistler, 1954). The lithology of the Novo Remanso formation consists of layers of coarse ferruginous sandstones and fine and medium sandstones, moderately selected with tabular cross-stratification, and sandstones with massive bedding can also occur (Roza

et al.; 2005). The Quaternary deposits are made up of sandy and clayey sediments and basically comprise the modern layers and alluvial deposits along the river system of the region (Silva, 2005).

Lateritic layers, developed in a tropical climate environment during the Cenozoic era are also described in the region. The presence of younger laterites is marked by a ferro- alumino-clayey horizon that is little evolved, shallower and devoid of a bauxite horizon identified in topographically lower areas (Costa, 1991).

The region presents two types of geo-environments, with very distinct geological, pedological, geomorphological and phytosociological characteristics: the floodplains, which are the lands alongside the rivers that periodically flood and the *terra firme*, which represents the terrain where there is no flooding.

In the floodplains, hydromorphic soils, such as gleysols, and the young sandy soils occur (ICMBio, 2017), which were formed from the deposition of sediments in the Quaternary period. In areas outside the ANP, the soil is poorer mainly due to the loss of organic matter because of felling and burning of trees and the introduction of annual crops and pastures (Alves, 2013).

On the other hand, in the *terra firme*, more evolved soils such as latosols and Acrisols predominate (ICMBio, 2017), which are formed from sediments or rocks in the Paleogene and Neogene periods. These soils are generally covered by a dense forest and have good physical characteristics and low natural chemical fertility, as they are quite weathered and leached soils (Sioli, 1991).

## 2.2 Collection of soil samples

The fieldwork consisted of visits to the research area for collection of georeferenced samples during the ebb of the Negro River, which is the most favorable period for the sampling of soil and sediments in areas of river banks and streams, in other periods the formations are flooded. The field expedition was carried out almost entirely by river using speedboats, one of the only means of access to the formations and the riverine communities.

The samples were collected at 15 points that have the occurrence of different types of soils (Figure 1), which were selected based on the 1:50.000 pedological map that is part of the management plan of the Anavilhanas National Park (ICMBio, 2017).

The sampling was carried out in the subsurface up to a depth of 1 meter and in outcrops on the surface and totaled 43 samples. In the subsurface sampling, a manual auger was used and, the sampled materials were collected each 20 cm of depth and placed on a tarpaulin to avoid contact with the surface soil of the site. In wall-type outcrops, the procedures were to measure and describe, in detail, each horizon, by means of visual tactile action with identification of the top and base of the entire rock face.

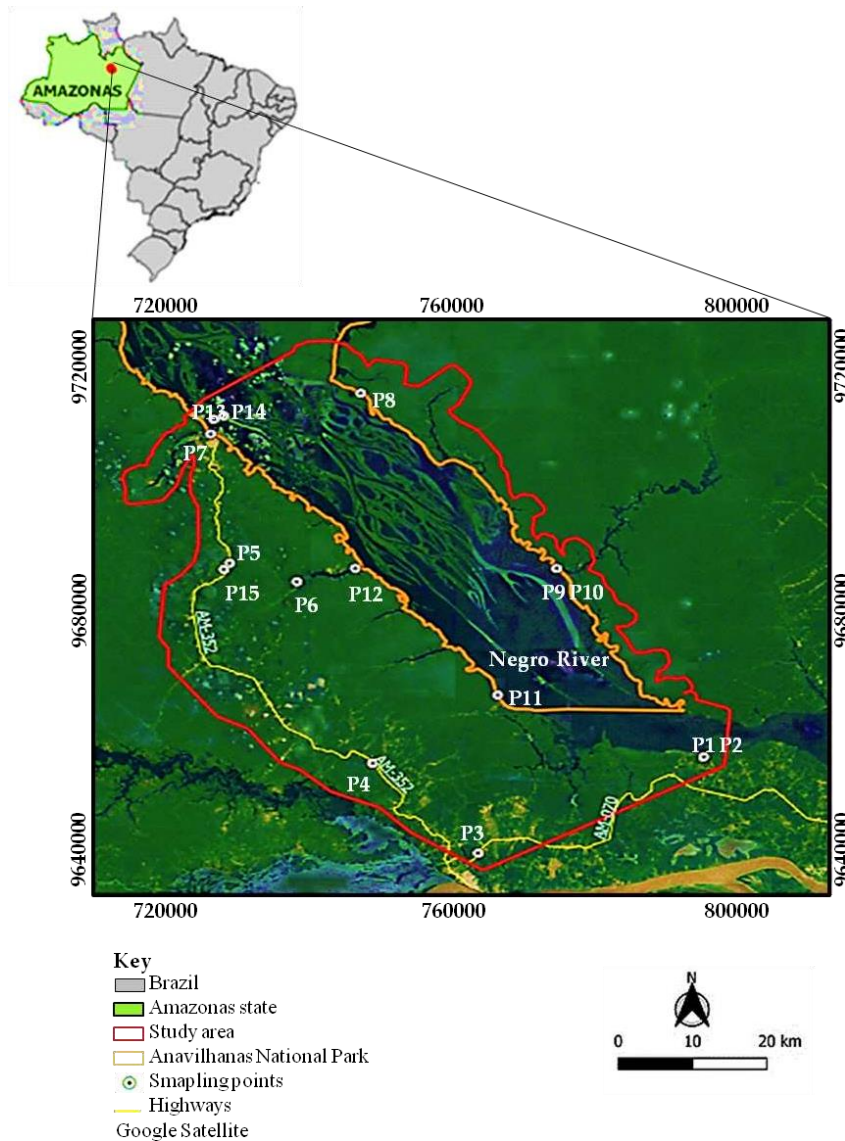


Figure 1: Map of the study area and sampling locations, Anavilhanas National Park and surroundings -Amazonas.

### 2.3 Laboratory analyses

All samples were dried at room temperature and ground subsequently, the samples were divided into four equal parts and sieved through a 2 mm mesh to obtain air-dried fine soil (ADFS). Aliquots were separated for physicochemical, mineralogical, and spectral analyses as described below.

The physical attributes evaluated were the contents of sand, silt, clay, which were determined via granulometric analysis by total dispersion, using the pipette method according to Manual of Soil Analysis Methods (EMBRAPA, 1997). The textural class followed the Brazilian Soil Classification System (EMBRAPA, 2006). These analyses were carried out in the Soil Laboratory of the Faculty of Agricultural Sciences at the Federal University of Amazonas (UFAM).

The chemical attributes correspond to the contents of silicon (Si), aluminum (Al), iron (Fe) and titanium (Ti) analyzed using X-ray fluorescence spectroscopy by the Soil Science Geotechnologies Group at the University of São Paulo (GeoCis, ESALQ/USP).

Mineralogical identification was performed using X-ray diffractometry (XRD) in total samples, via the powder method according to the standards of the ICDD database-PDF (International Center for Diffraction Data – Powder Diffraction File), performed at the Mineral Analysis laboratory (LAMIN) of the Geological Service of Brazil (CPRM), Manaus. An X-ray diffractometer (X'PERT PRO MPD, Panalytical), was used with the total samples.

### 2.4 Spectroscopic analyses

In the spectral analysis of soils in the Vis-NIR-SWIR regions (350 to 2500 nm), we sought to evaluate the prediction of particle size fractions and identify the mineralogical composition of the soil, according to MIRS (morphological interpretation of the reflectance spectrum (Demattê e Terra, 2014).

Aliquots of 50 g of soil were used in the spectral analysis, the samples were placed in Petri dishes and scanned using a spectroradiometer (FieldSpec Pro, Malvern Panalytical), which has a spectral resolution of 1 nm for wavelengths of 350 to 1100 nm and 2 nm for wavelengths from 1100 to 2500 nm. The reflectance of each sample

was given by the average of three sensor readings. The light collector has been placed in an upright position 8 cm from the sample. The light source was a 50 W halogen lamp. As a reference standard, a Spectralon® white plate was used and considered the standard for 100% reflectance. The spectral reflectance graphs were prepared using Excel® software. The spectral analyses were performed in the laboratory of the Department of Soil Sciences, GeoCis ESALQ/USP.

## 2.5 Acquisition of covariates

Geomorphometric parameters are considered a crucial factor in soil formation, since they are responsible for the control of all dynamics of the flow of water in the landscape, the potential for erosion/deposition and land use capacity (Gallant e Wilson, 2000; Chagas, 2013). The values of the relief attributes were extracted from the digital elevation model (DEM) with 30 m resolution, thus acquiring a set of covariates (Poppiel et al.; 2020). These covariates were prepared using the remote sensing database within the Google Earth Engine (Safanelli et al.; 2020), and were derived from the following terrain attributes: aspect, elevation, curvatures, hillshade, slope, shape index, and north and east slope orientations (Table 1).

The results of the relief attributes derived from the SMD were obtained by the Soil Science Geotechnologies group (GeoCis, ESALQ/USP).

| <b>Attribute/Unit</b> | <b>Unit</b>   | <b>Description</b>                             |
|-----------------------|---------------|--|
| Elevation             | (m)           | Height of the land above sea level             |
| Slope                 | (%)           | Slope gradient                                 |
| Aspect                | (%)           | Compass direction                              |
| Hillshade             | dimensionless | Lightness or darkness of the terrain           |
| Northness             | dimensionless | Degree of orientation to the north             |
| Eastness              | dimensionless | Degree of orientation to the east              |
| Shape index           | dimensionless | Continuous form of the Gaussian classification |
| Horizontal curvature  | (m)           | Curvature tangent to contour line              |
| Vertical curvature    | (m)           | Curvature tangent to the slope line            |
| Mean curvature        | (m)           | Half sum of the two orthogonal curvatures      |
| Minimum curvature     | (m)           | Lowest curvature value                         |
| Maximum curvature     | (m)           | Highest curvature value                        |
| Gaussian curvature    | (m)           | Sum of maximum and minimum curvature           |

Table 1: Geomorphometric attributes extracted from the DEM of the study area.

The attributes of the relief obtained from the DEM and used in the evaluation of soils are elevation, slope, shaded relief, vertical and horizontal curvatures. The other parameters were not so explicit. The slope is defined as the angle of inclination (zenith) of the terrain surface relative to the horizontal with values ranging from 0° to 90°, although it is most expressed as a percentage, from zero to infinity.

## 2.6 Statistical and geostatistical analyses

The physicochemical attributes and covariates of the relief were analyzed using Pearson's coefficient to determine the degree of linear correlation between the data, in which those with a correlation coefficient value equal to or greater than 0.40 were selected for descriptive statistical analysis by calculating the mean, median, standard deviation, variance, asymmetry coefficient and kurtosis coefficient.

The hypothesis of normality of the data was tested via the Anderson-Darling test. Data that did not follow a normal distribution were transformed using Johnson transformation in the Minitab Statistical software. With the normalized data, a preliminary analysis of spatial autocorrelation was performed, for which the Global Moran's index was used. This index provided a single value as a measurement of spatial association for the entire data set.

Moran's index provides a general measure of the spatial association existing in the dataset, whose value ranges from -1 to 1 (Almeida, 2012). Values close to zero are related to the absence of spatial autocorrelation, positive values indicate positive correlation and negative values negative autocorrelation.

Next, the semivariogram modeling was elaborated considering the lowest values of  $R^2$  (coefficient of determination of the model) and the RMSE (root mean square error) in the choice of the model. Spatial dependence analysis was performed by adjusting the data to the experimental semivariogram model, according to the theory of regionalized variables, thus determining the coefficients of nugget effect ( $C_0$ ), variance ( $C$ ), level ( $C_0 + C$ ) and range ( $A$ ), which was performed using the Smart-Map plugin in the QGIS software.

The distance from which the value of the semivariance becomes constant is

called the range of spatial dependence (A). The adjusted semivariograms were used to estimate the values in unsampled locations (Goovaerts, 1997), by using kriging interpolation.

Kriging uses the spatial dependence between neighboring samples, expressed in the semivariogram, to estimate values at any position within the field, without trend and with minimal variance (Vieira, 2000). Ordinary kriging is one of the most used techniques among geostatistical methods, especially when it comes to studies involving environmental variables (Schloeder et al.; 2001; Landim et al.; 2006; Lima et al.; 2014, Da Silva et al.; 2021). Ordinary kriging uses the moving average of a linear estimator, with minimum variance for interpolation of the measured attribute in unsampled positions (Felgueiras et al.; 2002; Silva, et al.; 2011).

## 2.7 Cluster analysis of pedological units

The map of pedologically homogeneous units was constructed based on the predicted maps of relief and physicochemical attributes, using map algebra in the QGIS 3.16 software. The pedologically homogeneous units were delimited using the elbow method and the k-means grouping, based on their textural, chemical and covariate characteristics of the relief in QGIS 3.16. The spectral and mineralogical data were also visually observed to assist in the delimitation of the units.

## 3. Results and Discussion

The soils found in the region of Anavilhanas National Park and surroundings correspond to latosols, plinthosols, Acrisols, Spodosols and Gleysols, according to the management plan of the Anavilhanas National Park (ICMBio, 2017). In the pedological characterization, the results were similar to the data of the RADAMBRASIL project, which was carried out in the 1970s, but disagreed when classified as a latosol in areas of river banks and streams and, in this research, on a scale of greater detail, the soil was defined as recent sediment belonging to Quaternary sedimentary deposits, which is in agreement with previous works (Silva, 2005).

The soils found in the research area were classified according to the proposal and the soil classification parameters of SiBCS (EMBRAPA, 2006). Thus, the



profiles found were classified as: Latosol in P1, P2, P3 and P10, Plinthosol in P11, Gleysol in P14 and Spodosol P4, P5, P6 and P15, Quaternary sedimentary deposits in P7, P9 and P13. According to IBGE (2010), the representative sample points of the Uatumã-Jari Plateau geomorphological unit (*terra firme*) are P3, P4, P8, P10 and P15. In the Amazonian Plain (floodplains and banks of the Negro River), the sampling points are identified as P1, P2, P5, P6, P7, P9, P11, P12, P13 and P14. Table 2 shows the set of results of the granulometric, chemical and mineralogical analyses, and the classification of the soils in the region (textural class) is presented according to SiBCS (EMBRAPA, 2006).

The granulometric analysis allowed us to identify the textural classes of sandy, medium and clayey. The textural classes were correlated with the soil types of the region and their position in the relief. The sandy texture, predominantly quartzose, has low contents of silt and clay. The sandy soils are located predominantly in the flat relief in the western portion of the study area and on the banks of rivers and streams. Sand contents tend to be higher at elevations above 35 m, when compared to the others, probably due to the influence of the geological substrate, since the slope and topographic factor are not expressive to the point of transporting fine particles from the highest parts. In this region of the research area, these soils correspond to spodosols, and young soils deposited in the Holocene. While the samples with a clayey texture are found in areas of flat to gently undulating relief, which predominates in the southeastern portion of the study area, where there is greater water infiltration and conditions that facilitate the dissolution of iron oxides in low-lying areas, in these areas the latosols are found. On the other hand, in areas of floodplains, river terraces and islands of the archipelago, the finest fractions (silt and clay) predominate, and are of a medium texture that corresponds to hydromorphic soils, gleysols and plinthosols, which are located in central areas of the study area.

According to the literature, layers of petroplinthite in the slope areas occur possibly due to the more pronounced drainage, which results in less infiltration and a lower moisture content in the slope profiles. The analysis of the chemical elements Si, Fe, Al and Ti were selected for this study because they are the elements with the highest levels in the samples, with the exception of titanium, which is selected

because it is an indicator of weathering processes in the Amazon region. Higher silica contents were detected at points P4, P5, P6, P7, P10, P13 and P15, which correspond to spodosols and Holocene deposit zones, while the element iron was more expressive at points P3, P7, P9, P10 and P11. Aluminum ranged from 0.0 to 15.5% in the samples, while titanium showed higher levels (around 1.0%) at points P1, P3 and P7.

Mineralogically, *terra firme* soils are composed of kaolinite, quartz, gibbsite, hematite, and are associated with well-drained zones developed in older sediments. In the floodplain, where the most recent depositions occur, where there are periods of seasonal flooding, mineralogical diversity, composed of quartz, kaolinite, illite, gibbsite, rutile and potassium feldspar, was identified. The mineral phase referring to hematite was identified, at higher levels, at points P3, P10, P11 and P12, and corresponds to latosols and plinthosols. At these points, it was possible to identify fragments of ferruginous crusts. The occurrence of hematite is probably associated with the possible genesis of Amazonian latosols, which, according to several authors (Irion, 1978 e 1984; Lucas et al.; 1989; Costa, 1991; Horbe e Costa, 1997) were formed by the destruction of lateritic ferruginous crusts formed in drier periods. At point P10, low levels of magnetite were also identified.

| Points | Depth (m) | Granulometry <sup>1</sup> (%) |      |      | Textural class <sup>1</sup><br>SiBCS | Chemical composition <sup>2</sup> (%) |      |     |      | Mineral phases <sup>3</sup><br>ICDD-PDF |
|--------|-----------|-------------------------------|------|------|--------------------------------------|---------------------------------------|------|-----|------|---|
|        |           | Sand                          | Silt | Clay |                                      | Al                                    | Si   | Ti  | Fe   |   |
| P1-1   | 0.0 - 0.2 | 36.9                          | 15.2 | 47.8 | Clayey                               | 11.5                                  | 10.6 | 0.8 | 6.2  | qz, k, gb                               |
| P1-2   | 0.4 - 0.6 | 35.3                          | 16.3 | 48.4 |                                      | 11.5                                  | 10.3 | 0.9 | 6.8  |   |
| P2-1   | 0.0 - 0.2 | 67.2                          | 6.2  | 26.5 |                                      | 10.5                                  | 16.6 | 0.5 | 1.4  |   |
| P2-2   | 2.0 - 2.2 | 66.0                          | 4.8  | 29.2 | Medium                               | 14.3                                  | 14.3 | 0.4 | 2.6  | qz,<br>k, ru                            |
| P2-3   | 2.6 - 2.7 | 59.7                          | 6.6  | 33.5 | 12.3                                 | 19.8                                  | 0.3  | 1.2 |      |   |
| P3-1   | 0.0 - 0.2 | 37.0                          | 14.5 | 48.3 | Clayey                               | 11.1                                  | 9.9  | 1.5 | 11.0 | qz, k, he                               |
| P3-2   | 2.0 - 2.5 | 31.0                          | 12.0 | 57.0 |                                      | 13.1                                  | 9.1  | 1.6 | 7.8  |   |
| P3-3   | 3.0 - 3.5 | 20.4                          | 22.3 | 57.2 |                                      | 7.9                                   | 5.9  | 0.5 | 38.0 |   |
| P4-1   | 0.0 - 0.2 | 96.6                          | 1.3  | 2.0  | Sand                                 | 0.0                                   | 29.6 | 0.0 | 0.1  | qz                                      |
| P4-2   | 2.0 - 3.0 | 98.0                          | 0.5  | 1.5  |                                      | 0.0                                   | 30.4 | 0.1 | 0.1  |   |
| P5-1   | 0.0 - 0.2 | 94.8                          | 1.9  | 3.1  | Sand                                 | 0.0                                   | 29.5 | 0.3 | 0.1  | qz, k                                   |
| P5-2   | 0.2 - 0.4 | 96.8                          | 2.2  | 1.0  |                                      | 0.0                                   | 29.1 | 0.1 | 0.2  |   |
| P5-3   | 0.4 - 0.6 | 96.0                          | 1.9  | 1.9  |                                      | 0.0                                   | 28.8 | 0.3 | 0.1  |   |

|       |           |      |      |      |        |      |      |     |     |                           |
|-------|-----------|------|------|------|--------|------|------|-----|-----|---------------------------|
| P5-4  | 1.5 - 1.8 | 85.3 | 4.0  | 10.6 |        | 0.0  | 29.9 | 0.1 | 0.4 |                           |
| P6-1  | 0.0 - 0.2 | 92.0 | 1.4  | 5.4  |        | 2.2  | 25.5 | 0.3 | 0.2 |                           |
| P6-2  | 0.2 - 0.4 | 89.5 | 2.5  | 8.0  |        | 4.0  | 23.0 | 0.4 | 0.1 |                           |
| P6-3  | 0.4 - 0.6 | 73.3 | 5.8  | 20.7 | Sand   | 6.0  | 21.8 | 0.6 | 0.4 | qz, k, gb                 |
| P6-4  | 0.6 - 0.8 | 77.2 | 5.3  | 17.3 |        | 8.6  | 19.3 | 0.7 | 0.3 |                           |
| P6-5  | 0.8 - 1.0 | 90.5 | 1.9  | 7.5  |        | 2.0  | 27.0 | 0.3 | 0.2 |                           |
| P7-1  | 0.0 - 0.2 | 86.3 | 3.4  | 10.1 |        | 2.8  | 25.2 | 0.2 | 1.7 |                           |
| P7-2  | 0.4 - 0.6 | 73.1 | 4.8  | 21.9 | Sand   | 4.6  | 19.4 | 1.1 | 4.9 | qz, k, gb                 |
| P7-3  | 0.8 - 1.0 | 86.0 | 2.0  | 12.0 |        | 8.6  | 13.9 | 0.6 | 6.1 |                           |
| P8-1  | 0.0 - 0.2 | 52.7 | 7.7  | 39.4 |        | 13.5 | 12.3 | 0.8 | 2.6 |                           |
| P8-2  | 0.4 - 0.6 | 45.1 | 8.7  | 46.0 | Clayey | 15.5 | 13.0 | 0.9 | 3.2 | qz, k, gb                 |
| P8-3  | 0.8 - 1.0 | 38.1 | 7.1  | 54.8 |        | 15.4 | 13.0 | 0.9 | 3.2 |                           |
| P9-1  | 0.0 - 0.2 | 77.4 | 3.8  | 18.8 | Medium | 11.5 | 13.4 | 0.1 | 5.5 | qz, k, go                 |
| P9-2  | 1.0 - 1.2 | 74.8 | 3.4  | 21.7 |        | 14.5 | 17.7 | 0.1 | 1.4 |                           |
| P10-1 | 0.0 - 0.2 | 85.3 | 3.9  | 10.7 |        | 1.3  | 21.5 | 0.4 | 6.5 |                           |
| P10-2 | 0.4 - 0.6 | 94.0 | 1.0  | 5.0  | Sand   | 1.9  | 26.2 | 0.1 | 1.3 | qz, k, mg                 |
| P10-3 | 0.8 - 1.0 | 89.3 | 1.7  | 8.8  |        | 6.7  | 24.1 | 0.3 | 0.5 |                           |
| P11-1 | 0.0 - 1.0 | 38.1 | 14.8 | 47.0 |        | 10.8 | 11.6 | 0.5 | 8.4 |                           |
| P11-2 | 1.0 - 1.5 | 16.5 | 31.7 | 51.8 | Clayey | 10.9 | 12.4 | 0.4 | 7.6 | qz, k, he                 |
| P11-3 | 1.5 - 4.0 | 28.5 | 12.9 | 58.4 |        | 16.6 | 12.3 | 0.7 | 4.5 |                           |
| P11-4 | 4.0 - 6.0 | 30.3 | 11.5 | 58.1 |        | 16.8 | 12.5 | 1.1 | 1.4 |                           |
| P12-1 | 0.0 - 0.5 | 74.0 | 4.0  | 21.9 | Medium | 8.9  | 21.2 | 0.4 | 0.8 | qz, k, gb,<br>he          |
| P12-2 | 2.0 - 4.0 | 73.0 | 1.0  | 6.0  |        | 7.5  | 19.8 | 0.1 | 3.3 |                           |
| P13-1 | 0.0 - 0.2 | 94.4 | 2.0  | 3.5  | Sand   | 0.5  | 27.7 | 0.1 | 0.3 | qz, k, ru,<br>fkp         |
| P13-2 | 0.4 - 0.6 | 98.0 | 0.5  | 1.5  |        | 0.0  | 28.4 | 0.2 | 0.4 |                           |
| P14-1 | 0.0 - 0.2 | 45.8 | 10.8 | 43.2 | Medium | 10.9 | 16.8 | 0.5 | 2.2 | qz, k, il,<br>gb, ru, fkp |
| P15-1 | 0.0 - 0.2 | 87.9 | 3.1  | 9.7  |        | 0.0  | 27.0 | 0.0 | 0.1 |                           |
| P15-2 | 0.4 - 0.6 | 98.0 | 0.5  | 1.5  | Sand   | 0.0  | 28.9 | 0.0 | 0.1 | qz, k                     |
| P15-3 | 0.8 - 1.0 | 93.9 | 2.1  | 3.9  |        | 0.0  | 29.9 | 0.0 | 0.1 |                           |

Table 2: Physicochemical and mineralogical analysis of samples from the study area. <sup>1</sup> - Analyses performed in a traditional laboratory; <sup>2</sup> - analyses performed using X-ray fluorescence; <sup>3</sup> - analyses performed using X-ray diffraction. qz - quartz, k - kaolinite, gb - gibbsite, ru - rutile, he - hematite, go - goethite, il - illite, mg - magnetite, fkp - potassium feldspar).

### 3.1 Description of the spectral curves of the studied soils

Figure 2 shows the spectral curves elaborated for 15 points that were separated into 3 textural classes: sandy, clayey and medium. Spectral curves of samples with a sandy texture with more than 85% quartz can be observed in Figure 2A. These have an intensity that does not exceed 0.6% reflectance. They present curves with rising

aspect up to 700 nm, typical of a sandy texture, since quartz tends to reflect electromagnetic energy and, from 700 to 2500 nm, it has a flat shape that may be associated with the presence of organic matter. These spectral curves resemble the curves of the Quartzarenic Neosols described by Souza Junior et al.; (2008); however, the spectral curves were correlated with the Amazonian spodosols according to the classification of EMBRAPA (2006). While the spectral curves of samples with sand content lower than 85% show spectral curves with ascending, flat and descending shapes. This variation in shapes is certainly related to the lower quartz content. It was also possible to observe other constituent minerals that have characteristic curves of iron oxides and hydroxides (hematite and goethite), in the concave and convex features in the spectral region from 420 to 950 nm. However, at 2200 nm, kaolinite was identified and was characterized by a step or shoulder on the left side of the absorption zone of this clay mineral (Figure 2B). These spectral curves are representative of the young soils deposited during the Quaternary period. Figure 2C comprises samples with a clayey texture, with intensity around 0.6, and albedos with an ascending and descending slope, presenting discrete characteristic features of hematite and goethite in the region of 420 to 950 nm, and kaolinite at 2200 nm, which were correlated to latosols. While Figure 2D also shows a clayey texture, but with higher Fe contents, and it was possible to observe more pronounced absorptions of goethite in the region of 480 nm and hematite at 650 nm. It was considered that the concave shape in the region from 750 to 1150 nm were related to both hematite and goethite. These were correlated to plinthosols and latosols with the presence of ferruginous concretions and are in accordance with the studies by Dalmolin (2002).

Samples with a medium texture are exemplified in Figure 4E-F. In this figure, a reflectance intensity in the range of 0.7 is shown, which is different from the clayey samples that have a lower intensity; the other characteristics were similar to the clay samples with low iron content. The spectral curves are shown in ascending and descending form also with characteristic absorptions of hematite, goethite, kaolinite. These spectral curves correlate with the latosols, with the exception of the P-14 sample that corresponds to the gleysol, which has a rising curve up to 1850 nm and then a downward curve up to 2500 nm. The absence of absorptions of iron oxides and hydroxides is observed, which is characteristic of gleysols according to the

EMBRAPA classification (2006).

All observations of the spectral curves are in accordance with the studies that have been developed in recent years via reflectance spectroscopy in soils. It was possible to compare the spectral data with the results of traditional soil analysis such as granulometry and mineralogy by XRD, for which spectroscopy proved to be an important tool in this identification.

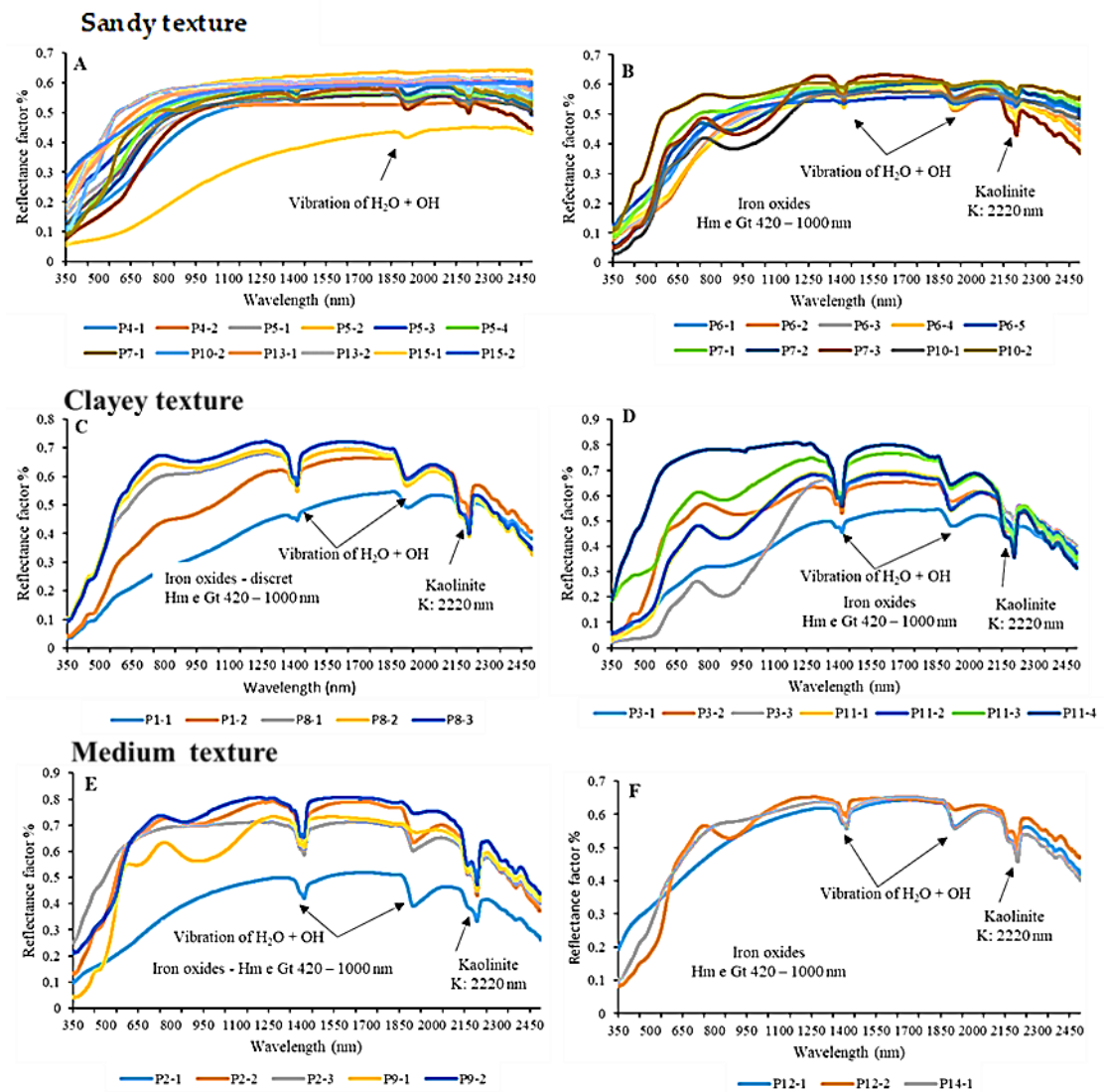


Figure 2: Spectral curves (350-2,500 nm) of the soils of the study area. A and B – Spectral curves of soils with sandy textures, C and D – Spectral curves of soils with clayey textures, E and F – Spectral curves of soils with a medium texture, Hm – Hematite, Gt - Goethite.

### 3.2 Statistical and geostatistical analyses

The statistical analysis of the data was performed in three steps. The first

phase consisted of the analysis of the correlation between the data, while in the second phase, the classical statistical analysis was carried out. In the third phase, such geostatistical methods as kriging.

The soil attributes and the covariates of the relief (hillshade, shape index, slope, vertical curvature) present significant positive and negative correlations, the results demonstrate an important contribution of these covariable with the spatial distribution of the granulometric fractions, this is due to the great influence of the relief in the process of soil formation according to Walton et al.; 2000.

To verify whether there was a correlation between the physicochemical attributes and the covariates of the relief, the Pearson correlation coefficient was calculated, and a moderate to low correlation was observed (Table 3).

| Pearson correlation  | Sand         | silt        | Clay         | Si           | Al           | Fe           | Ti           |
|----------------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| levation             | -0.07        | 0.16        | 0.05         | 0.06         | -0.21        | 0.18         | 0.21         |
| levation             | 0.27         | 0.33        | -0.25        | 0.07         | -0.01        | -0.04        | -0.12        |
| hillshade            | <b>0.55</b>  | <b>0.63</b> | <b>-0.53</b> | <b>0.49</b>  | <b>-0.39</b> | <b>-0.44</b> | <b>-0.19</b> |
| thickness            | 0.12         | 0.26        | -0.08        | -0.04        | 0.14         | -0.1         | -0.13        |
| thickness            | -0.28        | 0.33        | 0.27         | -0.01        | 0.03         | -0.03        | 0.05         |
| shape index          | <b>-0.50</b> | <b>0.57</b> | <b>0.48</b>  | <b>-0.44</b> | <b>0.34</b>  | <b>0.37</b>  | <b>0.40</b>  |
| slope                | <b>-0.54</b> | <b>0.59</b> | <b>0.52</b>  | <b>0.50</b>  | <b>0.42</b>  | <b>0.47</b>  | <b>0.14</b>  |
| Gaussian curvature   | -0.2         | 0.22        | 0.19         | -0.18        | 0.15         | 0.09         | 0.22         |
| horizontal curvature | 0.02         | 0.08        | -0.04        | 0.08         | -0.16        | 0.12         | -0.15        |
| vertical curvature   | <b>-0.63</b> | <b>0.66</b> | <b>0.61</b>  | <b>-0.48</b> | <b>0.41</b>  | <b>0.33</b>  | <b>0.68</b>  |
| maximum curvature    | -0.33        | 0.39        | 0.31         | -0.25        | 0.19         | 0.21         | 0.21         |
| mean curvature       | -0.49        | 0.57        | 0.47         | -0.35        | 0.25         | 0.32         | 0.47         |
| minimum curvature    | -0.52        | 0.59        | 0.49         | -0.35        | 0.25         | 0.35         | 0.57         |

Table 3: Pearson correlation matrix for soil attributes of the study area and relief covariates.

The statistical analysis of the data was performed in three steps. The first phase consisted of the analysis of the correlation between the data, while in the second phase, the classical statistical analysis was carried out. In the third phase, such geostatistical methods as kriging.

The classical statistical analysis aimed at characterizing the form of distribution of the data of interest, and the most common theoretical model of probability distribution is the normal distribution. For this, the basic estimators calculated for a normal distribution were mean, median, standard deviation, variance, asymmetry, kurtosis and the normality test (Table 4).

It was observed that the mean and median values have close values, thus

characterizing normal distribution of the data. It is worth noting that these values have already been transformed to follow the normal distribution. Values with negative kurtosis have platykurtic frequency, except for Ti which has positive kurtosis and leptokurtic frequency. Asymmetry data indicated that the median was higher than the mean, which shows a tendency towards the concentration of values higher than the mean, and indicates greater variability, and which was confirmed by the Anderson-Darling test, at 5% probability (\*) (p-value). Below are the graphs with the normal distributions and the results of the statistical analysis, for subsequent kriging (Figures 3 and 4).

| <b>Descriptive Statistics</b> | <b>Mean</b> | <b>Median</b> | <b>Standard Deviation</b> | <b>Variance</b> | <b>Asymmetry</b> | <b>Kurtosis</b> | <b>p-value (*)</b> |
|-------------------------------|-------------|---------------|---------------------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------------|
| Sand                          | 0.07        | 0.13          | 1.08                      | 1.18            | 0.13             | -0.33           | 0.82               |
| Silt                          | 4.38        | 4.60          | 0.83                      | 0.7             | -0.18            | -1.62           | 0.13               |
| Clay                          | -0.09       | -0.16         | 1.08                      | 1.16            | -0.008           | -0.28           | 0.90               |
| Si                            | 19.9        | 21.2          | 7.26                      | 52.73           | -0.03            | -1.67           | 0.14               |
| Al                            | -0.09       | 0.37          | 1.10                      | 1.21            | -0.37            | -0.46           | 0.05               |
| Fe                            | 0.07        | 0.05          | 0.93                      | 0.87            | 0.27             | -1.02           | 0.44               |
| Ti                            | 0.42        | 0.40          | 0.38                      | 0.15            | 1.55             | 3.29            | 0.07               |
| Elevation                     | -0.08       | -0.11         | 1.01                      | 1.03            | -0.33            | -0.3            | 0.46               |
| Hillshade                     | 0.03        | -0.14         | 0.98                      | 0.97            | -0.08            | -0.26           | 0.90               |
| Shape index                   | 0.04        | 0.08          | 1.11                      | 1.23            | -0.07            | 0.25            | 0.97               |
| Slope                         | 33,598      | 32,359        | 15,496                    | 2,401           | 0.53             | -0.61           | 0.39               |
| C Vertical                    | -291,753    | -311,165      | 247,587                   | 6129            | 1.26             | 1.89            | 0.12               |

Table 4: Results of statistical analysis of the attributes of interest of the studied area.

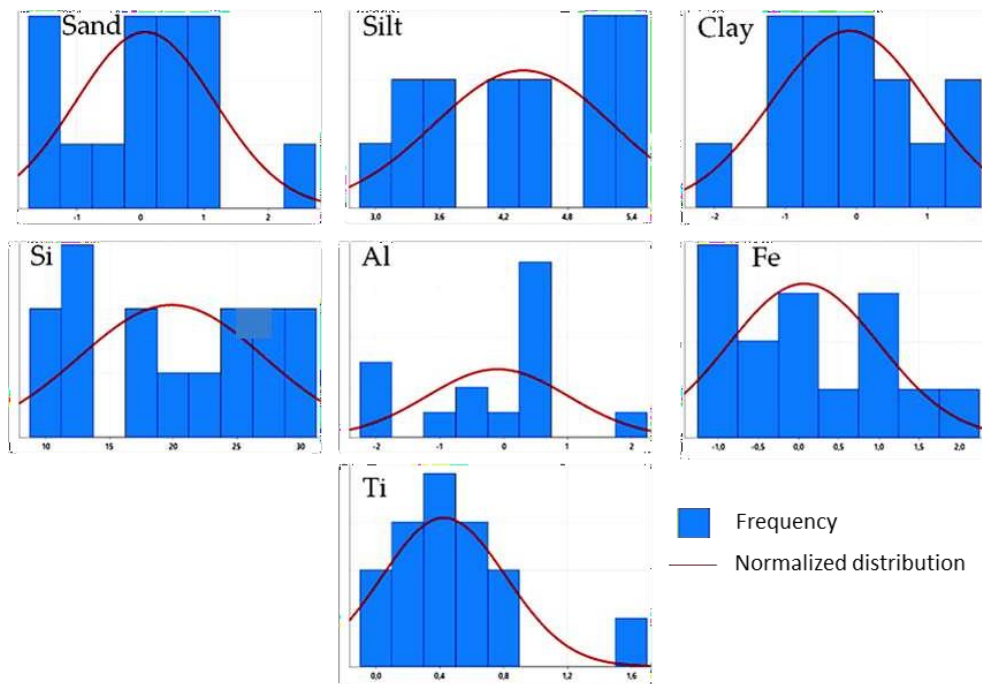


Figure 3: Graphs of the normal distribution of the physicochemical attributes of the soil of the studied area.

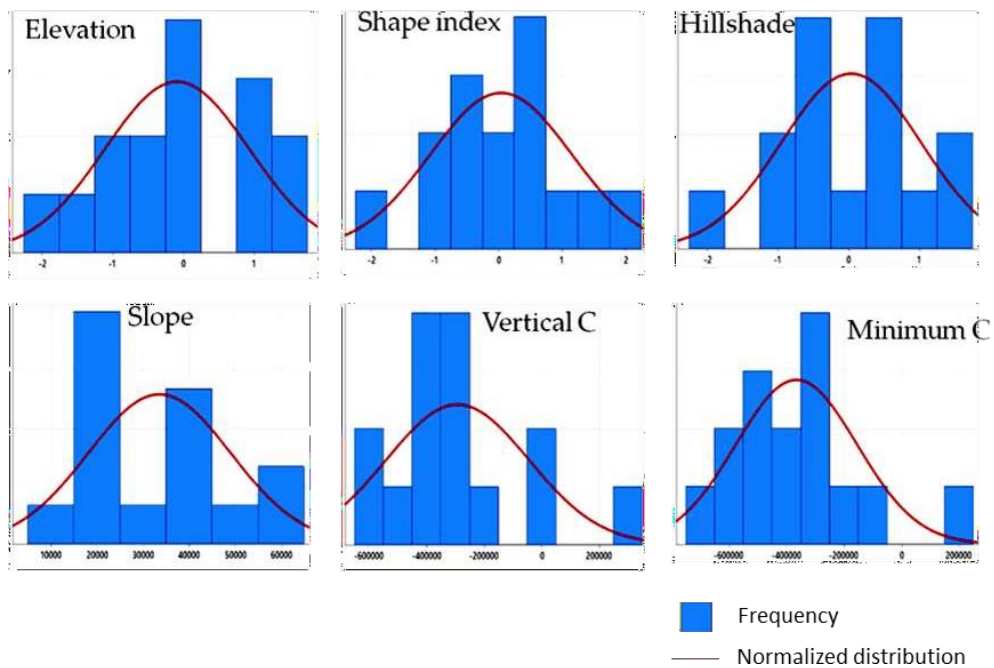


Figure 4: Graphs of the normal distribution of the covariates of the relief of the studied area.

From the adjustment of a mathematical model to the calculated values of semivariance, the coefficients of the theoretical model for the semivariogram are defined (nugget effect -  $C_0$ ; variance -  $C$ ; threshold -  $C_0 + C$  and range -  $A$ )



(Trangmar et al.; 1985).

It is noted that, in most of the data, the Moran index value of above 0.70 indicates a good autocorrelation, and the covariate elevation showed a higher correlation and shape index, and vertical curvature with values above 0.60 positive was considered a moderate correlation. The threshold values of the sand, clay, Si, Al, Fe, slope and vertical curvature had values above 1.0. Since they are the data with normal distribution, there was no type of transformation to normalize, while the others have values less than 1, since they underwent the Johnson transformation to follow a normal distribution. The semivariogram model was chosen based on the results of RMSE and  $R^2$ , which should have lower values among the models (Figures 5-6 e Table 5).

| Descriptive Statistics | Moran index | Nugget effect (Co) | Threshold (Co+C) | Range (A) | RMSE | R2   | Model            |
|------------------------|-------------|--------------------|------------------|-----------|------|------|------------------|
| Sand                   | 0.77        | 0.015              | <b>1.40</b>      | 24,888    | 0.61 | 0.72 | Gaussian         |
| Silt                   | 0.77        | 0.005              | 0.78             | 29,353    | 0.77 | 0.76 | Gaussian         |
| Clay                   | 0.77        | 0.000              | <b>1.32</b>      | 24,086    | 0.   | 0.73 | Linear threshold |
| Si                     | 0.76        | 0.251              | <b>58.92</b>     | 29,415    | 345  | 0.77 | Gaussian         |
| Al                     | 0.75        | 0.000              | <b>1.73</b>      | 31,976    | 0.40 | 0.88 | Gaussian         |
| Fe                     | 0.79        | 0.049              | <b>1.09</b>      | 41,342    | 0.40 | 0.80 | Gaussian         |
| Ti                     | 0.71        | 0.006              | 0.08             | 36,140    | 0.11 | 0.81 | Gaussian         |
| Elevation              | 0.81        | 0.000              | 0.83             | 50,813    | 0.46 | 0.70 | Exponential      |
| Hillshade              | 0.74        | 0.213              | 0.99             | 50,813    | 0.55 | 0.56 | Gaussian         |
| Shape index            | 0.66        | 0.139              | 0.82             | 17,354    | 0.83 | 0.28 | Linear threshold |
| Slope                  | 0.74        | 4,545              | <b>2.59</b>      | 36,582    | 956  | 0.56 | Linear threshold |
| Vertical curvature     | 0.61        | 1,555              | <b>3.93</b>      | 26,695    | 963  | 0.00 | Gaussian         |

Table 5: Results of geostatistical analysis of the physicochemical attributes and covariates of the relief.

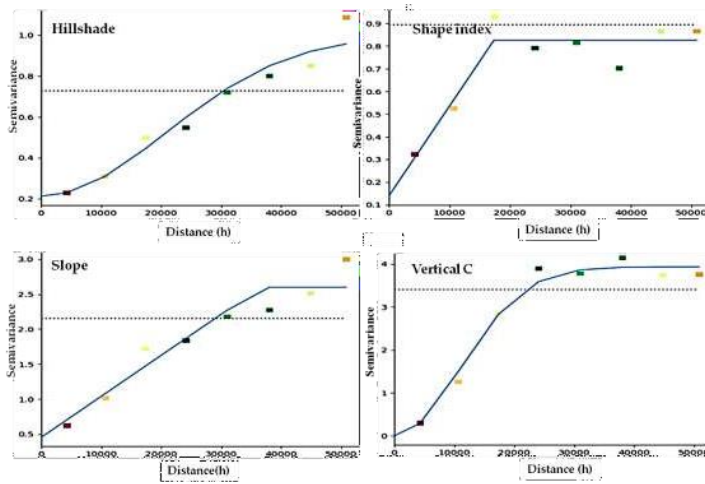


Figure 5: Models of experimental semivariograms of the covariates of the relief.

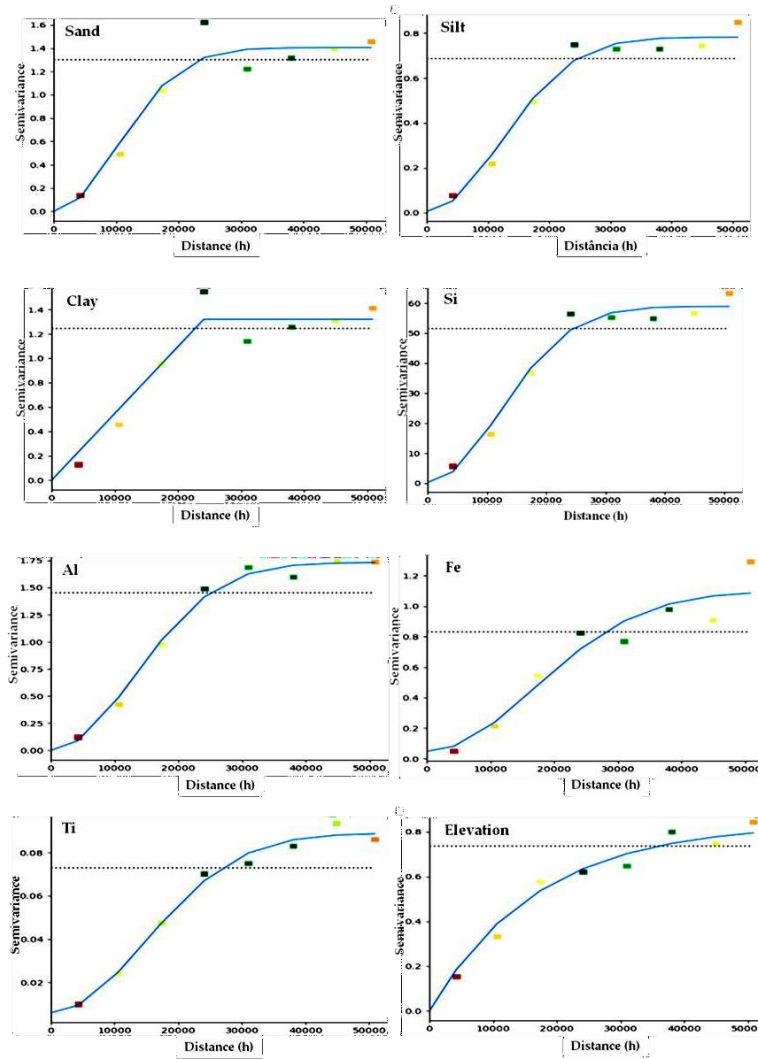


Figure 6: Models of the experimental semivariograms of the physicochemical attributes of the study area.

### 3.3 Maps of the predicted physicochemical attributes and covariates of the relief

In the spatial distribution maps obtained from the physicochemical attributes and relief covariates (Figure 6), it is noted that sand and clay have contents ranging from 0.7 to -0.7%. The spatial variability of sand is predominantly located in the western region of the study area, while clay is spatially distributed in both the northern, southern and eastern portions of the map. The silt varies from 0.6 to -0.6 % and predominates in the southeastern region; while the maps of the chemical attributes showed correlation with the maps of the physical variables, and the spatial distribution of Si is similar to the prediction map of sand, as it is mainly composed of quartz (SiO<sub>2</sub>). The prediction maps of clay and silt are more similar to the maps of Al and Fe because, in these zones of spatial distribution of clay and silt, minerals occur that have Al and Fe in their constitution (Figure 7).

The relief is considered a crucial factor in soil formation, as it is responsible for controlling the dynamics of water flow in the landscape, such as leaching, and it also acts in erosive processes and drainage conditions (Santos et al.; 2010). Due to the distance from the water table, the highest points of the landscape have good drainage conditions and, when associated with low slopes, favor greater water infiltration. As such, these points are associated with sandy zones and correspond to areas of *terra firme*. On the other hand, landscape points with good drainage, i.e.; with higher slopes, intensify surface water runoff to the detriment of infiltration, which increases the erosion rate, and promotes soil rejuvenation. Thus, these areas are associated with more clayey and silty areas and floodplain areas. The lowest points of the landscape, despite having less declivity, are closer to the water table, and are normally poorly or very poorly drained, with anaerobic conditions most of the year. These are associated with the islands of the ANP that are represented by gleysols, and the hillshade values are inversely proportional to the declivity data (Figure 8).

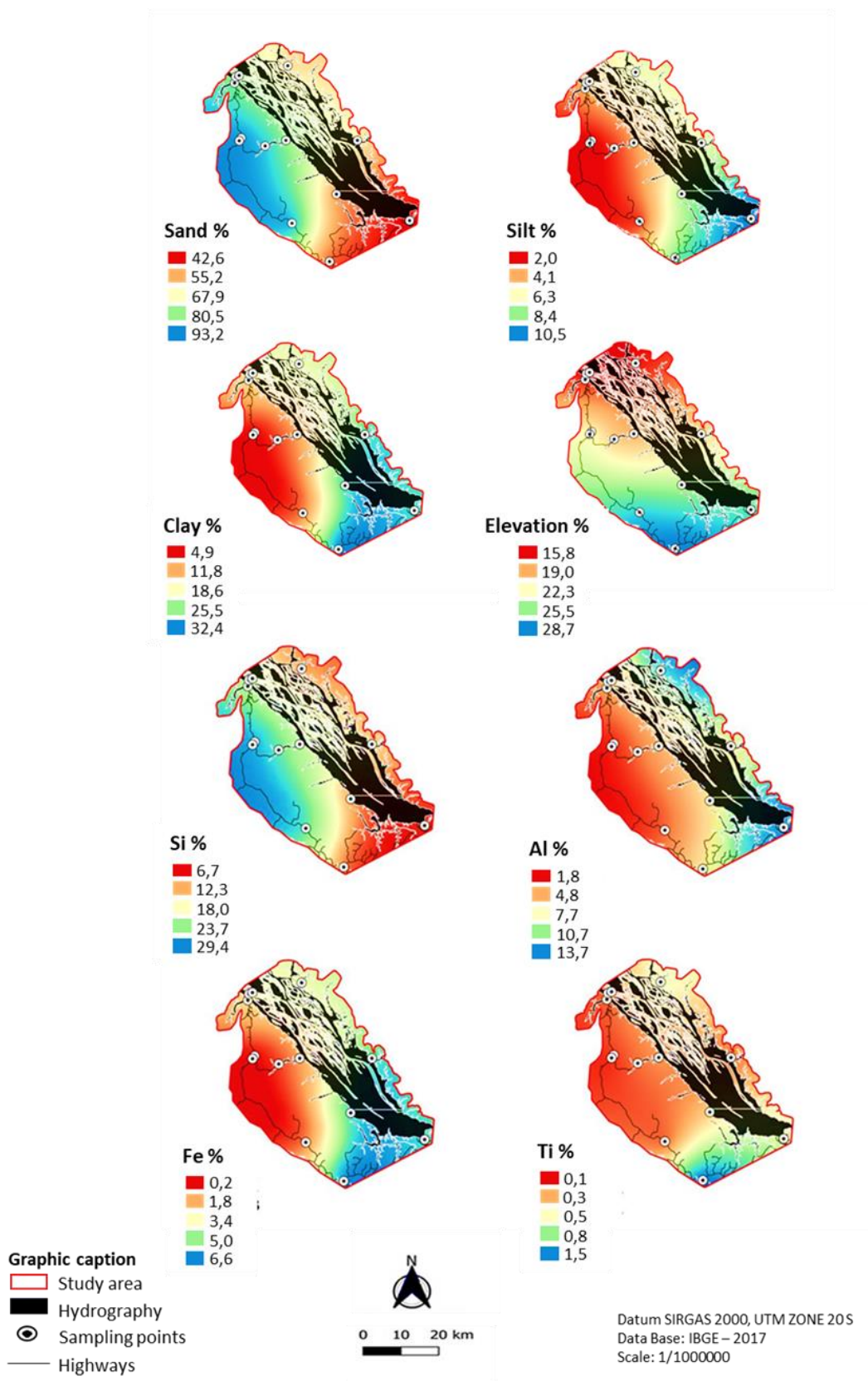


Figure 7: Map of the predicted physicochemical attributes of the study area. Elevation in (m)

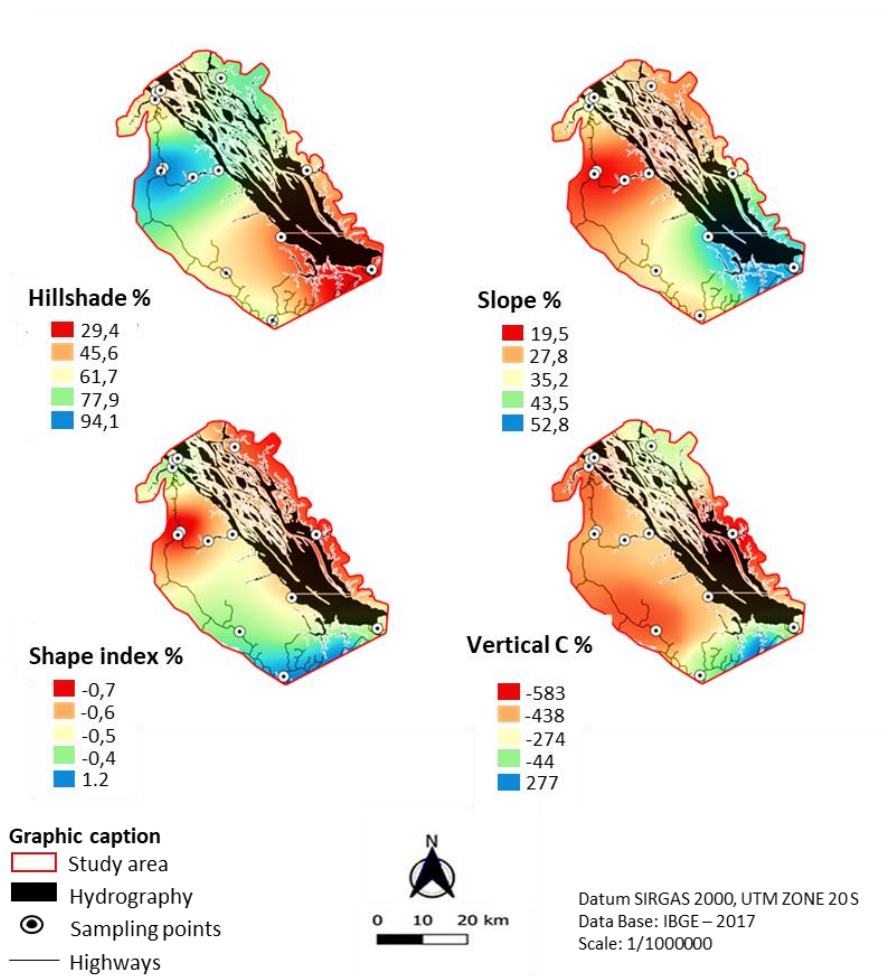


Figure 8: Maps of the predicted covariates of the relief of the study area.

### 3.4 Map of the pedological units

Via the k-means grouping, five groups were identified from the analysis of the elbow method (Figure 9), which better defined the optimal number of groupings. Again, only the attributes of soils that presented moderate to strong spatial correlation were selected, and the optimal number of groupings was defined as five. Therefore, we delimited them as: Zone 1 - clayey soils: points P1, P2, P3, P11; Zone 2 - sandy soils: points P4, P5, P6 and P15; Zone 3

- sandy and hydromorphic soils: P7, P13 and P14; Zone 4 - Sandy to sandy-clay soils: P9 and P10; Zone 5 - clayey soils: P8 (Figure 10).

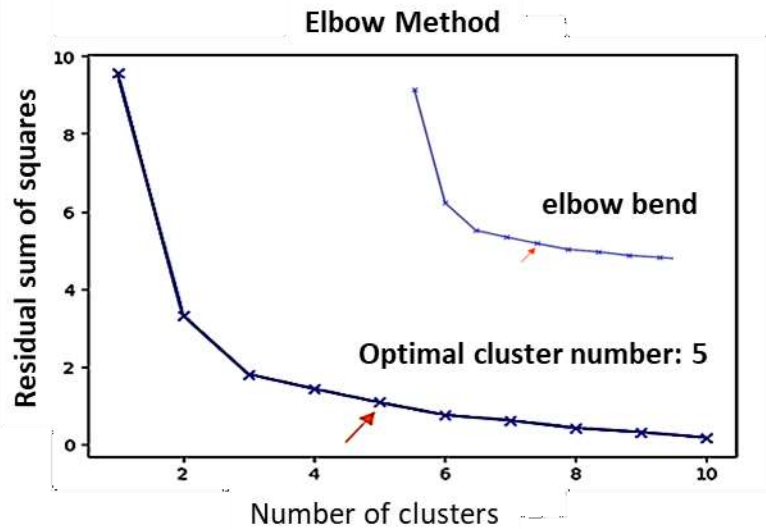


Figure 9: Determination of the number of clusters via the elbow method of the physicochemical attributes and covariates of the relief.

From the results of granulometric and chemical analyses associated with spectral and k-means grouping analyses, a map of zones with their pedological characteristics was created, in which five areas were identified in a way that better perceives the soils of the region under study (Figure 10).

**Zone 1 – clayey soils:** Represented by points P1, P2, P3, P11, presenting soils with predominantly clayey texture, originating from the rocks of the Alter do Chão and Novo Remanso formations. They are areas with low elevation and high slope, well-drained soils on *terra firme* of the sedimentary basin of the Amazon. It is observed that the most consistent, structured and yellow-red materials are related to the deeper profiles characterized as Acrisols and Latosols, which are mineralogically composed of kaolinite and hematite. In P2, minerals of gibbsite and small portions of rutile are also identified. P11, on the other hand, is associated with a Plinthosol that differs from the others by presenting a lower elevation and a high slope with shaded relief in an intermediate band, which makes drainage difficult and presents the formation of ferruginous nodules.

**Zone 2 – sandy soils:** This zone covers points P4, P5, P6 and P15, which represent a zone with higher altitudes and low slope that facilitate the action of weathering and leaching. It consists of more friable, unconsolidated materials that show dark colors on the surface and subsurface and which are pale at depths. They are described as spodosols and are characterized by dystrophic soils with a light-colored horizon that has a high percentage of sand below a dark horizon with a high content of organic matter. The mineralogy of the soils at points P4 and P5 is predominantly quartzose, and points P6 and P15 have quartz and portions of kaolinite.

**Zone 3 - sandy and hydromorphic soils:** This zone is represented by points P7, P13 and P14, where the soils are lithologically correlated to recent quaternary alluvial deposits and sediments of the Alter do Chão formation. It is observed that points P7 and P13 have a sandy texture, and are composed of quartz, kaolinite and gibbsite. This grouping is related to sediments deposited on the banks of streams and rivers, which are floodable in certain periods because they are at low elevations and whose soils have high porosity, and a fine to medium sandy texture with gray to white color. However, at point P14, which is representative of the soils of the islands of the Anavilhanas archipelago, the soil has a medium texture, is composed of quartz, kaolinite, illite, potassium feldspar, gibbsite, and mica, and is characterized as a gleysol.

In general, the soils that occur in this zone are directly related to the change of relief, which conditions drainage and positioning of the groundwater level, and reflects on the high mobility of chemical elements, especially those derived from rocks of the Alter do Chão and Novo Remanso formations. The degree of development of the profiles, which is associated with the presence and depth of mottled soils and lateritic horizons, prove the development of weathering and leaching processes, which are also related to the climate and the environmental conditions of the region.

**Zone 4 - sandy to sandy-clay soils:** Consisting of points P9 and P10, these profiles are geographically close, and point P9 is represented by sediments from the Alter do



Chão formation and point P10 by alluvial deposits. They present profiles with medium to sandy texture that are composed of quartz and kaolinite and, at point P10, the occurrence of small portions of magnetite are observed, which reflects an intense weathering process in this zone. Point P9 presents centimeter to meter thickness and is described in the literature as a latosol that is developed in elevated areas in a *terra firme* environment, preferably positioned on the Alter do Chão formation.

**Zone 5 – clayey soils:** This zone is represented by point P8, which is positioned in an area with low relief and a moderate slope. The soil of this zone is a latosol. It is located on the left margin of the Negro River and is characterized by soils with a clayey texture that are composed of quartz, kaolinite and gibbsite and which originated from sediments of the Alterdo Chão formation.

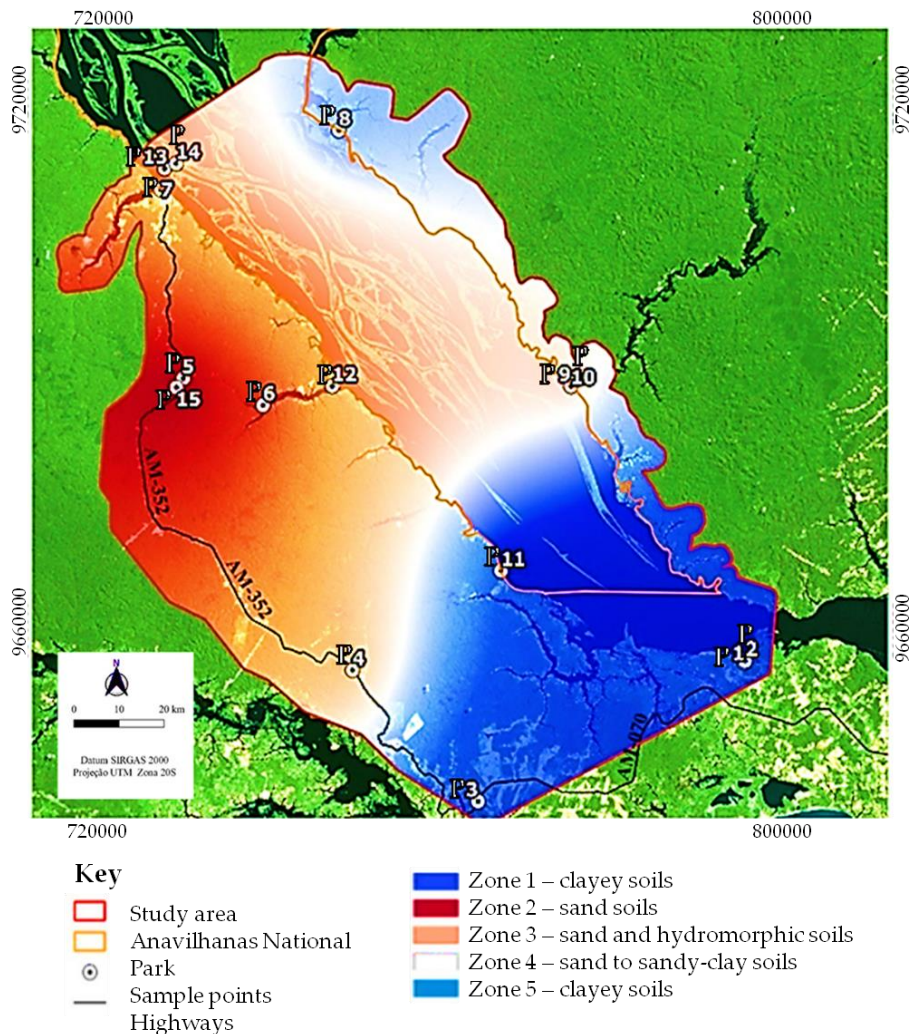


Figure 10: Representative sample points of Zone 5 - clayey soils.



This study was developed in order to expand the knowledge and spatial distribution of the properties of the soil in the Anavilhanas National Park and its surrounding area, since the available pedological maps were generated in the 1970s in scales with little detail. It also aimed to provide significant information for the understanding of an existing conflict in the ANP and surroundings that is related to illegal sand extraction; and as such, the research may contribute to the reassessment of the management plan and environmental monitoring.

In this work, the soil-landscape relationship was clearly observed in the research area, where areas classified as plateau (*terra firme*) occur the types of Latosols and Plinthosols, in addition to spodosols and in plain areas (*várzea*) there are gleissolos and recent sedimentary deposits, agreeing with Santos et al. (2015) which states. That the factors of formation and pedogenetic processes justify the diversity of the soil classes with varied morphological, chemical and physical characteristics, even in small geographical areas. In a natural landscape, the soil presents a wide variability in its attributes both in the spatial and volumetric sense, which is a result of the interaction of the processes that command the factors of its formation (Bouma et al.; 2006).

The soil, being a three-dimensional body formed by the action of various factors and processes, presents variation in its characteristics throughout the landscape (Abreu et al.; 2003). Several authors have found a relationship between the spatial variability of soil attributes and landscape forms (Souza et al.; 2006; Montanari et al.; 2005; Leão, 2004; Souza, 2004). Bouma & Finke (1993) although the Amazon region has a variety of ecosystems, there is no differentiation in the spatial variability of soil attributes and landscape forms in relation to pedological studies in other regions.

According to Teixeira et al.; 2009, the dominant soils on the banks of the Rio Negro are Neosols Flúvicos and Neosols Quartzarenics (beaches on the Rio Negro), and further up the bank (ravine), Argisols, Oxisols and Plinthosols appear, from the municipality of Novo Airão there is the predominance of Spodosols, all these soil classes in this region have severe limitations of agricultural aptitude due to reduced fertility. The observations made in the field and in the laboratory agree with the authors above in relation to the soils found above the margins as being Oxisols and

Plinthosols, however we did not observe the presence of Argisols, probably due to the large territorial extension. We identified the presence of spodosols in the Novo Airão region and the soils found on the banks of the Negro River and streams in the study area we considered as quaternary sedimentary deposits.

In general, the physical, chemical and mineralogical characteristics of Amazonian soils are related to their original materials, relief and climate. Geomorphology has an extremely important role in the spatial distribution of these soils (Figures 7 and 8), and areas with high altimetry and low slope are generally associated with latosols, though in areas with intermediate values of elevation and low slope spodosols occur. In the floodplain, gleysols and young soils of Holocene sedimentation predominate as indicated in the map of the pedological units.

The constructions of the maps with the values obtained through kriging (Figures 7 and 8) are important for the verification and interpretation of spatial variability, in addition to being a technique through which the prediction of soil characteristics can be performed in places where there was no sample collection. They are also useful in decision-making, since the interpretation of the spectra permitted the mineralogical identification as well as the texture of the samples.

#### **4. Conclusions**

Spectroscopy allowed us to obtain a soil analysis, by which it was possible to identify the minerals and differentiate soil textures in hard-to-reach areas in the study region. The use of elevation and derivative models helped in the spatialization of attributes. Both techniques converged to a single product, the map of the pedological units, which presented different physical, chemical, mineralogical and relief characteristics.

Obtaining the map of homologous zones provided significant subsidies for the identification and understanding of the various types of soil that occur in and around the Anavilhanas National Park.

It is worth mentioning that, depending on the study region, the seasonal periods of the rivers should be taken into account. As well as increasing the grid of sampling points, since in this work 15 points were visited and, for a better interpolation by kriging, 50 random points were generated.

Geostatistics helped in the mapping of soil attributes in places where there was no sample collection, and spectroscopy was important because it expressed data that were difficult to measure in the region, such as mineralogy and texture, and without delay. Through this information, the soil attributes could be evaluated to aid the mapping. These data supported the compartmentalization into pedological zones that are characterized via physical, chemical, mineralogical analysis and identification of the relief.

With the grouping techniques, five pedologically analogous zones were identified. The spectral data and digital mapping were positive, thus showing that the spectroscopy technique and digital mapping using geostatistics techniques are an excellent alternative for identifying soil textures and minerals at low cost, with less time spent, while still meeting the precepts of sustainable development.

### **Acknowledgments**

The author Deborah Natalie Collyer Monteiro would like to thank CNPq for the financial support in the form of a Masters scholarship, Project Tar – Tempo, Água e Rocha at UFAM for financial aid for the sample collection and training at PROBASE – 2019; the GeoCis Group (website – [esalqgeocis.wixsite.com](http://esalqgeocis.wixsite.com)) - Esalq-USP for its support in performing spectral analysis, X-ray fluorescence chemistry and analysis of relief attributes; CPRM for carrying out, at no cost, the mineralogical analyses using X-ray diffractometry. We would also like to thank ICMBio for the authorization to conduct research in the Anavilhanas National Park.

### **5. References**

- Abinader, H. D. (2008). Depósitos Cenozoicos da porção oeste da Bacia do Amazonas. Dissertação (Mestrado). Manaus: Programa de Pós-Graduação em Geociências – Ufam.
- Abreu, S. L. D.; Reichert, J. M.; Silva, V. R. D.; Reinert, D. J.; & Blume, E. (2003). Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do sol, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em argissolo franco arenoso sob plantio direto. *Ciência Rural*, 33, 275-282.
- Alba, J. M. F. (2007). O uso da Espectrorradiometria no Mapeamento de Solos: Estudo de Caso na Estação Experimental Terras Baixas. Pelotas: Embrapa Clima Temperado.
- Almeida, E. (2012). *Econometria Espacial*. Alínea: Campinas/Sp – Ufjf.Br
- Alves, N. D. S. (2013). Mapeamento hidromorfodinâmico do complexo fluvial de

- Anavilhanas: contribuição aos estudos de geomorfologia fluvial de rios Amazônicos (Doctoral Dissertation, Universidade De São Paulo).
- Barbosa, R. O. (2015). Estudos sedimentológico e estratigráfico dos depósitos sedimentares quaternários do arquipélago de Anavilhanas município de Novo Airão (Amazônia Central). Dissertação (Mestrado). Manaus: Programa de Pós-Graduação em Geociências– Ufam.
- Bellinaso, H. (2009) Biblioteca espectral de solos e sua aplicação na quantificação de atributos e classificação. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luís de Queiroz, Piracicaba.
- Bouma, J. (2006). Hydopedology as a powerful tool to environmental policy research, *Geoderma*, 131, 275– 286.
- Bouma, J.; & Finke, P. A. (1993). Origin and nature of soil resource variability. in proceedings of soil specific crop management: A Workshop on Research and Development Issues (Pp. 1-13). Madison, Wi, Usa: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Callegari-Jacques, S.M. (2003) Bioestatística princípios e aplicações. Porto Alegre: Artmed.
- Caputo, M.V. (1984). Glaciação neodevoniana no continente Gondwana Ocidental. In: Congresso Brasileiro de Geologia. 33. Rio De Janeiro, Anais. Rio de Janeiro. Sbg. 2: 725-739.
- Chagas, C. S.; Fontana, A.; Carvalho Junior, W. D.; & Caires, S. M. D. (2013). Atributos topográficos na diferenciação de Argissolos. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 37, 1441-1453.
- Coblinski, J. A. (2021). O uso do sensoriamento próximo para estimativa de propriedades do solo de importância agrícola e ambiental. Tese (Doutorado), Lume.Ufrgs.Br.
- Costa, J. J. F.; Giasson, E.; Silva, E. B.; Coblinski, J. A.; Tiecher, T. (2020). Use of color parameters in the grouping of soil samples produces more accurate predictions. *Computers and electronics in agriculture*, Holanda, N. 177, P. 1-15, 2020.
- Costa, M.L. (1991). Mineralogia, geoquímica, gênese e epigênese dos lateritos de Jandiá. *Geochimica Brasiliensis*, 4(1):85-110.
- Cunha F.M.B.; Gonzaga F.G.; Coutinho L.F.C. Feijó F.J. (1994). Bacia do Amazonas. *Bol. Geoc. Petrob.*; 8:47-55.
- Dalmolin, R. S. D. (2002). Matéria orgânica e características físicas, químicas, mineralógicas e espectrais de latossolos de diferentes ambientes. 2002. Tese (Doutorado em Ciências do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- De Conservação Ambiental, D.; & Silvestre, V. (2017) Plano de Manejo da Estação Ecológica de Anavilhanas. – Assiste.Icmbio.Gov.Br.
- Demattê, J. A.; Safanelli, J. L.; Poppiel, R. R.; Rizzo, R.; Silvero, N. E. Q.; Mendes, W. D. S., & Lisboa, C. J. D. S. (2020). Bare earth's surface spectra as a proxy for soil Resource monitoring. *Scientific Reports*, 10(1), 1-11.
- Demattê, J.A.M.; Epiphânio, J.C.N. & Formaggio, A.R. Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. (2003). *Bragantina*, 62:451-464.
- Demattê, J.A.M.; Giasson, E; Couto, E. G.; Samuel-Rosa, A.; de Castro, S. S.; Dalmolin, R. S.D.; Brilha, J.; Botelho, R. G. M.; Azevedo, A. C.; Cerri, C. E. P.; dos Anjos, L. H. C.; De Lourdes M.-S. S, M.; Boechat, C. L.; do Amaral, E. F.; da Silva J. J. F.; Junior, A. F.N.; Poppiel, R. R.; Horst, T. Z.; da Silva, L. M.; Pereira, M. G. (2022)

- The Brazilian Soil Priorities. *Geoderma Regional*, V. 22, P. E00503.
- Demattê, J.A.M.; Terra, F.S. (2014). Spectral Pedology: A new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations. *Geoderma* 218, 190-200.
- Embrapa - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional De Pesquisa De Solos: Manual De Métodos De Análise De Solo (1997a). 2.Ed. Rio De Janeiro: EmbrapaCnps, 212p.
- Embrapa - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Centro Nacional De Pesquisas De Solos. (2006) Sistema Brasileiro De Classificação De Solos. Rio De Janeiro, Embrapa Solos, 306 P.
- Felgueiras, C.A.; Druck, S.; Monteiro, A.M. V. (2002). Análise Espacial de Superfície:Enfoque da Geoestatística por Indicação. São José Dos Campos, Sp: Inpe, Cap.4, P.1- 23.
- Gallant, J. C.; Wilson, J. P. (2000). Primary Topographic Attributes. In: Wilson, J. P.; J. C. (Eds.). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York: John Wiley, P.51-85.
- Genú, A. M.; Roberts, D.; Demattê, J.A.M. (2013a). The use of Multiple endmember Spectral Mixture Analysis for the Mapping of Soil Attributes Using Aster Imagery. *Acta Scientiarum Agronomy* 35, 377-386.
- Genú, A. M.; Demattê, J. A. M. (2012). Espectrorradiometria de solos e comparação com sensores orbitais. *Bragantina, Campinas*, v. 71, n. 1, p.82-89.
- Goovaerts, P. (1997). *Geoestatística Para avaliação de Recursos Naturais*. Oxford University Press on Demand. Books. Google. com
- Hofig, P.; Giasson, E.; Vendrame, P.R.S. (2014). Mapeamento Digital de Solos com Base na Extrapolação de Mapas entre Áreas Fisiograficamente Semelhantes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49, 958-966, Embrapa – Secretaria de Pesquisa e Desenvolvimento, Pesquisa Agropecuária Brasileira.
- Horbe, A. M. C. et al. (2001). A Lateritização na Gênese das Superfícies de Aplanamento da Região de Presidente Figueiredo-Balbina, Nordeste do Amazonas. *Contribuições à Geologia da Amazônia*, V. 2, P. 148-176.
- Horbe, A. M. C.; & Costa, M. L. D. (1997). Solos gerados a partir do Intemperismo de Crostas Lateríticas Sílico-Ferruginosas. *Acta Amazônica*, 27, 241-256.
- Ibge - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010). Mapa de Geomorfologia do Amazonas. Diretoria de Geociências, Rio De Janeiro.
- Ibge - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018). *Desbravar, Conhecer, Mapear: Memórias do Projeto Radam/Radambrasil* Ibge, Gerência de Biblioteca e Acervos Especiais, Rio De Janeiro, Brasil, 364 Págs.
- Irion, G.; (1982). Mineralogical and Geochemical contribution to Climatic History in Central Amazonia during quaternary time. *Tropical Ecology* 23: 76–85.
- Kistler, P.; (1954). Historical resume of the Amazon Basin. Belém, Petrobras/Renor, Relatório Interno 104-A.
- Kumar, S.; Lal, R.; Liu, D. A Geographically weighted regression Kriging approach for Mapping Soil Organic Carbon stock. *Geoderma*, V.189-190, 627-634, 2012.
- Kweon, G.; Lund, E.; Maxton, C.; Drummond, P.; Jensen, K. (2008). In Situ Measurement of Soil Properties using a Probe-Based Vis-Nir Spectrophotometer. St Joseph: Asabe. (Asabe Paper No. 084399).
- Landim, P.M.B. (2006). Sobre Geoestatística e Mapas. *Terra e Didática*, V. 2, N. 1, P. 19-33.
- Leão, M. G. A. (2004). Relação entre atributos de uma vertente com Latossolos e

- qualidade de frutos cítricos. Jaboticabal. 119f. Dissertação (Mestrado Em Ciência Do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista.
- Lima, G. C.; Silva, M. L. N.; Oliveira, M. S.; Curi, N.; Silva, M. A.; Oliveira, A. H. (2014). Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e Mata Atlântica na escala de Microbacia Hidrográfica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, V. 18, N. 5, P. 517-526.
- Lucas, Y.; Kobilsek, B.; Chauvel, A. (1989). Structure, Génesis, and present evolution of Amazonian bauxites developed on Sediments. In: Intern. Cong. Icsoba 6, Poços de Caldas, Brazil.
- Mendonça-Santos, M.L.; Santos, H.G. (2006). O Estado da Arte do Mapeamento de Solos Brasileiro E as perspectivas para o Mapeamento Digital de Solos.
- P. Lagacherie, A.B. Mcbratney, B.T. Voltz (Eds.) (2006). *Digital Soil Mapping an Introductory Perspective*, Elsevier, Pp. 39-601.
- Montanari, R.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T.; Souza, Z. M. (2005). Forma da Paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, V.40, P.69-77.
- Odeh, I.O.A.; Mcbratney, A.B.; Chittleborough, D.J. (1995). Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: Heterptopic cokriging and regression kriging. *Geoderma*, v.67, p.215-225.
- Poppiel, R. R. (2016). Mapeamento Pedológico por meio de série histórica Landsat-5 Tm e Biblioteca Espectral na Bacia do Rio Jardim (Df).
- Poppiel, R.R.; Lacerda, M.P.C.; Rizzo, R.; Safanelli, J.L.; Bonfatti, B.R.; Silvero, N.E.Q.; Demattê, J.A.M. (2020). Soil color and mineralogy mapping using proximal and remote Sensing in Midwest Brazil. *Remote Sens.*; 12, 1197. <https://doi.org/10.3390/Rs12071197>.
- Ramaroson, V. H. et al. (2018). Mineralogical analysis of ferralitic soils in Madagascar using Nir Spectroscopy. *Catena, Cremlingen*, V. 168, P. 106-108, 68.
- Riker, S. R. L.; Reis, N.; & D'antona, R. G. (2008). Caracterização dos depósitos holocênicos de argila da região do médio Amazonas, Estado do Amazonas. Dissertação (Mestrado). Manaus: Programa de Pós-Graduação em Geociências – Ufam.
- Rozo, J. M. G.; Nogueira, A. C. R.; Horbe, A. M. C.; Carvalho, A. S. (2005). Depósitos Neógenos da Bacia do Amazonas. *Contribuições À Geologia da Amazônia* Vol. 4, 201- 207.
- Safanelli, J.L.; Poppiel, R.R.; Ruiz, L.F.C.; Bonfatti, B.R.; Mello, F.A.O.; Rizzo, R.; Demattê, J.A.M. (2020). Terrain analysis in Google Earth Engine: A Method adapted for High-Performance Global-Scale Analysis. *Isprs Int. J. Geo-Inf.*; 9, 400.
- Santos, A. D. C.; Pereira, M. G.; Anjos, L. H. C. D.; Bernini, T. D. A.; Cooper, M.; Cooper, M.; Nummer, A. R.; & Francelino, M. R. (2010). Gênese e Classificação de Solos numa Toposequência no Ambiente de Mar de Morros do Médio Vale do Paraíba do Sul, Rj. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, 34, 1297-1314.
- Santos, R.D.; Santos, H.G.; Ker, J.C.; Anjos, L.H.C.; Shimizu, S.H. (2015). *Manual de Descrição e Coleta de Solo de Campo*. 7. Ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.
- Schloeder, C. A.; Zimmerman, N. E.; & Jacobs, M. J. (2001). Comparison of Methods for

- Interpolating Soil Properties using limited data. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), 470-479.
- Silva, A.F.; Quatezani, W.Z; Zimback, C.R.L.; Landim, P.M.B. (2011). Aplicação da Geoestatística em Ciências Agrárias. In *Simpósio de Geoestatística aplicada a Ciências Agrárias, Botucatu-Sp*.
- Silva, C. L. (2005). Análise da Tectônica Cenozóica da Região de Manaus e Adjacências. Rio Claro, 278 P. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista).
- Sioli, H. (1991). *Amazônia Fundamentos da Ecologia da maior Região de Florestas Tropicais*. 3.Ed.; Petrópolis, Edit. Vozes, 72 P.
- Soares, E.A.A, Wahnfried, I.; Dino, R. (2016). Estratigrafia de subsuperfície da Sequência Sedimentar Cretáceo-Neógena das regiões de Manaus e Itacoatiara, Amazônia Central. *Geologia. Usp. Série Científica*, 16(1), 23-41. <https://doi.org/10.11606/Issn.2316-9095.V16i1p23-41>
- Souza Junior, J. D. (2005). O efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia do Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 211 fl.
- Souza, Z. M.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T.; Barbieri, D. M. (2004). Variabilidade Espacial da Textura de um Latossolo Vermelho Eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, V.24, P.309-319.
- Souza, Z. M.; Marques-Júnior, J.; Pereira, G. T.; Montanari, R.; Campos, M. C. C. (2006). Amostragem de Solo para determinação de atributos químicos e físicos em Área com variação nas formas do relevo. *Revista Científica, Jaboticabal*, V. 34, N. 2, P. 249-256.
- Teixeira, W. G.; et al. (2009). "O solo de várzea nas margens do rio Negro-Amazonas-Brasil." In: *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 32.; Fortaleza. O solo e a produção de bioenergia: perspectivas e desafios. Viçosa, MG, SBCS; Fortaleza: UFC, 1 CD-ROM.
- Trangmar, B. B; Yost, R. S.; Uehara, G. (1985). Application of Geostatistical to Spatial Studies of Soil Properties. *Advances In Agronomy; New York*, V.38, N.1, P. 45-93.
- Vasques, G.M.; Demattê, J.A.M.; Viscarra Rossel, R.; Ramirez Lopez, L.; Terra, F.S. (2014). Soil classification using Visible/Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra from multiple depths. *Geoderma* 223-225, 73-78.
- Vieira, S.R. (2000). Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do Solo. *Tópicos em Ciência do Solo*, V.1, 1-54.
- Walter, C.; Mcbratney, A.B.; Douaoui, A.; Minasny, B. (2001). Spatial prediction of topsoil salinity In the Chelif Valley, Algeria, using local Ordinary Kriging with local Variograms Versus Whole-Area Variogram. *Australian Journal of Soil Research*, V.39, 259-272, 2001.
- Walton, R.S.; Volker, R.E.; Bristow, K.L (2000). Experimental examination of solute transport by surface runoff from low-angle slopes. *Journal of Hydrology*, .233:19-36.