



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

RYSHARDSON GEOVANE PEREIRA DE OLIVEIRA E SILVA

**ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA NO MAPEAMENTO E MODELAGEM
DE SOLOS NO SEMIÁRIDO**

FORTALEZA

2018

RYSHARDSON GEOVANE PEREIRA DE OLIVEIRA E SILVA

ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA NO MAPEAMENTO E MODELAGEM DE
SOLOS NO SEMIÁRIDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Pedologia.

Orientador: Prof. Dr. Raul Shiso Toma

Fortaleza

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S583e Silva, Ryshardson Geovane Pereira de Oliveira e.
Espectroscopia de Reflectância no Mapeamento e Modelagem de Solos no Semiárido / Ryshardson Geovane Pereira de Oliveira e Silva. – 2018.
151 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Raul Shiso Toma.
1. Mapeamento de solos. 2. Espectroscopia de reflectância. 3. Pedometria. 4. Reflectância. 5. Absorbância.
I. Título.

CDD 631.4

RYSHARDSON GEOVANE PEREIRA DE OLIVEIRA E SILVA

ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA NO MAPEAMENTO E MODELAGEM DE
SOLOS NO SEMIÁRIDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Pedologia.

Aprovada em: 02 / 03 / 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raul Shiso Toma (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ph.D. Adunias dos Santos Teixeira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fabrício da Silva Terra
Universidade Federal de Pelotas (UFPel)

Aos meus pais, Malan e Edivana, pelo incentivo e confiança.

A minha esposa Esraelda, pelo amor, apoio e companheirismo, que me ajuda a enfrentar todas as adversidades da vida.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Esraelda Araújo, pela cumplicidade, paciência e ternura, nos dias alegres e, principalmente, nos mais cansativos e preocupantes.

Aos meus pais, Malan Júnior e Edivana Silva, pelos ensinamentos e valores que levarei comigo do início ao fim de minha existência e pelo apoio e confiança na busca dos meus objetivos.

Aos meus irmãos, Roni Charles e Malan Neto, pela amizade, carinho e incentivo.

Aos amigos de longa data Bené, Ithalo, Janisson, Mosart, Rodrigo, Tiago e Uilian, que apesar da distância se fazem presentes onde quer que eu esteja, proporcionando boas conversas e admiráveis momentos de descontração.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Raul Shiso Toma, pela orientação, confiança, empenho e amizade, me auxiliando a ampliar meus conhecimentos e contribuindo com meu crescimento profissional.

Ao Prof. Dr. Fabrício da Silva Terra, pelos ensinamentos, direcionamentos e fundamental auxílio na realização deste trabalho.

Aos professores Ph.D. Adunias dos Santos Teixeira, Dr. Fernando Felipe Ferreyra Hernandez, Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, Dra. Mirian Cristina Gomes Costa, Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior e Dr. Ricardo Espíndola Romero, pelo grande apoio ao projeto, disponibilizando equipamentos e laboratório para o desenvolvimento do trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da UFC, tanto aqueles com quem cursei disciplinas durante o curso de mestrado, como aqueles que não tive a oportunidade de conviver em sala de aula, pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos durante parte de minha trajetória acadêmica.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da UFC, pela oportunidade a mim proporcionada de cursar uma Pós-graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP) pelo auxílio financeiro concedido por meio da bolsa de mestrado e demais apoios financeiros.

À todos os servidores do Departamento de Ciências do Solo, mas em especial aos técnicos(as) Deyse Maia, do Laboratório de Manejo do Solo e Água, e Crisanto Dias, do Laboratório de Química do Solo, além, é claro, do secretário Edilson Dote, pela gentileza e dedicação na assistência prestada na execução desta pesquisa e ao longo de minha pós-graduação.

À Embrapa Agroindústria Tropical, na pessoa do pesquisador Dr. Carlos Alberto Kenji Taniguchi e da técnica do Laboratório de Solos e Água, Vanderléia, pela oportunidade da execução de algumas análises essenciais a este trabalho nas dependências da empresa.

Aos colegas da graduação em Agronomia da Universidade Federal do Ceará, irmãos de orientação, Igor Vieira e Tácito Almeida, pela colaboração com esta pesquisa, auxiliando nos trabalhos em campo e em laboratório, cuja ajuda foi de fundamental importância na execução e finalização deste trabalho.

À todos os colegas da Pós-Graduação, com quem passei muitos momentos agradáveis nesta etapa de formação e que não cito individualmente não por esquecimento, mas sim por conta da grande quantidade de pessoas com que tive o enorme prazer de compartilhar esses dois breves anos da minha vida, tendo a oportunidade de conhecer outras, línguas, culturas e particularidades regionais do Brasil e do mundo.

À todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho para meu crescimento pessoal, intelectual e profissional.

De coração, muito obrigado!

“Saber muito não lhe torna inteligente. A inteligência se traduz na forma que você recolhe, julga, maneja e, sobretudo, onde e como aplica esta informação.”

Carl Edward Sagan

RESUMO

O conhecimento acerca dos diferentes tipos de solos e suas características no ambiente faz-se fundamental para a adequada utilização e manejo destes, demandando a utilização do mapeamento de solos. Contudo, a utilização de métodos tradicionais de mapeamento tem-se mostrado por diversas vezes onerosa e demorada, necessitando de técnicas alternativas a fim de se estabelecer uma relação da maneira como o solo é formado e sua distribuição no ambiente. Cada classe de solo apresenta comportamento diferenciado frente à radiação eletromagnética e por esta característica julga-se que seja possível a distinção entre as mesmas por meio da energia refletida. Assim, este trabalho objetivou: i) identificar e caracterizar as diferentes classes de solos existentes na Fazenda Experimental Lavoura Seca, pertencente à Universidade Federal do Ceará (UFC), no município de Quixadá, Ceará, por meio dos métodos de mapeamento tradicional e digital, avaliando o comportamento espectral dos solos existentes na área e ii) quantificar alguns de seus atributos pela análise espectral. Foi elaborado um mapa pedológico semidetalhado, na escala 1:20.000, pelo método tradicional de mapeamento de solos, com a coleta das amostras de solo realizada por meio de tradagens em grid regular, nas profundidades 0-20, 40-60 e 80-100 cm quando possível, seguida de análises físico-químicas e espectrais. A obtenção do mapa digital se deu pela análise de componentes principais dos dados espectrais das amostras de solo de superfície, subsuperfície e horizontes dos perfis, seguida de geoestatística para espacialização e verificação de dependência espacial. As unidades espectrais de mapeamento foram delimitadas empregando-se uma classificação não-supervisionada na imagem obtida a partir da união dos mapas de isolinhas provenientes da geoestatística. Houve algumas correspondências entre as unidades espectrais de mapeamento delimitadas e as delimitações obtidas no mapeamento tradicional. Os valores de área total ocupada por cada unidade de mapeamento nas duas metodologias utilizadas permaneceram próximos, contudo, deve-se atentar para os elementos presentes na constituição do solo que podem vir a influenciar nos resultados obtidos. A análise de atributos do solo por sensoriamento proximal pode proporcionar a quantificação de alguns atributos, sendo obtidos resultados satisfatórios para Mg, SB e CTC na maioria dos métodos de transformação dos dados espectrais avaliados. A transformação dos dados espectrais em Absorbância apresentou-se como o tratamento que mais foi capaz de proporcionar modelos satisfatórios para a maioria dos atributos avaliados.

Palavras-chave: Mapeamento de solos. Espectroscopia de reflectância. Pedometria. Reflectância. Absorbância.

ABSTRACT

Knowledge about the different types of soils and your characteristics in the environment is essential for the proper use and management these, demanding the use of soil mapping. However, the use of traditional soil mapping methods has been shown to be costly and time-consuming, requiring alternative techniques in order to establish a relationship of the way the soil is formed and its distribution in the environment. Each soil class presents differentiated behaviour in the face of electromagnetic radiation and by this characteristic, it is judged that it is possible to distinguish between them by means of reflected energy. Thus, this work aimed to: i) identify and characterize the different soil classes existing in the Fazenda Experimental Lavoura Seca, belonging to the Federal University of Ceará (UFC), in the municipality of Quixadá, Ceará, through the methods of traditional and digital mapping, evaluating the spectral behavior of soils existing in the area and ii) to quantify some of their attributes by spectral analysis. A semi-detailed pedological map was elaborated on the scale 1:20000, by the traditional method of soil mapping and the collection of the soil samples was carried out with a Dutch auger in regular grid, at depths 0-20, 40-60 and 80-100 cm when possible, followed by physicals, chemicals and spectral analysis. The digital map was obtained by the principal component analysis of the spectral data of surface, subsurface and profile horizons soil samples, followed by geostatistics for spatialization and spatial dependence verification. The mapping spectral units were delimited by employing an unsupervised classification in the image obtained from the union of the maps of isolines from geostatistics. There were some correspondences between the delimited mapping spectral units and the delimitations obtained in the traditional mapping. The values of total area occupied by each mapping unit in the two methodologies used remained close, however, should be made aware of the elements present in the soil constitution that may influence the results obtained. The analysis of soil attributes by proximal sensing can provide the quantification of some attributes and satisfactory results were obtained for Mg, BS and CEC in most of the methods of transformation of the evaluated spectral data. The spectral data transformation in absorbance presented itself as the treatment that most was able to provide models satisfactory for most of the evaluated attributes.

Keywords: Soil mapping. Reflection Spectroscopy. Pedometrics. Reflectance. Absorbance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da Fazenda Lavoura Seca - UFC.....	35
Figura 2 - Mapa planialtimétrico da Fazenda Lavoura Seca - UFC.....	37
Figura 3 – Localização dos pontos de tradagem e perfil completo.	39
Figura 4 - Geometria de aquisição dos dados espectrais.	42
Figura 5 - Fluxograma representativo da metodologia utilizada para obtenção dos mapas de solo Tradicional e Digital.....	45
Figura 6 - Mapa de solos da Fazenda Lavoura Seca – UFC, obtido pelo método tradicional.	52
Figura 7 – Principal uso e cobertura (A) e abertura de perfil para caracterização da classe RLe (B).....	54
Figura 8 – Painel fotográfico dos perfis SXe e FTd.	56
Figura 9 – Painel fotográfico dos perfis PVe e inclusões.	58
Figura 10 – Painel fotográfico da abertura de perfil da classe TCo e amostras de seus horizontes.	59
Figura 11 – Caracterização espectral das amostras representativas, obtidas por amostragens realizadas nos perfis de solo, representando as classes de solo existentes na Fazenda Lavoura Seca – UFC.....	61
Figura 11 – Caracterização espectral das amostras representativas, obtidas por amostragens realizadas nos perfis de solo, representando as classes de solo existentes na Fazenda Lavoura Seca – UFC.....	62
Figura 12 – Análise de Componentes Principais dos dados espectrais das amostras de solo avaliados em diferentes profundidades.	67
Figura 13 – Modelos e parâmetros (C_0 ; C_0+C ; a ; R^2) dos semivariogramas ajustados às componentes principais.	70
Figura 13 – Modelos e parâmetros (C_0 ; C_0+C ; a ; R^2) dos semivariogramas ajustados às componentes principais.	71
Figura 14 – Distribuição espacial na área de amostragem das três componentes principais nas três diferentes profundidades avaliadas.....	73
Figura 14 – Distribuição espacial na área de amostragem das três componentes principais nas três diferentes profundidades avaliadas.....	74
Figura 14 – Distribuição espacial na área de amostragem das três componentes principais nas três diferentes profundidades avaliadas.....	75
Figura 15 - Mapa de solos digital da Fazenda Lavoura Seca – UFC.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva dos componentes principais dos dados espectrais das amostras de solo analisadas.....	69
Tabela 2 – Resultados da calibração dos modelos PLSR para as variáveis analisadas com os melhores modelos.	81
Tabela 3 – Resultado da calibração dos modelos PLSR para as variáveis analisadas com os tratamentos mais eficientes.	86

LISTA DE ABREVIACOES

AD - rvore de Decisão
ACP - Análise de Componentes Principais
CP - Componente Principal
CTC - Capacidade de Troca Catinica
MDS - Mapeamento Digital de Solos
MDT - Modelo Digital de Terreno
NIR - Infravermelho Próximo
REM - Radiao Eletromagnética
RMSE - Raiz do Erro Quadrático Médio
RNA - Redes Neurais Artificiais
SIBCS - Sistema Brasileiro de Classificao de Solos
SIG - Sistemas de Informao Geográfica
SR - Sensoriamento Remoto
SWIR - Infravermelho de Ondas Curtas
SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*
UFC - Universidade Federal do Ceará
VIS - Visível

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	Mapeamento de Solos	21
2.1.1	Mapeamento Tradicional de Solos	22
2.1.2	Mapeamento Digital de Solos	23
2.2	Sensoriamento Remoto.....	26
2.3	Espectroscopia de Reflectância	27
2.4	Comportamento Espectral do Solo	28
2.5	Fatores que exercem influência no comportamento espectral do solo.....	30
2.5.1	Umidade.....	30
2.5.2	Textura e Rugosidade	30
2.5.3	Matéria Orgânica	31
2.5.4	Óxidos de Ferro	32
2.5.5	Mineralogia	33
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1	Descrição da Área de Estudos	35
3.1.1	Clima.....	36
3.1.2	Geologia e Geomorfologia.....	36
3.2	Procedimentos Metodológicos	37
3.2.1.	Base de Campo.....	37
3.2.2.	Análises Laboratoriais de Rotina	40
3.2.3.	Dados Espectrais.....	41
3.2.4.	Interpretação dos Dados Espectrais e Obtenção dos Mapas Digitais.....	42
3.2.4.1	Transformação e Redução das Informações Espectrais.....	42
3.2.4.2	Geoestatística e Geração dos Mapas Digitais.....	43

3.2.5. Quantificação de Atributos Físico-Químicos do Solo Através de Dados Espectrais	46
.....	
3.2.5.1 Pré-processamento das Curvas Espectrais.....	46
3.2.5.2 Calibração dos Modelos	46
3.2.5.2 Validação e Avaliação dos Modelos	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Mapeamento Tradicional	49
4.1.1 Caracterização das Amostras de Solo dos Pontos Amostrais	49
4.1.2 Caracterização das Amostras de Solo dos Perfis Completos.....	50
4.1.2.1 Unidade de Mapeamento: RLe.....	53
4.1.2.2 Unidade de Mapeamento: SXe	54
4.1.2.3 Unidade de Mapeamento: PVe	56
4.1.2.4 Unidade de Mapeamento: TCo	58
4.2 Caracterização das Curvas Espectrais das Classes de Solo.....	60
4.3 Mapeamento Digital de solos	66
4.3.1 Análise de Componentes Principais dos Dados Espectrais	66
6.3.2 Geoestatística das Componentes Principais	68
6.3.3 Classificação e Obtenção do Mapa Digital de Solos	76
4.4 Modelagem espectroscópica dos Atributos do Solo	80
4.4.1 Calibração dos Modelos de Predição	80
4.4.2 Validação dos Modelos de Predição	88
5 CONCLUSÕES.....	93
REFERÊNCIAS.....	95
APÊNDICE A – QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS PONTOS DE TRADAGEM	107
APÊNDICE B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA E CLASSIFICAÇÃO COMPLETA DOS SOLOS ENCONTRADOS NA ÁREA DE ESTUDOS.	112
APÊNDICE C – RESULTADO COMPLETO DA CALIBRAÇÃO DOS	

MODELOS PLSR.....	130
APÊNDICE D – RESULTADO COMPLETO DA VALIDAÇÃO DOS MODELOS PLSR.....	135
APÊNDICE E – CURVAS ESPECTRAIS DOS PONTOS DE TRADAGEM....	140

1 INTRODUÇÃO

O solo é tido como fator chave para as inúmeras relações que ocorrem na natureza, promovendo desde sustentação às plantas, bem como atuando na compartimentalização e regulação do fluxo de água e na ciclagem de nutrientes, além de proporcionar também a degradação e atenuação dos efeitos de agentes químicos que venham a provocar algum tipo de impacto no ambiente, causando seu desequilíbrio. O correto funcionamento do solo é o que permite as interações bióticas entre os seres vivos e promove a sustentabilidade ambiental, além de determinar a regulação dos ecossistemas. Dessa forma, informações referentes às características do solo se fazem necessárias, em função da importância que o mesmo possui.

As relações que o solo mantém com os organismos que o habitam e com os compostos nele depositados apresentam caráter dinâmico, sendo fortemente influenciadas pelas suas características pedogenéticas e dependentes, ainda, de suas condições de utilização e manejo. Contudo, para se manejar o solo adequadamente, faz-se necessário conhecer suas características pedológicas e morfológicas, demandando assim a utilização de levantamentos pedológicos, realizados em escalas definidas de acordo com o objetivo pretendido.

A maneira mais conhecida e também mais utilizada na execução de mapeamentos de solos é chamada convencionalmente de método tradicional. Esse método tem como base a localização e diferenciação entre unidades de mapeamento no ambiente por meio da observação das relações solo-paisagem, ou seja, pode-se inferir a respeito da distinção de solos no local estudado observando-se as modificações em um ou mais fatores de formação. O tipo e distribuição do solo na paisagem é determinado de acordo com a intensidade e durabilidade dos processos pedológicos, junto com as diferentes feições do relevo e as características do material de origem, relacionando-se à processos geomorfogenéticos e pedogenéticos.

Entretanto, apesar de mais utilizado, o método tradicional tem se mostrado por diversas vezes inviável, demandando um período de tempo relativamente longo para apresentar resultados e ainda requerendo altos custos para sua execução (McBRATNEY et al., 2003).

A fim de superar essas dificuldades, novos métodos e estratégias, aliados às inovações tecnológicas, vêm sendo constantemente utilizados para a obtenção de informações do solo, como a utilização de dados obtidos por meio de sensoriamento proximal ou espectroscopia, relacionando os mesmos à ocorrência dos tipos de solos existentes no ambiente estudado e aos fatores determinantes para sua formação. A utilização conjunta de modelos numéricos e sistemas de informação, correlacionando as variáveis ambientais e o conhecimento prévio das características do solo com suas propriedades, é a base do Mapeamento Digital de Solos

(McBRATNEY et al., 2003).

O sensoriamento proximal tem sido bastante estudado no decorrer dos anos em relação à sua aplicação no estudo de solos. Esta técnica tomou dois caminhos distintos com o passar do tempo, visando tanto caracterizar o comportamento espectral dos solos, como buscando estimar atributos físico-químicos utilizando dados espectrais. Todavia, em ambas as vertentes a existência de um banco de dados espectral, ou seja, uma biblioteca espectral se faz necessária, servindo de base para padronizar tanto o comportamento espectral dos solos, como a geração de modelos de estimativa de seus atributos (SHEPHERD; WALSH, 2002).

Partindo do pressuposto que cada classe de solo apresenta características distintas, julga-se que seja possível a diferenciação entre as mesmas avaliando-se a variação da energia eletromagnética refletida por essas, fato este que vem a auxiliar os levantamentos pedológicos (TERRA et al., 2018). Assim, esse trabalho fundamenta-se na hipótese que é plausível a elaboração de um mapa digital de solos, semelhante a um obtido de maneira tradicional, utilizando a espectroscopia de reflectância na mensuração e distinção da energia eletromagnética refletida pelas classes de solo existentes na área estudada.

Como objetivo principal, esse estudo buscou identificar e caracterizar as diferentes classes de solo existentes na Fazenda Experimental Lavoura Seca, no município de Quixadá, Ceará, por meio do método tradicional de mapeamento de solos e através do comportamento espectral das amostras pontuais e de perfis de solo, utilizando a espectroscopia de reflectância. Como objetivos específicos, buscou-se:

- a) Caracterizar e relacionar o comportamento espectral de algumas classes de solo do semiárido do Nordeste com seus respectivos processos pedogenéticos atuantes;
- b) Comparar o mapa pedológico produzido pelo método tradicional com o digital, obtido por meio da avaliação do comportamento espectral das classes de solo presentes na fazenda experimental;
- c) Quantificar alguns atributos dos solos estudados por meio de suas respostas espectrais;
- d) Iniciar a construção de uma biblioteca espectral de solos para o semiárido cearense.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Mapeamento de Solos

O conhecimento adquirido em relação às características, atributos e distribuição do solo é fundamental para sua correta utilização, manejo e conservação, sendo considerado crucial no que se refere à ampliação da capacidade produtiva e de utilização do mesmo. Dessa forma, o mapeamento de solos se faz necessário quando se objetiva a obtenção de informações a respeito dos solos existentes em determinada área de interesse (DALMOLIN et al., 2004).

Conjuntamente ao mapeamento, são realizados levantamentos pedológicos, que podem ser entendidos pela descrição da maneira como o solo está distribuído em um determinado local do espaço geográfico, onde essa distribuição é regida pelas relações solo-paisagem, fator determinante para o delineamento e separação das unidades de mapeamento (EMBRAPA, 1995). As informações finais são expostas em um documento bidimensional em papel ou, até mesmo, de maneira digital, fazendo-se essenciais para o planejamento da utilização e manejo do solo, estudos de limitações e viabilidade técnica e econômica da execução de projetos em áreas de interesse, sendo o produto final do mapeamento denominado mapa de solos (TENCATEN, 2008).

O mapeamento dá-se inicialmente em campo com a observação da paisagem e seus atributos, ocorrendo parte de sua construção em escritório ou laboratório, retornando posteriormente para o campo a fim de se proceder a validação das hipóteses pré-estabelecidas, referentes à distribuição dos solos na paisagem. O mapa criado corresponde a uma transposição dos elementos naturais observados, onde o autor do mapa, no uso de sua experiência e conhecimentos adquiridos, utiliza-se de convenções para a representação cartográfica, podendo o mapa representar elementos culturais, estéticos, científicos e, até mesmo, emocionais do autor (LEGROS, 2006).

De acordo com a metodologia de execução e recursos utilizados, o mapeamento de solos pode ser denominado tradicional ou digital. O mapeamento tradicional, ou clássico, se dá por meio de inferências realizadas pelo pedólogo de acordo com as observações da interação entre as variáveis que determinam a formação do solo (CIORPT), sendo elas: clima (C), organismos (O), relevo (R), material de origem (P) e tempo (T) (JENNY, 1941; DOKUCHAEV, 1949). Já o Mapeamento Digital está inserido na pedometria, sendo descrito como uma relação entre métodos quantitativos e o próprio método CIORPT, objetivando principalmente o estabelecimento de predições das propriedades dos solos de uma maneira mais clara e precisa (McBRATNEY et al., 2000).

2.1.1 Mapeamento Tradicional de Solos

O método tradicional de mapeamento de solos tem como ponto de partida as observações realizadas pelo pesquisador no campo e o levantamento de informações da área a ser mapeada, tais como topografia, vegetação e histórico de uso. O detalhamento das observações realizadas, determina a qualidade tanto da fotointerpretação, quanto da delimitação dos polígonos de classes de solos na etapa final do mapeamento (NEUMANN, 2012; IBGE, 2015).

Há duas formas principais de se fazer o mapeamento de solos de maneira tradicional, sendo elas o mapeamento por grid e o mapeamento livre (LEGROS, 2006). No mapeamento por grid, é estabelecida uma grade regular com a distância entre os pontos criteriosamente medida, fazendo-se então as observações em cada ponto (nó) dessa grade. Contudo, o mapeamento tradicional mais utilizado é o categórico, ou livre, baseando-se no equacionamento dos fatores de formação do solo, estabelecidos por Dokuchaev (1949).

A execução da metodologia categórica do mapeamento tradicional de solos ocorre basicamente em três etapas, sendo a primeira delas o agrupamento e visualização dos dados existentes disponíveis, como as fotografias aéreas, características geológicas e o tipo de vegetação presente na área. Após esse processo, são observados os atributos que o solo possui, onde a partir desses é selecionado um modelo a fim de prever a variação espacial do solo. A terceira etapa, consiste na aplicação do modelo selecionado para a área mapeada, buscando uma previsão da distribuição do solo nos locais não amostrados. Realizadas as etapas supracitadas, ocorre então a transposição das informações em um modelo cartográfico, por meio de polígonos com limites precisamente definidos e traçados, gerando o chamado mapa cloroplético, ou mapa temático como é mais comumente conhecido (FUKS, 1998).

Habitualmente as únicas informações disponíveis referentes ao tipo e distribuição de solos em certas áreas do planeta são advindas do mapeamento tradicional, o que evidencia a importância desse método de mapeamento de solos para a comunidade profissional e científica (SCULL et al., 2003). Entretanto, segundo Lagacherie e Mcbratney (2007), na maioria das vezes a obtenção dos dados se dá em pequenas áreas mapeadas, considerando-se que a confecção de mapas com maior riqueza em detalhes e em escalas maiores que 1:20.000 pelo método tradicional implica aos profissionais um alto custo financeiro e retardamento no tempo para obtenção dos resultados finais. Esse fato contribui significativamente para a falta de mapeamento em várias localidades do planeta, bem como para a existência de áreas com levantamentos em escala reduzida (McBRATNEY et al., 2003).

Apesar de ser a principal maneira de se realizar o mapeamento de solos, o método tradicional possui alguns entraves, sendo um dos principais a delimitação das unidades de mapeamento, pois ainda que possuam início de execução diferentes, tanto no mapeamento por grid, quanto no mapeamento livre, o pedólogo faz uso da taxonomia para delimitar e distinguir as classes de solos, modelo determinístico que utiliza da intuição do manipulador para realização da diferenciação entre os tipos de solos, tomando como base as relações entre os mesmos e o ambiente de ocorrência (RANZANI, 1969).

A delimitação das unidades de mapeamento pode ser considerada um fator subjetivo, pois é dependente dos conhecimentos obtidos de forma prática pelo pedólogo, sendo de difícil repasse e, em muitos casos, somente esse saber empírico não justifica uma tomada de decisão (HUDSON, 1992). O mapeamento tradicional requer habilidade dos profissionais que trabalham com o mesmo, sendo executado por grupos de trabalho reduzidos e com aptidão similar, o que torna a atividade solitária e demanda dedicação durante todo o processo (LAGACHERIE; McBRATNEY, 2007).

Outro fator relevante é a lentidão e onerosidade na obtenção de resultados no método tradicional de mapeamento de solos, requerendo subsequentes idas a campo para coleta de informações e amostras de solo, além de múltiplas análises laboratoriais, sendo elas físicas, químicas e/ou mineralógicas. A maioria dos métodos utilizados faz uso de uma grande quantidade de reagentes químicos, o que é desagradável do ponto de vista ambiental, pois há a geração de um amplo volume de resíduos que, porventura, podem ter um destino ou tratamento inadequado, vindo a contaminar solos e lençóis freáticos (SOUSA JUNIOR et al., 2011). Somado a crescente preocupação com o avanço da agricultura e a questão ambiental, tem-se uma demanda por técnicas alternativas para obtenção de informações do solo que produzam resultados com maior agilidade, eficiência e menores custos financeiros (McBRATNEY et al., 2003; NEUMANN, 2012).

2.1.2 Mapeamento Digital de Solos

Com a constante evolução da tecnologia, técnicas alternativas têm sido empregadas no intuito de minimizar os problemas relacionados à obtenção de informações do solo. Dentre essas técnicas, destaca-se a utilização do sensoriamento remoto e do proximal em conjunto com algoritmos matemáticos a fim de estabelecer uma relação da maneira como o solo é formado e sua distribuição no ambiente. A utilização conjunta de modelos numéricos e sistemas de informação, correlacionando as variáveis ambientais e o conhecimento prévio das

características do solo com suas propriedades, constitui o Mapeamento Digital de Solos (MDS) (McBRATNEY et al., 2003; LAGACHERIE, 2008).

Na ciência do solo, a maneira como o solo é caracterizado numa abordagem quantitativa é denominada Pedometria (WEBSTER, 1984). Na maioria das pesquisas que envolvem a pedometria, realizadas atualmente, as técnicas pedométricas são utilizadas principalmente para descrever a variabilidade espacial do solo, sendo materializadas por meio da confecção de mapas digitais (LOPÉZ, 2009). O MDS é uma ramificação da pedometria que busca fundamentalmente uma redução na utilização de recursos humanos e materiais na execução dos trabalhos em campo, obtendo-se assim uma redução de custos financeiros e de tempo na elaboração de mapas de solos. Como consequência, tem-se desde o surgimento desta técnica um elevado crescimento no uso de dados informatizados visando auxiliar a produção de mapas pedológicos (LAGACHERIE; McBRATNEY, 2007).

Uma das principais maneiras de se elaborar um mapa digital de solos é, primeiramente, realizando-se a delimitação da área que se pretende mapear, seguido com a formação de uma base de dados (fotografias terrestres e aéreas e dados cartográficos) visando auxiliar o mapeamento. Então, é feito o planejamento da amostragem em campo, procedendo-se posteriormente a coleta de amostras de solo para análise laboratorial e classificação dos tipos de solos presentes no local de estudos. A partir dos dados coletados, são estabelecidas relações quantitativas com aplicações de modelos matemáticos no intuito de relacionar os pontos amostrais e variáveis preditoras. Ao final do processo, faz-se necessária a verificação em campo para atestar a qualidade do mapa elaborado, identificando os erros na delimitação das classes de solo e retificando o mapa confeccionado (McBRATNEY et al., 2003).

O Modelo Digital do Terreno (MDT) é outra ferramenta que vem auxiliar na elaboração de um MDS, sendo a partir deste analisadas e extraídas as propriedades necessárias para o modelo (nesse caso, dados referentes à topografia) e então relacionadas as informações do solo referentes à sua morfologia e fertilidade com as características do relevo. De posse dessas informações, é viável a construção de um mapa onde há a possibilidade de extrapolação dos dados observados em áreas circunvizinhas não mapeadas, com características ambientais semelhantes (FIGUEIREDO, 2006).

Pode-se inferir que os mapas digitais de solos são produtos dinâmicos, pois conforme as informações referentes às características destes são obtidas, é possível proceder sua introdução e incorporação à base de dados de modo menos complexo, o que permite uma modificação e atualização dos mapas mais facilmente, melhorando assim a precisão das informações dos solos de maneira mais rápida e com menores custos (CARRÉ et al., 2007;

LOPÉZ, 2009).

Diversos modelos podem ser adotados no tocante à predição de informações pedológicas de acordo com o interesse da pesquisa, dando-se destaque aos comumente utilizados, como os estatísticos e geoestatísticos, e alguns ainda pouco explorados, como a árvore de decisão (AD), regressão linear e redes neurais artificiais (RNA) (GIASSON et al., 2006; CRIVELENTI et al., 2009; CHAGAS et al., 2010; KHEIR et al., 2010; CARVALHO JUNIOR et al., 2011; TEN CATEN et al., 2011). A adoção desses modelos permite mapear alguns atributos do solo, tais como granulometria, pH, fertilidade e CTC.

A importância da utilização do MDS é destacada, como exemplo, no mapeamento em áreas com baixo grau de informações e detalhes dos solos presentes, ou ainda em áreas não mapeadas e em áreas já mapeadas com necessidade de atualização de seu mapeamento por consequência das alterações nas propriedades dos solos com o passar dos anos (McBRATNEY et al., 2003; HEMPEL et al., 2008). Dessa maneira, o MDS vem se destacando pelo desenvolvimento de estudos utilizando técnicas de mapeamento com detalhes e escalas em níveis diferenciados, com maior detalhamento (HOWELL et al., 2008).

Apesar de, na atualidade, serem bastante utilizados no levantamento e mapeamento de solos, métodos matemáticos e estatísticos empregados no estudo de solos têm sido aplicados desde a década de 1960, sendo reconhecido há pouco mais de 20 anos como um ramo diferente da pedologia tradicional (McBRATNEY et al., 2000). Segundo McBratney et al. (2003), em levantamento realizado das pesquisas de predição envolvendo classes ou atributos de solos, houve um aumento considerável no número de trabalhos com modelagem nos últimos anos e os dados obtidos diante da comunidade científica vem obtendo grande aceitação. Os estudos efetuados objetivam principalmente, dentre os diferentes modelos, a avaliação e a adoção de um padrão no mapeamento digital de solos (HOWELL et al., 2008).

Mesmo sendo tratado como uma futura alternativa ao mapeamento tradicional, gerando produtos semelhantes com menores custos e em menor espaço de tempo, no Brasil o potencial de utilização do MDS ainda não é amplamente explorado, possuindo uma baixa quantidade de trabalhos técnicos e científicos, com abrangência muitas vezes reduzida, sendo em grande parte desenvolvidos por meio de empresas de capital privado (McBRATNEY et al., 2003; LOPÉZ, 2009).

2.2 Sensoriamento Remoto

Entende-se por Sensoriamento Remoto (SR) como a técnica de obtenção de informações de determinado alvo sem a necessidade de contato físico com o mesmo (NOVO, 2011; LORENZZETTI, 2015). Isto se dá por meio da interação entre a energia eletromagnética e sistemas sensores, que captam os dados do alvo, mensurando sua reflectância, ou seja, a radiação eletromagnética (REM) proveniente de fonte natural ou artificial que interage com o alvo e é refletida pelo mesmo, gerando informações quando coletadas pelo sensor (SABINS, 2000; MENESES et al., 2012).

O Sol é a principal fonte da radiação eletromagnética utilizada no sensoriamento remoto orbital. A energia é transmitida pela diferença de temperatura existente entre o Sol e a Terra, sendo essa transmissão denominada energia radiante, propagando-se por meio de ondas eletromagnéticas e não precisando de um meio material para se propagar. A REM é energia, formada por um campo magnético perpendicular a um campo elétrico oscilando de maneira perpendicular a direção de propagação da onda, de maneira que o campo magnético origina um campo elétrico e o campo elétrico origina um campo magnético e assim sucessivamente. Dessa forma, cada comprimento de onda possui determinada energia e frequência (MOREIRA, 2012).

O sensoriamento remoto possui relação direta com a radiação eletromagnética que é emitida ou refletida dos alvos, bem como a obtenção e manuseio das informações obtidas pelos sensores para a disponibilização desta informação numa forma passível de interpretação. As técnicas de radiometria são responsáveis por analisar e mensurar a interação da radiação com um alvo, sendo a quantidade de energia envolvida no processo denominada grandeza radiométrica. Dentre essas grandezas, destaca-se principalmente a energia radiante (Q), fonte da qual derivam as outras grandezas, como: a intensidade radiante (I), a radiância (L), a irradiância (E) e o fluxo radiante (F) (STEFFEN; MORAES, 1993; MOREIRA, 2012).

O solo, a vegetação, os corpos hídricos, entre outros alvos presentes na superfície da Terra, possuem uma assinatura espectral distinta, variando de acordo com suas características biofísicas e bioquímicas, apresentando comportamento espectral característico ao absorver, refletir e transmitir a radiação eletromagnética em locais, condições climáticas e comprimentos de onda diferentes. Por meio dessa diferença na reflectância dos alvos, ao ser mensurada a variação na intensidade da radiação eletromagnética refletida, é possível fazer a identificação e distinção dos mesmos nas imagens obtidas por sensores remotos (FLORENZANO, 2011).

Nas imagens geradas por sensores remotos, a energia média é representada no pixel. O pixel é o menor elemento da imagem, estando associado a um valor numérico, correspondente

a intensidade da radiação eletromagnética que interage e é refletida. A junção de vários pixels é o que compõe a imagem digital (IBGE, 2000).

Há vários sistemas sensores utilizados na aquisição de dados de sensoriamento remoto, sejam eles orbitais, aerotransportados ou terrestres, podendo ser, ainda, ativos, ou seja, que produzem sua própria radiação, ou passivos, que dependem de uma fonte de radiação externa para produção de dados (IBGE, 2000). Cabe ao usuário definir qual o mais adequado para a aquisição do maior número de informações dos alvos de interesse, conhecendo as vantagens e desvantagens de cada um.

2.3 Espectroscopia de Reflectância

A espectroscopia pode ser entendida como a aquisição de informações relacionadas à constituição de um corpo por meio da distribuição de sua energia radiante, onde a interação entre a energia eletromagnética, advinda de uma fonte natural ou artificial, com a superfície do corpo citado resultam em fenômenos de absorção, reflexão e transmissão (CLARK; ROUSH, 1984). Ao se utilizar de sensores, sem que estes venham a ter contato físico direto com a amostra, a espectroscopia de reflectância é capaz de registrar sob diversos comprimentos de onda os valores de radiação eletromagnética refletidos pela superfície do corpo analisado, representando os resultados sob a forma gráfica através de curvas de reflectância espectral, ou apenas curvas espectrais.

Na espectroscopia de reflectância, várias faixas espectrais têm sido amplamente testadas e utilizadas ao longo do tempo em estudos quantitativos e qualitativos relacionados ao levantamento e caracterização das classes de solos em múltiplas finalidades, sendo que dentre essas faixas espectrais, a maioria dos estudos têm se concentrado nos comprimentos de onda correspondentes ao visível (VIS/*visible*), que vai de 350 a 700 nm, e no infravermelho próximo (NIR/*near infrared*), que vai de 700 a 2500 nm, subdividindo-se este último, ainda, em infravermelho de ondas curtas (SWIR/*shortwave infrared*), de 1100 a 2500 nm (HUNT; SALISBURY, 1970; STONER; BAUMGARDNER, 1981; BAUMGARDNER et al., 1985; DEMATTÊ et al., 2004; SHEPHERD; WALSH, 2007; VISCARRA-ROSSEL; CHEN, 2011).

Devido à proximidade existente entre o sensor e o alvo e o fato de se dar em pequenas áreas amostrais, em leituras espectrais realizadas com radiômetros em nível de solo há uma maior probabilidade de os dados obtidos retratarem mais fielmente aquilo que se pretende avaliar. Esses aparelhos podem ser instalados tanto em campo, levando em consideração as condições climáticas existentes na área de estudo, como sobre bancadas em laboratório,

minimizando-se os efeitos do ambiente externo nas leituras conduzidas (MOREIRA, 2012).

Visando reduzir custos financeiros, tempo para obtenção de resultados e a utilização de reagentes químicos que podem gerar impactos ambientais, a utilização da espectroscopia de reflectância tem sido bem vista no que se refere à métodos alternativos auxiliares aos métodos convencionais para determinação de atributos do solo (VISCARRA-ROSSEL et al., 2009; VENDRAME et al., 2012). Em razão do espectro ser resultado direto dos constituintes opticamente ativos que compõem o solo analisado, como também receber influência de atributos físicos como umidade e textura, a utilização da espectroscopia de reflectância na determinação de atributos do solo se faz possível (STENBERG et al., 2010).

2.4 Comportamento Espectral do Solo

O comportamento espectral que um alvo apresenta quando a energia eletromagnética refletida por esse é mensurada, é regido pelas características físicas e químicas dos materiais que compõem sua superfície e estrutura, podendo este absorver, transmitir ou refletir a energia incidente de maneira distinta nos diferentes comprimentos de onda. Esse comportamento espectral pode ser avaliado pelos valores de reflectância que o alvo apresenta ao longo do espectro eletromagnético, onde, devido ao comportamento variável que diferentes corpos possuem, é possível identificá-los no ambiente analisando suas respostas espectrais características (SABINS, 2000).

Por apresentarem constituições distintas, diferentes tipos de solos podem gerar diferentes dados, inerentes às suas características, podendo ser expressos pela representação de curvas de reflectância, geralmente abrangendo a região do espectro eletromagnético entre 400 e 2500 nm. Por consequência da interação entre os constituintes do solo e o espectro eletromagnético, é possível a observação de feições particulares ou, em outras palavras, bandas de absorção nas curvas de reflectância (DALMOLIN et al., 2005).

A variação da reflectância na região do visível e infravermelho se dá em função da rugosidade superficial dos constituintes do solo, dos minerais primários e de argila, do material orgânico e dos sais e materiais parcialmente cristalizados. Esses atributos são componentes chave em qualquer sistema de classificação de solos, servindo de referência até mesmo para o direcionamento no manejo do solo (BROWN et al., 2006).

São vários os fatores que podem afetar o comportamento espectral do solo, podendo-se destacar como principais: a coloração, determinada pela quantidade de matéria orgânica e óxidos de ferro presente desde sua formação; a granulometria, a rugosidade da superfície e o

estado de umidade que o mesmo se encontra (STONER; BAUMGARDNER, 1981; EIPHANIO et al., 1992; JONES; VAUGHAN, 2010; MULDER et al., 2011). Devido a variabilidade desses fatores na natureza, cada solo pode apresentar uma constituição diferente, favorecendo com que sua curva espectral tenha comportamento distinto ao longo dos diferentes comprimentos de onda.

Devido as diferentes classes de solo existentes apresentarem particularidades distintas, para que seja possível sua caracterização por meio do sensoriamento remoto torna-se necessária a existência de um banco de dados espectral, ou, em outras palavras, uma Biblioteca Espectral. Vários autores vêm direcionando estudos neste aspecto em diferentes locais no globo terrestre (DEMATTÊ et al., 2000; SHEPHERD; WALSH, 2002; BROWN et al., 2006; BELLINASSO et al., 2010). Segundo esses, há pelo menos três requisitos básicos para a construção de uma biblioteca espectral de solos: (a) o número de amostras deve ser representativo, ou seja, a biblioteca espectral deve conter um número de amostras suficiente para que se represente de maneira satisfatória a variabilidade de solos encontrados na região de estudo; (b) a coleta e manuseio das amostras de solo deve ser criteriosa, sendo estas sub-amostradas, manipuladas, preparadas, digitalizadas e armazenadas com o máximo de cuidados possíveis, pois qualquer que seja o descuido nessa manipulação implicará em alterações na curva espectral a ser obtida; (c) os dados analíticos de referência a serem utilizados nas calibrações das amostras devem advir de procedimentos analíticos reconhecidos e confiáveis.

Há, no entanto, complexidades na avaliação do comportamento espectral dos solos quando se realizam estudos com sensores orbitais e em laboratório, uma vez que em laboratório é possível verificar o efeito que os fatores bióticos exercem sob a curva espectral, fornecendo a possibilidade de isolá-los e estudá-los separadamente, enquanto que na natureza esses fatores estão intimamente ligados ao solo, influenciando em sua resposta espectral (ROBERTS; COZZOLINO, 2016).

A atuação dos atributos do solo, influenciando a resposta espectral do mesmo, pode ser visualizada ao se obter as curvas espectrais por meio de sensores terrestres, observando-se a presença de bandas de absorção ou ainda a diferença na intensidade de reflectância dos diferentes tipos de solos avaliados. Quando se passa do nível terrestre para o orbital, percebe-se que, na maioria dos sensores orbitais, há uma diminuição na resolução espectral por conta da redução no número de bandas, ocasionando uma perda de detalhes nas curvas espectrais, com conseqüente alteração em sua forma. Apesar desse fato, ainda assim se faz possível analisar a resposta espectral do solo através da intensidade de reflectância das curvas obtidas por meio de sensores orbitais (GENÚ; DEMATTÊ, 2012).

2.5 Fatores que exercem influência no comportamento espectral do solo

2.5.1 Umidade

De maneira geral, solos úmidos possuem sua reflectância diminuída por aparentarem ser mais escuros do que solos secos. Assim, conforme a umidade do solo aumenta, a reflectância do mesmo passa a diminuir, ocorrendo tanto nas bandas de absorção de água, quanto nas demais faixas existentes, devido às reflexões internas decorrentes da película de água que recobre as partículas do solo (STONER; BAUMGARDNER, 1981; MULLER; DÉCAMPS, 2001; DEWITTE et al., 2012).

A avaliação das implicações da mudança de umidade na reflectância do solo é importante, pois são vários os métodos utilizados para inferir propriedades da superfície terrestre, tais como os índices de vegetação (IV) e de solo, que podem ser afetados consideravelmente em razão das alterações na reflectância dos alvos por conta da variação da umidade (PINTY et al., 1998). Assim, para se melhorar a capacidade de detecção nas propriedades da vegetação e do solo, modelos confiáveis baseando-se na reflectância em função da umidade se fazem necessários.

A variação na umidade do solo exerce efeito sobre todo o comprimento de onda na faixa de 400-2500 nm, alterando a eficácia dos índices espectrais (LIU et al., 2002). O teor de água que o alvo de interesse possui e a rugosidade superficial são os principais fatores que influenciam o retroespalhamento da radiação de sensores de microondas ativos. Contudo, alguns estudos demonstram que o retroespalhamento do sinal se faz independente da rugosidade do solo quando a umidade do mesmo se torna muito elevada (ANDERSON; CROFT, 2009).

Apesar do relato de alguns autores de que a adição de água no solo promove uma substancial redução na radiação refletida, para Accioly e Huete (2000) o formato da curva espectral do solo não é substancialmente alterado, sendo que a redução constatada na refletividade do solo após a elevação da umidade mostra-se mais dependente da cor que o mesmo possui, que do próprio teor de água.

2.5.2 Textura e Rugosidade

A quantidade de argila presente no solo possui grande influência sobre a estrutura deste, sendo considerada como principal agente responsável por promover a formação de agregados no solo, o que faz com que as partículas permaneçam mais próximas, ocasionando menor

reflecção da energia eletromagnética que incide sobre o solo (BAUMGARDNER et al., 1985; BELLINASO et al., 2010).

A menor reflectância em solos argilosos e muito argilosos é atribuída principalmente a maior agregação destes solos e a presença de minerais trans-opacos, o que causa, conseqüentemente, uma maior absorção da energia eletromagnética incidente (BELLINASO et al., 2010). Assim, solos argilosos possuem menor refletividade que solos arenosos (DEWITTE et al. 2012).

Além disso, o quartzo, mineral altamente presente na fração areia, possui resposta espectral na faixa do VIS-NIR-SWIR caracterizada por elevado albedo somado a ausência de feições de absorção, fator esse que geralmente é marcante no espectro de solos arenosos (BELLINASO et al., 2010; VICENTE; SOUZA FILHO, 2011). Esse fato foi constatado também por Franceschini et al. (2013), analisando a energia refletida em amostras de solos com diferentes texturas, puderam observar uma diminuição na reflectância das amostras arenosas para as muito argilosas em todo espectro no VIS-NIR-SWIR, considerando o espectro médio de cada classe textural em todos os sistemas de classificação da textura analisados.

A rugosidade superficial dos alvos analisados também pode ser considerada com um dos fatores que promovem diferenciação na resposta espectral. A maneira como as frações areia, silte e argila estão arrançadas no solo, formando ou não agregados, tem ligação direta com a rugosidade do mesmo. Além disso, a reflectância depende tanto da rugosidade superficial, como também do formato e da maneira como os agregados superficiais estão orientados (IRONS; SMITH, 1990).

A influência da rugosidade na intensidade da reflectância é resultante de uma menor interação da radiação eletromagnética com o alvo, onde superfícies mais lisas tendem a possuir maior efeito de espelhamento dessa radiação que superfícies rugosas. Assim, quanto maior a rugosidade, menor será a interação com a energia eletromagnética incidente, enquanto que a diminuição da rugosidade da superfície imageada tende a aumentar a refletividade desta (DEWITTE et al., 2012).

2.5.3 Matéria Orgânica

A matéria orgânica, por seu alto poder pigmentante, capaz de promover considerável alteração na coloração do solo, é um dos principais fatores que alteram a reflectância deste, especialmente na faixa do visível, ocorrendo a diminuição na energia refletida à medida que o conteúdo de constituintes orgânicos aumenta. Em solos com elevados teores de matéria

orgânica, a energia eletromagnética é absorvida, o que acaba por reduzir consideravelmente o albedo do solo (HENDERSON et al., 1992).

A matéria orgânica existente no solo é capaz de diminuir a intensidade de reflectância deste, atenuando toda a curva espectral, principalmente na faixa de 400 a 2500 nm. Sua atuação pode mascarar até mesmo os óxidos de ferro presentes no solo, recobrando-os e afetando as bandas de absorção destes minerais (DEMATTÊ et al., 2003). Reforçando a influência da matéria orgânica sobre os óxidos de ferro, Fernandes et al. (2004) observaram que dependendo do conteúdo destas duas variáveis no solo, a matéria orgânica pode vir a mascarar os efeitos dos óxidos, interferindo em sua resposta espectral, absorvendo energia e diminuindo a sua intensidade de reflectância.

Alguns trabalhos relatam que ao ser adicionada à matriz do solo, a matéria orgânica reduziu a intensidade da reflectância do mesmo, com aumento da absorbância nos comprimentos de onda de 1440 nm, 1900 nm e 2240 nm (DAUGHTRY, 2001; FIDENCIO et al., 2002).

Ao analisar amostras de Latossolos em diferentes profundidades, Genú et al. (2010) constataram similaridade na sua resposta espectral em decorrência da homogeneidade que essa classe de solo possui, ocorrendo a diferenciação das amostras com o aumento da profundidade por conta da distinção na intensidade da reflectância, sofrendo essa um aumento em profundidade devido à diminuição no teor de matéria orgânica. Essa afirmativa é reforçada por Galvão et al. (1997), obtendo resultados semelhantes ao se estudar seis classes de solo com ampla distribuição no Brasil.

Além da quantidade presente, a composição da matéria orgânica também pode influenciar o comportamento espectral dos solos, sendo os constituintes orgânicos como ácidos húmicos e fúlvicos os principais responsáveis por esta influência (HENDERSON et al., 1992). Mudanças no comportamento espectral do solo na região do visível e infravermelho próximo foram verificadas por Ben-Dor et al. (1997) ao analisar a reflectância da matéria orgânica em diferentes estágios de decomposição, sendo este fato correlacionado com a relação C/N.

2.5.4 Óxidos de Ferro

As formas mais frequentes de ferro (Fe^{3+}) encontradas nos solos brasileiros são a Goethita (FeOOH) e a hematita (Fe_2O_3), provenientes da oxidação do ferro (Fe^{2+}) presente nos minerais primários durante o processo de formação do solo (CORNELL; SCHWERTMANN, 1996). As diferentes cores que estes possuem são promovidas pela absorção seletiva da luz na

região do intervalo de comprimento de onda correspondente ao visível, causada pela transição dos elétrons na camada orbital (DALMOLIN et al., 2005). Com grande ocorrência nas regiões tropicais e subtropicais, a presença dessas formas de ferro oxidado afeta a constituição química e física do solo, influenciando também seu comportamento espectral (GENÚ et al., 2010).

As feições de absorção ocasionadas por óxidos de ferro foram descritas e caracterizadas com êxito por alguns pesquisadores, com a hematita proporcionando bandas de absorção em 530 nm e a goetita em 480 nm e 900 nm (MADEIRA NETTO, 2001). Em 2265 nm ocorre também uma feição atribuída a gibbisita, ocasionada pela presença de ligações Al-OH (MADEIRA NETTO; BAPTISTA, 2000).

O que se observa em relação aos óxidos de ferro magnetita e ilmetita é que esses não proporcionam feições de absorção, entretanto vale salientar que sua presença pode promover a diminuição na intensidade de reflectância pela presença de minerais trans-opacos e de alta absorção (HUNT, 1979). Em solos derivados de material de origem rico em ferro, a presença de minerais trans-opacos afeta as leituras espectrais tanto por apresentar albedo muito baixo, como também pela ausência de feições de absorção na região do espectro eletromagnético entre 400 a 2500 nm (VICENTE; SOUZA FILHO, 2011).

O aumento da reflectância do solo após a retirada do ferro amorfo, revela que a presença dessa forma de ferro relaciona-se diretamente com o albedo do solo (DEMATTÊ et al., 2003). Apesar da goethita apresentar maior intensidade de reflectância que a hematita, a presença desses óxidos de ferro no solo influencia o comportamento da curva espectral principalmente na região do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio, diminuindo o albedo conforme seu teor aumenta (STONER, 1979; FORMAGGIO et al., 1996; VITORELLO; GALVÃO, 1996; DEMATTÊ; GARCIA, 1999).

2.5.5 Mineralogia

Além da matéria orgânica, os minerais de argila são constituintes fundamentais do solo, promovendo o surgimento de feições de absorção distintas ao longo do espectro eletromagnético, desde o visível ao infravermelho (VISCARRA-ROSSEL et al., 2006). Em função das várias feições de absorção presentes nas curvas espectrais e da influência que a mineralogia exerce sob albedo do solo, faz-se necessário o conhecimento acerca da composição mineralógica que este possui quando se pretende avaliar o solo espectralmente.

Em curvas espectrais características, é possível visualizar picos de absorção nos comprimentos de onda entre 750 e 1000 nm, produto da interação entre a radiação

eletromagnética e os óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e goethita) (HUNT, 1980, FERNANDES et al., 2004; RICHTER et al., 2009). Há também feições de absorção nos comprimentos de onda 1,400 e 1,900 nm resultantes da vibração das moléculas de água presentes na água residual do solo ou ainda na estrutura cristalina dos minerais de argila (STONER; BAUMGARDNER, 1981; BEN-DOR et al., 2008). Na montmorilonita, por conta da presença de moléculas de água entre as camadas unitárias, intensas bandas de absorção ocorrem também em 1400 e 1900 nm, visto que a banda em 1900 nm é atribuída às vibrações de moléculas de água (HUNT; SALISBURY, 1970).

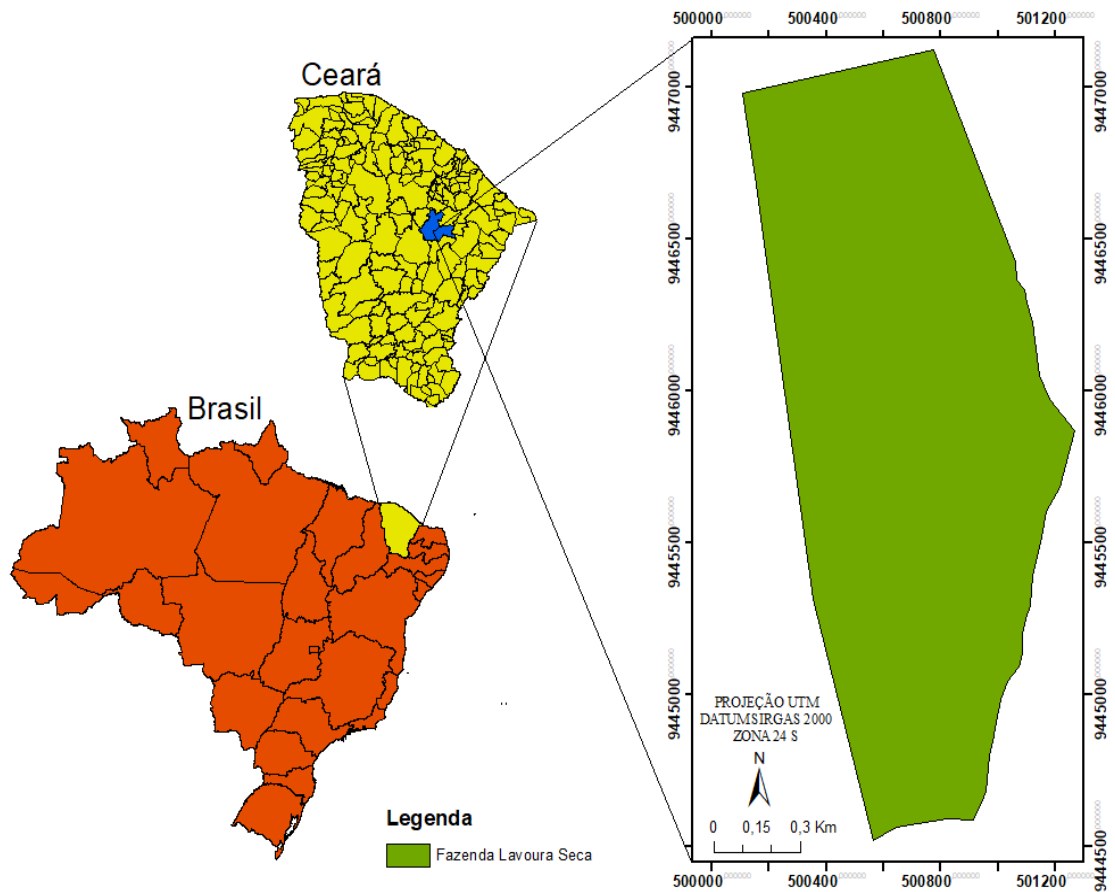
Existem ainda feições de absorção próximas ao comprimento de onda de 2.200 nm, atribuídas à caulinita e em 2265 nm, atribuídas à gibsitita (CLEMENTE et al., 2000; DEMATTÊ et al., 2004; VICENTE; SOUZA FILHO, 2011). Picos de absorção podem ser avistados também no comprimento de onda de 2350 nm e 2450 nm, promovidos por influência do Al-OH dos minerais 2:1, principalmente pela presença de ilita (HUNT et al., 1971).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da Área de Estudos

O local selecionado para a realização deste estudo corresponde à Fazenda Lavoura Seca, propriedade da Universidade Federal do Ceará (UFC), com área total de aproximadamente 190 hectares. A Fazenda localiza-se no município cearense de Quixadá (FIGURA 1), na mesorregião do Sertão de Quixeramobim, entre os municípios de Itapiúna, Choró e Ibaretama, distante 168 km de Fortaleza, próximo a estrada CE-020 (km 80).

Figura 1 - Localização da Fazenda Lavoura Seca - UFC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1 Clima

O clima da região é do tipo BSw_h (quente e semiárido) de acordo com a classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2014), com predomínio de duas estações climáticas ao longo do ano, sendo uma chuvosa de curta duração que se estende de fevereiro a junho e a outra seca entre os meses de julho a janeiro. A precipitação pluviométrica média é de 750 mm e a temperatura média é de 27,3°C, concentrando-se os valores máximos nos meses de outubro a dezembro e mínimos em julho, porém, permanecendo estável ao longo do ano (IPECE, 2015).

Com altitude de 190 m, a umidade relativa do ar na região sofre elevação em períodos chuvosos e diminuição em períodos secos, o que mostra a relação direta desta com a precipitação pluvial. Os índices de insolação mais intensos ocorrem entre os meses de agosto a dezembro, momento em que a evaporação potencial é expressiva (SOUSA, 2010).

3.1.2 Geologia e Geomorfologia

O município de Quixadá está situado na bacia hidrográfica do Rio Banabuiú (IPECE, 2015), com vegetação predominante do tipo caatinga hipoxerófila. Por situar-se na zona de abrangência do complexo granítico Quixadá – Quixeramobim, a formação do relevo da região é composta por diversas formações rochosas denominadas de inselbergs ou monólitos. O relevo da área é do tipo suave a ondulado com substrato de gnaisses, onde a manifestação irregular de fatores morfodinâmicos, geológicos e paleoclimáticos, no decorrer da evolução geoambiental da área, exerceu forte influência na formação do relevo (SOUZA, 2006).

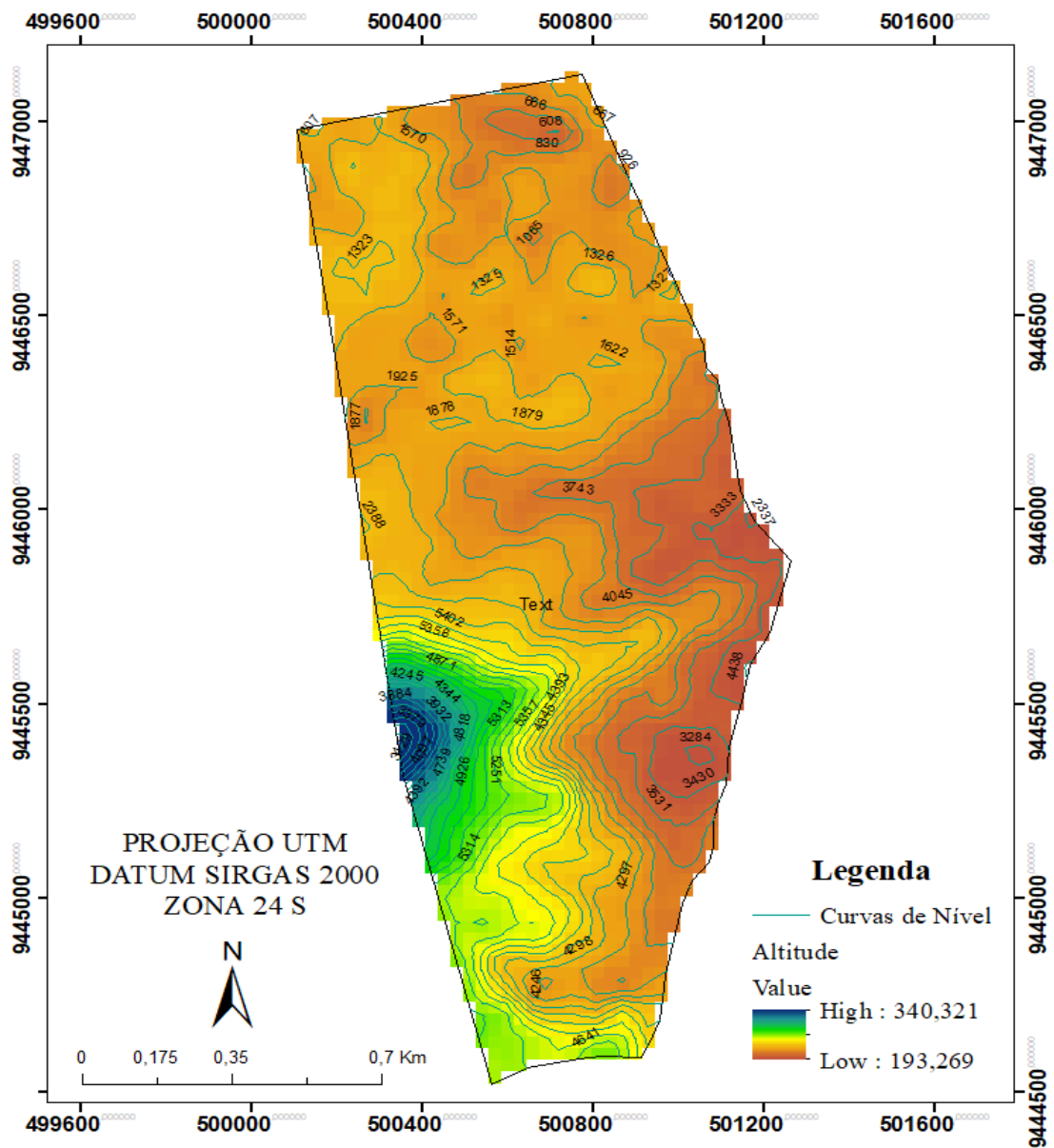
O predomínio de rochas do embasamento cristalino se faz notável na área deste estudo, sendo representado por gnaisses, migmatitos e granitos, associados a restos de supracrustais sob pequenas faixas preenchidas por quartzitos, xistos e anfibólitos. Estes materiais são de origem vulcânica, gerados no período pré-cambriano, com a presença de maciços residuais, depressões sertanejas e inselbergs que podem atingir até 150 metros de altura (COSTA; SILVA, 2012). Os terrenos cristalinos são compostos por rochas do complexo nordestino e correspondem aos maciços residuais e a depressão sertaneja (RADAMBRASIL, 1981).

3.2 Procedimentos Metodológicos

3.2.1. Base de Campo

Para auxiliar na delimitação das unidades de mapeamento, para a elaboração do mapa pelo método tradicional, foi elaborado um mapa planialtimétrico da fazenda, sendo também traçadas curvas de nível a partir de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de 30 m (FIGURA 2).

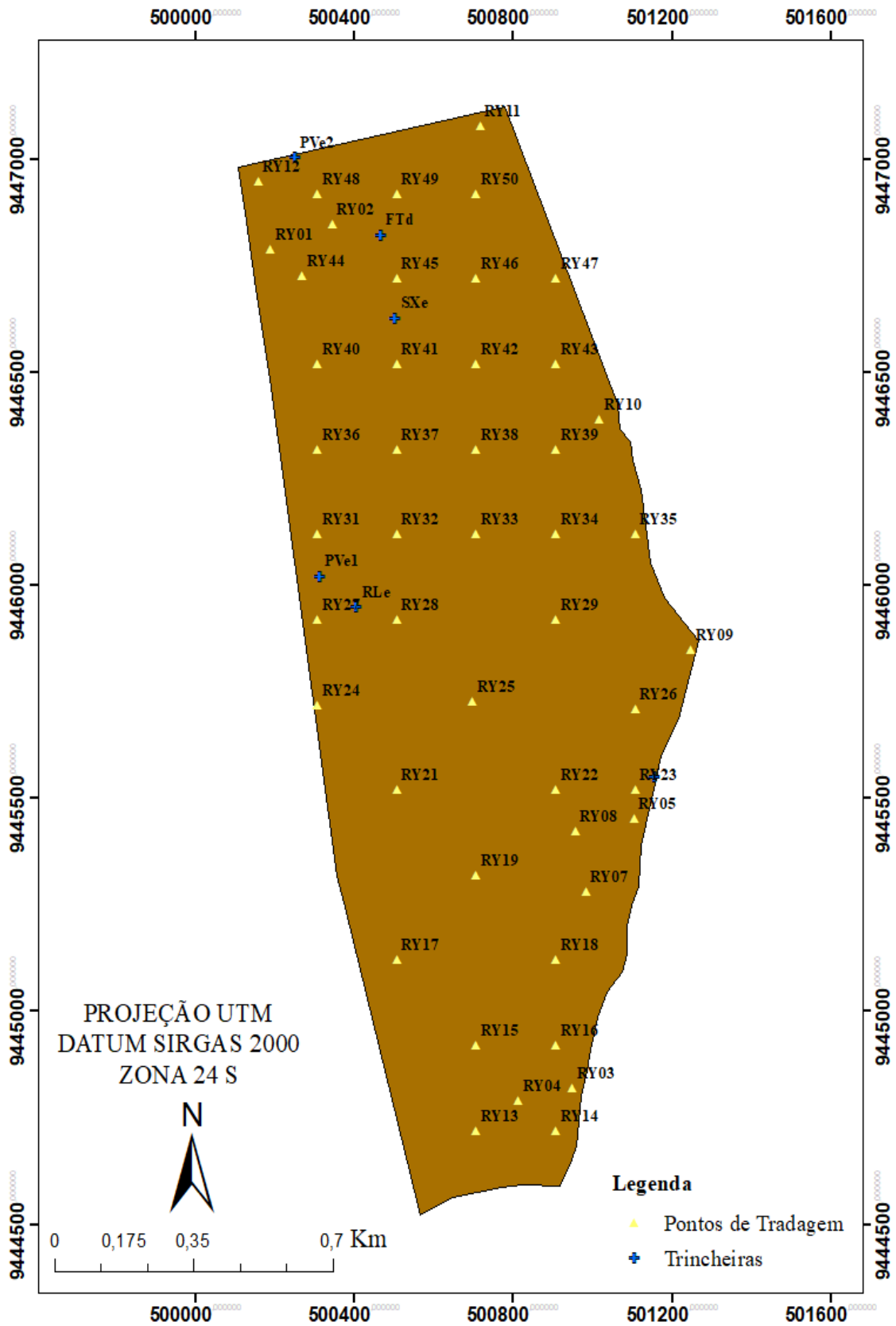
Figura 2 - Mapa planialtimétrico da Fazenda Lavoura Seca - UFC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Visando obter a representatividade dos solos presentes na fazenda, foi elaborado um mapa pedológico em nível semidetalhado, utilizando-se a escala 1:20.000 (EMBRAPA, 1995). Para isso, foi realizada a amostragem estabelecendo-se uma grade regular de 200 m x 200 m, sendo adicionados pontos de coleta extras fora da grade conforme a necessidade. Os locais de amostragem foram numerados e georreferenciados, totalizando 47 pontos de coleta de amostras. Os pontos para observação no campo tiveram por objetivo identificar os diferentes solos e seus limites, sendo amostrados com trado, modelo holandês, nas profundidades 0-20, 40-60 e 80-100 cm. Em alguns casos, ao se observar a presença do horizonte diagnóstico fora das profundidades pré-estabelecidas, foram coletadas amostras em profundidades extras (20-40 e 60-80 cm) (FIGURA 3).

Figura 3 – Localização dos pontos de tradagem e perfil completo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2. Análises Laboratoriais de Rotina

As amostras de solo coletadas foram posteriormente levadas ao laboratório de Pedologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), sendo devidamente identificadas e preparadas para a realização da caracterização química, granulométrica e espectral. Para isso, estas foram primeiramente dispostas para secagem ao ar e a sombra, moídas e peneiradas (malha de 2 mm), para obtenção da TFSA (Terra Fina Seca ao Ar).

A análise granulométrica foi executada no laboratório de Física do Solo da Universidade Federal do Ceará (UFC), sendo esta realizada por sedimentação de sólidos em meio líquido, utilizando-se o método da pipeta (CAMARGO et al., 2009), onde a fração areia total (0,05 – 0,002 mm) e o teor da fração argila (<0,002 mm) foram obtidos por peneiramento e o silte calculado por diferença.

As análises químicas das amostras coletadas foram realizadas no laboratório de Manejo do Solo e Água da Universidade Federal do Ceará (UFC) e no laboratório de Solo e Água da Embrapa Agroindústria Tropical, onde foram determinados: pH (H₂O, solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ e solução de KCl 1 mol L⁻¹), fósforo, sódio, potássio, alumínio, acidez potencial, condutividade elétrica e cálculo da CTC e da saturação por bases (EMBRAPA, 2009), teor de carbono orgânico (MENDONÇA; MATOS, 2005), N total, cálcio e magnésio (RAIJ et al., 2001).

Utilizando-se dos resultados provenientes das análises de solos, do mapa planialtimétrico da área, das observações de campo e demais informações da região, foram traçadas, em escritório, possíveis unidades de mapeamento, sendo demarcados os locais para abertura de trincheiras para a realização da descrição morfológica completa. Nesta descrição foram incluídos: cor úmida e seca, conforme a caderneta de cores Munsell, textura, estrutura e consistência do solo (SANTOS et al., 2015) e coleta de amostras de todos os horizontes identificados no exame dos perfis dos solos.

Foram realizadas novas análises físico-químicas nas amostras de solo provenientes dos horizontes, utilizando-se os métodos supracitados a fim de confirmar as classes de solos existentes na Fazenda.

De volta ao escritório, tendo em mãos o mapa plotado com os pontos onde foram realizadas as tradagens e suas respectivas análises de solo, os locais onde foram examinados perfis e suas descrições morfológicas, com resultados das análises físico-químicas, foi definida a classificação das unidades taxonômicas até o 4º nível categórico segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013) e os limites dos polígonos delineados para cada

uma delas, elaborando-se, assim, o mapa semidetalhado pelo método tradicional.

3.2.3. *Dados Espectrais*

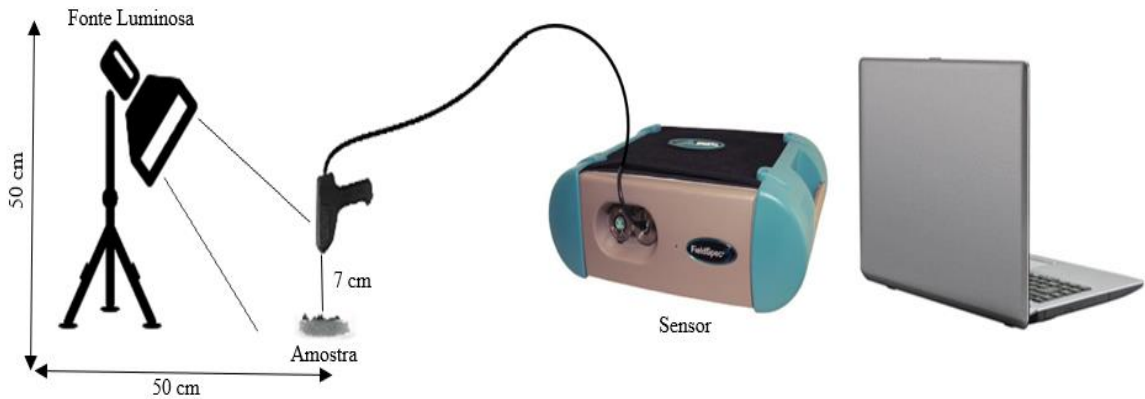
A coleta de dados espectrais das amostras de solo (superfície, subsuperfície e dos horizontes dos perfis) foi realizada em sala escura, utilizando-se o espectrorradiômetro FieldSpec Pro FR 3 (*Analytical Spectral Devices*, Boulder, Colorado, USA), pertencente ao Laboratório de Espectrorradiometria do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará. O sensor hiperespectral utilizado recobre a faixa espectral entre 350 e 2500 nm com resolução espectral de 1 nm entre 350 e 1100 nm e de 2 nm entre 1100 e 2500 nm. As faixas espectrais são correspondentes ao visível (VIS = 400 a 700 nm), infravermelho próximo (NIR = 700 a 1100 nm) e infravermelho de ondas curtas (SWIR= 1100 a 2500 nm).

Para obtenção dos dados espectrais de laboratório, as amostras previamente moídas e peneiradas (malha de 2 mm) foram acondicionadas em placas de petri de 9 cm de diâmetro, formando uma camada com espessura de aproximadamente 1,5 cm, sendo, então, levadas para secagem em estufa a 45 °C por um período de 24 horas para homogeneização dos efeitos da umidade e rugosidade (EPIPHANIO et al., 1992).

Foi utilizada como padrão de referência para calibração do sensor uma placa branca, através de pré-leitura, considerada como padrão de 100% de reflectância (Spectralon). Na geometria utilizada, a amostra foi posicionada a 7 cm do sensor e 70 cm da fonte de iluminação (lâmpada de 250 Watts), com um ângulo zenital de 45° e a distância da superfície do piso a fonte luminosa de 50 cm (FIGURA 4). Assim, o fator de reflectância espectral bidirecional foi gerado pela razão entre o fluxo radiante espectral refletido pela amostra de solo e o fluxo radiante espectral refletido por um padrão de referência, possuindo a mesma iluminação e visada, por se encontrarem sob as mesmas condições geométricas.

A partir do fator de reflectância bidirecional foram obtidos os espectros, sendo realizadas três leituras espectrais para cada amostra e o valor médio das leituras posteriormente calculado. Objetivando a total varredura de diferentes pontos da placa, a mesma foi girada cerca de 120 graus entre cada leitura, obtendo-se ao final das leituras os valores espectrais das amostras de solo.

Figura 4 - Geometria de aquisição dos dados espectrais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4. Interpretação dos Dados Espectrais e Obtenção dos Mapas Digitais

3.2.4.1 Transformação e Redução das Informações Espectrais

Os espectros das amostras superficiais, subsuperficiais e dos horizontes dos perfis de solo foram analisados no intuito de evidenciar a diferenciação existente entre as amostras e classes de solos existentes na área estudada. Em decorrência da quantidade de ruídos existentes ao final dos espectros, houve a necessidade da suavização destes por meio da aplicação do método de suavização hiperespectral chamado filtro de média móvel. Para sua execução, esse filtro calcula o valor espectral de pontos considerando um intervalo definido a partir de um ponto médio (TSAI; PHILPOT, 1998). Neste estudo foi utilizada a média de dez pontos, considerando-se que a escolha visou a suavização do ruído, de tal forma que não atenuasse fortemente as feições de absorção características nas curvas espectrais.

Em todas as curvas espectrais, para correção de possíveis erros devidos a não linearidade, os dados inicialmente obtidos em reflectância foram transformados em absorbância (EQUAÇÃO 1).

$$A = \log \frac{1}{R} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

R = reflectância

Posteriormente, com o objetivo de reduzir a quantidade de informações espectrais nos pontos amostrais, visto que foi gerado um volume de informações muito grande, onde cada curva espectral detém um total de 2151 bandas, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (ACP) (WOLD, 1982), transformando os dados espectrais de cada amostra em um grupo de valores independentes.

A ACP realiza uma transformação linear de um conjunto original de dados correlacionados entre si, num conjunto menor de variáveis não correlacionadas, porém com a menor perda possível de informação, ou seja, contendo a maior parte da informação do conjunto original (HONGYU et al., 2016). A base da ACP é a determinação da variabilidade dos dados de entrada, sendo verificadas as relações de covariância nesse conjunto de dados e por meio de transformações são geradas novas variáveis, onde os dados originais de entrada são transformados e reagrupados em um novo e reduzido conjunto de variáveis (CRÓSTA, 1993).

3.2.4.2 Geoestatística e Geração dos Mapas Digitais

Foi empregada a análise geoestatística na contribuição das observações, ou seja, no produto resultante da aplicação da Análise de Componentes Principais, determinando-se os modelos teóricos de variogramas e sendo realizadas interpolações por krigagem. A estimação dos valores em locais não medidos foi realizada por krigagem ordinária para confecção dos mapas. A dependência espacial entre as observações pode ser expressa através do semivariograma (EQUAÇÃO 2).

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde, $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados pela distância h (VIEIRA et al., 1983). O gráfico de $\gamma^*(h)$ versus os valores correspondentes de h é uma função do vetor h e depende tanto da magnitude, quanto da direção de h . Dessa forma, modelos matemáticos devem ser ajustados aos semivariogramas, permitindo assim a visualização da natureza da variação espacial das variáveis estudadas, além de serem necessários para a realização da krigagem.

Foram ajustados aos semivariogramas os seguintes modelos matemáticos:

a) Modelo gaussiano (EQUAÇÃO 3):

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) \right], 0 < h < d. \quad \text{Eq. 3}$$

b) Modelo esférico (EQUAÇÃO 4):

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], \text{ se } 0 < h < d \quad \text{Eq. 4}$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1, \text{ se } h \geq a \quad \text{Eq. 5}$$

Em ambos os modelos supracitados, C_0 é o efeito pepita, $C_0 + C_1$ é o patamar, e a é o alcance do semivariograma.

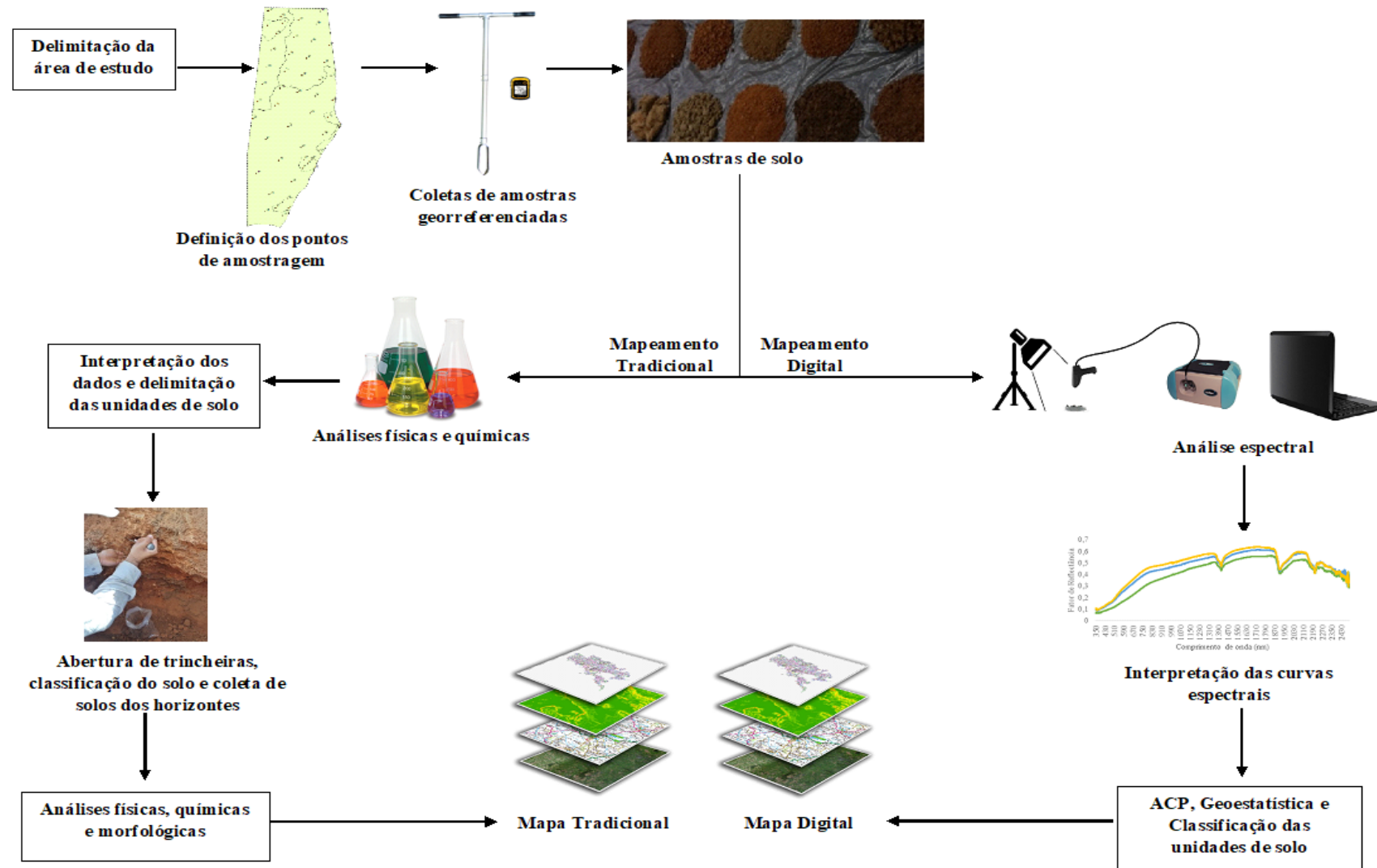
Para a realização do ajuste dos semivariogramas, as variáveis foram separadas por componente principal e por profundidade de coleta, gerando um total de 9 conjuntos de dados (3 profundidades de coleta e 3 componentes principais para cada profundidade), totalizando 9 semivariogramas e 9 mapas de interpolação. Valores obtidos por meio da krigagem possuem variância mínima, não são viciados e são ideais para a construção de mapas tridimensionais ou de isolinhas quando se pretende analisar a variabilidade espacial (VIEIRA et al., 1983).

Obtidos os mapas da krigagem, foi realizada a exportação desses para o software Envi, onde foram agrupados e, após esse processo, empregada uma classificação não-supervisionada por intermédio do algoritmo de clusterização K-Médias (MACQUEEN, 1967) gerando então subdivisões das unidades de solo com características espectrais semelhantes em profundidade. Apesar da existência de uma gama de métodos capazes de realizar agrupamentos na área de reconhecimento de padrões (XU et al., 2005), a classificação não-supervisionada baseada em métodos de agrupamentos particionais é utilizada pela maioria dos softwares ou sistemas computacionais voltados para o processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.

A imagem gerada pela classificação não-supervisionada foi então vetorizada e exportada para a interface do software ArcGIS, sendo comparadas visualmente as classes obtidas no mapa digital com o mapa produto do método tradicional.

Um fluxograma contendo a metodologia adotada na execução do mapeamento pode ser verificado na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma representativo da metodologia utilizada para obtenção dos mapas de solo Tradicional e Digital.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.5. Quantificação de Atributos Físico-Químicos do Solo Através de Dados Espectrais

3.2.5.1 Pré-processamento das Curvas Espectrais

Foram utilizados na quantificação os dados espectrais originais (95 amostras) e mais quatro conjuntos com os dados pré-processados, visando corrigir possíveis erros e melhorar a estabilidade da regressão, sendo comparados os produtos de cada método de pré-processamentos. Nos novos conjuntos de variáveis, as curvas espectrais originais em reflectância (RF) foram processadas, corrigindo-se o espalhamento da luz pela variação normal padrão (SNV). Visando a correção de possíveis erros devido a não linearidade, os dados espectrais foram também transformados em absorbância (ABS), utilizando a equação 1; foi testado ainda um tratamento com os dados espectrais transformados em absorbância e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+SNV). Por último, utilizaram-se os dados espectrais transformados em absorbância, com a 1ª derivada (1DEV) aplicada para eliminação da linha de base e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+1DEV+SNV).

Para geração dos modelos de predição dos atributos químicos e físicos avaliados, foi utilizada a análise de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) fazendo o uso do software ParLes versão 3.1 (VISCARRA-ROSSEL, 2008).

Tanto para os dados originais de reflectância, quanto para os demais processamentos espectrais, foi feito um sorteio aleatório de aproximadamente um terço das curvas (30 amostras) e atributos para posterior validação dos modelos que atingissem valores satisfatórios na fase de calibração, ao qual foram reservados os outros dois terços dos dados.

3.2.5.2 Calibração dos Modelos

Ao iniciar a modelagem dos atributos do solo, faz-se necessária a calibração dos modelos. Assim, para todos os dados avaliados, foi utilizado o método de validação cruzada “leave-one-out”, selecionando-se os modelos que apresentaram o menor número de fatores (N.F), com maiores coeficientes de determinação (R^2), maiores valores de desvio padrão do erro (RPD) e menores valores de raiz do erro quadrático médio (RMSE) conforme as equações descritas por Williams (2001) (EQUAÇÕES 5, 6 e 7).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde,

\hat{Y} = valor predito;

Y = valor observado;

\bar{Y} = média dos valores observados;

n = número de amostras (com i variando de 1 a n).

$$RPD = \frac{sd}{SEP} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde,

sd = taxa de desvio padrão dos dados analisados;

SEP = erro padrão da predição.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-m} \frac{(y_i' - y_i)^2}{n-m}} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde,

n = Número de amostras;

m = Número de amostras usadas para predição;

y_i' - y_i = Valores preditos e observados respectivamente.

3.2.5.2 Validação e Avaliação dos Modelos

Ao atingirem valores ideais para utilização na determinação dos atributos do solo, os modelos gerados foram testados, verificando sua capacidade de estimar as referidas variáveis na terça parte das amostras anteriormente selecionadas, mas não utilizadas na calibração, processamento este que pode vir a fornecer com maior propriedade a real exatidão dos modelos criados (DARDENNE et al., 2000).

A avaliação do desempenho dos modelos foi realizada conforme Dunn et al. (2002) e Chang et al. (2001), onde os autores sugerem que valores de RPD menores que 1,4 sejam insuficientes para a maioria das aplicações, sendo não confiáveis; valores entre 1,4 e 2,0 são considerados úteis, que podem ser melhorados; e acima de 2,0 são considerados excelentes, que

podem prever com precisão o atributo avaliado. Em relação aos valores de R^2 , avaliação do desempenho baseou-se nos parâmetros propostos por Sayes et al. (2005), onde indicaram quatro faixas de satisfação para os valores de R^2 , sendo elas:

- 0,50 a 0,65 - com capacidade de discriminação entre altas e baixas concentrações do atributo;
- 0,66 a 0,81 - modelos de predição aceitáveis;
- 0,82 a 0,90 - modelos de predição bons;
- $\geq 0,90$ - modelos de predição excelentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Mapeamento Tradicional

4.1.1 Caracterização das Amostras de Solo dos Pontos Amostrais

Os 47 pontos de tradagem foram separados em quatro grupos distintos de acordo com suas características físicas, químicas e morfológicas, correspondendo esses a quatro classes de solos diferentes e, portando, definindo as unidades de mapeamento presentes na fazenda. Observando-se a caracterização das amostras, 23 foram atribuídas à classe dos NEOSSOLOS LITÓLICOS, 10 foram condizentes com a classe dos PLANOSSOLOS, 9 tenderam aos LUVISSOLOS e 5 aos ARGISSOLOS (APÊNDICE A).

Os pontos pertencentes à classe dos NEOSSOLOS LITÓLICOS situaram-se em sua maioria exatamente onde se localiza o elemento mais alto do relevo, indo desde o topo ao sopé do morro presente na fazenda. Nas amostras correspondentes a essa classe, foi observada pouca mudança na textura, consistência e coloração em profundidade, não indicando a existência de um horizonte diagnóstico. Como complemento, observou-se ainda que a maioria dos pontos alcançou apenas a profundidade superficial, ou, no máximo, a segunda profundidade, atingindo a rocha matriz, em média, por volta de 30 a 40 cm.

Os pontos correspondentes à classe dos PLANOSSOLOS permaneceram em relevo plano a suave ondulado. Essas amostras apresentaram em sua maioria coloração acinzentada ou, mais especificamente, cores pouco vivas, característica da referida classe de solo. Exibiram ainda adensamento nas camadas mais profundas, por diversas vezes dificultando a coleta, e mudança textural abrupta, ou pelo menos mudança de textura em profundidade, indicando migração de argila do horizonte superficial para o subsuperficial. A não verificação de mudança abrupta em todos os pontos relacionados à classe em questão pode ser atribuída a erros originados pela metodologia adotada, pois em função das condições ambientais que esse estudo ocorreu, verificou-se que os horizontes dos solos estudados em sua maioria se apresentaram pouco espessos, o que pode ter implicado em uma mescla de horizontes no momento da coleta das amostras nas profundidades pré-estabelecidas.

Os pontos pertencentes à classe dos LUVISSOLOS estabeleceram-se principalmente na região sudeste da área de estudos, sendo observada ainda a presença de alguns pontos com características semelhantes na direção noroeste da área mapeada. Esses apresentaram cores avermelhadas e textura variando de média a argilosa, com incremento de argila em

profundidade. A maioria apresentou, além de gradiente textural, argila de atividade alta e saturação por bases alta, características indicativas da classe de solo atribuída. Contudo, vale ressaltar que, assim como citado anteriormente, alguns resultados podem ter sofrido influência da mescla de horizontes em função das profundidades de coleta pré-estabelecidas e da baixa espessura dos horizontes do solo, erros causados em razão da metodologia adotada.

Em relação aos pontos atribuídos à classe dos ARGISSOLOS, esses ocuparam a parte noroeste da área de estudos, em conjunto com pontos correspondentes à classe dos LUVISSOLOS, sendo feita a diferenciação entre os mesmos principalmente pela observação dos valores de atividade da argila e saturação por bases, visto que as amostras de ambas as classes foram bastante semelhantes em relação à presença de cores avermelhadas e textura tendendo de média a argilosa, com gradiente textural, sendo confirmada posteriormente a distinção entre as duas referidas classes por meio de caracterização físico-química e descrição morfológica completa dos perfis de solo (APÊNDICE B).

4.1.2 Caracterização das Amostras de Solo dos Perfis Completos

As classes de solos predominantes na área de estudos, obtidas pelo método tradicional de levantamento de solos, com classificação até o 4º nível categórico conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013), foram: NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos típicos - RLe (59,4 %), PLANOSSOLOS HÁPLICOS Eutróficos típicos - SXe (20,4 %), LUVISSOLOS CRÔMICOS Órticos típicos - TCo (4,3 %) e ARGISSOLOS VERMELHOS (15,9 %), subdividindo-se em ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos típicos - PVe e ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos abrupticos - Pve. Algumas unidades de mapeamento apresentaram ainda inclusões de PLINTOSSOLOS ARGILÚVICOS Distróficos abrupticos - FTd e LUVISSOLOS CRÔMICOS Órticos típicos - TCo, presentes nas unidades de mapeamento correspondentes aos PLANOSSOLOS e ARGISSOLOS respectivamente.

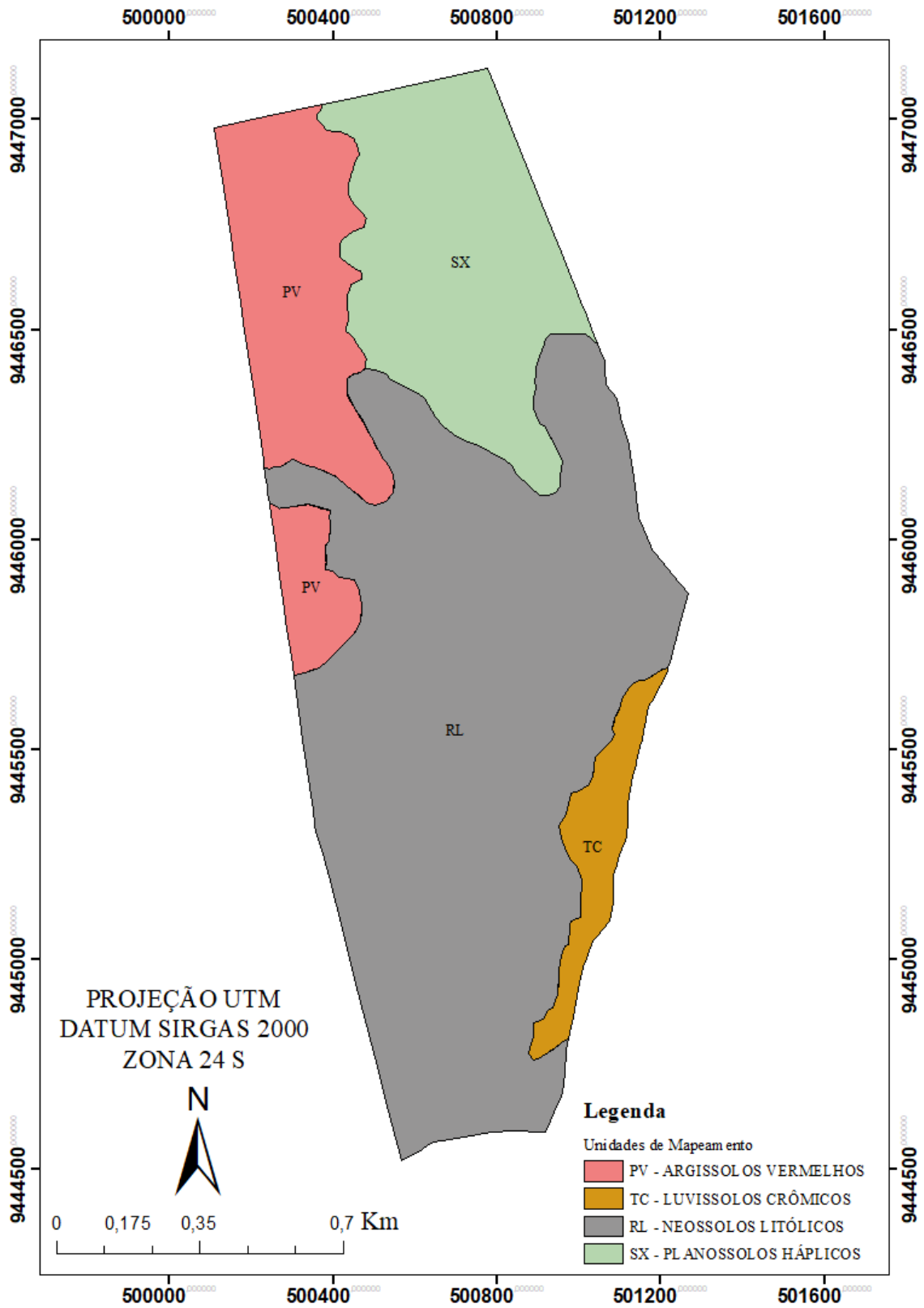
Em geral, os solos do território do sertão central cearense são rasos a medianamente profundos, com alta taxa de afloramentos rochosos e pedregosidade superficial, comumente encontrando-se associações de Planossolos, Luvisolos, Vertissolos, Neossolos e Argissolos (BRASIL, 2010).

De acordo com a classificação (EMBRAPA, 2013), a maior parte das amostras de solo enquadraram-se na classe textural média (55 %), seguida pela classe textural arenosa (42 %) e pela classe textural argilosa (3 %). A composição granulométrica média de argila foi de

15,79 %, com atividade de argila em sua maioria alta (média: 42,3 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) e saturação por bases também alta (média: 74,9 %). Em relação à acidez, as amostras foram consideradas moderadamente ácidas, segundo a média dos valores de pH (H_2O) (média: 6,38), com baixa saturação por alumínio (média: 3 %) (APÊNDICE B).

O resultado obtido após a classificação de solos e descrição morfológica completa, chamado mapa tradicional de solos, é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Mapa de solos da Fazenda Lavoura Seca – UFC, obtido pelo método tradicional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2.1 Unidade de Mapeamento: RLe

A unidade de mapeamento que compreende os NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos típicos encontrados na fazenda ocupa uma área de 112,61 ha, o que representa 59,4 % do total da área mapeada. Devido a pequena profundidade dessa classe de solo, nos pontos presentes na mesma, em que foram realizadas as tradagens, a profundidade das coletas não atingiu mais que 40 cm, o que resultou em pontos com apenas 1 profundidade de coleta na fase amostral (0-20 cm).

Foi observado nessa unidade de mapeamento a ocorrência de afloramentos de rochas do tipo Gnaisse na maior parte do terreno, o que dificultou por diversas vezes a tradagem nos locais georreferenciados e a escolha do local para a abertura da trincheira para classificação. O relevo forte ondulado e o solo raso constituem a principal limitação dessa classe de solo para a prática da agricultura que não seja de subsistência.

Quanto ao uso e ocupação, a maior parte da área onde prenomina essa classe de solo é ocupada por mata nativa, sendo florestada por uma vegetação de porte arbóreo-arbustiva do tipo caatinga hiperxerófila, o que caracteriza o bioma caatinga, predominante na região. É praticada ainda a pecuária extensiva na caatinga, com caprinos e, menos usualmente, com bovinos.

O perfil descrito apresentou profundidade total de 48 cm, com apenas 1 horizonte A subdividido em 3 e contato lítico logo abaixo do solo. A caracterização do perfil indicou que o solo se enquadrou na classe textural arenosa, com uma média de 81,5 % de areia e um teor médio de apenas 6,5 % de argila. A saturação por bases foi alta (média: 79 %), com baixa acidez, observada pela média dos valores de pH H₂O (média: 6,6), apresentando também baixa saturação por alumínio (média: 1 %).

Na FIGURA 7 é retratado o uso e cobertura da área onde a classe dos NEOSSOLOS se encontra, bem como o processo de abertura de trincheira para classificação e descrição morfológica completa. Na FIGURA 7A pode ser observada a vegetação tipo caatinga densa ao longo de todo o morro presente na fazenda, sendo essa a principal cobertura e utilização na área dos NEOSSOLOS LITÓLICOS. A FIGURA 7B refere-se à abertura do perfil referente à classe RLe.

Figura 7 – Principal uso e cobertura (A) e abertura de perfil para caracterização da classe RLe (B).



A

B

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2.2 Unidade de Mapeamento: SXe

A unidade de mapeamento que constitui os PLANOSSOLOS HÁPLICOS Eutróficos típicos, possui inclusões de PLINTOSSOLOS ARGILÚVICOS Eutróficos abruptos, possivelmente resultado da segregação de ferro em pontos mais altos do relevo, mobilizando-se e sendo depositado e concentrado na área dos PLANOSSOLOS, o que somado a baixa permeabilidade do horizonte B plânico e ao lençol freático suspenso promoveu a formação de mosqueados e, em estágio mais avançado, plintita; e NEOSSOLOS LITÓLICOS, ocupando um total de 38,73 ha, o que representa 20,4 % do total da área mapeada. Devido a inclusão de NEOSSOLOS LITÓLICOS, em alguns pontos onde foram realizadas tradagens, nessa unidade de mapeamento, a profundidade das coletas também não atingiu mais que 40 cm, resultando em pontos com apenas 1 profundidade coletada na fase amostral (0-20 cm).

Foi observado ainda nessa unidade de mapeamento a ocorrência de afloramentos de rochas do tipo Gnaisse em alguns pontos do terreno, o que também dificultou a tradagem em alguns locais georreferenciados. Quanto ao uso e ocupação, a área onde prenomina essa classe de solo é reservada para agricultura e pecuária de caprinos e bovinos, sendo um terço da área cultivada com milho e sorgo e os outros dois terços com pastagem, onde o rebanho consome in natura durante o período chuvoso, ao tempo que são aproveitados para a fabricação de silagem, mantendo os animais no período de estiagem.

A caracterização do perfil correspondente aos PLANOSSOLOS indicou profundidade

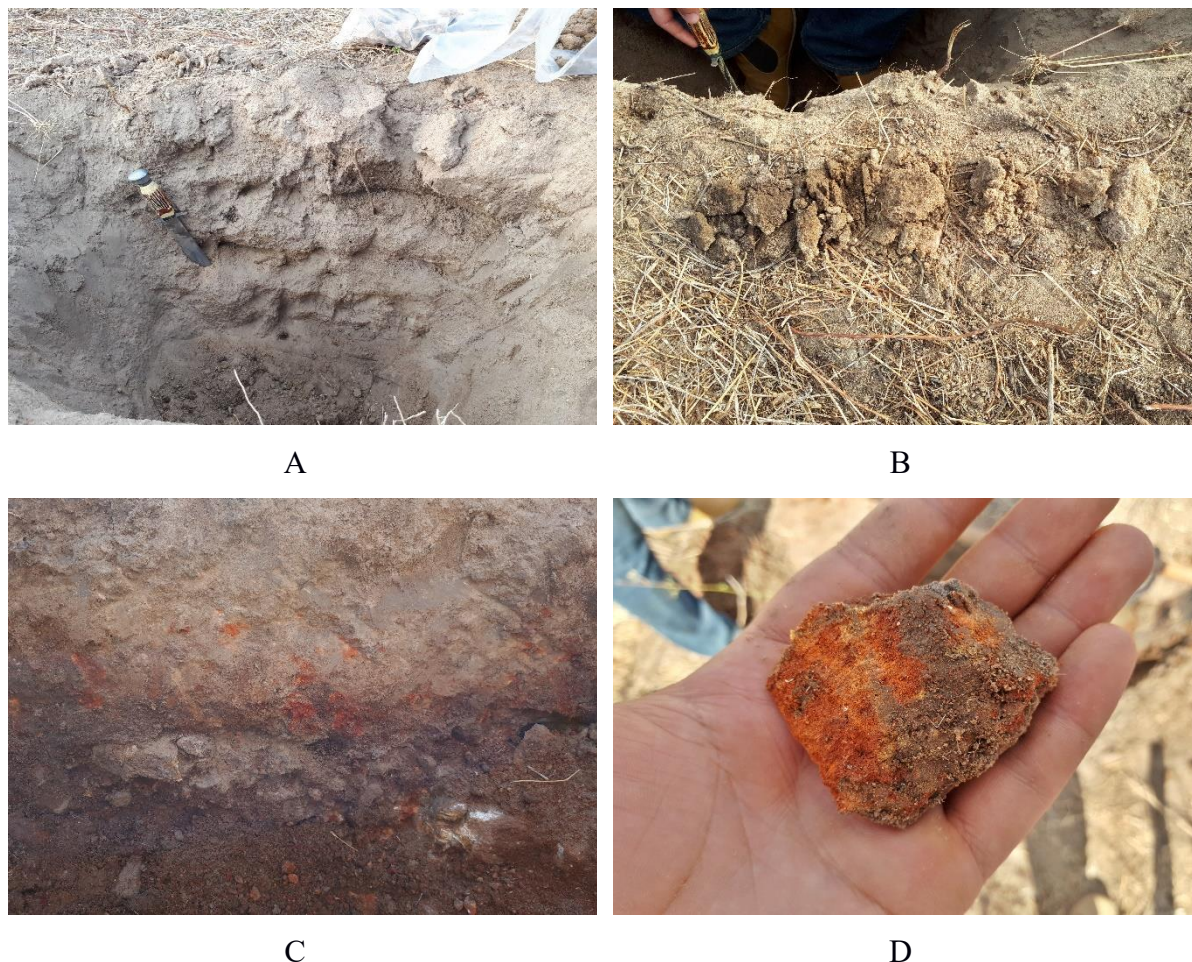
total do solo superior a 90 cm, dividido em 5 horizontes. O horizonte diagnóstico B Plânico possui espessura de 28 cm, subdividido em 2. A análise do perfil enquadrou o solo na classe textural arenosa, tendendo à textura média, observando-se incremento de argila em profundidade. A atividade da argila foi alta (média: 106,4 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), com saturação por bases também alta (média: 83 %). Foi observada ainda baixa acidez, pela média dos valores de pH H_2O (média: 6,7) e baixa saturação por alumínio (média: 1 %).

Em relação aos PLINTOSSOLOS, a caracterização do perfil indicou profundidade total do solo superior a 35 cm, dividido em 3 horizontes. O horizonte diagnóstico Plíntico, devido a inclusão na classe dos PLANOSSOLOS, surgiu conjugado com horizonte B Plânico, não sendo classificado como PLANOSSOLO por não possuir caráter sódico e por encontrar-se dentro de 40 cm da superfície de acordo com o SIBCS. Os PLINTOSSOLOS são solos minerais caracterizados por apresentar expressiva plintitização, sendo esta com ou sem petroplintita. São originados pela drenagem má ou imperfeita, podendo apresentar três horizontes diagnósticos: plíntico, concrecionário ou litoplíntico (EMBRAPA, 2013).

A análise das amostras de solo indicou a predominância da classe textural média, com atividade de argila baixa (18,6 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$). A saturação por bases em geral foi alta (média: 65,4 %) com diminuição em profundidade. A acidez se mostrou moderada, segundo os valores de pH H_2O (média: 6,4), também com diminuição em profundidade e baixa saturação por alumínio (média: 2 %), com aumento em profundidade.

Na FIGURA 8 são retratados os perfis referentes aos PLANOSSOLOS e aos PLINTOSSOLOS. Nas FIGURAS 8A e 8B podem ser observadas, respectivamente, a trincheira para classificação e descrição morfológica completa e amostras dos horizontes do perfil referente à unidade de mapeamento SXe. Já nas FIGURAS 8C e 8D, visualiza-se o perfil correspondente à classe FTd e a representação de um agregado do solo contendo plintita.

Figura 8 – Painel fotográfico dos perfis SXe e FTd.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2.3 Unidade de Mapeamento: PVe

A unidade de mapeamento que constitui os ARGISSOLOS VERMELHOS ocupou um total de 30,2 ha, representando 15,9 % do total da área mapeada. Esta unidade subdividiu-se em ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos abruptos e ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos típicos, este último possuindo inclusões de LUVISSOLOS CRÔMICOS Órticos típicos. Para essa unidade de mapeamento, nos pontos onde foram realizadas as tradagens na fase amostral, a profundidade das coletas atingiu pelo menos 80 cm, viabilizando o estudo com 3 profundidade de coleta.

Em relação ao uso e ocupação, nas áreas onde prenomina essas classes de solos há ampla utilização, sendo empregadas tanto na agricultura, com o cultivo de milho e sorgo, quanto para a pecuária de caprinos e bovinos, aproveitando-se ainda para construção, visto que a sede da fazenda, juntamente aos locais de armazenamento e manutenção de implementos agrícolas,

localiza-se nessa unidade de mapeamento.

O perfil que caracterizou os ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos abrupticos apresentou profundidade total superior a 160 cm, tendo o horizonte diagnóstico Bt 92 cm de espessura. Já o perfil que caracterizou os ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos típicos, apresentou profundidade superior a 120 cm, possuindo o horizonte diagnóstico Bt 50 cm de espessura. A variabilidade textural e química na composição dos Argissolos é considerada abundante, pois para sua classificação deve possuir argila de atividade baixa, ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico. O horizonte Bt pode se encontrar em variadas profundidades, com cores que vão desde acinzentadas a amareladas ou avermelhadas, podendo apresentar ainda problemas de infiltração de água, atribuídos ao acúmulo de argila nos horizontes subsuperficiais, o que confere a essa classe de solos uma maior susceptibilidade à erosão (EMBRAPA, 2013).

A análise do perfil correspondente aos ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos abrupticos (PVe1) enquadrou o solo na classe textural média, com média da atividade de argila baixa ($26,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). A saturação por bases em geral foi alta (média: 55 %), com média acidez de acordo com a média do pH H₂O (média: 5) e baixa saturação por alumínio (média: 10 %), com aumento em profundidade.

A análise do perfil correspondente aos ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos típicos (PVe2) também enquadrou o solo na classe textural média. Já a atividade de argila média e a saturação por bases média seguiram o padrão do perfil anterior, mostrando-se baixa ($21,1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e alta (média: 82 %) respectivamente. De acordo com a média do pH H₂O, o solo foi considerado neutro (média: 7), com baixa saturação por alumínio (média: 1 %).

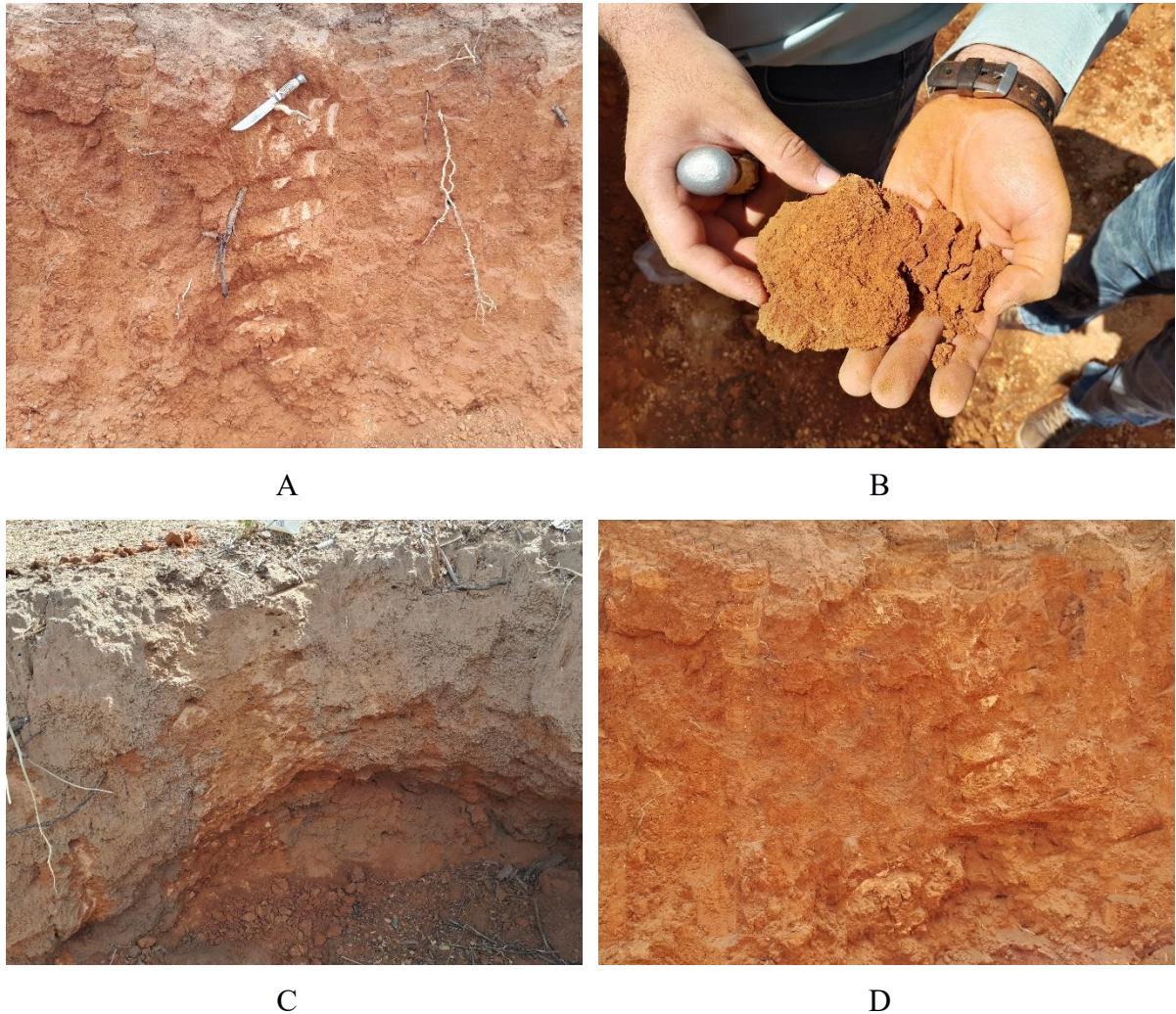
Em relação aos LUVISSOLOS inclusos na área dos ARGISSOLOS, a caracterização do perfil indicou profundidade total do solo superior a 80 cm, dividido em 4 horizontes. O horizonte diagnóstico B textural, possui espessura total superior a 60 cm, encontrando-se dentro de 20 cm a partir da superfície do solo.

A análise das amostras de solo indicou a predominância da classe textural média, com média da atividade de argila alta ($34,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). A saturação por bases em geral foi alta (média: 76,7 %) com aumento em profundidade. A acidez se mostrou mediana, segundo os valores de pH H₂O (média: 5,7), com diminuição em profundidade e baixa saturação por alumínio (média: 2,5 %).

Na FIGURA 9 são expostos os perfis referentes aos ARGISSOSSOLOS e aos LUVISSOLOS. Nas FIGURAS 9A e 9C podem ser observadas as trincheiras abertas para classificação e descrição morfológica completa dos ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos

típicos e dos ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos abruptos, respectivamente, e na FIGURA 9B observa-se uma amostra de um agregado retirado do perfil referente aos ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos abruptos. Na FIGURA 9D, visualiza-se o perfil correspondente aos LUVISSOLOS, inclusos na área dos ARGISSOLOS.

Figura 9 – Painel fotográfico dos perfis PVe e inclusões.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2.4 Unidade de Mapeamento: TCo

A unidade de mapeamento que constitui os LUVISSOLOS CRÔMICOS Órticos típicos ocupa um total de 8,07 ha, o que representa 4,3 % do total da área mapeada. Em alguns pontos onde foram realizadas tradagens, nessa unidade de mapeamento, foi observada a ocorrência de afloramentos de rochas (AR), fato esse atribuído a proximidade com a unidade onde se encontram os NEOSSOLOS LITÓLICOS. Na fase amostral alguns pontos atingiram não mais

que 60 cm de profundidade, resultando em pontos com apenas 2 profundidades coletadas.

Quanto ao uso e ocupação, no local de predominância principal dessa classe de solo não é praticada agricultura, sendo recoberta por uma vegetação de porte arbóreo-arbustiva do tipo caatinga hiperxerófila, semelhante ao que ocorre na a unidade dos NEOSSOLOS LITÓLICOS. Também é praticada a pecuária extensiva na caatinga, com caprinos e bovinos.

O perfil descrito apresentou profundidade total superior a 170 cm, com horizonte diagnóstico Bt de 55 cm de espessura. Foi observada erosão em estágio avançado próximo ao local de abertura e descrição do perfil correspondente aos LUVISSOLOS, com a presença de uma mini voçoroca. Por conta da textura muito argilosa do horizonte Bt e da presença de horizontes subjacentes mais arenosos, os LUVISSOLOS são muito susceptíveis à erosão, fato este que é agravado quando situados em áreas declivosas, com horizonte Bt próximo a superfície e em clima em que há precipitação pluvial elevada em um curto período de tempo, como ocorre no semi-árido nordestino (OLIVEIRA, 2011).

A caracterização do perfil indicou que o solo se enquadrou na classe textural média. A média da atividade de argila foi alta (50 cmolc kg^{-1}), com saturação por bases também alta (média: 86 %). A acidez foi considerada fraca, observando-se a média do pH H_2O (média: 6,7) e a saturação por alumínio nula (média: 0 %).

Na FIGURA 10 é retratado o processo de abertura da trincheira completa correspondente à classe dos LUVISSOLOS, para classificação e descrição morfológica. A FIGURA 10A refere-se à abertura do perfil e na FIGURA 10B podem ser observados agregados correspondentes aos diferentes horizontes do perfil de solo referente à classe TCo.

Figura 10 – Painel fotográfico da abertura de perfil da classe TCo e amostras de seus horizontes.



A



B

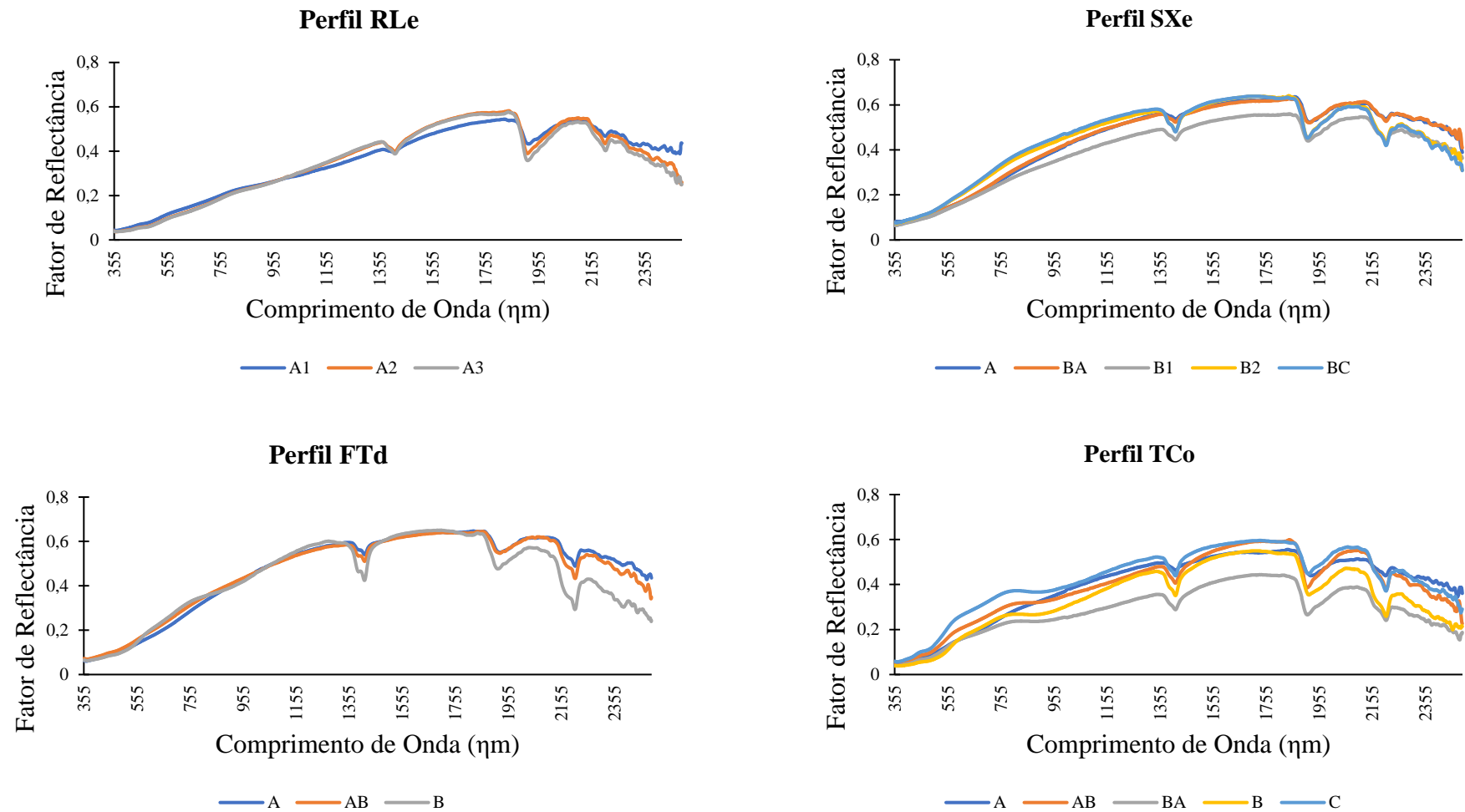
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Caracterização das Curvas Espectrais das Classes de Solo

Os espectros das amostras provenientes dos diferentes horizontes dos perfis de solo avaliados puderam ser discriminados qualitativamente de acordo com o comportamento espectral característico de cada classe de solo, considerando-se também o formato e as mudanças na amplitude das feições de absorção e a alteração na intensidade de reflectância (albedo) dos espectros ao longo de todo o comprimento de onda, mas principalmente entre 600 nm e 2500 nm (FIGURA 11).

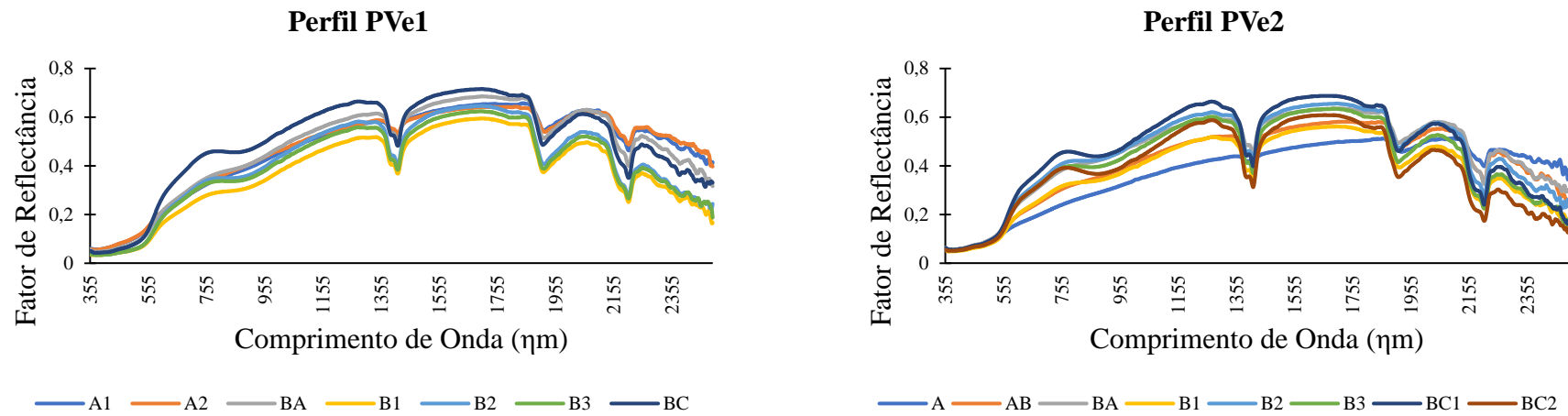
Com exceção às amostras dos NEOSSOLOS LITÓLICOS, que apresentaram comportamento ascendente e retilíneo até 1400 nm, mesmo existindo peculiaridades inerentes à constituição de cada tipo de solo, a morfologia dos espectros dos demais perfis descritos apresentaram comportamento semelhante, com uma leve ascendência na faixa 355-500 nm e inclinação ascendente e pronunciada de 500 nm até aproximadamente 750 nm, ocorrendo uma variação na faixa entre 750 nm e 2100 nm, onde o aspecto ascendente tendeu a linearidade. A partir disso, todos os espectros apresentaram a mesma tendência no comportamento, com as curvas espectrais sofrendo inclinação descendente em direção ao retilíneo entre 2100 nm até 2500 nm.

Figura 11 – Caracterização espectral das amostras representativas, obtidas por amostragens realizadas nos perfis de solo, representando as classes de solo existentes na Fazenda Lavoura Seca – UFC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 – Caracterização espectral das amostras representativas, obtidas por amostragens realizadas nos perfis de solo, representando as classes de solo existentes na Fazenda Lavoura Seca – UFC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A similaridade das feições de absorção se deve ao fato de que a mineralogia dos solos estudados é bem semelhante, principalmente na classe dos PLANOSSOLOS e dos NEOSSOLOS. Os minerais de argila e a matéria orgânica são constituintes fundamentais dos solos, possuindo feições de absorção características no espectro eletromagnético desde o visível até a região do infravermelho (VISCARRA-ROSSEL et al., 2006).

Com exceção às amostras dos NEOSSOLOS LITÓLICOS, é possível visualizar nas demais curvas espectrais os picos de absorção existentes nos comprimentos de onda entre 750 e 1000 nm, causando uma concavidade, resultante da interação entre a radiação eletromagnética e os óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e goethita) (HUNT, 1980, FERNANDES et al., 2004; RICHTER et al., 2009), evidenciados de maneira mais notória nas curvas espectrais correspondentes aos ARGISSOLOS VERMELHOS. Assim como nos NEOSSOLOS, a amostra do horizonte A do perfil PVe2 apresentou comportamento semelhante, o que pode ter sido ocasionado pelo maior aporte de matéria orgânica nesse horizonte, sobrepondo-se ao efeito da presença dos óxidos de ferro, mascarando-os (DEMATTE et al., 2003; FERNANDES et al., 2004).

Em todas as amostras analisadas foi observada a presença de feições de absorção em 1400 nm e 1900 nm, o que está relacionado à influência exercida pela energia na molécula dos grupos funcionais devido a vibrações não-fundamentais, ou seja, processos vibracionais do grupo OH presente na água residual do solo ou na estrutura dos minerais 1:1 e/ou 2:1 (STONER; BAUMGARDNER, 1981; BAUMGARDNER et al., 1985; BEN-DOR et al., 2008; SHI et al., 2014). Observa-se ainda um pico de absorção duplo próximo ao comprimento de onda de 2200 nm, característico da presença da caulinita, no comprimento de onda 2205 nm; e da gibsitita, no comprimento de onda de 2265 nm (FREDERICKSON, 1954).

Em decorrência da quantidade de ruído existente após 2200 nm, torna-se quase que impraticável a observação das feições de absorção originadas pela influência do Al-OH dos minerais 2:1, principalmente pela presença de illita em 2350 nm e 2450 nm (HUNT et al., 1971).

Com relação à cor do solo, essa foi marcante principalmente para a classe dos PLANOSSOLOS e dos PLINTOSSOLOS, visto que essa última se encontrava inclusa na área de predomínio dos PLANOSSOLOS. Em decorrência dos constantes ciclos de umedecimento presentes nessa classe de solo, as cores do horizonte B, ou mesmo na parte sobrejacente a esse horizonte, são predominantemente pouco vivas, tendendo a neutras, acinzentadas ou ainda escurecidas, podendo ou não haver mosqueados e plintita, desde que em posição e quantidade que não seja diagnóstica para ser classificado como PLINTOSSOLOS (EMBRAPA, 2013), como ocorreu nesse estudo.

As cores neutras e acinzentadas dos PLANOSSOLOS e PLINTOSSOLOS proporcionaram semelhanças nas curvas espectrais obtidas para ambas as classes, além do fato dessas duas classes serem constituídas pelo mesmo material de origem (granito-gnaiss). A principal diferenciação entre elas pode ser visualizada no comportamento das bandas de absorção, sendo as feições nos comprimentos de onda 1400 nm, 1900 nm e 2200 nm mais pronunciados no perfil FTd, principalmente em seu horizonte B, que ocorreu conjugado com o horizonte Plíntico.

Apesar de, comumente, se observar na análise espectral de amostras de solos de textura arenosa tendência a uma maior reflectância, devido à sua constituição mineralógica, geralmente rica em quartzo (RESENDE et al., 2005), somada a baixos teores de matéria orgânica e de óxidos de ferro (MENESES; MADEIRA NETTO, 2001), os resultados obtidos nesse estudo indicaram baixa reflectância nas amostras correspondentes aos NEOSSOLOS LITÓLICOS, permanecendo as curvas espectrais com reflectância inferior à dos demais perfis avaliados. Isso ocorreu, possivelmente, devido ao maior aporte de matéria orgânica na zona de ocorrência dessa classe de solo (APÊNDICE B) em razão da predominância da vegetação do tipo caatinga, que perde as folhas no período de estiagem como mecanismo de defesa contra a perda de água, fazendo com que o material orgânico seja constantemente adicionado ao solo.

Foi observada uma alta reflectância nas amostras de solo provenientes dos ARGISSOLOS e LUVISSOLOS, com menor reflectância nos LUVISSOLOS em comparação aos ARGISSOLOS, apesar de ambas as classes possuírem a cor vermelha intensa, relacionada à presença de óxidos de ferro. Nas duas referidas classes, a inclinação ascendente e pronunciada de 500 nm até aproximadamente 1400 nm é marcada pela concavidade existente na região próxima a 900 nm, feição típica dos óxidos de ferro, apresentando-se mais intensas quanto maiores forem os teores de ferro (MATHEWS et al., 1973; STONER et al., 1980).

A presença de maior quantidade de argila e óxidos de ferro tendem, originalmente, a diminuir o fator de reflectância (BELLINASO et al., 2010), como pode ser observado no horizonte B1 nas duas classes de solo supracitadas, apresentando a curva espectral correspondente a esse horizonte albedo inferior à dos demais horizontes. Contudo, em decorrência do intemperismo menos acentuado a que os solos do bioma caatinga, no clima semiárido, são expostos, a quantidade de elementos em estágio final de intemperismo como os óxidos é inferior à quantidade de materiais pouco intemperizados, como os argilominerais 2:1, sobrepondo-se a esses e evitando a diminuição acentuada da reflectância nesses solos. Esse fato é corroborado por Grove et al. (1992), onde relatam que a presença de feldspatos e minerais de argila do tipo 2:1 contribuem para a maior intensidade da reflectância em solos.

A forte presença de minerais 2:1, influenciando o comportamento espectral, pode ser observada na faixa do infravermelho de ondas curtas, em 1400 nm e 1900 nm, devido a presença da radical hidroxila (-OH) na água residual do solo ou na estrutura dos minerais (DEMATTÊ; TERRA, 2014; STENBERG et al., 2010), mostrando-se as feições de absorção dos perfis PVe1 e PVe2 mais acentuadas que as dos perfis RLe e SXe. A intensidade das bandas de absorção em 1400 e em 1900 nm torna-se mais acentuada na maior presença de minerais 2:1 (GENÚ; DEMATTÊ, 2012). Outro indicador da presença de minerais do tipo 2:1 nos solos avaliados é a atividade da argila dos seus horizontes subsuperficiais, apontado pelas análises físico-químicas (APÊNDICE B), pois com exceção aos ARGISSOLOS, essa manteve-se alta para a maioria das classes de solo estudadas.

Mota e Oliveira (1999), em estudo realizado para investigação da mineralogia de solos oriundos de regiões próximas a área de realização deste trabalho, observaram quantidades relativamente equivalentes de caulinita e montmorilonita presentes na fração argila dos horizontes subsuperficiais dos solos por eles analisados, ocorrendo o mesmo com as proporções de caulinita e vermiculita em horizontes superficiais, evidenciando a existência e presença marcante de minerais 2:1 nos solos da região estudada.

Os solos do semiárido cearense são em sua maioria pouco intemperizados, originados por rochas cristalinas com grande predominância de gnaisses. Com relação à mineralogia, as principais ocorrências são de feldspatos potássicos, plagioclásios calco-sódicos e argilominerais montmorilonita e mica (BRASIL, 1973; MOREIRA, 1979). Mesmo com a ausência da análise mineralógica, foi observado na análise morfológica prévia do solo, durante as tradagens, forte presença do mineral primário mica, em grande parte das amostras coletadas, o que pode vir a ter influenciado no comportamento espectral das amostras de solo analisadas, aumentando a reflectância destas.

Assim, de maneira geral o que se observou na avaliação dos espectros correspondentes aos perfis de solo descritos foi que a cor, como fator indireto, pois essa está relacionada à elementos pigmentantes como a MOS e compostos de ferro; e a mineralogia, de maneira direta, foram os principais fatores influenciadores no comportamento espectral das classes de solos descritas, pois, além da minimização dos efeitos causados por granulometria e umidade, visto que as amostras foram destorroadas e secas em estufa previamente à realização das leituras espectrais, houve baixa influência da matéria orgânica do solo no comportamento espectral, devido à baixa quantidade da mesma nas amostras coletadas (APÊNDICE B) e nos solos do semiárido como um todo (SANTIAGO et al., 2012).

4.3 Mapeamento Digital de solos

4.3.1 *Análise de Componentes Principais dos Dados Espectrais*

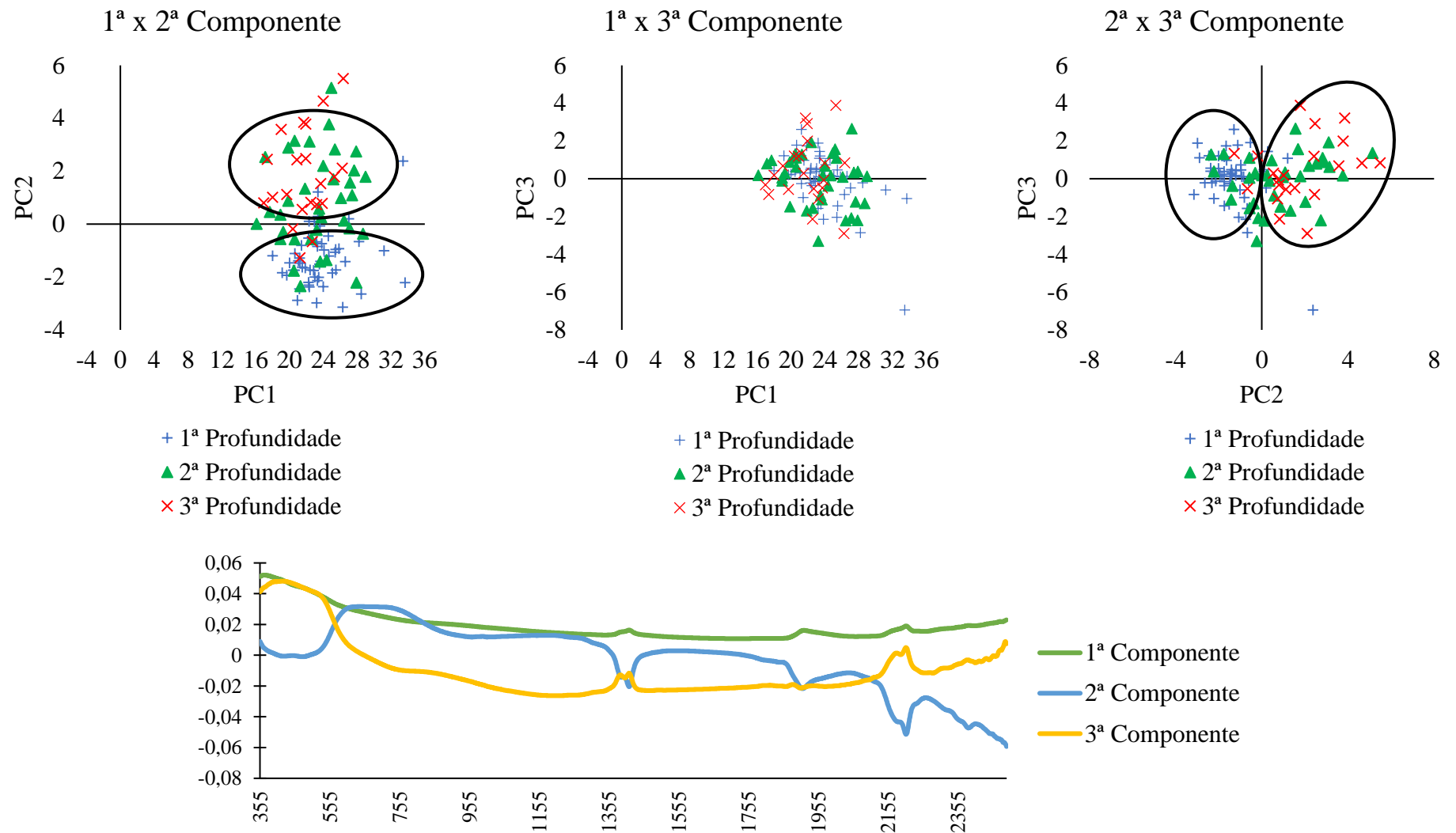
De acordo com a ACP, foi possível observar que as três primeiras componentes principais explicaram 99,9% das variações dos dados espectrais, o que admite a utilização somente desses dados na tentativa de explicação da dimensão das variáveis analisadas (HAIR et al., 2006). A primeira e a segunda componente principal (CP1 e CP2) foram capazes de explicar mais de 99% da variabilidade espectral dos solos avaliados.

Segundo Bellinaso et al. (2010) valores mais altos da CP1 são indicativos de uma menor intensidade de reflectância das amostras, fato esse que foi verificado com o resultado da ACP, atribuído ao processamento empregado nos dados espectrais previamente à análise (conversão em absorbância).

Com base nos gráficos de dispersão dos escores da ACP foi possível avaliar as diferenças no comportamento espectral das classes de solo, considerando os horizontes diagnósticos superficiais e subsuperficiais dos perfis e as diferentes profundidades dos pontos de tradagem (0 - 20 cm, 40 - 60 cm e 80 - 100 cm).

De modo geral, não houve grandes variações das nuvens de pontos, o que pode ser indicativo da baixa variabilidade entre as classes de solos em função do seu material de origem. Contudo, observou-se que, ainda assim, a análise de componentes principais proporcionou agrupamentos entre as amostras de solo avaliadas, principalmente entre as da primeira e da terceira profundidade, observando-se as referidas separações de forma mais evidente nos gráficos CP1 × CP2 e CP2 × CP3 (FIGURA 12).

Figura 12 – Análise de Componentes Principais dos dados espectrais das amostras de solo avaliados em diferentes profundidades.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As informações espectrais que apresentaram as mais baixas intensidades de reflectância e os maiores valores do escore CP1 são referentes à primeira profundidade de coleta (0 – 20 cm), envolvendo ainda várias amostras da segunda profundidade (40 – 60 cm), presentes principalmente na área correspondente aos NEOSSOLOS LITÓLICOS. Por serem em sua maioria de superfície e localizarem-se na área com vegetação quase que totalmente de mata nativa, o solo detém um maior aporte de matéria orgânica (APÊNDICE 1) em função da maior presença da vegetação, influenciando a reflectância dessas amostras, onde essa acaba por sofrer uma diminuição (DALMOLIN, 2002).

Em contrapartida, as amostras que apresentaram maior intensidade de reflectância e, conseqüentemente, valores mais baixos do CP1, são principalmente as da terceira profundidade (80 - 100 cm), sendo altamente encontradas na área correspondente à classe dos PLANOSSOLOS e dos ARGISSOLOS. Essa diferenciação possivelmente ocorre em função do gradiente textural, ou seja, migração de argila em profundidade, presente na maioria das classes de solo existentes na área de estudos. Dessa forma, por conta da grande presença de minerais de argila nesses solos, principalmente do tipo 2:1, sendo depositados em profundidade, há o favorecimento do aumento em sua reflectância (GROVE et al., 1992), principalmente nas amostras de solo correspondentes à profundidade de 80 - 100 cm, o que leva aos agrupamentos, nos gráficos, de pontos com características espectrais semelhantes.

6.3.2 Geoestatística das Componentes Principais

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da análise estatística descritiva para os dados obtidos na ACP. Observou-se que os valores de assimetria estiveram mais próximos da normalidade para as componentes 1 e 2, enquanto os resultados de curtose foram mais satisfatórios para a componente 3. Os valores de média e mediana das componentes principais 2 e 3 também estão próximos, demonstrando que os dados estão ou se aproximam da distribuição normal, podendo ser aplicada a geoestatística, pois os melhores resultados da krigagem são proporcionados quando a normalidade dos dados é satisfeita (PAZ-GONZALEZ et al., 2001).

Tabela 1 - Estatística descritiva dos componentes principais dos dados espectrais das amostras de solo analisadas.

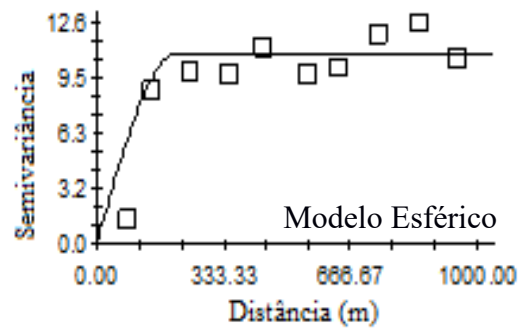
	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Média	23,18	-0,013	0,10
Mediana	23,20	-0,52	0,21
Desvio padrão	3,24	1,94	1,46
CV	13,97	-14668,1	1415,82
Variância	10,49	3,75	2,15
Curtose	0,97	-0,087	4,37
Assimetria	0,57	0,74	-1,05
Mínimo	16,13	-3,14	-6,94
Máximo	33,67	5,49	3,88

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se que o coeficiente de variação se manteve alto para as componentes 2 e 3, com valores muito superiores ao apresentado para a componente 1. Essa variação está relacionada com o fato de que apenas a primeira componente já foi capaz de explicar mais de 98% da variação dos dados espectrais, restando apenas 2% da variabilidade a ser explicada pelas demais componentes.

Seguindo os resultados da análise exploratória dos dados, a geoestatística foi utilizada para verificar a variabilidade espacial das componentes principais definidas em cada amostra de solo a diferentes profundidades, como também para a escolha do modelo de semivariograma que melhor descrevesse a variabilidade dos dados analisados, conforme descrito por Isaaks e Srivastava (1989). Os semivariogramas obtidos para cada componente principal, nas diferentes profundidades avaliadas, são apresentados na Figura 13.

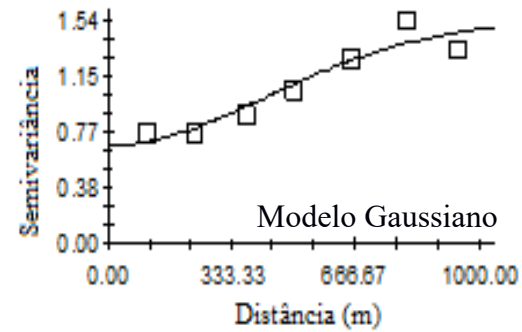
Figura 13 – Modelos e parâmetros (C_0 ; C_0+C ; a ; R^2) dos semivariogramas ajustados às componentes principais.



$$C_0 = 0,01; C_0 + C = 10,85; A_0 = 211,14$$

$$R^2 = 0,89; RSS = 28,8$$

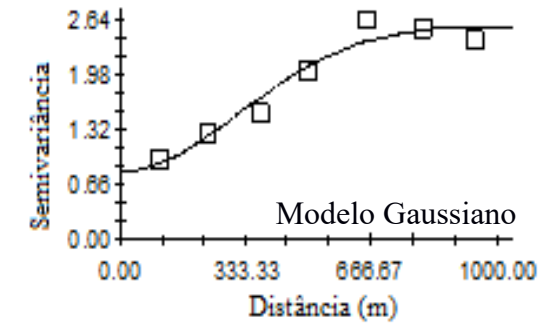
A



$$C_0 = 0,68; C_0 + C = 1,53; A_0 = 610,00$$

$$R^2 = 0,92; RSS = 0,05$$

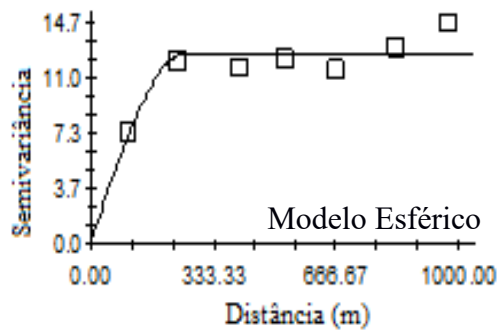
B



$$C_0 = 0,82; C_0 + C = 2,58; A_0 = 447,00$$

$$R^2 = 0,95; RSS = 0,14$$

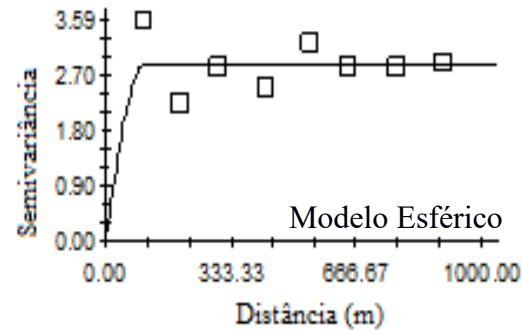
C



$$C_0 = 0,18; C_0 + C = 12,64; A_0 = 259,00$$

$$R^2 = 0,78; RSS = 6,53$$

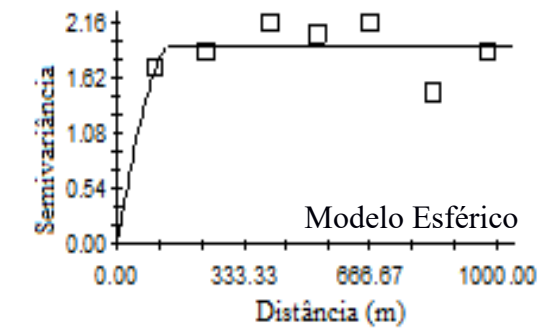
D



$$C_0 = 0,001; C_0 + C = 2,87; A_0 = 104,70$$

$$R^2 = 0,52; RSS = 1,17$$

E



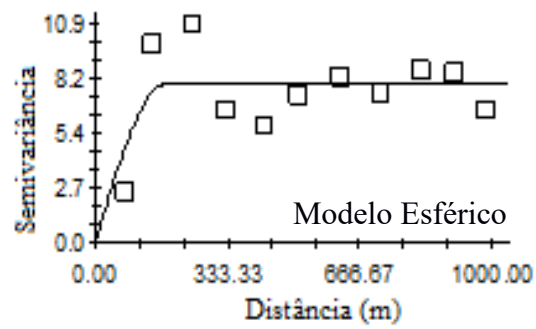
$$C_0 = 0,001; C_0 + C = 1,93; A_0 = 145,00$$

$$R^2 = 0,11; RSS = 0,32$$

F

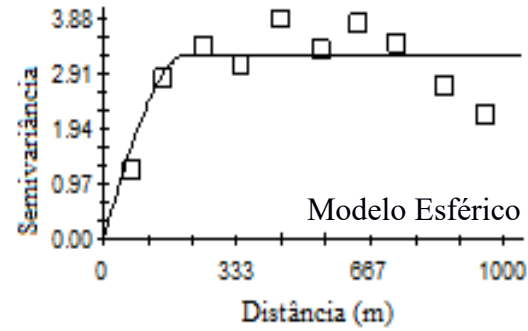
A: 1ª componente da 1ª profundidade (P1CP1); B: 2ª componente da 1ª profundidade (P1CP2); C: 3ª componente da 1ª profundidade (P1CP3);
 D: 1ª componente da 2ª profundidade (P2CP1); E: 2ª componente da 2ª profundidade (P2CP2); F: 3ª componente da 2ª profundidade (P2CP3).

Figura 13 – Modelos e parâmetros (C_0 ; C_0+C ; a ; R^2) dos semivariogramas ajustados às componentes principais.



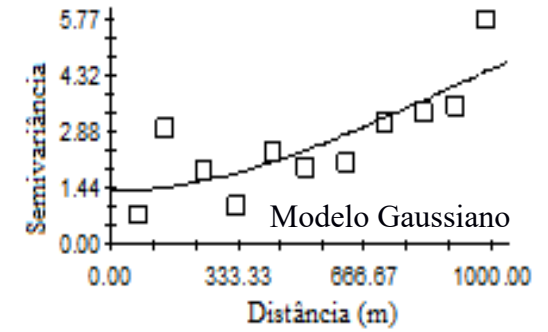
$C_0 = 0,01$; $C_0 + C = 7,90$; $A_0 = 180,00$
 $R^2 = 0,49$; $RSS = 28,0$

G



$C_0 = 0,01$; $C_0 + C = 3,22$; $A_0 = 204,38$
 $R^2 = 0,62$; $RSS = 2,38$

H



$C_0 = 1,37$; $C_0 + C = 7,75$; $A_0 = 1223,00$
 $R^2 = 0,67$; $RSS = 6,40$

I

G: 1ª componente da 3ª profundidade (P3CP1); H: 2ª componente da 3ª profundidade (P3CP2); I: 3ª componente da 3ª profundidade (P3CP3).

Fonte: Elaborado pelo autor.

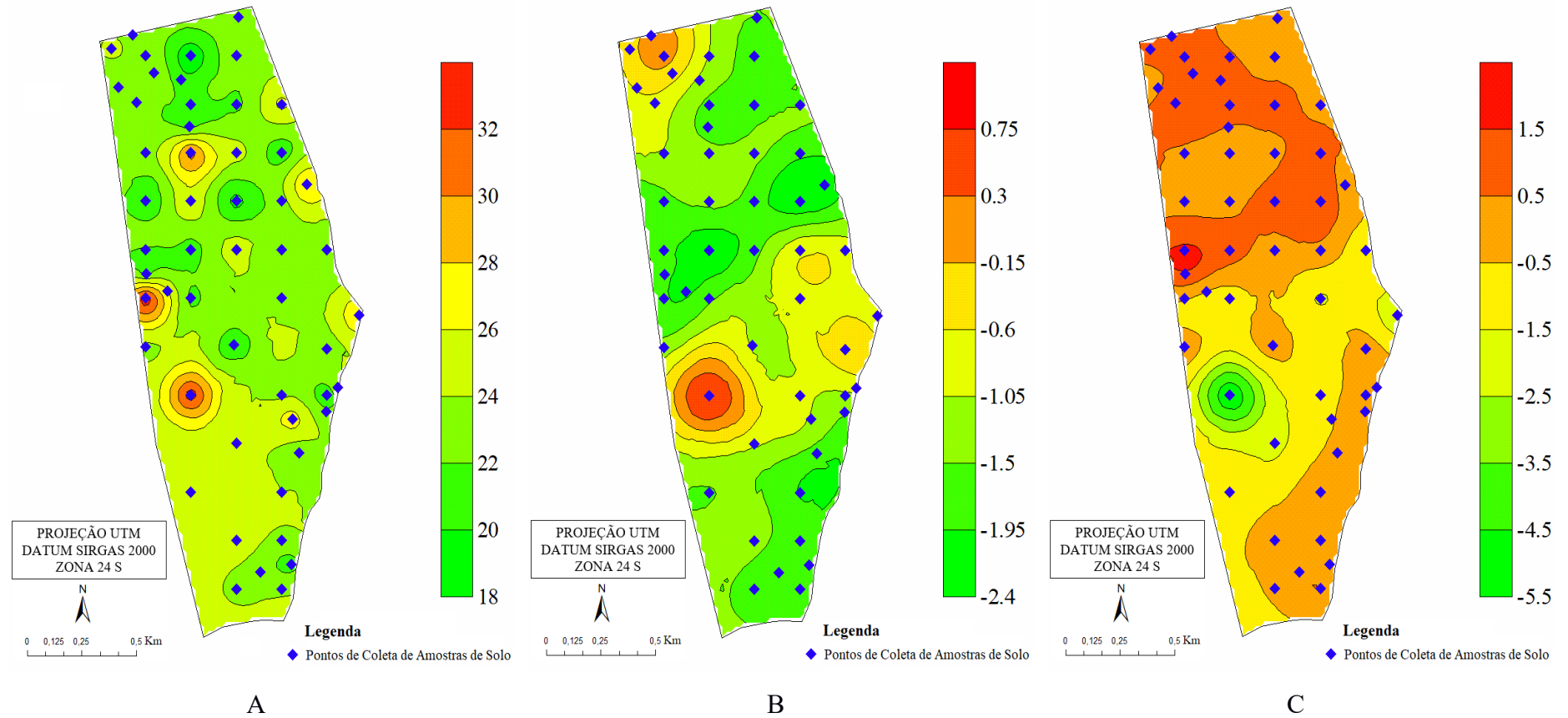
Os modelos esférico e gaussiano ajustados aos semivariogramas foram submetidos ao processo de validação “jack-knifing”, sendo selecionados os mais compatíveis segundo os melhores indicadores (C_0 ; $C_0 + C$; A ; R^2). Observou-se que o modelo esférico, ajustado às semivariâncias, predominou em seis das nove combinações, enquanto nas três restantes o modelo gaussiano foi o que melhor se ajustou.

Os modelos ajustados aos semivariogramas apresentaram dependência espacial, indicando que a distribuição no espaço dos atributos avaliados não é aleatória. De acordo com os resultados obtidos e utilizando os critérios de Cambardella et al. (1994), 7 dos modelos ajustados exibiram forte dependência (P1CP1, P2CP1, P2CP2, P2CP3, P3CP1, P3CP2 e P3CP3), com efeito pepita $\leq 25\%$ do patamar. Os outros 2 restantes (P1CP2 e P1CP3) exibiram dependência espacial moderada, com efeito pepita entre 26-75% do patamar.

A forte dependência espacial observada na maioria das variáveis é atribuída principalmente ao maior teor de matéria orgânica em amostras de superfície e à textura e mineralogia em amostras de subsuperfície, ocorrendo menor variação da dependência espacial em pontos presentes na mesma unidade de mapeamento de solos.

Após a identificação da dependência espacial nos semivariogramas, foi possível realizar a interpolação dos dados nos locais não amostrados por meio da krigagem ordinária (VIEIRA et al., 1983). Em seguida à interpolação, foi feita a espacialização dos valores interpolados, sendo construídos os mapas de isolinhas para todas as profundidades e todas as CPs. Os mapas de isolinhas das diferentes componentes e profundidades, estimados por krigagem, são apresentados na Figura 14.

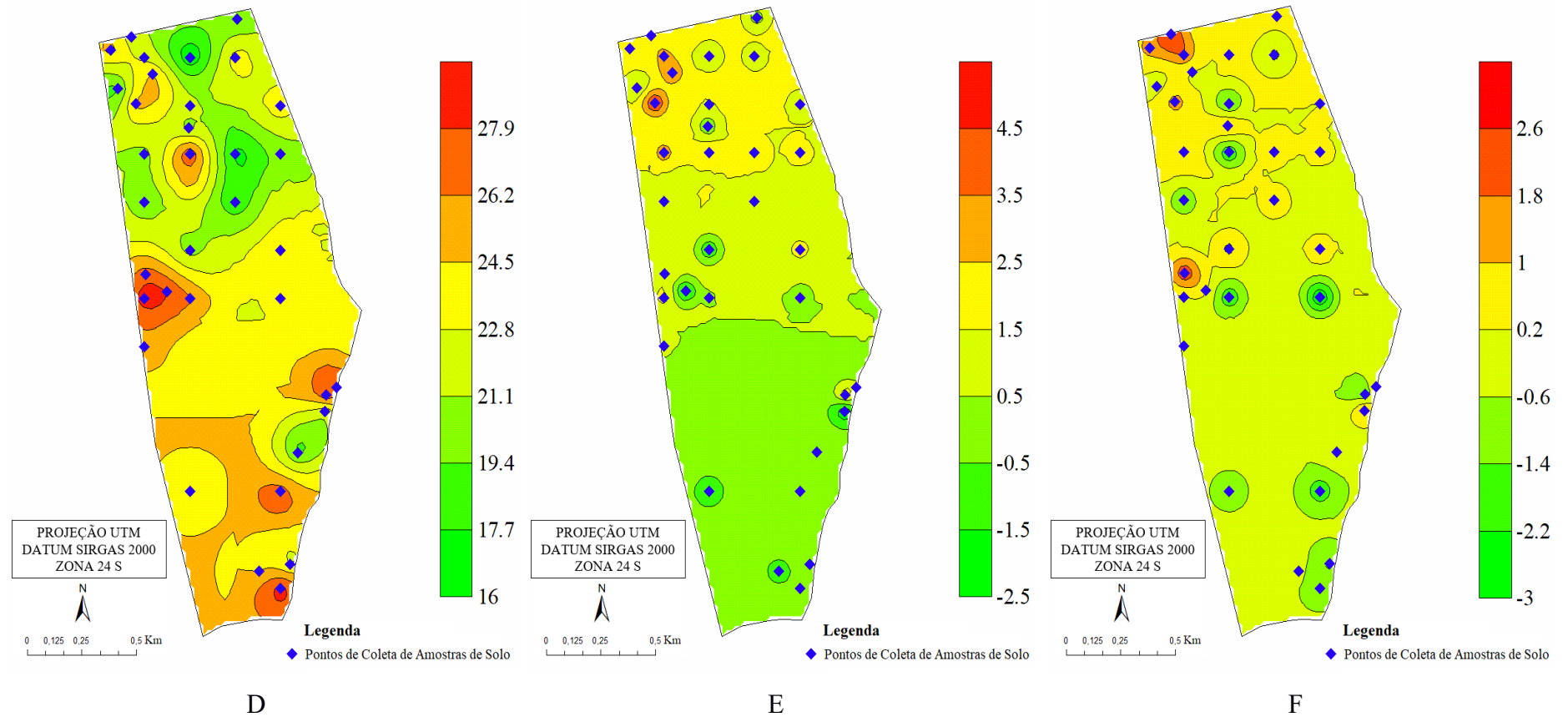
Figura 14 – Distribuição espacial na área de amostragem das três componentes principais nas três diferentes profundidades avaliadas.



A: 1^a componente da 1^a profundidade; B: 2^a componente da 1^a profundidade; C: 3^a componente da 1^a profundidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

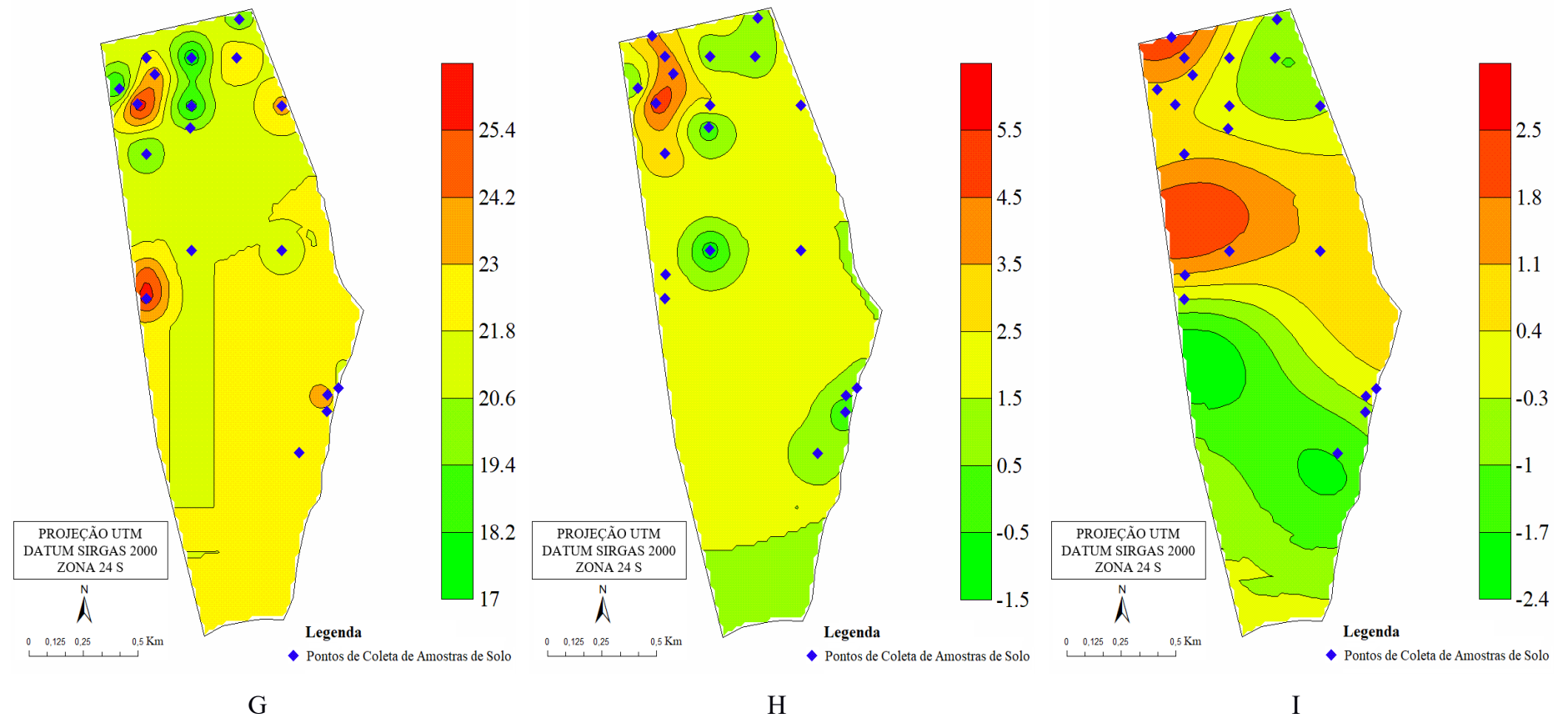
Figura 14 – Distribuição espacial na área de amostragem das três componentes principais nas três diferentes profundidades avaliadas.



D: 1ª componente da 2ª profundidade; E: 2ª componente da 2ª profundidade; F: 3ª componente da 2ª profundidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 – Distribuição espacial na área de amostragem das três componentes principais nas três diferentes profundidades avaliadas.



G: 1^a componente da 3^a profundidade; H: 2^a componente da 3^a profundidade; I: 3^a componente da 3^a profundidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos mapas gerados, pôde-se visualizar a distribuição espacial dos atributos avaliados na área amostrada. Conhecer a variabilidade de determinado conjunto de dados no campo experimental é importante para definição do exato esquema de amostragem a ser seguido (CARVALHO et al., 2002).

Os mapas de isolinhas evidenciam que a variabilidade se acentua na direção da declividade do solo (FIGURA 2), modificando-se do ponto mais alto ao mais baixo do relevo, ou seja, de leste para oeste nos mapas. Esse fato está relacionado à formação do solo, demonstrando a variabilidade de solos existentes nos diferentes pontos do relevo, indo desde o solo mais raso e pouco desenvolvido no topo, onde os fatores e processos de formação atuam com menor intensidade, até a parte mais baixa, onde os processos e fatores de formação são mais atuantes, resultando em solos mais profundos e em maior grau de desenvolvimento.

Em alguns mapas foi possível visualizar uma divisão estabelecida próxima a metade da área mapeada, o que pode indicar distinção entre unidades de mapeamento de solos na área, de acordo com os diferentes materiais de origem existentes. Essa divisão remete à diferenciação existente entre os materiais de origem presentes no local de estudos, possivelmente gnáissica para os NEOSSOLOS e PLANOSSOLOS e sedimentar para os ARGISSOLOS e LUVISSOLOS, sendo isso constatado em campo, no momento das coletas de amostras de solo.

6.3.3 Classificação e Obtenção do Mapa Digital de Solos

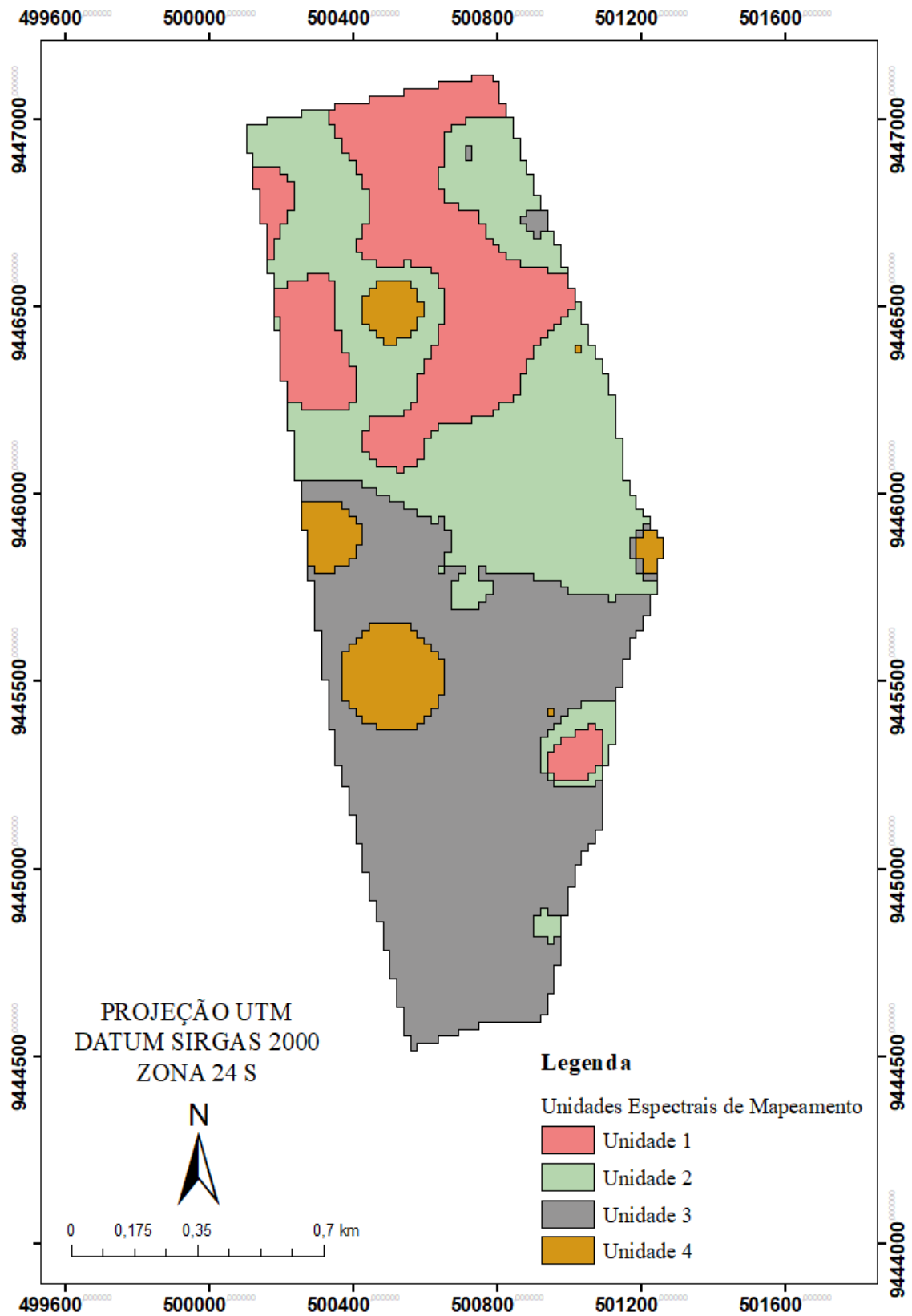
De posse dos mapas de isolinhas das diferentes profundidades e diferentes componentes principais, foi possível juntar as informações em uma única imagem, promovendo a criação de possíveis unidades de mapeamento utilizando a classificação não-supervisionada, com o algoritmo de agrupamentos denominado K-Médias. A classificação não-supervisionada parte do princípio de que o próprio algoritmo computacional é capaz de separar as classes existentes dentro de um conjunto de dados, apenas com o fornecimento de uns poucos parâmetros pelo operador (GONÇALVES et al., 2008).

Previamente à execução do K-Médias sob a imagem contendo todas as informações digitais das diferentes profundidades e diferentes componentes principais, foram especificados manualmente alguns parâmetros para controlar o processo de agrupamentos, dentre eles: O número de unidades de mapeamento espectrais, que nesse caso foi igual a 4 (mesmo número de unidades de mapeamento encontradas no método de mapeamento tradicional); o número de pixels que mudam de classe (*Change Threshold*), sendo escolhido o valor 3; e o número máximo de interações, sendo definido como igual a 100.

Para a geração das classes estabelecidas, o algoritmo K-Médias inicialmente calcula as mesmas fazendo a distribuição uniforme em uma classe no espaço, utilizando a técnica de distância mínima para aglomeração destas. Quanto melhor for agrupada a nuvem de pixels nesse processo, melhor será o resultado final da classificação. Dessa forma, a classificação se dará por finalizada após a conclusão do número de iterações definido pelo usuário, ou antes disso, caso seja alcançado o critério de número de pixels que mudam de classe (*Change Threshold*) (ENVI, 2000).

O resultado obtido após o processo de classificação da imagem supracitada, chamado mapa digital de solos, é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Mapa de solos digital da Fazenda Lavoura Seca – UFC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se observar o produto da classificação, nota-se que houve algumas correspondências entre as unidades de mapeamento delimitadas e as delimitações obtidas no mapeamento tradicional. A linha traçada próxima a metade da área levantada permaneceu, como um indicativo de diferenciação entre os materiais originários existentes no local de estudos, possivelmente gnáissica para os NEOSSOLOS e sedimentar para os ARGISSOLOS e LUVISSOLOS, corroborando com os estudos de Costa e Silva (2012).

Das unidades espectrais de mapeamento delimitadas, a unidade 1 foi correspondente para os ARGISSOLOS (unidade PVe), levando em consideração para essa afirmativa a observação das análises físico-químicas e as curvas espectrais dos pontos localizados dentro do polígono delimitado. Essa ocupou 39,1 hectares da área total da fazenda, representando 20,7 % desta, sendo mais que o valor encontrado no mapeamento tradicional para esta mesma unidade, com um total de 30,2 ha, representando 15,9 %.

A unidade de número 2 foi correspondente para os PLANOSSOLOS (unidade SXe), uma vez que os dados das análises físicas, químicas espectrais da maior parte dos pontos presentes dentro do referente polígono indicaram equivalência passa esta unidade de mapeamento de solo. Essa satisfaz no mapa digital 62,8 hectares, representando 33,3 % da área total da fazenda, sendo consideravelmente maior que o valor encontrado no mapeamento tradicional para esta mesma unidade de mapeamento, com um total de 38,7 ha, representando 20,4 % do total da área mapeada.

Em relação a unidade 3 gerada no mapeamento digital, a mesma foi correspondente aos NEOSSOLOS LITÓLICOS (unidade RLe), considerando-se os pontos localizados dentro do polígono criado, com o indicativo dos resultados provenientes das análises físicas, químicas e espectrais. A referida unidade espectral de mapeamento preencheu no mapa digital 75 hectares, o qual representa 39,8 % da área total da fazenda. Esse valor permaneceu abaixo do resultado total obtido por meio do mapeamento tradicional para esta mesma unidade, onde o mesmo satisfaz um total de 112,61 ha, o que representa 59,4 % do total da área mapeada.

Já a unidade 4, correspondeu aos LUVISSOLOS (unidade TCo), atendendo para essa unidade a maioria dos pontos localizados dentro do polígono delimitados, segundo a observação das análises físico-químicas e espectrais. Essa unidade espectral de mapeamento preencheu no mapa digital um total de 11,7 hectares, o que representa 6,2 % da área total da fazenda, valor esse não muito, mas ainda menor que o obtido no mapeamento tradicional para esta mesma unidade, perfazendo um total de 8,07 ha, representando 4,3 % do total da área mapeada.

Apesar das distinções visuais existentes entre as unidades geradas nos dois diferentes métodos de mapeamento, observou-se que, de modo geral, os valores de área total ocupada por

cada unidade, nas duas metodologias utilizadas, permaneceram próximos. Além disso, com exceção à unidade 4 do mapa digital, as demais mantiveram-se ocupando áreas espacialmente semelhantes às do mapa tradicional, sendo esse um dos critérios utilizados para relacionar as unidades de mapeamento espectrais com as unidades de mapeamento definidas no método tradicional.

4.4 Modelagem espectroscópica dos Atributos do Solo

4.4.1 Calibração dos Modelos de Predição

Os melhores modelos, capazes de prever os atributos do solo, bem como os parâmetros utilizados na calibração dos mesmos encontram-se na Tabela 2, sendo os resultados completos correspondentes a todos os atributos e tratamentos dispostos no Apêndice C. Pode ser observado o número de fatores PLS utilizados (NF), assim como a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o desvio padrão do erro (RPD) e o coeficiente de determinação (R^2) para amostras com os dados espectrais originais em reflectância (RF), com os dados espectrais em reflectância e com o espalhamento da luz corrigido (RF+SNV), com os dados espectrais transformados em absorvância (ABS), com os dados espectrais transformados em absorvância e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+SNV) e com os dados espectrais transformados em absorvância, com a 1ª derivada aplicada para eliminação da linha de base e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+1DEV+SNV).

Tabela 2 – Resultados da calibração dos modelos PLSR para as variáveis analisadas com os melhores modelos.

Reflectância (RF)				
Atributo	Nº de Fatores	RMSE	RPD	R²
Areia (g kg⁻¹)	9	76,72	1,63	0,65
Argila (g kg⁻¹)	18	53,17	2,19	0,80
Na (cmolc dm⁻³)	15	0,35	1,44	0,54
Reflectância e com o espalhamento da luz corrigido (RF+SNV)				
Atributo	Nº de Fatores	RMSE	RPD	R²
Areia (g kg⁻¹)	5	71,01	1,77	0,67
Argila (g kg⁻¹)	17	51,77	2,25	0,81
Na (cmolc dm⁻³)	15	0,32	1,55	0,60
Mg (cmolc dm⁻³)	6	1,18	1,40	0,50
SB (cmolc dm⁻³)	9	2,36	1,36	0,47
CTC (cmolc dm⁻³)	11	2,60	1,36	0,49
Absorbância (ABS).				
Atributo	Nº de Fatores	RMSE	RPD	R²
Areia (g kg⁻¹)	13	89,08	1,41	0,57
Argila (g kg⁻¹)	13	54,97	2,12	0,79
Na (cmolc dm⁻³)	15	0,37	1,36	0,50
Mg (cmolc dm⁻³)	09	1,05	1,56	0,58
SB (cmolc dm⁻³)	10	2,17	1,47	0,55
CTC (cmolc dm⁻³)	13	2,36	1,50	0,58
Absorbância e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+SNV)				
Atributo	Nº de Fatores	RMSE	RPD	R²
Areia (g kg⁻¹)	11	72,49	1,73	0,67
Argila (g kg⁻¹)	12	54,46	2,14	0,79
Na (cmolc dm⁻³)	22	0,35	1,43	0,51
Mg (cmolc dm⁻³)	8	1,12	1,50	0,53
SB (cmolc dm⁻³)	9	2,30	1,40	0,50
CTC (cmolc dm⁻³)	9	2,59	1,36	0,49

Absorbância, com a 1ª derivada aplicada para eliminação da linha de base e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+1DEV+SNV).

Atributo	Nº de Fatores	RMSE	RPD	R ²
Areia (g kg ⁻¹)	7	81,57	1,54	0,59
Argila (g kg ⁻¹)	6	64,32	1,81	0,70

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os modelos gerados em todos os tratamentos de dados adotados não apresentaram resultados satisfatórios para os atributos Silte, pH (H₂O, CaCl₂ e KCl), P, Carbono Orgânico (CO), N, K, Ca, Al, Acidez Potencial (H+Al) e m%, com valores de R² inferiores a 0,5 e RPD menores que 1,4, o que torna inviável a utilização desses modelos para qualquer objetivo, devido a não confiabilidade nos resultados a serem preditos.

Avaliando-se os modelos gerados para as amostras com os dados espectrais em reflectância (RF), em relação aos atributos químicos analisados, somente a variável Sódio (Na⁺) permaneceu com valor de R² superior a 0,5, apresentando ainda valor de RPD superior a 1,4, o que permitiria pelo menos a discriminação entre altas e baixas concentrações do atributo.

Para os atributos físicos, a areia apresentou valor de R² entre 0,5 e 0,65, sendo que seu RPD esteve acima de 1,4, podendo então seu modelo ser utilizado para a distinção entre altas e baixas concentrações (CHANG et al., 2001; DUNN et al., 2002; SAYES et al., 2005). Já para o atributo argila, o valor do R² de 0,80, que categoriza o modelo de predição apenas como aceitável, contrasta com o valor de RPD de 2,19, o que atribuiria ao modelo obtido a categoria excelente em relação a exatidão da predição de argila, podendo prever com precisão o atributo sob avaliação.

Em um estudo realizado por Fiorio e Demattê (2009) com as medidas das amostras em reflectância, objetivando definir as propriedades para quatro classes de solos brasileiros, foram encontrados valores superiores de R² para os modelos de determinação da granulometria do solo, sendo areia = 0,81 e argila = 0,86. Contudo, salienta-se a utilização de análise de regressão múltipla, ao invés de regressão por mínimos quadrados parciais, por esses autores, onde os mesmos ainda propuseram uma equação global para avaliação dos referidos atributos para diferentes solos e horizontes.

Os valores de R² constatados para argila são maiores que os verificados por Coleman et al. (1991), Ben-Dor e Banin (1995) e Sousa Junior et al. (2011), com, respectivamente, 0,60, 0,56 e 0,69. No entanto, permanecem menores que os obtidos por Nanni e Demattê (2006), com R² de 0,91 para argila e 0,79 para areia. Assim, deve ser levada em consideração a diferença

existente entre os tipos de solos, as sequências metodológicas aplicadas e os algoritmos de predição utilizados nesses trabalhos.

Em relação aos modelos gerados para as amostras com os dados espectrais em reflectância e com o espalhamento da luz corrigido (RF+SNV), verificou-se que, dos atributos químicos analisados, somente as variáveis sódio (Na^+) e magnésio (Mg) atingiram valores suficientes para serem utilizadas na predição, pois mesmo não obtendo altos valores, permaneceram com valor de R^2 superior a 0,5 e valor de RPD superior a 1,4, permitindo pelo menos a discriminação entre altas e baixas concentrações desses atributos.

Novamente, os atributos físicos areia ($R^2 = 0,67$ e $\text{RPD} = 1,77$) e argila ($R^2 = 0,81$ e $\text{RPD} = 2,25$) destacam-se por proporcionarem resultados de calibração dos modelos satisfatórios, sendo que para o atributo argila o modelo pode ser considerado de bom a excelente em relação a exatidão da predição, segundo as faixas de classificação estabelecidas.

Foi observado ainda, que a correção no espalhamento da luz para os dados espectrais em reflectância veio a promover na calibração a geração de modelos com resultados superiores aos gerados para os dados também em reflectância, porém sem a correção no espalhamento da luz. Essa melhora nos resultados gerados é atribuída a correção individual de cada espectro de acordo com o resultado do desvio padrão individual, o que corrige o espalhamento causado por falta de homogeneidade ótica devido ao tamanho das partículas da amostra lida pelo sensor (COSTA FILHO, 2003).

A utilização de técnicas de pré-processamento visando a obtenção de melhores resultados na calibração também proporcionou a geração de modelos superiores para Riedel et al. (2018), onde utilizando-se de pré-tratamentos como a variação normal padrão (SNV) e a correção da dispersão média da luz (MSC) na calibração dos modelos com os dados em reflectância, obtiveram os melhores resultados na calibração para as variáveis analisadas.

Em relação aos modelos gerados na calibração para os dados espectrais convertidos em absorbância (ABS), os atributos físico-químicos areia, argila, magnésio (Mg), soma de bases (SB) e capacidade de troca catiônica (CTC) foram os que apresentaram resultados satisfatórios na calibração dos modelos de predição, com R^2 superiores a 0,5 e RPD superiores a 1,4. Os resultados de R^2 e RPD permaneceram próximos para os atributos Areia, Mg, SB e CTC, classificando os modelos gerados como úteis, capazes de discriminar pelo menos entre alta e baixa concentração do atributo avaliado. Já para a variável Argila, semelhante ao que ocorreu com os modelos gerados para os dados em reflectância, o valor do R^2 de 0,79, categorizando o modelo de predição apenas como aceitável, contrasta com o valor de RPD de 2,12, o que tornaria o modelo obtido excelente em relação a exatidão da predição de argila.

A calibração dos modelos de predição para atributos químicos Mg, SB e CTC, se saiu melhor com os dados espectrais convertidos em absorvância em comparação com a calibração dos modelos de predição realizada com os dados espectrais em reflectância. Em contrapartida, para os atributos Areia e Argila, a calibração dos modelos com os dados espectrais em reflectância proporcionou resultados superiores aos dos modelos calibrados com os dados espectrais convertidos em absorvância.

A respeito dos modelos gerados para as amostras com os dados espectrais convertidos em absorvância e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+SNV), somente as variáveis sódio (Na^+), magnésio (Mg) e soma de bases (SB), correspondentes aos atributos químicos analisados nesse tratamento de dados, permaneceram com valor de R^2 superior a 0,5 e valor de RPD superior a 1,4, permitindo pelo menos a discriminação entre altas e baixas concentrações desses atributos.

Para os atributos físicos, novamente apenas os atributos Areia e Argila apresentaram resultados satisfatórios na calibração dos modelos, com R^2 de 0,67 e 0,79 e RPD de 1,73 e 2,14, respectivamente. Assim como nos tratamentos anteriores, a areia apresentou valor de R^2 entre 0,5 e 0,65, sendo que seu RPD esteve acima de 1,4, podendo a qualidade da predição ser considerada aceitável. Igualmente para o atributo argila, com exceção do modelo gerado para os dados espectrais em reflectância e com o espalhamento da luz corrigido (RF+SNV), o valor do R^2 de 0,79, categorizando o modelo de predição como aceitável, se diferencia da atribuição excelente, relacionada a exatidão da predição do atributo, atribuída pelo valor do RPD de 2,19 encontrado.

Ao se comparar os resultados da calibração para os dados transformados e absorvância, com e sem correção do espalhamento da luz, verifica-se que no tratamento ABS+SNV houve uma melhora nos resultados dos modelos obtidos para os atributos físicos Areia e Argila, elevando os valores de R^2 de 0,57 para 0,67 e de RPD de 1,41 para 1,73 para areia, sendo que para argila houve uma pequena elevação apenas do RPD, passando esse de 2,12 para 2,14, permanecendo o R^2 como 0,79 em ambos os tratamentos. Franceschini et al. (2013), também obtiveram melhores resultados na calibração realizando a transformação espectral dos dados de reflectância para absorvância, seguido do processamento de dados espectrais por SNV (*Standard Normal Variate*).

Na predição dos atributos químicos, constatou-se que no atributo SB, em que ambos apresentaram resultados suficientes para garantir a validação, o método de transformação dos dados espectrais somente em absorvância (ABS) foi mais eficiente, proporcionando melhores resultados de R^2 e RPD. Leone et al. (2012) ao aplicarem a PLSR para predição de propriedades

de solos provenientes do sul da Itália, também obtiveram melhores resultados na calibração através do pré-processamento dos espectros antes de sua análise, transformando-os de reflectância (R) para absorvância (A). Contudo, vale ressaltar que esses autores ainda aplicaram um filtro médio para a absorvância antes de calcular sua primeira derivada, finalizando o tratamento pré-calibração com a centralização da média.

Com relação aos modelos gerados na calibração para os dados espectrais transformados em absorvância, com a 1ª derivada aplicada para eliminação da linha de base e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+1DEV+SNV), foi observado que nenhum dos atributos químicos analisados foi capaz de gerar um modelo de calibração satisfatório para predição, permanecendo abaixo do aceitável os resultados de R^2 e RPD. Apenas os atributos físicos Areia ($R^2 = 0,59$ e RPD = 1,54) e Argila ($R^2 = 0,70$ e RPD = 1,81) proporcionaram resultados suficientes para os modelos de calibração, porém, ainda assim, de modo geral permaneceram inferiores aos resultados obtidos nos demais tratamentos aplicados aos dados espectrais.

De maneira geral, o tratamento ABS+1DEV+SNV foi o que apresentou o menor número de fatores na calibração para as variáveis Areia e Argila, com 7 e 6 fatores respectivamente para cada atributo. Porém, tendo em vista os valores de R^2 e RPD nesse método apresentarem-se mais baixos que os demais, somando-se ao fato da incapacidade de geração de modelos de calibração satisfatórios para os atributos químicos, notou-se que o referido tratamento se mostrou menos eficiente que os demais procedimentos utilizados para tratamento dos dados espectrais. Os resultados obtidos podem estar relacionados com a utilização da 1ª derivada no tratamento dos dados, o que pode ter ocasionado redução no sinal e aumento do ruído dos espectros, prejudicando as predições na etapa de calibração (LEONE et al., 2012).

Os melhores resultados para modelos gerados na calibração encontram-se na Tabela 3. Mesmo com os tratamentos dos dados espectrais em reflectância, ou ainda nos dados originais, os modelos gerados não atingiram resultados satisfatórios para os atributos Silte, pH (H₂O, CaCl₂ e KCl), P, CO, N, K, Ca, Al, H+Al, V% e m%, permanecendo os valores de R^2 e RPD para esses atributos inferiores a 0,5 e 1,4, respectivamente.

Tabela 3 – Resultado da calibração dos modelos PLSR para as variáveis analisadas com os tratamentos mais eficientes.

Atributo	Nº de Fatores	RMSE	RPD	R ²	Tratamento do Dados Espectrais
Areia (g kg ⁻¹)	5	71,01	1,77	0,67	RF+SNV
Argila (g kg ⁻¹)	17	51,77	2,25	0,81	RF+SNV
Silte (g kg ⁻¹)	1	54,22	0,99	0,15	ABS+SNV
pH H ₂ O	29	0,65	1,20	0,41	RF+SNV
pH CaCl ₂	30	0,74	1,11	0,33	RF+SNV
pH KCl	13	0,62	1,18	0,37	ABS
P (mg dm ⁻³)	6	5,97	1,11	0,20	RF
CO (g kg ⁻¹)	8	3,92	1,22	0,36	RF+SNV
N (g kg ⁻¹)	14	0,24	1,14	0,31	RF+SNV
Na (cmol _c dm ⁻³)	15	0,32	1,55	0,60	RF+SNV
K (cmol _c dm ⁻³)	1	0,15	0,99	0,30	ABS+SNV
Ca (cmol _c dm ⁻³)	9	1,85	1,18	0,34	RF
Mg (cmol _c dm ⁻³)	9	1,05	1,56	0,58	ABS
Al (cmol _c dm ⁻³)	1	0,31	0,99	0,36	ABS+SNV
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	30	1,11	1,31	0,49	ABS+SNV
SB (cmol _c dm ⁻³)	10	2,17	1,47	0,55	ABS
CTC (cmol _c dm ⁻³)	13	2,36	1,50	0,58	ABS
V%	13	14,63	1,13	0,36	ABS+SNV
m%	1	9,74	0,99	0,42	ABS+SNV

RMSE: raiz do erro quadrático médio; **RPD:** desvio padrão do erro; **R²:** coeficiente de determinação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, o tratamento RF+SNV foi mais eficiente na geração de modelos na calibração dos atributos físicos do solo estudados, sendo que o modelo de predição do atributo Argila pode ser considerado excelente, de acordo com as faixas de classificação pré-estabelecidas. Mesmo que os modelos gerados para silte não tenham permitido a utilização sequer para determinação de altas ou baixas concentrações desse atributo, o conteúdo dessa fração ainda pode ser obtido pela diferença entre o percentual de areia somado ao percentual de

argila.

Dentre os modelos gerados com os tratamentos aplicados aos dados espectrais para os atributos químicos, destaca-se a transformação dos dados em Absorbância, capaz de proporcionar a geração de modelos que permitem pelo menos a determinação de altas ou baixas concentrações dos atributos Mg, SB e CTC. A transformação dos dados espectrais como ferramenta de aprimoramento nos modelos de predição também proporcionou melhorias aos resultados de Franceschini et al. (2015) e Demattê et al. (2014), obtendo maior eficiência nos procedimentos de modelagem utilizando os dados espectrais em absorbância em vez da reflectância.

Em relação ao atributo Na^+ , verificou-se que o modelo gerado na calibração com os dados espectrais em reflectância (RF), ou seja, sem tratamento, foi mais eficiente por proporcionar maiores valores de R^2 e RPD, permitindo assim a determinação de altas ou baixas concentrações desse atributo.

No que diz respeito à quantidade de fatores utilizados pelos diferentes métodos de transformação a que os dados espectrais foram submetidos na etapa de calibração, observou-se que o tratamento ABS+1DEV+SNV foi o que apresentou o menor número fatores para a maioria dos atributos avaliados. Entretanto, apesar de algumas poucas variáveis não apresentarem os menores fatores na calibração com esse método de transformações dos dados espectrais, esse tratamento apresentou-se menos eficiente na geração de modelos de calibração aceitáveis, em comparação aos outros tratamentos empregados nos dados espectrais.

Mesmo se destacando como um dos tratamentos mais eficientes para geração dos melhores modelos na calibração, o tratamento que consistiu da transformação dos dados espectrais de reflectância para absorbância (ABS) foi o que por mais vezes apresentou os maiores fatores, seguido pelo método RF. Apesar disso, a quantidade de fatores fora considerada ideal em função dos bons resultados obtidos para algumas variáveis, como Mg, SB e CTC.

Quanto à raiz do erro quadrático médio (RMSE), novamente o tratamento ABS+1DEV+SNV destaca-se por apresentar os valores mais altos para a maioria dos atributos avaliados, enquanto a transformação dos dados espectrais de reflectância para absorbância (ABS) apresentou os menores valores para a maioria dos atributos, principalmente para os atributos Mg, SB e CTC, em que bons resultados na calibração foram obtidos.

4.4.2 Validação dos Modelos de Predição

Os modelos gerados na fase de calibração que atingiram valores que permitiriam sua utilização pelo menos na determinação de altas e baixas concentrações do atributo do solo avaliado foram testados num novo conjunto de amostras independentes, não utilizadas na fase de calibração (30 % do conjunto total), verificando sua capacidade de estimar tais propriedades. Esse processo auxilia na melhoria da qualidade das predições, pois fornece uma ideia mais realista da exatidão dos modelos criados (DARDENNE et al., 2000). Os melhores modelos encontram-se na Tabela 4, sendo os resultados completos da validação apresentados no Apêndice D.

Tabela 4 – Resultados da validação dos modelos PLSR para as variáveis analisadas com os melhores modelos.

Reflectância (RF)			
Atributo	RMSE	RPD	R²
Areia (g kg⁻¹)	97,5	1,12	0,52
Argila (g kg⁻¹)	60,9	1,53	0,62
Na (cmol_c dm⁻³)	0,28	0,53	0,002
Reflectância e com o espalhamento da luz corrigido (RF+SNV)			
Atributo	RMSE	RPD	R²
Areia (g kg⁻¹)	68,8	1,58	0,63
Argila (g kg⁻¹)	62,9	1,50	0,58
Na (cmol_c dm⁻³)	0,28	0,52	0,011
Mg (cmol_c dm⁻³)	1,45	2,08	0,84
Absorbância (ABS)			
Atributo	RMSE	RPD	R²
Areia (g kg⁻¹)	87,7	1,24	0,74
Argila (g kg⁻¹)	42,7	2,19	0,82
Mg (cmol_c dm⁻³)	1,18	2,55	0,88
SB (cmol_c dm⁻³)	2,36	2,24	0,81
CTC (cmol_c dm⁻³)	1,95	2,72	0,86

Absorbância e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+SNV)			
Atributo	RMSE	RPD	R²
Areia (g kg⁻¹)	69,8	1,56	0,68
Argila (g kg⁻¹)	46,3	2,02	0,78
Na (cmol_c dm⁻³)	0,25	0,59	0,21
Mg (cmol_c dm⁻³)	1,45	2,09	0,85
SB (cmol_c dm⁻³)	2,89	1,84	0,74

Absorbância, com a 1ª derivada aplicada para eliminação da linha de base e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+1DEV+SNV)			
Atributo	RMSE	RPD	R²
Areia (g kg⁻¹)	110,8	0,98	0,24
Argila (g kg⁻¹)	64,14	1,45	0,62

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação aos atributos com os dados espectrais em reflectância (RF), com a validação dos modelos de predição, houve um decréscimo na qualidade das quantificações, diminuindo tanto para os atributos físicos do solo (areia e argila), quanto para o atributo químico sódio (Na⁺).

Observou-se que o atributo Argila ainda manteve níveis aceitáveis de R² e RPD (R² > 0,5 e RPD > 1,4), mesmo com a baixa na qualidade dos modelos gerados. Contudo, o mesmo não ocorreu com os atributos Areia e Na, sendo alterados de modelo razoável para "não confiável" por conta do baixo RPD = 1,12 (Areia) e RPD = 0,53 (Na) e do baixo R² = 0,002 (Na).

Para a maioria dos atributos com os dados espectrais em reflectância e com o espalhamento da luz corrigido (RF+SNV), a qualidade das quantificações na etapa de validação foi reduzida, com exceção apenas da variável Mg, onde houve um aumento considerável nos valores de R² e RPD.

Semelhante ao que ocorreu com os dados espectrais não tratados, o valor de R² = 0,002 e de RPD = 0,52 do atributo Na⁺ faz com que a classificação do modelo gerado seja alterada de útil para não confiável. Os baixos valores de R² e RPD dos atributos físicos Areia e Argila na fase de validação também ocasionou uma mudança de categoria relacionada a qualidade dos modelos gerados, passando os mesmos de aceitáveis a apenas com capacidade de discriminação entre altas e baixas concentrações desses atributos.

Em contrapartida aos baixos valores de R^2 e RPD obtidos nos demais atributos modelados, a variável Mg apresentou considerável aumento na etapa de validação para o tratamento dos dados espectrais aplicado, onde os valores de $R^2 = 0,84$ e de $RPD = 2,08$ indicam um excelente modelo quantitativo para a predição do atributo em questão.

A validação dos modelos PLS para os atributos físico-químicos com os dados espectrais convertidos em absorvância (ABS) proporcionou considerável melhora aos modelos gerados, promovendo a elevação nos valores de R^2 e RPD na maioria das variáveis analisadas.

A qualidade das quantificações, indicada principalmente pelo índice RPD, aumentou para os valores de argila ($RPD = 2,19$), Mg ($RPD = 2,55$), soma de bases ($RPD = 2,24$) e capacidade de troca catiônica ($RPD = 2,72$), sendo que o aumento nos valores dos coeficientes de determinação e a redução do RMSE corroboram com esta afirmação. Os modelos gerados na fase de validação para as variáveis supracitadas proporcionam a alteração de sua classificação, passando a serem considerados de a de bons a excelentes em relação a exatidão da predição dos atributos analisados.

Apesar do aumento nos valores de R^2 e RPD observado na maioria dos modelos validados, houve decréscimo na qualidade da predição do atributo areia, na etapa de validação para o referido tratamento aplicado aos dados espectrais, onde mesmo com valor de $R^2 = 0,74$, o que consideraria o modelo de predição aceitável, não há confiabilidade no modelo gerado em função do baixo RPD ($RPD = 1,24$).

Em relação aos atributos com os dados espectrais convertidos em absorvância e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+SNV), foi verificado aumento na qualidade das predições nas variáveis Mg e SB, observando-se, em contrapartida, decréscimo nos valores de R^2 e RPD dos demais modelos gerados para o restante das variáveis.

Para o atributo sódio, os modelos gerados na validação apresentaram comportamento semelhante ao ocorrido nos demais tratamentos, com o valor de R^2 inferior a 0,5 e o valor de RPD inferior a 1,4, fazendo do modelo não confiável para predição desse atributo. Com relação aos atributos físicos Areia e Argila, os valores de R^2 na fase de validação para o tratamento dos dados espectrais em questão foram semelhantes aos obtidos na calibração, porém, com uma baixa no RPD em ambos os atributos.

Um aumento na qualidade das predições nas variáveis Mg e SB foi observado em comparação com os modelos gerados na calibração, elevando os valores de R^2 de 0,53 para 0,85 e de RPD de 1,5 para 2,09 (magnésio); e de R^2 de 0,50 para 0,74 e de RPD de 1,4 para 1,84 (soma de bases).

Quanto aos modelos gerados na validação para os dados espectrais convertidos em

absorbância, com a 1ª derivada aplicada para eliminação da linha de base e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+1DEV+SNV), observou-se redução na a qualidade das quantificações para os dois atributos avaliados.

Houve decréscimo nos valores de R^2 e RPD em ambas as variáveis testadas quando comparados aos resultados dos modelos gerados na calibração, permanecendo os valores de RPD menores que 1,4, ou seja, tornando os modelos não confiáveis e insuficientes para a maioria das aplicações.

De acordo com os resultados da validação dos modelos pelos diferentes tratamentos nota-se que em geral os modelos gerados na validação apresentaram resultados inferiores aos da calibração para os atributos físicos do solo avaliados, exceto nos modelos de predição onde os dados espectrais em reflectância foram transformados em absorbância, promovendo aumento na qualidade dos modelos gerados.

Em relação aos atributos químicos analisados, na validação houve aumento na qualidade dos modelos gerados para os atributos Mg, SB e CTC, onde a maioria dos modelos criados podem ser considerados de bons a excelentes, seguindo as faixas de classificação pré-estabelecidas para quantificação.

Dos tratamentos empregados aos dados espectrais, a conversão dos dados espectrais de reflectância para absorbância foi a que mais promoveu melhorias aos modelos de predição, tanto para os atributos químicos, quanto para os atributos físicos avaliados. Esse tratamento se mostrou mais eficiente também para Franceschini et al. (2013), Demattê et al. (2014) e Lacerda et al. (2016).

Apesar de serem poucas as variáveis que apresentaram bons resultados na quantificação por sensoriamento remoto, ressalta-se que foram utilizadas amostras provenientes de diferentes classes de solo, estando de acordo com as conclusões de Fiorio et al. (2010), onde afirmam que para dados de atributos do solo obtidos em laboratório por sensoriamento remoto, o número de variáveis preditoras tende a ser maior em áreas com solos mais homogêneos que para áreas com solos mais heterogêneos, devido à maior dificuldade de diferenciá-los.

Enfim, de acordo com os resultados obtidos e as técnicas de processamento empregadas, pode-se considerar a espectrorradiometria como uma técnica auxiliar na quantificação de atributos do solo, ressaltando-se, no entanto, que o conhecimento relacionado às técnicas estatísticas para geração de modelos de estimativa de atributos através da radiometria necessita estar em constante evolução e melhoramentos. Para Cohen et al. (2007) o erro na estimativa dos atributos do solo, obtidos pela análise espectral, pode ser tão igual ou menor que o erro cometido por um laboratório de análises químicas convencionais. Assim, o sucesso dos modelos de

quantificação está diretamente relacionado com a importância da construção de bibliotecas espectrais regionais.

5 CONCLUSÕES

A variação dos dados espectrais dos solos permite a diferenciação entre unidades de mapeamento distintas no mapa digital, permanecendo o produto final desse método de mapeamento próximo ao obtido pelo método tradicional.

Os constituintes físico-químicos e mineralógicos presentes no solo podem levar a inferências errôneas na delimitação de unidades espectrais de mapeamento, superestimando ou subestimando a área total correspondente à cada unidade em decorrência da influência exercida por esses constituintes no comportamento espectral do solo analisado.

As incertezas referentes à delimitação de polígonos e à forma de agregação das informações temáticas em unidades espectrais de mapeamento de solos não devem ser negligenciadas, fazendo-se necessários maiores estudos relacionados à metodologia de processamento dos dados espectrais, treinamento operacional e tempo de avaliação dos resultados obtidos com a utilização dessa técnica.

Diferentes materiais de origem, somados à variação na quantidade de minerais trans- opacos e matéria orgânica, são fundamentais no processo de distinção e delimitação de polígonos referentes às diferentes unidades de mapeamento de solos, contribuindo com a proporção de maiores ou menores intensidades de reflectância.

A mineralogia apresenta-se como o principal agente influenciador na intensidade de reflectância em solos do semiárido nordestino, estudados por meio do sensoriamento proximal, variando o albedo nesses solos para mais, ou para menos, conforme sua constituição mineralógica.

A análise de atributos do solo por sensoriamento proximal pode proporcionar a quantificação de alguns atributos, sendo um método mais rápido e menos oneroso que as subsequentes análises físico-químicas tradicionais, além de promover uma menor geração de impactos ao meio ambiente por não demandar a utilização de agentes químicos para a obtenção de seus resultados.

REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, L. J. O.; HUETE, A. R. Resposta espectral de solos em razão do ângulo de visada, da umidade e da rugosidade superficial. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35 (12), p. 2473-2484, 2000.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; de MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22 (6), p. 711–728. 2014.
- ANDERSON, K.; CROFT, H. Remote sensing of soil surface properties. **Progress in Physical Geography**, v. 33 (4), p. 457–473, 2009.
- BAUMGARDNER, M. F.; SILVA, L. F.; BIEHL, L. L.; STONER, R. Reflectance properties of soils. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 38, p. 1-44, 1985.
- BELLINASSO, H.; DEMATTÊ, J. A. M.; ROMEIRO, S. A. Soil spectral library and its use in soil classification. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 861-870, 2010.
- BEN-DOR, E.; BANIN, A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, p. 364-372, 1995.
- BEN-DOR, E.; HELLER, D.; CHUDNOVSKY, A. A novel method of classifying soil profiles in the field using optical means. **Soil Science Society of American Journal**, v. 72, p. 1113-1123, 2008.
- BEN-DOR, E.; INBAR, Y.; CHEN, Y. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400-2500) during a controlled decomposition process. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 61, p. 1-15, 1997.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisa Pedológica, DNPEA. **Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do estado do Ceará**. Recife, convênios MA/DNPEA-SUDENE/DRN, MA/CONTAP/USAID/ETA, 1973. 2v. 502p. (Boletim Técnico, 28)
- BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO. **Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável: Território Cidadania do Sertão Central** - MDA/SDT/UNITACE. Fortaleza: Instituto Agropolos do Ceará, 2010. 823 p.
- BROWN, D. J.; SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G.; MAYS, M. D.; REINSCH., T. G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v. 132, p. 273-290, 2006.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. (2009). **Métodos de análise química, mineralógica e física dos solos do IAC**. Campinas, Instituto Agrônomo. 77 p. (Boletim técnico 106, edição revisada e atualizada).
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa

soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CARRÉ, F.; McBRATNEY, A. B.; MAYR, T.; MONTANARELLA, L. Digital soil assessments: Beyond DSM. **Geoderma**, v. 142, p. 69-79, 2007.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37 (8), p. 1151-1159, 2002.

CARVALHO JUNIOR, W.; CHAGAS, C. S.; FILHO, E. I. F.; VIEIRA, C. A. O.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BHERING, S. B.; FRANCELINO, M. R. Digital soilscape mapping of tropical hillslope areas by neural networks. **Scientia Agricola**, v. 68 (6), p. 691-696, 2011.

CHAGAS, C. S.; FILHO, E. I. F.; VIEIRA, C. A. O.; SCHAEFER, C. E. G. R.; JÚNIOR, W. C. Atributos topográficos e dados do Landsat 7 no mapeamento digital de solos com uso de redes neurais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45 (5), p.497-507, 2010.

CHANG, C. W.; LAIRD, D. A.; MAUSBACH, M. J.; HURBURGH, J. C. R. Near-infrared reflectance spectroscopy principal components regression analysis of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 480-490, 2001.

CLARK, R. N.; ROUSH, T. L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 89, p. 6329-6340, 1984.

CLEMENTE, C. A.; DEMATTÊ, J. A. M.; MAFRA, A. L.; BENTIVENHA, S. R. P. Reflectância espectral e mineralogia de materiais formados sobre diabásio. **Scientia Agricola**, v. 57, p. 159-168, 2000.

COHEN, M.; MYLAVARAPU, R. S.; BOGREKCI, I.; LEE, W. S.; CLARK, M. W. Reflectance spectroscopy for routine agronomic soil analyses. **Soil Science**, v. 172, p.469-485, 2007.

COLEMAN, T. L.; AGBU, P. A.; MONTGOMERY, O. L.; GAO, T.; PRASAD, S. Spectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. **Soil Science**, v. 151, p. 355-361, 1991.

COSTA, F. F. T.; SILVA, L. **Os monólitos de Quixadá e os impactos do título internacional de montanhas famosas da World Famous Mountains Association - WFMA**. VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisas e Inovação. Palmas: Tocantins, 2012. 10p.

COSTA FILHO, P. A. **Estudo comparativo de técnicas de inteligência artificial e modelos lineares em determinações quantitativas no infravermelho próximo**. Tese, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, São Paulo, 2003.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides. Structure, properties, reactions, occurrence and uses**. Weinheim: VCH, 1996. 573 p.

CRIVELENTI, R. C.; COELHO, R. M.; ADAMI, S. F.; OLIVEIRA, S. R. M. Mineração de

dados para a inferência de relações solo-paisagem em mapeamentos digitais de solo. **Revista Agropecuária Brasileira**, v. 44 (12), p.1707-1715, 2009.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/Unicamp, 1993. 170p.

DALMOLIN, R. S. D. **Matéria orgânica e características físicas, químicas, mineralógicas e espectrais de Latossolos de diferentes ambientes**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. 151p. (Tese de Doutorado)

DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; KLAMT, E.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35 (2), p. 481-489, 2005.

DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; PEDRON, F. A.; AZEVEDO, A. C. Relação entre as características e o uso das informações de levantamentos de solos de diferentes escalas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34 (5), p. 1479-1486, 2004.

DARDENNE, P.; SINNAEVE, G.; BAETEN, V. Multivariate calibration and chemometrics for near infrared spectroscopy: Which method?. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 8, p. 229-237, 2000.

DAUGHTRY, C. S. T. Discriminating crop residues from soil by shortwave infrared reflectance. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 125-131, 2001.

DEMATTÊ, J. A. M.; BELLINASSO, H.; ROMERO, D. J.; FONGARO, C. T. Morphological Interpretation of Reflectance Spectrum (MIRS) using libraries looking towards soil classification. **Scientia Agricola**. v. 71, p. 509-520, 2014.

DEMATTÊ, J. A. M.; CAMPOS, R. C.; ALVES, M. C.; FIORIO, P. R.; NANNI, M. R. Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 121, p. 59-112, 2004.

DEMATTÊ, J. A. M.; TERRA, F. S. Spectral pedology: a new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations. **Geoderma**, Amsterdam, v. 217-218, p. 190-200, 2014.

DEMATTÊ, J. A. M.; EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. **Bragantia**, Campinas, v. 62 (3), p. 451-464, 2003.

DEMATTÊ, J. A. M.; GARCIA, G. J. 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, 1999.

DEMATTÊ, J. A. M.; GENÚ, A. M.; FIORIO, P. R.; ORTIZ, J. L.; MAZZA, J. A.; LEONARDO, H. C. L. Comparação entre mapas de solos obtidos por sensoriamento remoto espectral e pelo método convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39 (12), p. 1219-1229, 2004.

DEMATTÊ, J. A. M.; HUETE A. R.; FERREIRA JUNIOR. L. G.; ALVES M. C.; NANNI M.

R.; CERRI C. E. **Evaluation of tropical soils through ground and orbital sensors**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2, 2000, Lake Buena Vista. Proceedings... Lake Buena Vista: Erim, 2000. p. 34-41.

DEWITTE, O.; JONES, A.; ELBELRHITI, H.; HORION, S.; MONTANARELLA, L. Satellite remote sensing for soil mapping in Africa: An overview. **Progress in Physical Geography**, v. 36 (4), p. 514–538, 2012.

DOKUCHAEV, V. V. **Russian chernozem**: complete set of works. Moscow: Academy of Sciences Publisher, 1949, v. 3, p. 404.

DUNN, B. W.; BEECHER, H. G.; BATTEN, G. D. & CIAVARELLA, S. 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, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Brasília, DF: Embrapa Solos, 2009. 627p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1995. 101p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M.; OLIVEIRA, J. B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1992. 132 p.

FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de latossolos brasileiros por espectroscopia de reflectância difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28 (2), p. 245-257, 2004.

FIDENCIO, P. H.; POPPI, R. J.; DE ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H. Determination of organic matter in soil using near-infrared spectroscopy and partial least squares regression. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v. 33, p. 1607–1615, 2002.

FIGUEIREDO, S. R. **Mapeamento supervisionado de solos através do uso de regressões logísticas múltiplas e sistema de informações geográficas**. 2006. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS.

FIORIO, P. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Orbital and laboratory spectral data to optimize soil analysis. **Scientia Agricola**, v. 66, p. 250-257, 2009.

FIORIO, P. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; NANNI, M. R.; FORMAGGIO, A. R. Diferenciação espectral de solos utilizando dados obtidos em laboratório e por sensor orbital. **Bragantia**, Campinas, v. 69 (2), p. 453-466, 2010.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2011. 128 p.

FORMAGGIO, A. R.; EIPHANIO, J. C. N.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J. B. Comportamento espectral (450-2450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 467-474, 1996.

FRANCESCHINI, M. H. D.; DEMATTÊ, J. A. M.; SATO, M. V.; VICENTE, L. E.; GREGO, C. R. Abordagens semiquantitativa e quantitativa na avaliação da textura do solo por espectroscopia de reflectância bidirecional no VIS-NIR-SWIR. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48 (12), p. 1569-1582, 2013.

FRANCESCHINI, M. H. D.; DEMATTÊ, J. A. M.; TERRA, F. S.; VICENTE, L. E.; BARTHOLOMEUS, H.; FILHO, C. R. S. Prediction of soil properties using imaging spectroscopy: Considering fractional vegetation cover to improve accuracy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.38, p. 358-370, 2015.

FUKS, S. D. **Novos modelos para mapas derivados de informações de solos**. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Ed.). *Sistemas de informações geográficas: aplicações na agricultura*. Brasília, DF: Embrapa, 1998. 434 p.

GALVÃO, L. S.; VITORELLO, I.; FORMAGGIO, A. R. Relationships of spectral reflectance and color among surface and subsurface horizons of tropical soil profiles. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 61 (1), p. 24-33, 1997.

GENÚ, A. M.; DEMATTÊ, J. A. M. Espectrorradiometria de solos e comparação com sensores orbitais. **Bragantia**, Campinas, v. 71 (1), p. 82-89, 2012.

GENÚ, A. M.; DEMATTÊ, J. A. M.; FIORIO, P. R. Análise espectral de solos da Região de Mogi-Guaçu (SP). **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31 (1), p. 1235-1244, 2010.

GIASSON, E.; CLARKE, R. T.; JUNIOR, A. V. I.; MERTEN, G. H.; TORNQUIST, C. G. Digital soil mapping using multiple logistic regression on terrain parameters in southern Brazil. **Scientia Agricola**, v.63, p.262-268, 2006.

GONÇALVES, M. L.; NETTO, M. L. A.; ZULLO JR., J.; COSTA, J. A. F. Classificação não-supervisionada de imagens de sensores remotos utilizando redes neurais auto-organizáveis e métodos de agrupamentos hierárquicos. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 60/01, 2008.

GROVE, C. I.; HOOK, S. J.; TAYLOR, E. D. **Laboratory reflectance of 160 minerals, 0.4 to 2.5 micrometers**. Pasadena, National Aeronautics and Space Administration, 1992. 355p.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 593 p.

HEMPEL, J. W.; HAMMER, R. D.; MOORE, A. C.; BELL, J. C.; THOMPSON, J. A.; GOLDEN, M. L. **Challenges to Digital Soil Mapping**. In: Hartemink, A. E.; McBratney, A. & Mendonça-Santos M. L. (Eds). *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Springer: Netherlands. p. 81-90. 2008.

HENDERSON, T. L.; BAUMGARDNER, M. F.; FRANZMEIER, D. E.; STOTT, D. E.; COSTER, D. C. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Beltsville, v. 56 (3), p. 865-872, 1992.

HONGYU, K., SANDANIELO, V. L. M., JUNIOR, G. J. O. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S - Engineering and Science**, v. 1 (5), p. 83-90. 2016.

HOWELL, D.; KIM, Y. G.; HAYDU-HOUDESHELL, C. A. **Development and Application of Digital Soil Mapping Within Traditional Soil Survey**: What will it grow into? In: HARTEMINK, A. E.; McBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS M. L. (Eds). *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Springer: Netherlands. p.32-43. 2008.

HUDSON, B. D. The soil survey as paradigm-based science. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 836-841, 1992.

HUNT, G. R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. **Geophysics**, v.42, p.501-513, 1979.

HUNT, G. R. **Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing**. In: SIEGEL, B.S.; GILLESPIE, A.R. (Eds.). *Remote sensing in geology*. New York: John Miley, 1980. p. 5-45.

HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I silicate minerals. **Modern Geology**, London, v. 1, p. 283-300, 1970.

HUNT, G. R.; SALISBURG, J. W.; LENHOFF, C. J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III Oxides and hydroxides. **Modern Geology**, New York, v. 1, p. 195-205, 1971.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Introdução ao processamento digital de imagens**. Primeira Divisão de Geociências do Nordeste. Rio de Janeiro: IBGE, 2000. 92 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico de pedologia**. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 3. ed. 430 p.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ – IPECE. **Perfil Básico Municipal**. Quixadá, 2015. Disponível em <http://www.ipece.ce.gov.br/perfil_basico_municipal/2015/Quixada.pdf>. Acesso em 02 Jul. 2017.

IRONS, J. R.; SMITH, J. A. **Soil surface roughness characterization from light scattering observations**. In: INTERNATIONAL GOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 1990. College Park. Proceedings. Washington: Institute of Electrical and Electronics Engineers, v.1, p. 1007-1010, 1990.

ISAACS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. Oxford University Press, Inc, New York, NY, 1989.

JENNY, H. **Factors of soil formation**. New York: McGraw-Hill, 1941.

JONES, H. G.; VAUGHAN, R. A. **Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications**. New York: Oxford University Press, 2010. 384 p.

KHEIR, R. B.; GREVE, M. H.; ABDALLAH, C.; DALGAARD, T. Spatial soil zinc content distribution from terrain parameters: A GIS-based decision-tree model in Lebanon. **Environmental Pollution**, v. 158 (2), p. 520-528, 2010.

LACERDA, M. P. C.; DEMATTÊ, J. A. M.; SATO, M. V.; FONGARO, C. T.; GALLO, B. C.; SOUZA, A. B. Tropical Texture Determination by Proximal Sensing Using a Regional Spectral Library and Its Relationship with Soil Classification. **Remote Sensing**, v. 8 (9), 701, 2016.

LAGACHERIE, P. **Digital Soil Mapping: a state of the art**. In: HARTEMINK, A. E.; McBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. (Ed.). **Digital Soil Mapping with Limited Data**. Wageningen: Springer, p. 3-14, 2008.

LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. **Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping**. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A.; VOLTZ, M. (Ed.). **Digital soil mapping: an introductory perspective**. Amsterdam: Elsevier, p. 3-22, 2007.

LEGROS, J.-P. **Mapping of the soil**. Enfield: Science Pub Inc, 2006. 411 p.

LEONE, A. P.; VISCARRA-ROSSEL, R. A.; AMENTA, P.; BUONDONNO, A. Prediction of Soil Properties with PLSR and vis-NIR Spectroscopy: Application to Mediterranean Soils from Southern Italy. **Current Analytical Chemistry**, v.8, p. 283-299, 2012.

LIU, L.; BARET, F.; XINGFA, G.; QUINGXI, T.; LANFEN, Z.; BING, Z. Relating soil surface moisture to reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.81, p. 238-246, 2002.

LÓPEZ, L. R. **Pedologia Quantitativa: espectrometria VIS-NIR-SWIR e mapeamento digital de solos**. 2009. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

LORENZZETTI, J. A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. São Paulo: Blucher, 2015.

MACQUEEN, J. **Some methods for classification and analysis of multivariate observations**. Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Vol. 1: Statistics, p. 281-297, University of California Press, Berkeley, Calif., 1967.

MADEIRA NETTO, J. S. **Comportamento espectral dos solos**. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S., (Org). **Sensoriamento remoto: reflectância de alvo naturais**. Brasília: Editora UnB; EMBRAPA Cerrados, 2001. p. 127-156.

MADEIRA NETTO, J. S.; BAPTISTA, G. M. M. **Reflectância espectral de solos**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2000. 55p.

- MATHEWS, H. L.; CUNNINGHAM, R. L.; PETERSEN, G. W. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.37, p.421-424, 1973.
- McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, p. 293-327, 2000.
- McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, p. 3-52, 2003.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005. 107 p.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; ROSA, A. N. C. S.; SANO, E. E.; SOUZA, E. B.; BAPTISTA, G. M. M.; BRITES, R. S. **Introdução Ao Processamento De Imagens De Sensoriamento Remoto**. Brasília: Universidade de Brasília, 2012. 276 p.
- MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: Editora UnB/EMBRAPA Cerrados, 2001. 262p.
- MOREIRA, E. G. S. **Caracterização e gênese de três pedons de solonetz solidizado do sertão central e médio Jaguaribe estado do Ceará**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1979. 83p. (Tese de Doutorado)
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4. Ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2012. 422 p.
- MOTA, F. O. B.; OLIVEIRA, J. B. Mineralogia de solos com excesso de sódio no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 799-806, 1999.
- MULDER, V. L.; DE BRUIN, S.; SCHAEPMAN, M. E.; MAYR, T. R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping – a review. **Geoderma**, v. 162 (1), p.1-19, 2011.
- MULLER, E.; DÉCAMPS, H. Modeling soil moisture – reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 76, n. 2, p. 173-180, May 2001.
- NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. **Soil Science Society of American Journal**, v. 70, p. 393-407, 2006
- NEUMANN, M. R. B. **Mapeamento digital de solos no Distrito Federal**. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências – IG, Universidade de Brasília, Brasília. 2012. 124 p.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4ª. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 388 p.
- OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. 4.ed. Piracicaba: FEALQ, 2011. 592p.
- PAZ-GONZALEZ, A.; TABOADA CASTRO, M. T.; VIEIRA, S. R. Geostatistical analysis of heavy metals in a one-hectare plot under natural vegetation in a serpentine area. **Canadian**

Journal of Soil Science, Ottawa, v. 81, p. 469-479, 2001.

PINTY, B.; VERSTRAETE, M. M.; GOBRON, N. The effect of soil anisotropy on the radiance field emerging from vegetation canopies. **Geophysical Research Letters**, v. 25 (6), p. 797-800, 1998.

RADAMBRASIL, PROJETO. **Levantamento de recursos naturais**. Rio de Janeiro, Ministério de Minas e Energia, 1981.

RANZANI, G. **Manual de Levantamento de Solos**. São Paulo: Edgar Blucher, 1969. 167 p.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J. C.; REZENDE, S. B. **Mineralogia de Solos Brasileiros: interpretação e aplicações**. Lavras: Editora UFLA, 2005. 192p.

RICHTER, N.; JARMER, T.; CHABRILLAT, S.; OYONART, C.; HOSTERT, P.; KAUFMANN, H. Free iron oxide determination in Mediterranean soils using diffuse reflectance spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, p. 72-81, 2009.

RIEDEL, F.; DENK, M.; MÜLLER, I.; BARTH, N.; GLÄßER, C. Prediction of soil parameters using the spectral range between 350 and 15,000 nm: A case study based on the Permanent Soil Monitoring Program in Saxony, Germany. **Geoderma**, v. 315, p. 188–198, 2018.

ROBERTS, J. J.; COZZOLINO, D. Wet or dry? The effect of sample characteristics on the determination of soil properties by near infrared spectroscopy. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 83, p. 25–30, 2016.

SABINS, F. F. **Remote sensing: principles and interpretations**. 3rd. ed. New York: W.H. Freeman and Company, 2000. 494 p.

SANTIAGO, F. S.; NANES, M. B.; JALFIM, F. T.; BLACKBURN, R. M.; GOMES-SILVA, N. C.; MONTENEGRO, A. A. A.; FREITAS, R. R. L.; RIBEIRO, G. A. **Melhoria do solo em área irrigada de horta e pomar com Manejo agroecológico no Sertão do Apodi-RN**. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇO DE CALDAS, IX. Poços de Caldas, 2012.

SANTOS, R. D. dos; LEMOS, R. C. de; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. 100 p.

SAYES, W.; MOUAZEM, A. M.; RAMON, H. Potential for onsite and online analyses of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy. **Biosystems Engineering**, v. 91, p. 393-402, 2005.

SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O. A.; MCARTHUR, D. Predictive soil mapping:

a review. **Progress in Physical Geography**, v. 27, p. 171-197, 2003.

SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 988-998, 2002.

SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. Infrared spectroscopy - enabling an evidence-based diagnostic surveillance approach to agriculture and environmental management in developing countries. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 15, p. 1-19, 2007.

SHI, T.; CHEN, Y.; LIU, Y.; WU, G. Visible and near-infrared reflectance spectroscopy - an alternative for monitoring soil contamination by heavy metals. **Journal of Hazardous Materials**. v.265, p.166–176, 2014.

SOUZA, M. J. N. **Plano de Manejo do Monumento Natural dos Monólitos de Quixadá**. Convênio SEMACE/IEPRO, Fortaleza, 2006.

SOUSA, S. A. M. **Avaliação de Implementação de Uma Unidade de Conservação de Proteção Integral: O caso do Monumento Natural dos Monólitos de Quixadá-CE**. 2010. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2010.

SOUSA JUNIOR, J. G.; DEMATTÊ, J. A. M.; ARAÚJO, S. R. Modelos espectrais terrestres e orbitais na determinação de teores de atributos dos solos: potencial e custos. **Bragantia**, Campinas, v. 70 (3), p. 610-621, 2011.

STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C. **SPECTRON SE-590 – Manual de Referência**. In: VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, Anais... Curitiba, SBSR, 1993. CD-ROM.

STENBERG, B., VISCARRA-ROSSEL, R. A., MOUAZEN, A. M., WETTERLIND, J. Visible and near-infrared spectroscopy in soil science. In: Sparks, D.L. (Ed.), **Advances in Agronomy**. Academic Press, Burlington, p. 163–215, 2010.

STONER, E. R. **Physicochemical, site and bi-directional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils**. 1979. 132f. Thesis (PhD in Soil Science) - Purdue University.

STONER, E. R.; BAUMGARDNER, M. F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, p. 1161–1165, 1981.

STONER, E. R.; BAUMGARDNER, M. F.; BIEHL, L. L.; ROBINSON, B. F. **Atlas of soil reflectance properties**. West Lafayette: Purdue University, 1980. 75p.

TEN CATEN, A. **Aplicação de componentes principais e regressões logísticas múltiplas em sistema de informações geográficas para a predição e o mapeamento digital de solos**. 2008. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, RS.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. Regressões logísticas múltiplas: fatores que influenciam sua aplicação na predição de classes de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.1, p.53-62, 2011.

TERRA, F. S.; DEMATTÊ, J. A. M.; VISCARRA-ROSSEL, R. A. Proximal spectral sensing in pedological assessments: VIS-NIR spectra for soil classification based on weathering and pedogenesis. **Geoderma**, v. 318, p. 123-136, 2018.

TSAI, F.; PHILPOT, W. **Derivative analyses of hyperspectral data. Remote Sensing of Environment**, v.66, 1998. p. 41-51

VENDRAME, P. R. S.; MARCHÃO, R. L.; BRUNET, D.; BECQUER, T. The potential of NIR spectroscopy to predict soil texture and mineralogy in Cerrado Latosols. **European Journal of Soil Science**, v.63, p.743-753, 2012.

VICENTE, L. E.; SOUZA FILHO, C. R. Identification of mineral components in tropical soils using reflectance spectroscopy and advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. **Remote Sensing of Environment**, v.115, p. 1824-1836, 2011.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51 (3), p. 1-75, 1983.

VISCARRA-ROSSEL, R. A. ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 90, p. 72-83, 2008.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; CATTLE, S. R.; ORTEGA, A.; FOUAD, Y. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by Vis-NIR spectroscopy. **Geoderma**, v.150, p.253-266, 2009.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; CHEN, C. Digitally mapping the information content of visiblenear infrared spectra of surficial Australian soils. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 115, p. 1443-1455, 2011.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J. J.; McBRATNEY, A. B.; JANIK, L. J.; SKJEMSTAD, J. O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, v. 131, p. 59-75, 2006.

VITORELLO, I.; GALVÃO, L. S. **Spectral properties of geologic materials in the 400 to 2500 nm range: Review for applications to mineral exploration and lithologic mapping.** In: POUGET, M. J.; GUYOUT, G. Spectral properties and remote sensing of soils and rocks. Photo interpretation. Paris: Eska, 1996. V.34, p.77-96. (Special issue).

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. **Advances in soil Science**, New York, v. 3, p. 1-70, 1984.

Williams, P. **Near-infrared technology: In the agricultural and food industries.** American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minn., USA. Ed. 2, 2001, p. 296.

WOLD, H. Systems under indirect observation. **Elsevier**: Amsterdam, 1982. 668p.

XU, R., WUNSCH II, D. Survey of Clustering Algorithms. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 16 (3), p. 645-678, 2005.

APÊNDICE A – QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS PONTOS DE TRADAGEM (CONTINUA).

Amostra	Areia	Silte	Argila	pH			P	CO	N	Ca	Mg	Na	K	Al	H	S	T	V	m	PST	CE	Cor Úmida
				H ₂ O	CaCl ₂	KCl																
----- g kg ⁻¹ -----								ppm	-- % --	----- cmolc dm ⁻³ -----							----- % -----					
P01 0-20	868,34	52,46	79,20	4,9	3,7	4,1	4	0,73	0,06	1,94	1,73	0,06	0,12	0,25	3,38	3,8	7,5	51	6	1	0,1	10YR 3/4
P01 40-60	820,46	82,45	97,09	5,6	3,6	4,4	1	0,56	0,02	2,13	2,28	0,09	0,04	0,30	2,18	4,5	7,0	65	6	1	0,1	10YR 4/3
P01 80-100	797,98	64,58	137,43	6,3	3,9	5,0	1	0,54	0,03	2,53	2,27	0,20	0,05	0,20	1,45	5,0	6,7	75	4	3	0,1	10YR 5/3
P02 0-20	839,18	86,07	74,75	7,2	6,9	6,6	11	0,33	0,08	3,14	1,25	0,06	0,46	0,00	2,64	4,9	7,6	65	0	1	0,4	7,5YR 3/4
P02 40-60	572,81	127,25	299,95	7,1	6,2	6,5	21	0,41	0,07	1,98	0,79	0,10	0,54	0,00	1,98	3,4	5,4	63	0	2	0,4	5YR 4/6
P02 80-100	483,56	176,73	339,71	6,8	5,9	6,4	3	0,45	0,03	1,86	0,84	0,07	0,84	0,00	1,98	3,6	5,6	65	0	1	0,4	2,5YR 4/6
P03 0-20	839,94	91,62	68,44	5,21	3,9	4,3	2	0,48	0,03	1,04	0,58	0,09	0,16	0,25	3,88	1,9	6,0	31	12	2	0,2	10YR 3/4
P03 20-40	807,90	66,03	126,06	6,45	3,9	4,7	1	0,13	0,02	0,58	0,94	0,73	0,09	0,05	3,42	2,3	5,8	40	2	13	0,2	10YR 3/3
P04 0-20	744,83	134,75	120,42	6,1	5,3	5,5	12	1,36	0,09	4,62	2,02	0,08	0,33	0,10	3,53	7,0	10,7	66	1	1	0,3	10YR 3/2
P04 40-60	797,89	100,35	101,76	6,0	3,9	4,7	3	1,25	0,03	2,70	1,90	0,10	0,13	0,10	2,54	4,8	7,5	65	2	1	0,1	7,5YR 3/2
P05 0-20	835,01	99,40	65,60	5,5	4,5	4,8	15	0,93	0,04	1,84	0,83	0,07	0,38	0,05	4,08	3,1	7,2	43	2	1	0,2	5YR 3/2
P05 40-60	839,34	96,80	63,86	6,4	4,9	5,0	4	0,34	0,05	1,76	0,45	0,04	0,19	0,05	2,26	2,4	4,8	51	2	1	0,1	10YR 3/3
P05 80-100	792,48	103,06	104,46	6,3	4,8	5,2	2	0,35	0,05	2,02	0,73	0,06	0,17	0,05	2,59	3,0	5,6	53	2	1	0,1	7,5YR 3/3
P07 0-20	877,76	80,96	41,28	4,8	3,9	4,1	4	1,04	0,06	1,06	0,41	0,05	0,16	0,25	5,69	1,7	7,6	22	13	1	0,2	10YR 3/4
P07 40-60	790,45	99,40	110,15	6,3	3,8	4,3	1	0,75	0,02	0,41	0,52	0,50	0,16	0,40	2,74	1,6	4,7	34	20	11	0,1	10YR 4/3
P07 80-100	702,02	81,82	216,16	8,3	6,4	4,2	2	0,54	0,02	0,34	1,97	1,93	0,13	0,00	1,65	4,4	6,0	73	0	32	0,8	2,5Y 4/3
P08 0-20	594,10	86,88	319,02	5,7	4,0	4,3	2	0,82	0,08	1,52	1,73	0,39	0,31	0,25	5,36	3,9	9,5	41	6	4	0,2	5YR 3/4
P09 0-20	776,15	124,20	99,65	5,3	4,7	4,7	7	2,13	0,11	3,65	0,80	0,04	0,13	0,05	4,57	4,6	9,2	50	1	0	0,4	10YR 3/4
P10 0-20	748,73	114,49	136,78	6,0	5,4	5,2	10	2,11	0,11	8,41	1,28	0,08	0,31	0,05	5,56	10,1	15,7	64	0	1	0,2	7,5YR 2,5/2
P11 0-20	810,17	101,61	88,22	5,6	4,4	4,7	3	0,91	0,05	2,60	3,56	0,07	0,18	0,05	2,76	6,4	9,2	70	1	1	0,2	10YR 3/2
P11 40-60	732,66	94,78	172,56	6,9	4,5	5,7	1	0,78	0,02	3,86	4,92	0,26	0,07	0,05	2,10	9,1	11,3	81	1	2	0,2	7,5YR 3/2
P11 80-100	675,13	79,39	245,48	7,0	4,6	5,7	2	0,56	0,02	3,59	3,08	0,33	0,07	0,05	1,60	7,1	8,7	81	1	4	0,2	10YR 4/2
P12 0-20	686,87	89,90	223,23	6,1	5,0	5,5	18	0,80	0,07	3,96	1,08	0,06	0,21	0,05	2,43	5,3	7,8	68	1	1	0,1	7,5YR 3/4

APÊNDICE A – QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS PONTOS DE TRADAGEM (CONTINUAÇÃO).

Amostra	Areia	Silte	Argila	pH			P	CO	N	Ca	Mg	Na	K	Al	H	S	T	V	m	PST	CE	Cor Úmida
				H ₂ O	CaCl ₂	KCl																
----- g kg ⁻¹ -----						ppm	-- % --	----- cmolc dm ⁻³ -----								----- % -----						
P12 40-60	544,95	96,70	358,35	6,3	4,7	5,3	2	0,75	0,07	5,26	1,13	0,07	0,06	0,05	3,58	6,5	10,2	64	1	1	0,1	5YR 3/4
P13 0-10	725,62	148,46	125,92	4,9	3,7	4,2	3	1,77	0,07	3,44	1,28	0,17	1,30	0,35	8,23	6,2	14,8	42	5	1	0,3	10YR 3/2
P14 0-20	788,44	119,30	92,26	6,0	5,1	5,2	3	1,23	0,04	3,33	0,83	0,04	0,22	0,05	3,91	4,4	8,4	53	1	0	0,2	7,5YR 3/4
P14 40-50	738,93	122,03	139,03	6,2	5,9	4,9	2	0,46	0,04	3,74	1,38	0,05	0,12	0,05	2,26	5,3	7,6	70	1	1	0,1	7,5YR 3/4
P15 0-20	707,81	125,54	166,65	4,9	4,0	4,2	3	1,44	0,06	1,77	0,43	0,04	0,24	0,30	6,63	2,5	9,4	26	11	0	0,2	5YR 3/4
P16 0-20	729,57	133,20	137,24	6,3	5,1	5,2	4	1,36	0,13	5,48	1,25	0,05	0,26	0,05	4,41	7,0	11,5	61	1	0	0,2	7,5YR 3/2
P17 0-20	732,19	139,26	128,55	4,9	4,0	4,3	4	1,61	0,06	2,81	1,31	0,05	0,34	0,25	7,67	4,5	12,4	36	5	0	0,4	10YR 3/4
P17 20-30	690,87	165,51	143,62	5,1	3,5	4,0	2	0,85	0,04	0,88	1,11	0,07	0,33	1,55	5,88	2,4	9,8	24	39	1	0,1	10YR 3/4
P18 0-20	738,82	138,21	122,97	5,9	5,2	5,4	18	2,50	0,11	7,62	2,09	0,07	0,29	0,05	5,23	10,1	15,4	66	0	0	0,4	10YR 2/2
P18 40-60	791,01	95,31	113,68	5,6	3,6	4,4	18	0,32	0,05	2,44	1,04	0,12	0,11	0,40	3,89	3,7	8,0	46	10	2	0,1	10YR 3/4
P19 0-20	689,31	186,62	124,08	5,9	4,7	5,2	3	1,30	0,06	9,98	2,10	0,07	0,58	0,05	3,58	12,7	16,4	78	0	0	0,3	10YR 3/4
P21 0-20	610,91	145,13	243,96	6,0	4,9	5,3	2	1,38	0,06	7,82	2,29	0,07	0,27	0,05	4,24	10,4	14,7	71	0	0	0,2	10YR 3/3
P22 0-20	832,33	110,04	57,63	6,0	4,7	5,1	2	0,58	0,03	4,57	1,04	0,04	0,23	0,05	2,59	5,9	8,5	69	1	0	0,2	10YR 3/4
P23 0-20	844,57	90,04	65,39	4,7	3,8	3,9	9	0,69	0,03	1,91	0,30	0,07	0,15	0,45	4,50	2,4	7,4	33	16	1	0,2	10YR 3/4
P23 40-60	563,23	156,22	280,55	5,2	3,8	4,0	1	0,32	0,03	1,50	1,30	0,37	0,12	0,95	3,51	3,3	7,7	42	22	5	0,2	5YR 4/6
P23 60-80	566,28	116,61	317,12	6,0	4,2	4,7	1	0,31	0,06	1,01	1,57	1,65	0,14	0,25	3,55	4,4	8,2	54	5	20	0,5	7,5YR 4/6
P23 80-100	572,81	90,53	336,66	7,6	5,8	6,3	1	0,02	0,05	0,93	1,78	3,12	0,17	0,05	1,44	6,0	7,5	80	1	42	0,7	10YR 3/3
P24 0-20	750,89	149,87	99,24	6,2	5,3	5,4	3	0,84	0,05	4,47	1,45	0,06	0,28	0,05	3,25	6,3	9,6	65	1	1	0,2	7,5YR 3/4
P24 40-60	593,64	168,09	238,28	5,7	3,9	4,6	3	0,59	0,06	4,99	2,28	0,16	0,16	0,15	4,80	7,6	12,5	61	2	1	0,1	7,5YR 3/3
P25 0-20	808,33	113,00	78,68	5,3	3,9	4,3	4	0,50	0,02	1,84	0,52	0,08	0,18	0,55	3,08	2,6	6,2	42	17	1	0,1	5,5YR 4/3
P26 0-20	727,09	114,60	158,31	5,5	4,3	4,5	2	1,04	0,04	3,82	1,72	0,05	0,25	0,15	5,30	5,8	11,3	52	3	0	0,2	5YR 3/3
P27 0-20	595,62	132,36	272,02	6,5	5,4	5,7	5	1,90	0,11	8,99	5,83	0,11	0,42	0,05	4,08	15,3	19,5	79	0	1	0,2	2,5YR 2,5/1
P27 40-60	443,13	121,03	435,84	7,5	5,6	6,5	2	1,16	0,03	7,98	13,2	0,49	0,21	0,05	1,60	21,9	23,5	93	0	2	0,3	10YR 3/4

APÊNDICE A – QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS PONTOS DE TRADAGEM (CONTINUAÇÃO).

Amostra	Areia	Silte	Argila	pH			P	CO	N	Ca	Mg	Na	K	Al	H	S	T	V	m	PST	CE	Cor Úmida
				H ₂ O	CaCl ₂	KCl																
----- g kg ⁻¹ -----				ppm				-- % --				----- cmolc dm ⁻³ -----				----- % -----						
P28 0-20	764,06	156,83	79,12	5,0	3,6	4,1	2	0,84	0,06	1,38	0,56	0,06	0,11	0,65	4,47	2,1	7,2	29	24	1	0,1	10YR 4/3
P28 40-60	761,38	121,74	116,89	6,0	3,4	4,3	3	0,39	0,02	2,55	1,40	0,20	0,07	0,65	3,64	4,2	8,5	50	13	2	0,1	10YR 3/3
P29 0-20	806,84	116,90	76,26	5,4	4,2	4,6	14	0,85	0,04	3,24	0,98	0,05	0,23	0,20	3,43	4,5	8,1	55	4	1	0,2	10YR 3/3
P29 40-60	824,27	102,22	73,51	5,7	3,4	4,2	21	0,13	0,02	1,61	1,38	0,14	0,13	0,70	2,77	3,3	6,7	48	18	2	0,1	10YR 3/4
P31 0-20	862,88	40,48	96,63	4,7	3,7	3,9	2	0,41	0,04	1,02	0,36	0,03	0,09	0,75	5,03	1,5	7,3	21	33	0	0,1	10YR 3/4
P32 0-20	904,90	57,06	38,04	5,5	4,0	4,5	4	0,36	0,05	1,37	0,31	0,04	0,12	0,15	2,99	1,8	5,0	37	8	1	0,1	5YR 3/3
P32 40-60	908,91	45,05	46,05	6,0	4,1	4,7	3	0,23	0,01	1,25	0,58	0,05	0,08	0,05	3,58	2,0	5,6	35	2	1	0,0	10YR 3/3
P32 80-100	865,69	35,11	99,20	7,3	4,9	5,9	3	0,13	0,01	1,81	1,25	0,29	0,06	0,05	0,94	3,4	4,4	78	1	7	0,1	10YR 3/4
P33 0-20	721,69	156,22	122,09	6,0	5,6	5,7	17	1,92	0,11	9,36	2,13	0,07	0,53	0,05	4,24	12,1	16,4	74	0	0	0,5	5YR 3/3
P34 0-20	687,22	163,01	149,77	5,3	4,4	4,5	6	1,23	0,05	5,11	0,77	0,05	0,32	0,80	4,98	6,2	12,0	52	11	0	0,2	10YR 3/2
P34 40-60	519,92	163,02	317,06	4,9	3,6	3,9	2	0,79	0,06	4,58	0,78	0,06	0,13	0,50	5,77	5,5	11,8	47	8	0	0,1	7,5YR 4/4
P34 80-100	701,17	150,89	147,95	5,1	3,6	4,1	2	0,23	0,06	2,63	0,61	0,07	0,09	0,40	2,74	3,4	6,5	52	11	1	0,1	5YR 4/6
P35 0-20	792,06	123,96	83,98	4,8	3,8	4,0	3	1,04	0,04	1,40	0,47	0,04	0,09	0,05	6,39	2,0	8,4	24	2	0	0,2	7,5YR 4/6
P36 0-20	843,37	108,63	47,99	6,0	4,6	4,9	2	0,78	0,06	1,27	0,93	0,16	0,04	0,00	2,64	2,4	5,0	48	0	3	0,1	10YR 3/3
P36 40-60	742,51	119,55	137,94	8,6	6,3	7,1	1	0,37	0,02	2,16	1,56	1,31	0,04	0,10	0,89	5,1	6,1	84	2	22	0,5	10YR 4/2
P37 0-20	752,94	85,35	161,72	6,1	4,5	5,2	3	0,52	0,03	6,15	3,75	0,16	0,12	0,15	2,99	10,2	13,3	76	1	1	0,1	10YR 3/2
P38 0-20	864,16	94,54	41,30	5,3	4,1	4,5	4	0,15	0,03	0,91	0,61	0,04	0,12	0,55	1,93	1,7	4,2	40	25	1	0,1	10YR 3/4
P38 40-60	807,96	60,38	131,65	5,3	3,5	4,1	2	0,13	0,06	2,17	0,96	0,06	0,13	0,10	2,71	3,3	6,1	54	3	1	0,1	2,5Y 4/4
P39 0-20	815,52	96,77	87,70	5,4	4,4	4,7	6	1,21	0,06	5,36	0,27	0,04	0,20	0,35	5,26	5,9	11,5	51	6	0	0,2	10YR 3/1
P40 0-20	861,29	55,98	82,72	5,4	3,9	4,1	3	0,54	0,05	0,95	2,10	0,03	0,15	0,35	2,29	3,2	5,9	55	10	0	0,1	10YR 3/3
P40 40-60	508,23	51,65	440,12	5,5	3,9	4,3	1	0,65	0,03	3,82	1,48	0,09	0,15	0,20	4,26	5,5	10,0	55	3	1	0,1	7,5YR 4/4
P40 80-100	462,21	75,68	462,11	5,8	4,0	4,7	1	0,56	0,03	4,04	1,83	0,16	0,06	0,10	3,70	6,1	9,9	62	2	2	0,1	7,5YR 4/4
P41 0-20	734,87	80,31	184,82	5,8	4,3	4,8	3	1,16	0,07	9,15	4,54	0,08	0,18	0,05	3,91	14,0	17,9	78	0	0	0,1	7,5YR 2,5/3

APÊNDICE A – QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS PONTOS DE TRADAGEM (CONTINUAÇÃO).

Amostra	Areia	Silte	Argila	pH			P	CO	N	Ca	Mg	Na	K	Al	H	S	T	V	m	PST	CE	Cor Úmida
				H ₂ O	CaCl ₂	KCl																
----- g kg ⁻¹ -----						ppm	-- % --	----- cmolc dm ⁻³ -----							----- % -----							
P41 20-40	559,43	114,10	326,47	6,4	4,3	5,6	2	0,54	0,04	7,66	10,9	0,23	0,21	0,05	3,09	19,0	22,1	86	0	1	0,2	5YR 3/3
P41 40-60	553,44	111,32	335,24	5,7	4,7	5,9	1	0,50	0,01	5,19	10,6	0,23	0,19	0,00	2,48	16,2	18,7	87	0	1	0,2	10YR 3/4
P42 0-20	668,51	266,90	64,59	6,7	6,1	6,2	9	0,82	0,06	4,64	1,00	0,04	0,19	1,35	1,46	5,9	8,7	68	19	0	0,3	10YR 3/4
P42 40-60	650,08	55,36	294,57	5,1	3,5	3,8	2	0,47	0,06	2,98	0,72	0,07	0,06	0,05	5,07	3,8	8,9	43	1	1	0,0	7,5YR 4/4
P43 0-20	839,86	81,63	78,51	5,8	4,4	4,3	6	0,67	0,03	1,61	0,85	0,04	0,28	0,60	3,53	2,8	6,9	40	18	1	0,1	5YR 3/3
P43 20-40	622,90	79,69	297,40	5,3	3,7	4,3	2	0,34	0,06	3,26	2,27	0,12	0,18	0,40	4,39	5,8	10,6	55	6	1	0,1	7,5YR 3/2
P43 40-60	592,04	71,80	336,16	5,7	3,9	4,8	2	0,36	0,03	3,62	4,40	0,25	0,10	0,10	3,53	8,4	12,0	70	1	2	0,2	10YR 4/4
P44 0-20	871,00	51,20	77,80	5,2	4,1	4,4	2	0,52	0,06	0,98	0,29	0,02	0,07	0,25	2,39	1,4	4,0	34	15	1	0,1	5YR 3/3
P44 40-60	425,73	101,17	473,10	5,4	4,2	4,5	1	0,58	0,05	2,38	1,35	0,08	0,30	0,40	3,56	4,1	8,1	51	9	1	0,1	5YR 4/6
P44 80-100	430,97	148,45	420,58	4,7	3,9	4,2	1	0,41	0,03	2,17	1,67	0,07	0,18	0,05	3,58	4,1	7,7	53	1	1	0,1	5YR 5/8
P45 0-20	584,46	366,22	49,32	5,9	5,0	5,1	4	0,85	0,04	1,00	0,39	0,03	0,13	0,05	1,93	1,5	3,5	44	3	1	0,2	10YR 3/3
P45 40-60	847,54	60,18	92,28	4,9	3,8	3,9	2	0,77	0,03	0,38	0,19	0,04	0,12	0,55	2,26	0,7	3,5	21	43	1	0,1	10YR 4/3
P45 80-100	718,67	90,29	191,04	5,5	3,8	4,3	1	0,46	0,03	1,89	0,81	0,06	0,05	0,40	2,74	2,8	5,9	47	12	1	0,1	7,5YR 4/3
P46 0-20	823,77	80,36	95,87	5,2	3,9	4,2	4	0,54	0,06	2,79	1,10	0,07	0,19	0,30	4,32	4,1	8,8	47	7	1	0,1	7,5YR 3/2
P47 0-20	797,78	75,23	127,00	5,4	3,9	4,5	38	1,06	0,03	3,24	1,96	0,10	0,14	0,20	3,93	5,4	9,6	57	4	1	0,1	5YR 4/3
P47 40-60	700,36	67,32	232,32	6,3	4,0	4,9	25	0,87	0,03	6,35	4,02	0,33	0,10	0,15	3,65	10,8	14,6	74	1	2	0,1	7,5YR 3/2
P47 80-100	665,98	74,45	259,58	6,8	4,4	5,6	14	0,60	0,05	6,15	5,94	0,73	0,09	0,10	2,21	12,9	15,2	85	1	5	0,3	5YR 3/2
P48 0-20	717,39	76,95	205,66	6,2	5,0	5,5	4	0,65	0,03	2,91	1,10	0,06	0,12	0,05	1,77	4,2	6,0	70	1	1	0,1	5YR 3/4
P48 40-60	604,96	151,85	243,20	6,0	5,0	5,6	1	0,17	0,02	2,73	0,95	0,08	0,04	0,05	2,43	3,8	6,3	61	1	1	0,2	5YR 4/6
P48 80-100	463,46	226,26	310,27	6,1	5,0	5,6	2	0,18	0,02	3,29	1,48	0,08	0,05	0,05	2,10	4,9	7,1	70	1	1	0,2	5YR 4/6
P49 0-20	915,96	62,63	21,41	5,5	4,3	4,7	2	1,15	0,01	0,67	0,35	0,02	0,05	0,05	2,10	1,1	3,2	34	4	1	0,1	10YR 3/3
P49 40-60	870,31	86,03	43,67	5,4	3,7	3,9	1	0,37	0,02	0,30	0,20	0,03	0,07	0,80	1,18	0,6	2,6	23	57	1	0,1	10YR 4/4
P49 80-100	846,89	77,21	75,90	5,7	4,0	4,5	1	0,37	0,05	0,86	0,12	0,03	0,06	0,20	1,62	1,1	2,9	37	16	1	0,1	10YR 4/4

APÊNDICE A – QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS PONTOS DE TRADAGEM (CONCLUSÃO).

Amostra	Areia	Silte	Argila	pH			P	CO	N	Ca	Mg	Na	K	Al	H	S	T	V	m	PST	CE	Cor Úmida
				H ₂ O	CaCl ₂	KCl																
----- g kg ⁻¹ -----			ppm		-- % --		----- cmolc dm ⁻³ -----						----- % -----									
P50 0-20	864,69	79,58	55,73	5,1	3,9	4,3	6	0,62	0,02	2,21	5,25	0,04	0,19	0,20	4,42	7,7	12,3	62	3	0	0,1	10YR 3/3
P50 40-60	823,23	86,87	89,90	5,9	3,7	4,6	4	0,53	0,02	5,29	2,44	0,12	0,07	0,35	1,63	7,9	9,9	80	4	1	0,1	10YR 3/4
P50 80-100	817,91	78,30	103,79	6,4	3,8	5,0	6	0,26	0,03	5,11	3,44	0,39	0,05	0,30	1,68	9,0	11,0	82	3	4	0,1	10YR 4/3

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA E CLASSIFICAÇÃO COMPLETA DOS SOLOS ENCONTRADOS NA ÁREA DE ESTUDOS.

PERFIL 1

Classificação – NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico

Localização – Fazenda Lavoura Seca (UFC)

Situação e Cobertura Vegetal – Trincheira em terço inferior da encosta, sob vegetação natural.

Formação geológica e litológica – Complexo Granítico Quixadá – Quixeramobim.

Material originário – Gnaisses, Granitos e Migmatitos.

Relevo local – Suave ondulado.

Relevo regional – Suave e forte ondulado.

Altitude – 231,14 m.

Pedregosidade – Não pedregoso.

Rochosidade – Rochoso.

Drenagem – Inperfeitamente drenado.

Erosão – Laminar ligeira.

Descrito e Classificado por: Raul S. Toma, Ryshardson G. P. de O. e Silva e Igor V. de Araujo.

- A1 0 – 22 cm; preto (7,5 YR 2,5/1, úmido), bruno (7,5 YR 5/2, seco); franco-arenoso; moderada a forte grande a muito grande blocos angulares; poucos poros pequenos; duro, friável, não plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e abrupta.
- A2 22 – 34 cm; bruno-escuro (7,5 YR 3/2, úmido), bruno (7,5 YR 4/2, seco); franco-arenoso; moderada grande blocos angulares; poucos poros pequenos; duro, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e abrupta.
- A3 34 – 48 cm; bruno muito escuro (7,5 YR 2,5/2, úmido), bruno (7,5 YR 4/2, seco); franco-arenoso; forte a moderada grande a média blocos angulares; poucos poros pequenos; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso.

Raízes – Poucas nos horizontes A1 e A3; comuns no horizonte A2.

Observações – Muitos minerais alteráveis e cascalho centimétrico no horizonte A2; presença de cascalho milimétrico no horizonte A3.

QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO PERFIL 1.

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica (%)				%Silte/ %Argila
Símbolo	Profund. (cm)	Calhaus (>20mm)	Cascalho (20- 2mm)	TF (<2mm)	Areia Grossa	Areia Fina	Argila	Silte	
A1	0-22	0	5	95	40,0	42,5	5,0	12,4	2
A2	22-34	7	11	82	43,4	36,8	7,1	12,7	2
A3	34-48	0	12	88	44,6	37,1	7,4	10,9	1
pH			Posto saturado		Sat, c/sódio 100.Na ⁺ /T	P assimil. (ppm)	C (%)	N (%)	C/N
H ₂ O (1:2,5)	CaCl ₂ (1:2,5)	KCl (1:2,5)	C.E. do extrato (mmhos/ cm 25° C)	Água (%)					
6,50	5,80	5,76	0,131	-	1	43,71	0,8	0,03	28
6,60	5,55	4,53	0,056	-	2	8,61	0,3	0,02	21
6,61	5,56	4,35	0,055	-	2	7,09	0,3	0,01	21
Complexo Sortivo (cmol _c dm ⁻³)								V (%)	100.Al ³⁺ Al ³⁺ +S
Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H ⁺	Al ³⁺	S	T		
4,00	2,02	0,45	0,07	1,27	0,05	6,5	7,9	83	1
5,60	0,46	0,16	0,14	1,75	0,07	6,3	8,2	78	1
6,25	0,23	0,11	0,15	1,88	0,10	6,7	8,7	77	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

PERFIL 2

Classificação – PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico típico

Localização – Fazenda Lavoura Seca (UFC)

Situação e Cobertura Vegetal – Trincheira aberta a 500 metros da estrada em terreno plano sob pastagem.

Formação geológica e litológica – Complexo Granítico Quixadá – Quixeramobim.

Material originário – Gnaisses, Granitos e Migmatitos.

Relevo local – Plano.

Relevo regional – Suave ondulado.

Altitude – 225,97 m.

Pedregosidade – Não pedregosa.

Rochosidade – Não rochosa.

Drenagem – Imperfeitamente drenado.

Erosão – Laminar ligeira.

Descrito e Classificado por: Raul S. Toma, Ryshardson G. P. de O. e Silva e Igor V. de Araujo.

A 0 – 5 cm; bruno muito escuro (10 YR 2/2, úmido), cinzento-brunado-claro (10 YR 6/2, seco); arenoso-franco; grão simples; muitos poros grandes e muito grandes; solto, solto, não plástico e não pegajoso; transição plana e abrupta.

BA 5 – 17 cm; bruno-acinzentado muito escuro (10 YR 3/2, úmido), bruno-acinzentado (10 YR 5/2, seco); arenoso-franco; moderada grande a muito grande blocos subangulares; muitos poros grandes; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição plana e abrupta.

B1 17 – 29 cm; bruno (10 YR 4/3, úmido), bruno-acinzentado (10 YR 5/2, seco); arenoso-franco; moderada grande a muito grande blocos angulares; poucos poros pequenos; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e abrupta.

B2 29 – 45 cm; bruno-amarelado -escuro (10 YR 4/4, úmido), cinzento-brunado-claro (10 YR 6/2, seco); arenoso-franco; moderada grande a muito grande blocos angulares; poros comuns pequenos; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e abrupta.

BC 45 – 90 cm+; bruno-acinzentado (10 YR 5/2, úmido), cinzento-claro (10 YR 7/1, seco); arenoso-franco; moderada grande a muito grande blocos angulares; muitos poros pequenos; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição plana e abrupta.

Raízes – Comuns nos horizontes A, AB, B1 e B2; ausentes no horizonte BC.

Observações – presença de pedotubos no horizonte AB; presença de carvão no horizonte B1; presença de quartzo milimétrico no horizonte B2.

QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO PERFIL 2.

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica (%)				%Silte/ %Argila
Símbolo	Profund. (cm)	Calhaus (>20mm)	Cascalho (20- 2mm)	TF (<2mm)	Areia Grossa	Areia Fina	Argila	Silte	
A	0-5	0	2	98	54,0	36,8	1,0	8,2	8
BA	5-17	0	2	98	57,1	32,5	2,8	7,6	3
B1	17-29	0	3	97	42,6	43,5	5,0	9,0	2
B2	29-45	0	4	96	54,6	34,7	5,2	5,5	1
BC	45-90+	0	1	99	53,7	34,8	6,0	5,5	1
pH			Posto saturado		Sat. c/sódio 100.Na ⁺ /T	P assimil. (ppm)	C (%)	N (%)	C/N
H ₂ O (1:2,5)	CaCl ₂ (1:2,5)	KCl (1:2,5)	C.E. do extrato (mmhos/ cm 25° C)	Água (%)					
7,00	6,60	6,43	0,658	-	1	19,85	1,3	0,04	35
6,51	5,75	5,46	0,097	-	1	7,53	0,6	0,02	27
6,70	5,94	5,43	0,087	-	2	4,55	0,3	0,01	42
6,68	5,93	5,30	0,084	-	2	3,47	0,4	0,01	43
6,72	6,02	5,37	0,046	-	2	2,67	0,1	0,01	15
Complexo Sortivo (cmolc dm ⁻³)								V (%)	$\frac{100.Al^{3+}}{Al^{3+}+S}$
Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H ⁺	Al ³⁺	S	T		
3,86	1,06	0,51	0,06	0,83	0	5,5	6,3	87	0
2,45	0,80	0,25	0,06	1,27	0,05	3,5	4,9	73	1
2,11	0,83	0,25	0,07	0,61	0,05	3,3	3,9	83	2
1,78	0,76	0,25	0,06	0,61	0,05	2,8	3,5	81	2
1,68	0,65	0,20	0,06	0,28	0,05	2,6	2,9	89	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

PERFIL 3

Classificação – PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico abrupto

Localização – Fazenda Lavoura Seca (UFC)

Situação e Cobertura Vegetal – Trincheira aberta a 500 metros da estrada, com pequena declividade - 3%, sob pastagem.

Formação geológica e litológica – Complexo Granítico Quixadá – Quixeramobim.

Material originário – Gnaisses, Granitos e Migmatitos.

Relevo local – Plano a suave ondulado.

Relevo regional – Suave ondulado.

Altitude – 222,20 m.

Pedregosidade – Moderadamente pedregosa.

Rochosidade – Ligeiramente rochosa.

Drenagem – Imperfeitamente drenado.

Erosão – Laminar ligeira.

Descrito e Classificado por: Raul S. Toma, Ryshardson G. P. de O. e Silva e Igor V. de Araujo.

- A 0 – 10 cm; bruno muito escuro (7,5 YR 2,5/2, úmido), bruno (7,5 YR 5/2, seco); franco-arenoso; fraca a moderada grande a muito grande blocos subangulares; poucos poros pequenos; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e abrupta.
- AB 10 – 20 cm; bruno (7,5 YR 4/2, úmido), cinzento-rosado (7,5 YR 6/2, seco), mosqueado pouco pequeno e difuso, bruno-forte (7,5 YR 4/6, úmido), bruno-forte (7,5 YR 5/8, seco); franco-arenoso; moderada a forte média a grande blocos angulares a subangulares; poros comuns pequenos a médios; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e abrupta.
- B 20 – 35 cm+; bruno (7,5 YR 4/3, úmido), bruno (7,5 YR 5/2, seco), mosqueado abundante médio a grande e difuso, amarelo-avermelhado (2,5 YR 6/6, úmido), amarelo-avermelhado (2,5 YR 6/6, seco) e vermelho (10 R 4/6, úmido), vermelho (10 R 5/8, seco); franco-argiloso; moderada a forte média blocos subangulares; poucos poros pequenos; duro, friável, muito plástico e pegajoso; transição plana e abrupta.

Raízes – Comuns nos horizontes A, AB e B.

Observações – Presença de cascalho centimétrico no horizonte AB; alta atividade biológica nos horizontes AB e B.

QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO PERFIL 3.

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica (%)				%Silte/ %Argila
Símbolo	Profund. (cm)	Calhaus (>20mm)	Cascalho (20- 2mm)	TF (<2mm)	Areia Grossa	Areia Fina	Argila	Silte	
A	0-10	1	3	96	40,1	42,8	5,7	11,4	2
AB	10-20	0	7	93	45,2	34,4	12,4	7,9	1
B	20-35+	0	3	97	27,9	26,8	34,3	11,0	0
pH			Posto saturado		Sat. c/sódio 100,Na ⁺ /T	P assimil. (ppm)	C (%)	N (%)	C/N
H ₂ O (1:2,5)	CaCl ₂ (1:2,5)	KCl (1:2,5)	C.E. do extrato (mmhos/ cm 25° C)	Água (%)					
6,54	5,95	6,01	0,220	-	1	8,03	0,9	0,05	20
6,67	5,96	5,67	0,104	-	1	1,22	0,5	0,03	18
5,90	4,94	4,38	0,103	-	1	2,16	0,5	0,03	17
Complexo Sortivo (cmol _c dm ⁻³)								V (%)	$\frac{100 \cdot \text{Al}^{3+}}{\text{Al}^{3+} + \text{S}}$
Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H ⁺	Al ³⁺	S	T		
2,95	0,95	0,34	0,07	1,32	0,00	4,3	5,6	77	0
1,80	1,01	0,45	0,06	1,27	0,05	3,3	4,6	72	1
1,87	0,89	0,24	0,07	3,15	0,15	3,1	6,4	48	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

PERFIL 4

Classificação – ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico abrupto

Localização – Fazenda Lavoura Seca (UFC)

Situação e Cobertura Vegetal – Corte em área de retirada de solo para construção, com pequena declividade de 3%, sob vegetação natural.

Formação geológica e litológica – Grupo Barreiras, terciário.

Material originário – Sedimentos areno-argilosos do grupo Barreiras.

Relevo local – Plano.

Relevo regional – Suave ondulado.

Altitude – 232,62 m.

Pedregosidade – Não pedregosa.

Rochosidade – Não rochosa.

Drenagem – Moderadamente drenado.

Erosão – Laminar ligeira.

Descrito e Classificado por: Raul S. Toma, Ryshardson G. P. de O. e Silva e Igor V. de Araujo.

- A1 0 – 17 cm; bruno-avermelhado (2,5 YR 4/4, úmido), bruno-avermelhado-claro (5 YR 6/3, seco); franco-arenoso; fraca a moderada grande blocos subangulares; poucos poros pequenos; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e clara.
- A2 17 – 29 cm; bruno-avermelhado (2,5 YR 4/4, úmido), bruno-avermelhado-claro (5 YR 6/3, seco); franco-arenoso; fraca a moderada grande a muito grande blocos angulares; poucos poros pequenos; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e abrupta.
- BA 29 – 34 cm; vermelho (2,5 YR 4/6, úmido), vermelho (2,5 YR 5/8, seco), mosqueado pouco pequeno e difuso, vermelho (2,5 YR 4/6, úmido), vermelho (2,5 YR 4/6, seco); franco-argilo-arenoso; moderada grande blocos angulares a prismática; muitos poros médios; duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e abrupta.
- B1 34 – 64 cm; vermelho (2,5 YR 4/6, úmido), vermelho (2,5 YR 5/8, seco), mosqueado pouco grande e difuso, vermelho-escuro (2,5 YR 3/6, úmido), vermelho (2,5 YR 4/6, seco); franco-argilo-arenoso; moderada grande a muito grande blocos angulares a prismática; muitos poros médios; duro, muito friável, muito plástico e pegajoso; transição ondulada e clara.
- B2 64 – 111 cm; vermelho (2,5 YR 4/8, úmido), vermelho (2,5 YR 5/8, seco), mosqueado pouco grande e distinto, vermelho-escuro (2,5 YR 3/6, úmido), vermelho (2,5 YR 4/6, seco); franco-argiloso; moderada muito grande blocos angulares a prismática; muitos poros médios a grandes; duro a ligeiramente duro, muito friável, muito plástico e pegajoso; transição ondulada e abrupta.

- B3 111 – 126 cm; vermelho (2,5 YR 4/8, úmido), vermelho (2,5 YR 5/8, seco); franco-argiloso; moderada grande a muito grande blocos subangulares a prismática; poros comuns médios; ligeiramente duro, muito friável, muito plástico e pegajoso; transição ondulada e abrupta.
- BC 126 – 161 cm+; vermelho (2,5 YR 4/8, úmido), vermelho (2,5 YR 5/8, seco); franco; moderada a fraca grande a muito grande blocos subangulares; poucos poros grandes; ligeiramente duro, muito friável, muito plástico e pegajoso; transição ondulada e abrupta.

Raízes – Muitas nos horizontes A1, A2, BA e B1; raras nos horizontes B2, B3 e BC.

Observações – Presença de cascalho milimétrico nos horizontes A1, A2 e B1; alta atividade biológica nos horizontes A1, A2, BA e B1; presença de carvão nos horizontes BA, B1, B2 e B3.

QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO PERFIL 4.

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica (%)				%Silte/ %Argila
Símbolo	Profund. (cm)	Calhaus (>20mm)	Cascalho (20- 2mm)	TF (<2mm)	Areia Grossa	Areia Fina	Argila	Silte	
A1	0-17	0	6	94	38,1	42,4	10,2	9,4	1
A2	17-29	0	5	95	37,8	44,1	7,4	10,6	1
BA	29-34	0	5	95	31,9	35,1	22,6	10,4	0
B1	34-64	0	5	95	27,8	27,2	35,4	9,5	0
B2	64-111	0	6	94	25,0	25,5	34,0	15,5	0
B3	111-126	0	6	94	25,7	27,7	29,1	17,5	1
BC	126-161+	19	29	52	29,1	28,5	23,1	19,4	1
pH			Posto saturado		Sat. c/sódio 100.Na ⁺ /T	P assimil. (ppm)	C (%)	N (%)	C/N
H ₂ O (1:2,5)	CaCl ₂ (1:2,5)	KCl (1:2,5)	C.E. do extrato (mmhos/ cm 25° C)	Água (%)					
5,95	5,23	4,61	0,157	-	1	6,51	0,5	0,02	23
6,08	5,37	4,98	0,202	-	2	6,00	0,7	0,02	48
5,31	4,85	4,32	0,645	-	2	2,81	0,6	0,02	26
5,04	4,55	4,03	0,407	-	1	1,87	0,6	0,03	24
5,12	4,35	3,84	0,234	-	2	1,58	0,5	0,02	23
5,20	4,29	3,79	0,138	-	2	1,73	0,6	0,02	29
5,33	4,15	3,73	0,103	-	2	1,65	0,4	0,02	21
Complexo Sortivo (cmol _c dm ⁻³)								V (%)	100.Al ³⁺ Al ³⁺ +S
Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H ⁺	Al ³⁺	S	T		
1,39	0,55	0,36	0,05	2,54	0,10	2,4	5,0	47	4
2,08	0,87	0,20	0,13	2,26	0,05	3,3	5,6	59	1
2,52	1,40	0,31	0,15	2,77	0,20	4,4	7,4	60	4
2,51	1,41	0,52	0,12	3,02	0,45	4,6	8,0	57	9
2,33	2,13	0,09	0,12	2,70	0,60	4,7	8,0	59	11
1,96	2,20	0,08	0,15	2,77	0,70	4,4	7,8	56	14
1,66	1,84	0,09	0,20	3,21	1,25	3,8	8,2	46	25

Fonte: Elaborado pelo autor.

PERFIL 5

Classificação – ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico

Localização – Fazenda Lavoura Seca (UFC)

Situação e Cobertura Vegetal – Trincheira a 50 metros da estrada em terreno plano, sob pomar de cajazeiras.

Formação geológica e litológica – Grupo Barreiras, terciário.

Material originário – Sedimentos areno-argilosos do grupo Barreiras.

Relevo local – Plano.

Relevo regional – Suave ondulado.

Altitude – 210,35 m.

Pedregosidade – Moderadamente pedregosa.

Rochosidade – Não rochosa.

Drenagem – Moderadamente drenado.

Erosão – Não aparente.

Descrito e Classificado por: Raul S. Toma, Ryshardson G. P. de O. e Silva e Igor V. de Araujo.

- A 0 – 10 cm; bruno-escuro (7,5 YR 3/2, úmido), bruno (7,5 YR 4/3, seco); franco-arenoso; moderada grande a muito grande blocos subangulares; poros comuns pequenos; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição plana e abrupta.
- AB 10 – 23 cm; vermelho-amarelado (5 YR 4/6, úmido), bruno-forte (7,5 YR 5/8, seco); franco-arenoso; moderada grande a muito grande blocos angulares a subangulares; poucos poros pequenos; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e abrupta.
- BA 23 – 33 cm; vermelho (2,5 YR 5/6, úmido), vermelho-amarelado (5 YR 5/8, seco); franco-argilo-arenoso; moderada grande a muito grande blocos subangulares; poucos poros pequenos; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e clara.
- B1 33 – 48 cm; vermelho (2,5 YR 4/6, úmido) vermelho-claro (2,5 YR 6/8, seco); franco-argilo-arenoso; moderada a forte grande a muito grande blocos angulares a subangulares; poros comuns pequenos; muito duro, firme, plástico e pegajoso; transição plana e clara.
- B2 48 – 68 cm; vermelho (2,5 YR 4/8, úmido) vermelho (2,5 YR 5/6, seco); franco-arenoso; moderada grande a muito grande blocos angulares; poros comuns pequenos; muito duro, firme, plástico e pegajoso; transição plana e clara.
- B3 68 – 83 cm; vermelho (2,5 YR 4/6, úmido) vermelho (2,5 YR 5/8, seco); franco-argilo-arenoso; moderada a forte grande a muito grande blocos angulares a subangulares; poucos poros pequenos; muito duro, firme, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e clara.
- BC1 83 – 108 cm; vermelho (2,5 YR 5/6, úmido) vermelho-claro (2,5 YR 6/8, seco); franco-

arenoso; moderada a forte grande a muito grande blocos subangulares; poucos poros pequenos; duro, firme, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e clara.

BC2 108 – 123 cm+; vermelho (2,5 YR 5/8, úmido) vermelho-claro (2,5 YR 6/8, seco); franco-arenoso; moderada grande a muito grande blocos subangulares; poucos poros pequenos a médios; duro, firme, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e clara.

Raízes – Comuns no horizonte A; poucas nos horizontes AB, BA, B1, B2, B3, BC1 e BC2.

Observações – Presença de cascalho milimétrico e alta atividade biológica nos horizontes AB, BA, B1, B2, B3, BC1 e BC2; presença de poros de preenchimento nos horizontes AB e BA; presença de carvão nos horizontes B2 e B3.

QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO PERFIL 5 (CONTINUA).

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica (%)				%Silte/ %Argila
Símbolo	Profund. (cm)	Calhaus (>20mm)	Cascalho (20- 2mm)	TF (<2mm)	Areia Grossa	Areia Fina	Argila	Silte	
A	0-10	1	3	95	49,1	34,4	9,3	7,2	1
AB	10-23	0	2	98	46,1	26,8	14,2	13,0	1
BA	23-33	0	2	98	44,4	25,8	22,3	7,4	0
B1	33-48	0	2	98	34,7	27,3	29,4	8,6	0
B2	48-68	0	2	98	36,3	30,9	17,6	15,2	1
B3	68-83	0	2	98	33,2	32,1	20,8	14,0	1
BC1	83-108	0	2	98	51,4	25,0	13,0	10,6	1
BC2	108-123+	0	2	98	49,7	28,7	9,5	12,1	1
pH			Posto saturado		Sat. c/sódio 100.Na ⁺ /T	P assimil. (ppm)	C (%)	N (%)	C/N
H ₂ O (1:2,5)	CaCl ₂ (1:2,5)	KCl (1:2,5)	C.E. do extrato (mmhos/ cm 25° C)	Água (%)					
6,60	5,92	5,90	0,229	-	1	73,53	0,6	0,03	17
6,90	6,22	6,08	0,113	-	1	22,39	0,4	0,02	19
7,05	6,30	6,00	0,089	-	1	9,63	0,5	0,02	26
7,01	6,35	5,91	0,116	-	1	7,38	0,4	0,02	21
7,30	6,45	6,24	0,132	-	2	3,90	0,4	0,02	20
7,31	6,58	6,34	0,239	-	1	3,32	0,5	0,02	25
7,00	6,56	6,49	1,657	-	2	2,67	0,3	0,02	16
7,30	6,78	6,48	0,497	-	2	2,45	0,2	0,02	12

QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO PERFIL 5 (CONCLUSÃO).

Complexo Sortivo (cmolc dm ⁻³)								V (%)	$\frac{100 \cdot \text{Al}^{3+}}{\text{Al}^{3+} + \text{S}}$
Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H ⁺	Al ³⁺	S	T		
2,57	0,66	0,57	0,06	1,82	0,00	3,9	5,7	68	0
2,27	0,69	0,36	0,06	0,83	0,00	3,4	4,2	80	0
2,26	0,76	0,48	0,05	0,78	0,05	3,6	4,4	81	1
2,22	0,85	0,67	0,07	0,94	0,05	3,8	4,8	79	1
2,22	0,94	0,67	0,07	0,61	0,05	3,9	4,6	86	1
2,21	1,03	0,74	0,07	0,61	0,05	4,1	4,7	86	1
3,14	1,38	1,30	0,12	0,45	0,05	5,9	6,4	92	1
2,39	1,17	1,07	0,13	0,78	0,05	4,8	5,6	85	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

PERFIL 6

Classificação – LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico

Localização – Fazenda Lavoura Seca (UFC)

Situação e Cobertura Vegetal – Trincheira aberta em terreno com vegetação nativa.

Formação geológica e litológica – Grupo Barreiras, terciário.

Material originário – Sedimentos areno-argilosos do grupo Barreiras.

Relevo local – Plano.

Relevo regional – Suave ondulado.

Pedregosidade – Não pedregosa.

Rochosidade – Não rochosa.

Drenagem – Moderadamente drenado.

Erosão – Laminar ligeira.

Descrito e Classificado por: Raul S. Toma.

- A 0–10 cm, bruno (7,5YR 4/3, úmida); areia franca; moderada grande blocos subangulares; ligeiramente dura, friável; não plástico e não pegajoso; transição plana e clara.
- AB 10–20 cm, bruno avermelhado (5YR 4/4, úmido); franco arenosa; forte muito grande prismática; extremamente dura, friável; ligeiramente plástica e pegajosa; transição plana e abrupta.
- Bt1 20–50 cm, bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/4, úmido); franco arenosa; moderada grande prismática e blocos subangulares; dura, friável; ligeiramente plástica e pegajosa; transição plana e gradual.
- Bt2 50–80 cm+, vermelho (2,5YR 4/6, úmido); franco-argilo-arenosa; forte grande prismática e blocos subangulares; muito dura, friável, ligeiramente plástica e pegajosa.

QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO PERFIL 6.

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica (%)			%Silte/ %Argila	
Símbolo	Profund. (cm)	Calhaus (>20mm)	Cascalho (20- 2mm)	TF (<2mm)	Areia	Argila	Silte		
A	0-10	-	-	-	84,5	4,9	10,6	2	
AB	10-20	-	-	-	77,6	9,7	12,7	1	
B1	20-50	-	-	-	70,7	15,6	13,7	1	
B2	50-80+	-	-	-	49,8	26,1	24,2	1	
pH			Posto saturado		Sat. c/sódio 100.Na ⁺ /T	P assimil. (ppm)	C (%)	N (%)	C/N
H ₂ O (1:2,5)	CaCl ₂ (1:2,5)	KCl (1:2,5)	C.E. do extrato (mmhos/ cm 25° C)	Água (%)					
5,67	-	-	-	-	1	-	-	-	-
5,46	-	-	-	-	1	-	-	-	-
5,90	-	-	-	-	1	-	-	-	-
5,90	-	-	-	-	3	-	-	-	-
Complexo Sortivo (cmolc dm ⁻³)								V (%)	$\frac{100.Al^{3+}}{Al^{3+}+S}$
Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H ⁺	Al ³⁺	S	T		
3,30	1,60	0,10	0,04	0,50	0,10	5,0	5,6	89	2
1,60	1,10	0,14	0,04	2,00	0,10	2,9	5,0	58	3
1,80	1,20	0,14	0,05	1,10	0,10	3,2	4,4	73	3
3,50	1,60	0,10	0,19	0,70	0,10	5,4	6,2	87	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

PERFIL 7

Classificação – LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico

Localização – Fazenda Lavoura Seca (UFC)

Situação e Cobertura Vegetal – Corte de estrada sob vegetação natural em topo de pequena elevação com aproximadamente 5% de declividade.

Formação geológica e litológica – Grupo Barreiras, terciário.

Material originário – Sedimentos areno-argilosos do grupo Barreiras.

Relevo local – Suave ondulado.

Relevo regional – Suave e forte ondulado.

Altitude – 180,28 m.

Pedregosidade – Não pedregosa.

Rochosidade – Não rochosa.

Drenagem – Moderadamente drenado.

Erosão – Forte.

Descrito e Classificado por: Raul S. Toma, Ryshardson G. P. de O. e Silva e Igor V. de Araujo.

- A 0 – 2 cm; bruno muito escuro (7,5 YR 2,5/2, úmido), bruno (7,5 YR 4/3, seco); franco-arenoso; grão simples; muitos poros pequenos; solto, solto, não plástico e não pegajoso; transição plana e abrupta.
- AB 2 – 11 cm; bruno-escuro (7,5 YR 3/3, úmido), bruno-forte (7,5 YR 5/6, seco), mosqueado pouco pequeno e distinto, bruno-forte (7,5 YR 4/6, úmido), amarelo-avermelhado (5 YR 6/8, seco); franco; forte grande a muito grande blocos angulares a subangulares; poucos poros muito pequenos; extremamente duro, friável, ligeiramente plástico e não pegajoso; transição plana e abrupta.
- BA 11 – 17 cm; bruno-forte (7,5 YR 5/6, úmido), vermelho-amarelado (5 YR 5/6, seco), mosqueado abundante grande e difuso, vermelho (10 R 4/8, úmido), vermelho-escuro (10 R 3/6, seco); franco-argilo-arenoso; forte muito grande blocos angulares a subangulares; poucos poros muito pequenos; extremamente duro, muito firme, plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e abrupta.
- B 17 – 72 cm; vermelho (2,5 YR 4/6, úmido) vermelho (2,5 YR 4/6, seco), mosqueado pouco pequeno e difuso, vermelho-amarelado (5 YR 5/6, úmido), bruno-avermelhado (5 YR 4/4, seco); franco-argiloso; forte muito grande blocos angulares a prismática; poucos poros muito pequenos; extremamente duro, friável, muito plástico e pegajoso; transição plana e abrupta.
- C 72 – 170 cm+; bruno-amarelado-claro (10 YR 6/4, úmido) bruno muito claro-acinzentado (10 YR 7/4, seco), mosqueado pouco pequeno e difuso, vermelho (2,5 YR 5/6, úmido), vermelho (2,5 YR 4/6, seco); franco-arenoso; forte muito grande blocos angulares a prismática; poucos poros muito pequenos; extremamente duro, friável, plástico e pegajoso.

Raízes – Poucas nos horizontes AB, BA, B e BC.

Observações – Muito mineral primário e presença de pedotubos no horizonte AB; presença de carvão no horizonte BA.

QUADRO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO PERFIL 7.

Horizonte		Amostra seca ao ar (%)			Composição Granulométrica (%)				%Silte/ %Argila
Símbolo	Profund. (cm)	Calhaus (>20mm)	Cascalho (20- 2mm)	TF (<2mm)	Areia Grossa	Areia Fina	Argila	Silte	
A	0-2	0	10	90	48,9	31,7	6,8	12,5	2
AB	2-11	0	3	97	35,8	26,9	21,3	16,1	1
BA	11-17	0	2	98	34,7	25,4	25,3	14,6	1
B	17-72	0	5	95	26,9	21,6	29,4	22,1	1
C	72-170+	0	4	96	39,7	27,4	16,8	16,1	1
pH			Posto saturado		Sat. c/sódio 100.Na ⁺ /T	P assimil. (ppm)	C (%)	N (%)	C/N
H ₂ O (1:2,5)	CaCl ₂ (1:2,5)	KCl (1:2,5)	C.E. do extrato (mmhos/ cm 25° C)	Água (%)					
6,54	6,01	5,83	0,769	-	3	13,40	2,9	0,12	25
6,95	5,91	4,84	0,483	-	22	2,23	0,7	0,02	32
6,58	5,64	4,50	0,237	-	26	1,22	0,8	0,02	38
5,96	5,90	5,33	23,870	-	81	1,15	0,5	0,02	22
7,30	6,95	6,46	13,450	-	93	1,73	0,2	0	97
Complexo Sortivo (cmolc dm ⁻³)								V (%)	$\frac{100.AI^{3+}}{AI^{3+}+S}$
Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H ⁺	Al ³⁺	S	T		
5,42	0,54	0,50	0,26	3,14	0	6,7	9,9	68	0
2,90	0,71	0,26	1,45	1,27	0,05	5,3	6,6	80	1
2,60	0,92	0,17	1,71	1,11	0,05	5,4	6,6	82	1
1,54	1,60	0,11	17,05	0,61	0,05	20,3	21,0	97	0
0,74	0	0,17	11,62	0	0	12,5	12,5	100	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE C – RESULTADO COMPLETO DA CALIBRAÇÃO DOS MODELOS
PLSR.**

Calibração dos modelos PLS para as variáveis analisadas com os dados espectrais originais em reflectância (RF).

Atributo	Nº de Fatores	RMSE	RPD	R²
Areia (g kg⁻¹)	9	76,72	1,63	0,65
Argila (g kg⁻¹)	18	53,17	2,19	0,80
Silte (g kg⁻¹)	2	59,20	0,90	0,08
pH H₂O	24	0,99	0,78	0,11
pH CaCl₂	24	0,97	0,84	0,12
pH KCl	20	0,86	0,84	0,15
P (mg dm⁻³)	6	5,97	1,11	0,20
CO (g kg⁻¹)	11	4,16	1,15	0,33
N (g kg⁻¹)	15	0,25	1,09	0,28
Na (cmol_c dm⁻³)	15	0,35	1,44	0,54
K (cmol_c dm⁻³)	1	0,15	0,94	0,17
Ca (cmol_c dm⁻³)	9	1,85	1,18	0,34
Mg (cmol_c dm⁻³)	6	1,27	1,30	0,41
Al (cmol_c dm⁻³)	1	0,31	0,99	0,03
H+Al (cmol_c dm⁻³)	26	1,21	1,20	0,41
SB (cmol_c dm⁻³)	9	2,46	1,30	0,43
CTC (cmol_c dm⁻³)	11	2,91	1,22	0,41
V%	17	16,69	0,99	0,27
m%	3	9,64	1,00	0,02

RMSE: raiz do erro quadrático médio; **RPD:** desvio padrão do erro; **R²:** coeficiente de determinação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Calibração dos modelos PLS para as variáveis analisadas com os dados espectrais em reflectância e com o espalhamento da luz corrigido (RF+SNV).

Atributo	Nº de Fatores	RMSE	RPD	R ²
Areia (g kg ⁻¹)	5	71,01	1,77	0,67
Argila (g kg ⁻¹)	17	51,77	2,25	0,81
Silte (g kg ⁻¹)	2	59,79	0,89	0,11
pH H ₂ O	29	0,65	1,20	0,41
pH CaCl ₂	30	0,74	1,11	0,33
pH KCl	14	0,63	1,17	0,34
P (mg dm ⁻³)	6	6,00	1,11	0,19
CO (g kg ⁻¹)	8	3,92	1,22	0,36
N (g kg ⁻¹)	14	0,24	1,14	0,31
Na (cmol _c dm ⁻³)	15	0,32	1,55	0,60
K (cmol _c dm ⁻³)	1	0,15	0,98	0,15
Ca (cmol _c dm ⁻³)	8	1,90	1,15	0,31
Mg (cmol _c dm ⁻³)	6	1,18	1,40	0,50
Al (cmol _c dm ⁻³)	1	0,31	0,99	0,14
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	23	1,28	1,14	0,37
SB (cmol _c dm ⁻³)	9	2,36	1,36	0,47
CTC (cmol _c dm ⁻³)	11	2,60	1,36	0,49
V%	17	15,01	1,10	0,36
m%	1	9,73	0,99	0,18

RMSE: raiz do erro quadrático médio; **RPD:** desvio padrão do erro; **R²:** coeficiente de determinação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Calibração dos modelos PLS para as variáveis analisadas com os dados espectrais transformados em absorbância (ABS).

Atributo	Nº de Fatores	RMSE	RPD	R ²
Areia (g kg ⁻¹)	13	89,08	1,41	0,57
Argila (g kg ⁻¹)	13	54,97	2,12	0,79
Silte (g kg ⁻¹)	09	54,66	0,98	0,07
pH H ₂ O	12	0,74	1,05	0,25
pH CaCl ₂	10	0,80	1,02	0,19
pH KCl	13	0,62	1,18	0,37
P (mg dm ⁻³)	7	5,97	1,11	0,20
CO (g kg ⁻¹)	10	3,90	1,22	0,36
N (g kg ⁻¹)	11	0,25	1,08	0,22
Na (cmol _c dm ⁻³)	15	0,37	1,36	0,50
K (cmol _c dm ⁻³)	14	0,14	1,00	0,20
Ca (cmol _c dm ⁻³)	09	1,85	1,18	0,32
Mg (cmol _c dm ⁻³)	09	1,05	1,56	0,58
Al (cmol _c dm ⁻³)	01	0,31	0,98	0,02
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	29	1,11	1,30	0,48
SB (cmol _c dm ⁻³)	10	2,17	1,47	0,55
CTC (cmol _c dm ⁻³)	13	2,36	1,50	0,58
V%	26	17,21	0,96	0,34
m%	01	9,93	0,97	0,13

RMSE: raiz do erro quadrático médio; **RPD:** desvio padrão do erro; **R²:** coeficiente de determinação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Calibração dos modelos PLS para as variáveis analisadas com os dados espectrais transformados em absorbância e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+SNV).

Atributo	Nº de Fatores	RMSE	RPD	R ²
Areia (g kg ⁻¹)	11	72,49	1,73	0,67
Argila (g kg ⁻¹)	12	54,46	2,14	0,79
Silte (g kg ⁻¹)	1	54,22	0,99	0,15
pH H ₂ O	12	0,73	1,06	0,22
pH CaCl ₂	7	0,79	1,03	0,12
pH KCl	13	0,63	1,17	0,34
P (mg dm ⁻³)	5	5,94	1,12	0,19
CO (g kg ⁻¹)	4	3,95	1,21	0,30
N (g kg ⁻¹)	5	0,25	1,12	0,19
Na (cmol _c dm ⁻³)	22	0,35	1,43	0,51
K (cmol _c dm ⁻³)	1	0,15	0,99	0,30
Ca (cmol _c dm ⁻³)	7	1,88	1,16	0,31
Mg (cmol _c dm ⁻³)	8	1,12	1,50	0,53
Al (cmol _c dm ⁻³)	1	0,31	0,99	0,36
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	30	1,11	1,31	0,49
SB (cmol _c dm ⁻³)	9	2,30	1,40	0,50
CTC (cmol _c dm ⁻³)	9	2,59	1,36	0,49
V%	13	14,63	1,13	0,36
m%	1	9,74	0,99	0,42

RMSE: raiz do erro quadrático médio; **RPD:** desvio padrão do erro; **R²:** coeficiente de determinação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Calibração dos modelos PLS para as variáveis analisadas com os dados espectrais transformados em absorbância, com a 1ª derivada aplicada para eliminação da linha de base e com o espalhamento da luz corrigido (ABS+1DEV+SNV).

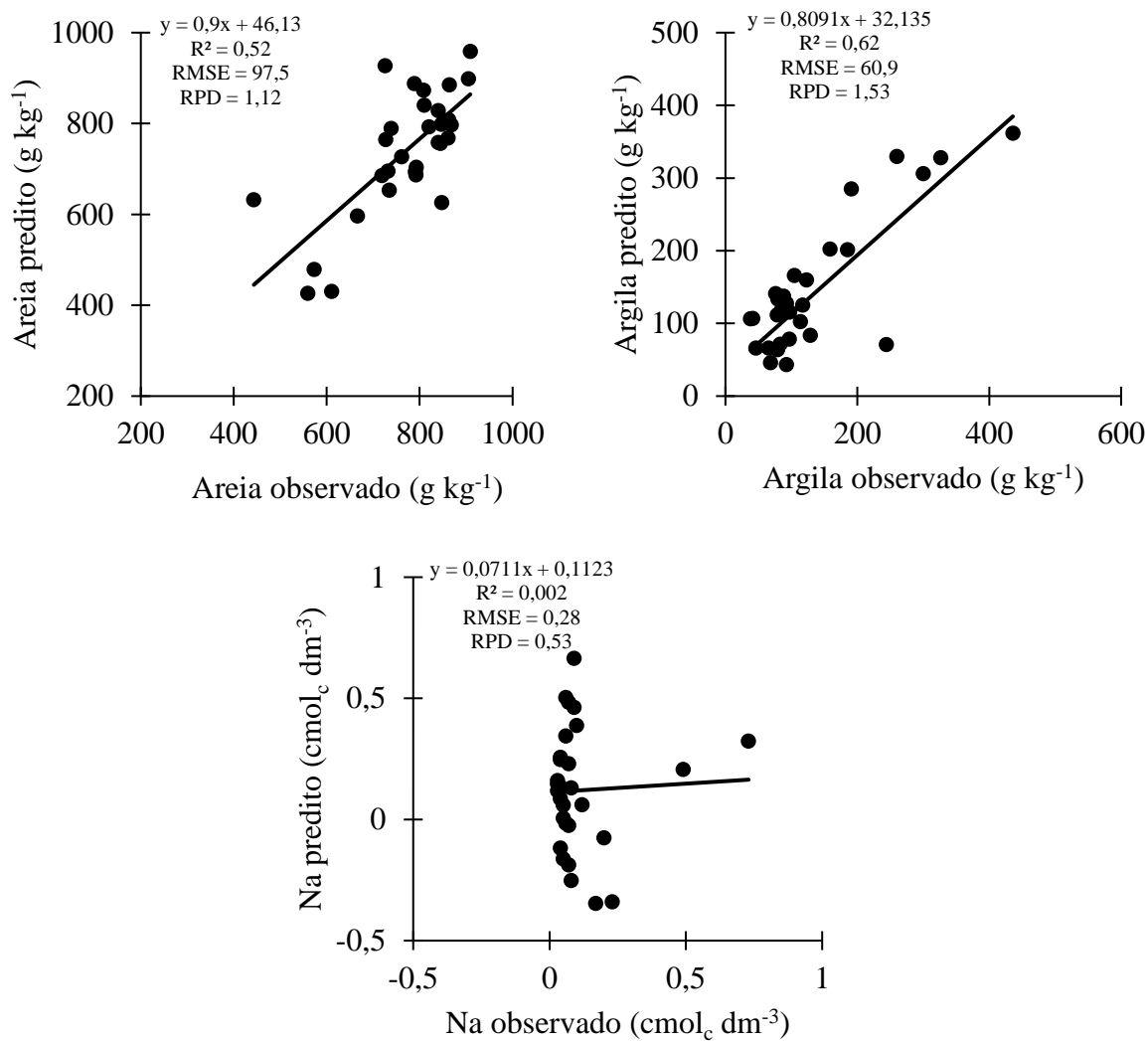
Atributo	Nº de Fatores	RMSE	RPD	R²
Areia (g kg⁻¹)	7	81,57	1,54	0,59
Argila (g kg⁻¹)	6	64,32	1,81	0,70
Silte (g kg⁻¹)	3	55,04	0,97	0,02
pH H₂O	12	0,89	0,87	0,07
pH CaCl₂	12	0,90	0,90	0,06
pH KCl	17	0,72	1,01	0,19
P (mg dm⁻³)	1	7,12	0,93	0,13
CO (g kg⁻¹)	1	5,87	0,81	0,32
N (g kg⁻¹)	1	0,34	0,81	0,16
Na (cmol_c dm⁻³)	4	0,47	1,06	0,18
K (cmol_c dm⁻³)	14	0,15	0,96	0,17
Ca (cmol_c dm⁻³)	4	2,16	1,01	0,22
Mg (cmol_c dm⁻³)	5	1,24	1,33	0,43
Al (cmol_c dm⁻³)	6	0,34	0,90	0,03
H+Al (cmol_c dm⁻³)	10	1,55	0,94	0,11
SB (cmol_c dm⁻³)	4	2,50	1,28	0,38
CTC (cmol_c dm⁻³)	5	3,24	1,09	0,28
V%	12	15,09	1,10	0,33
m%	21	11,16	0,87	0,07

RMSE: raiz do erro quadrático médio; **RPD:** desvio padrão do erro; **R²:** coeficiente de determinação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

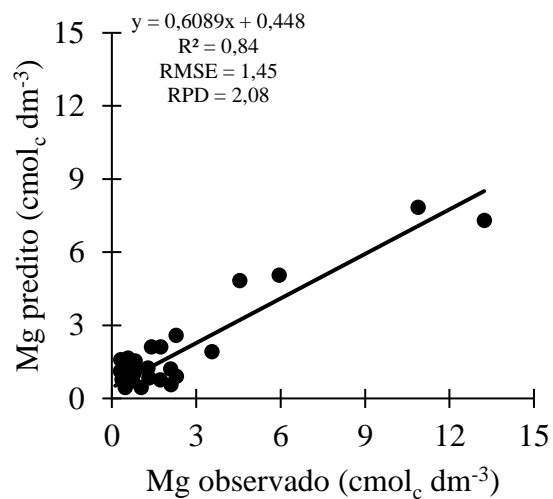
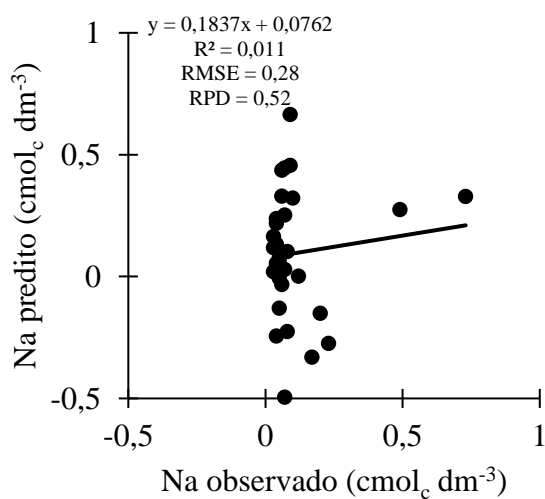
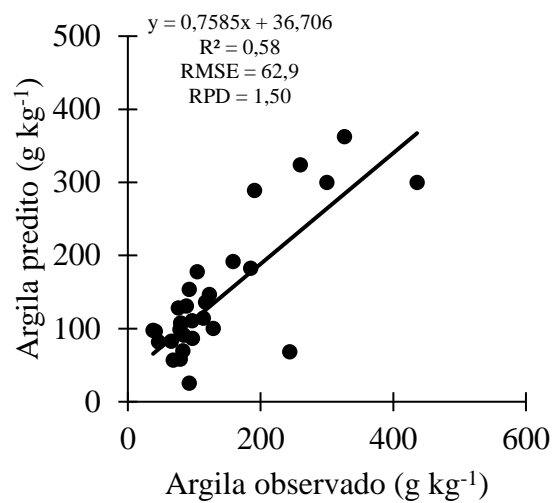
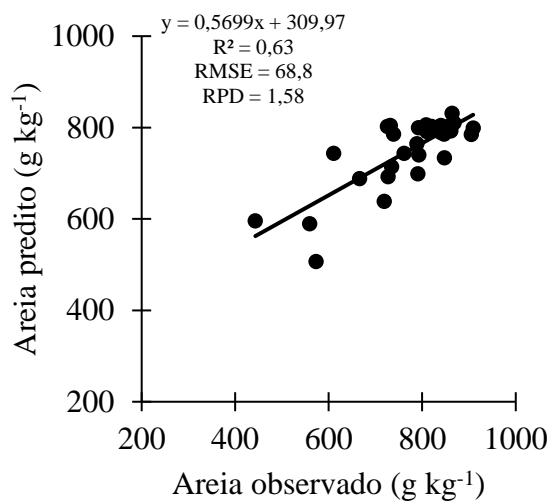
APÊNDICE D – RESULTADO COMPLETO DA VALIDAÇÃO DOS MODELOS PLSR.

Validação dos modelos PLS para os atributos químicos e físicos no tratamento RF.



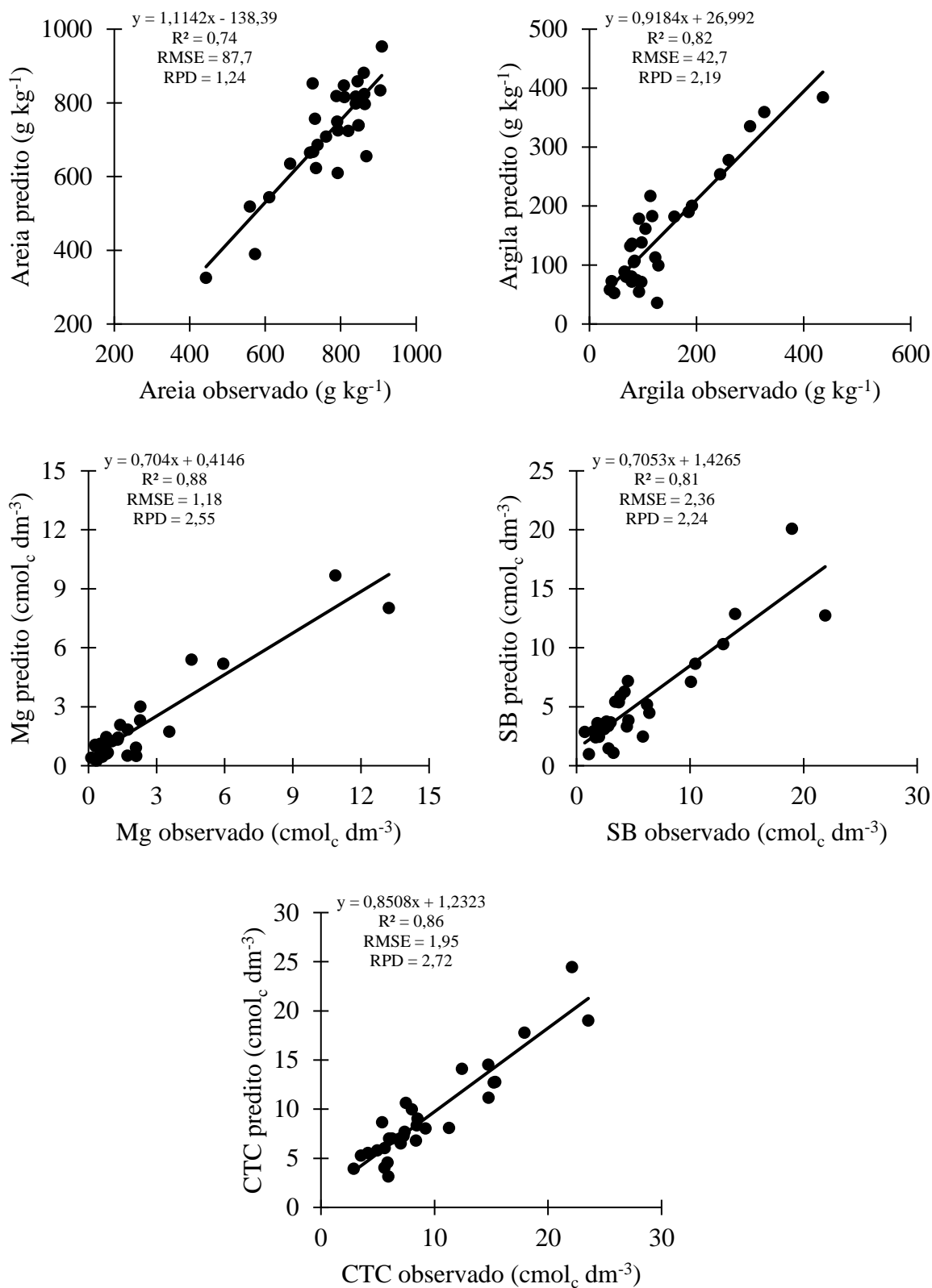
Fonte: Elaborado pelo autor.

Validação dos modelos PLS para os atributos químicos e físicos no tratamento RF+SNV.



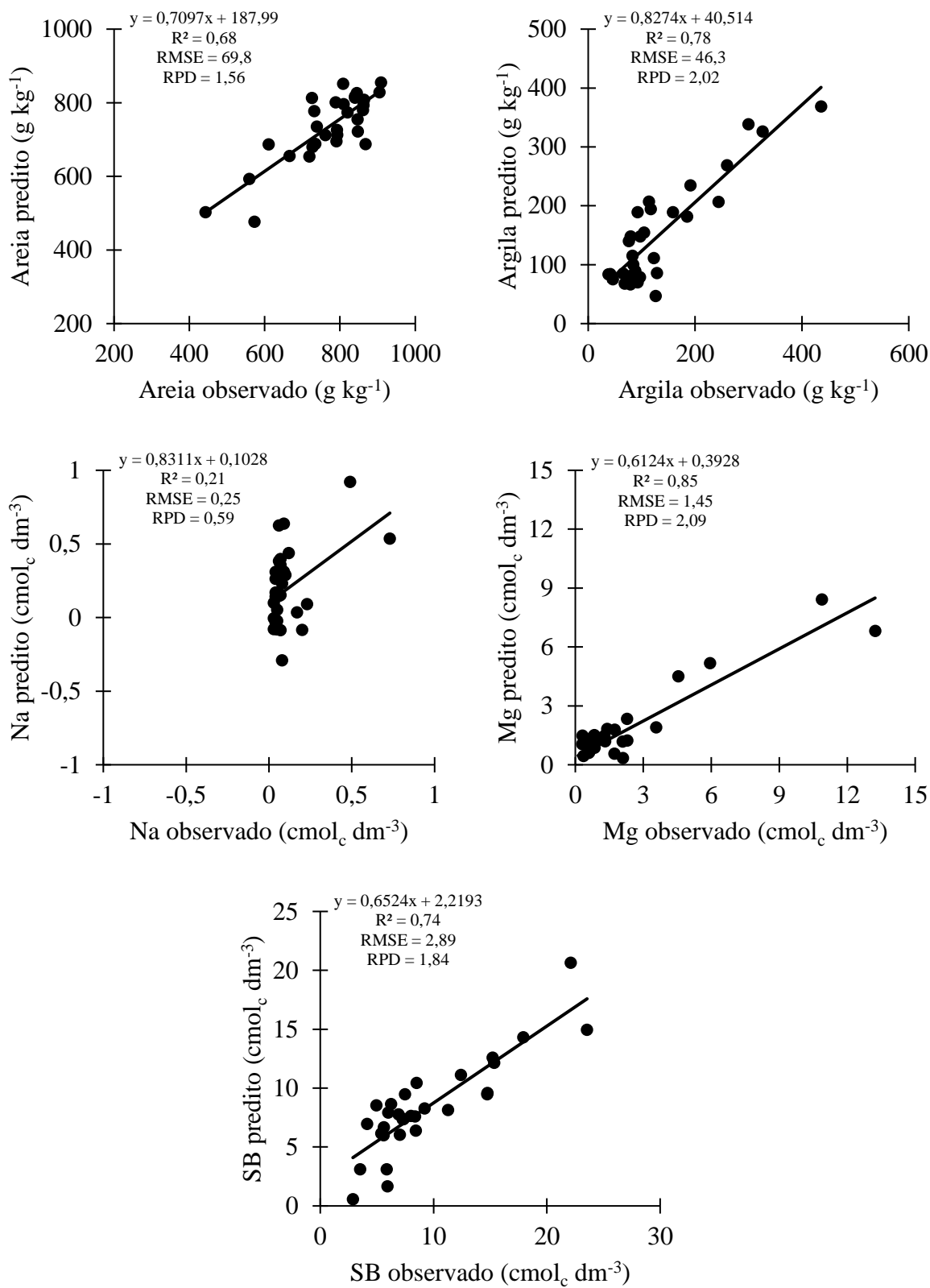
Fonte: Elaborado pelo autor.

Validação dos modelos PLS para os atributos químicos e físicos no tratamento ABS.



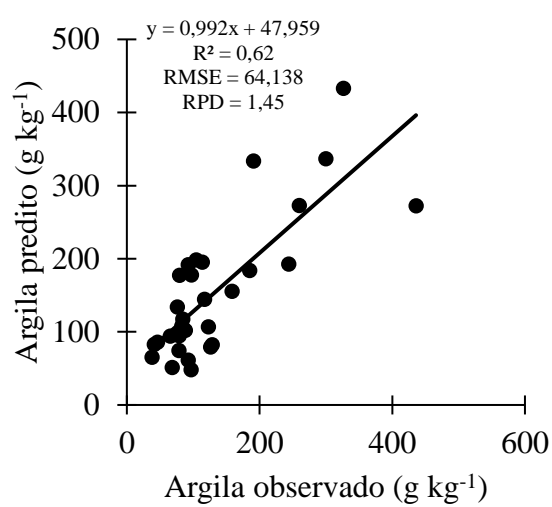
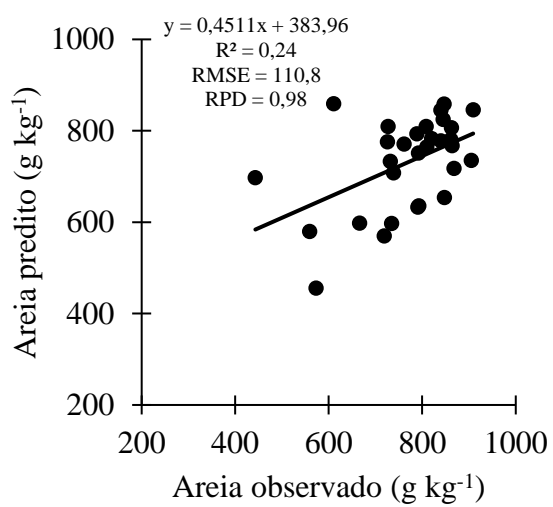
Fonte: Elaborado pelo autor.

Validação dos modelos PLS para os atributos químicos e físicos no tratamento ABS+SNV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

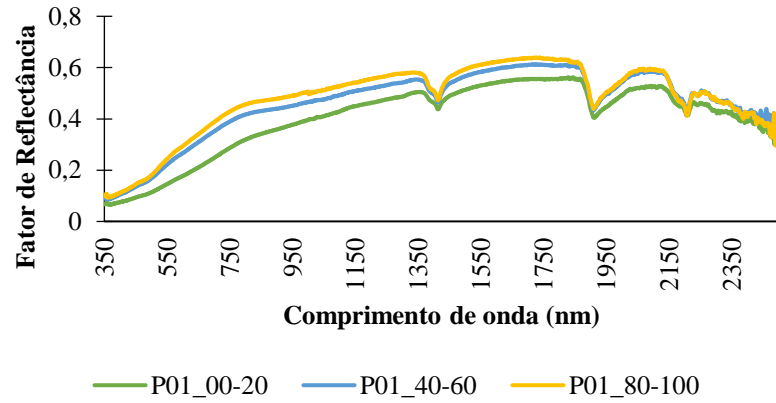
Validação dos modelos PLS para os atributos químicos e físicos no tratamento ABS+1DEV+SNV.



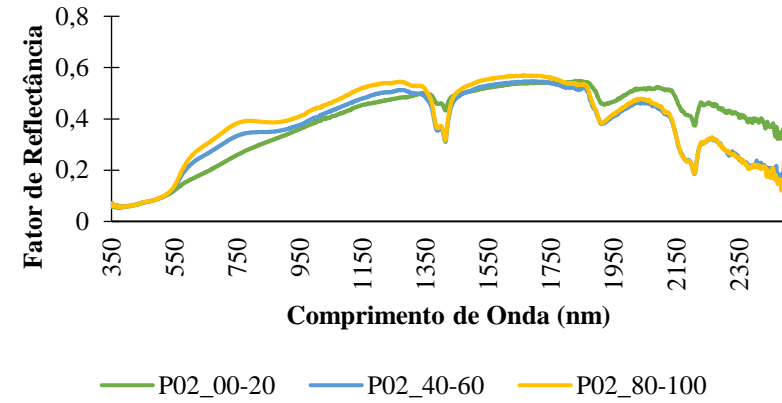
Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE E – CURVAS ESPECTRAIS DOS PONTOS DE TRADAGEM.

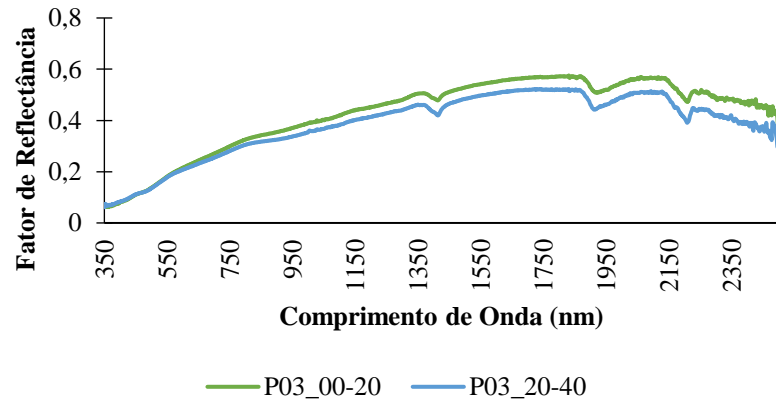
Ponto 01



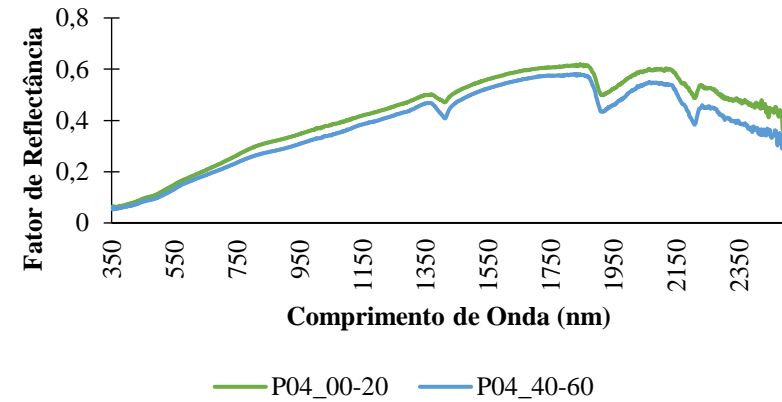
Ponto 02



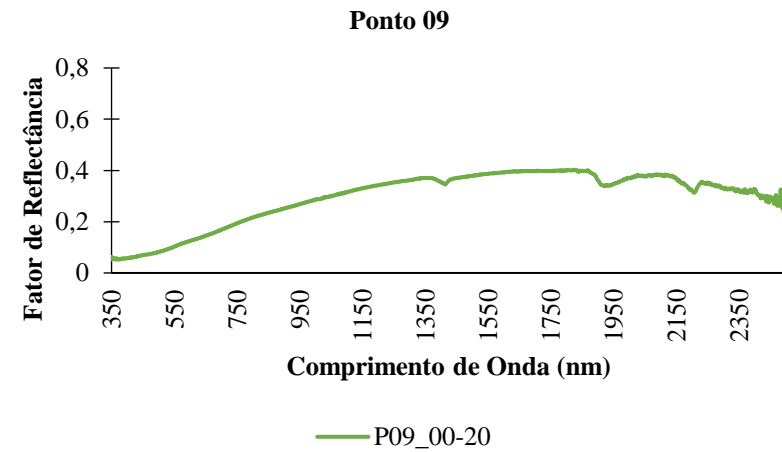
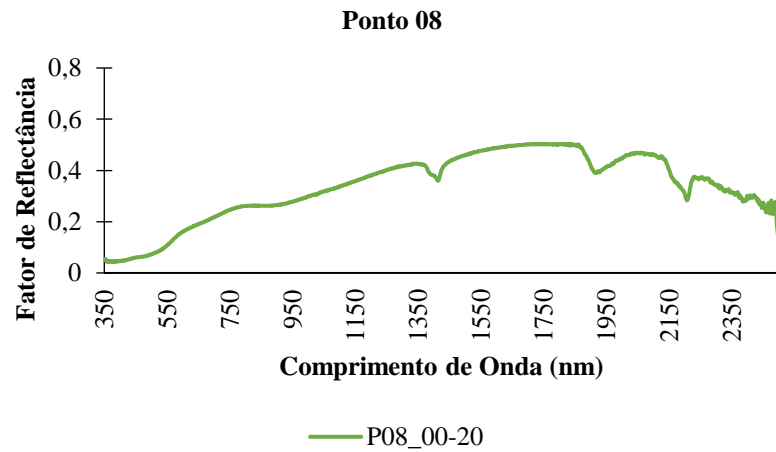
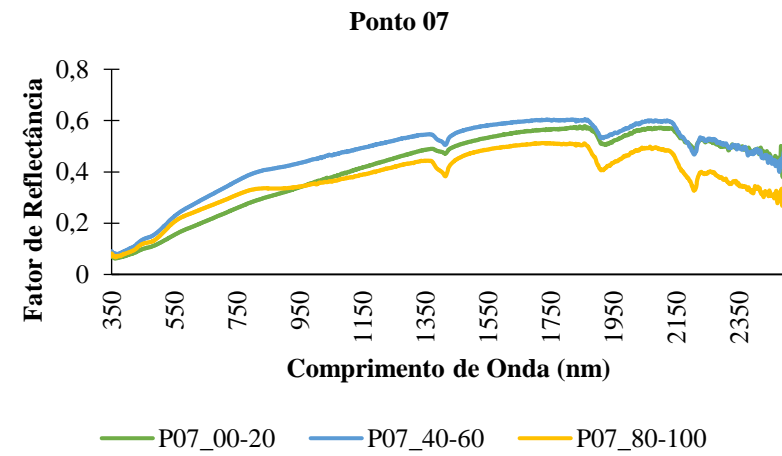
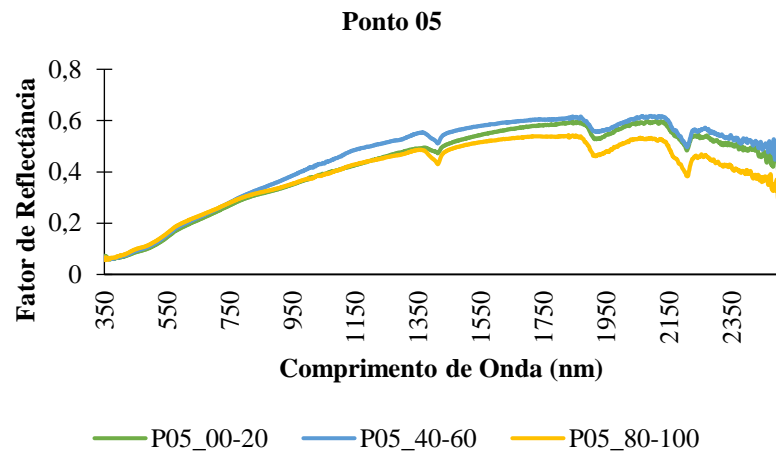
Ponto 03



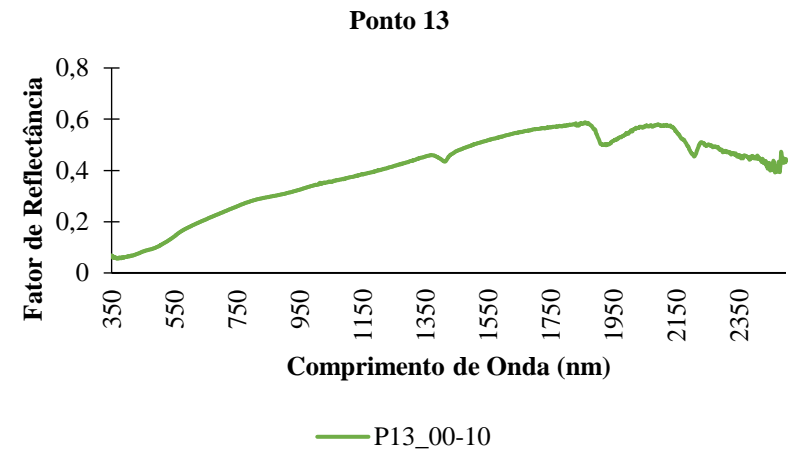
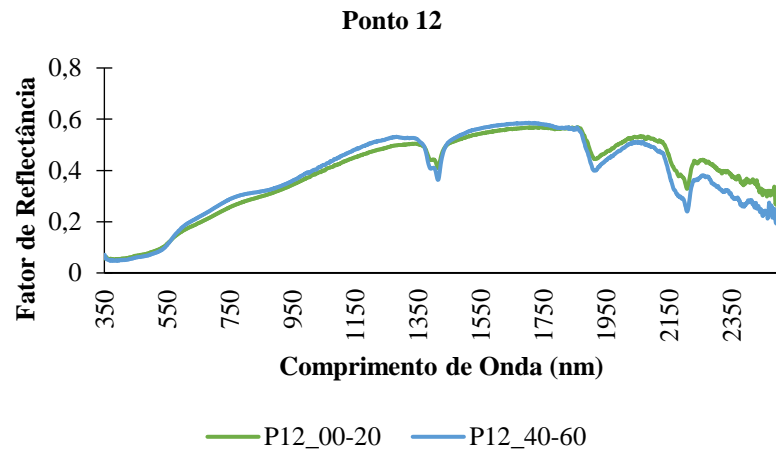
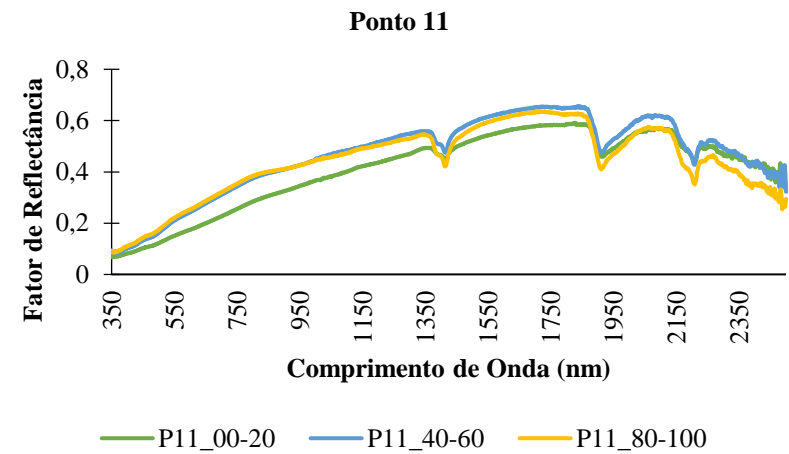
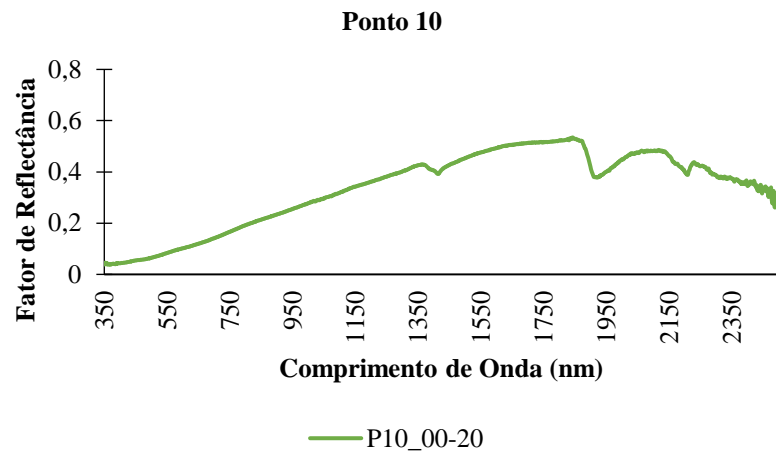
Ponto 04



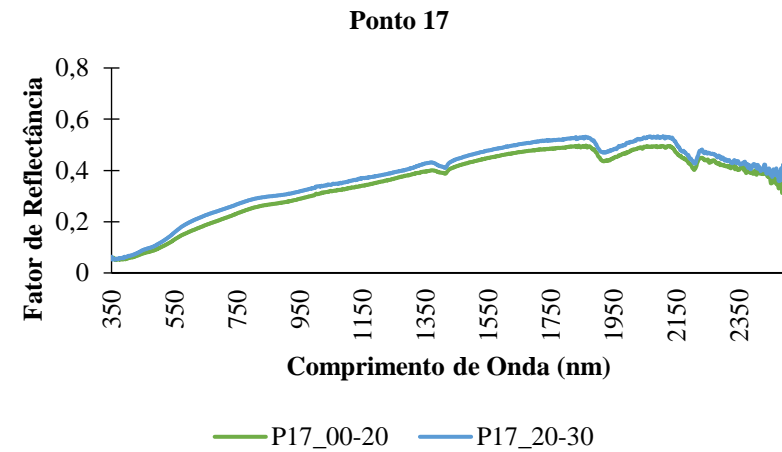
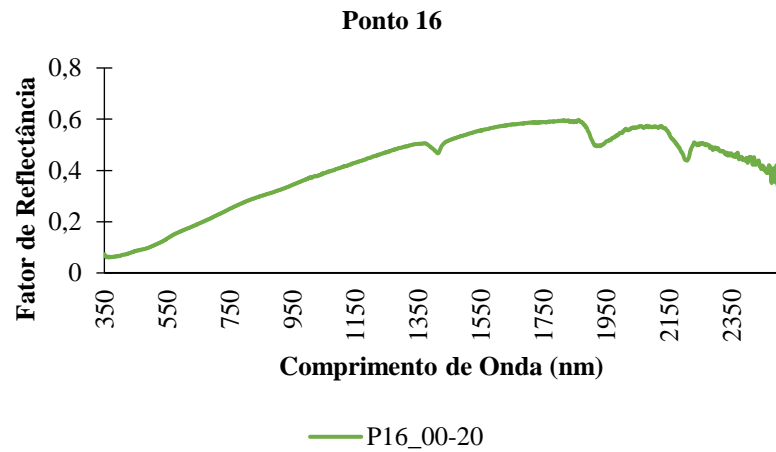
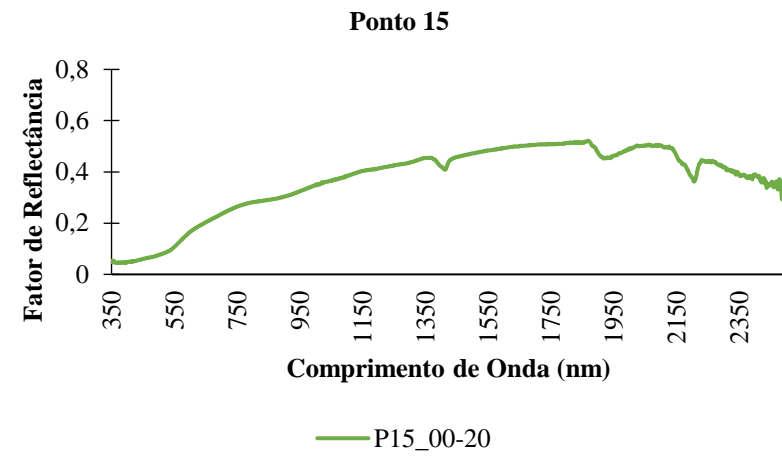
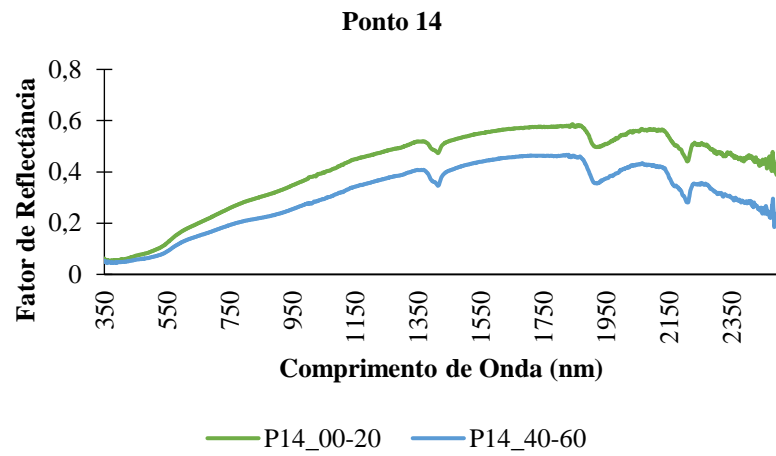
Fonte: Elaborado pelo autor.



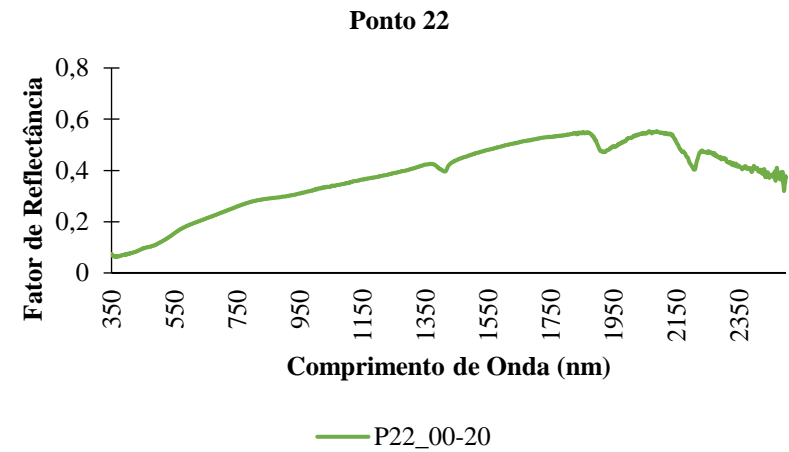
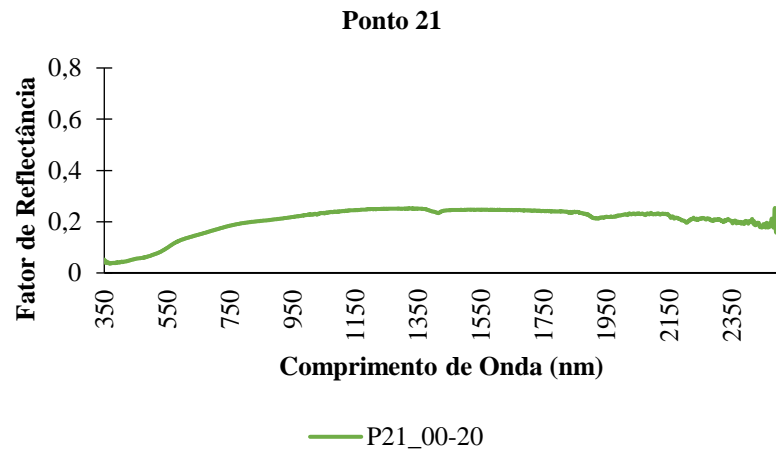
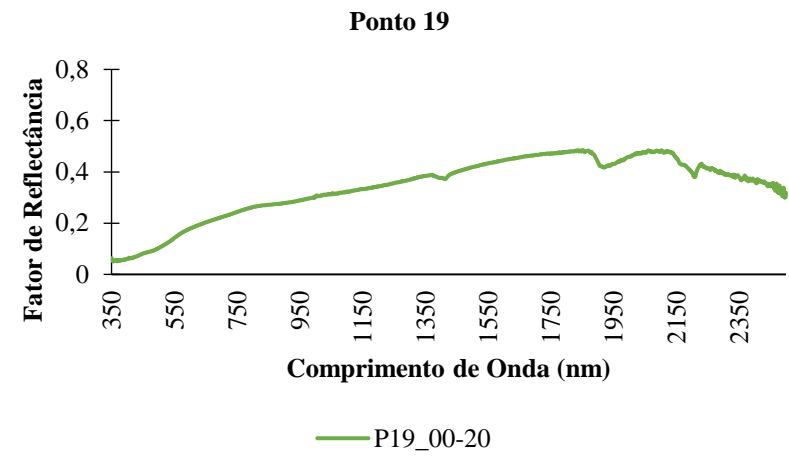
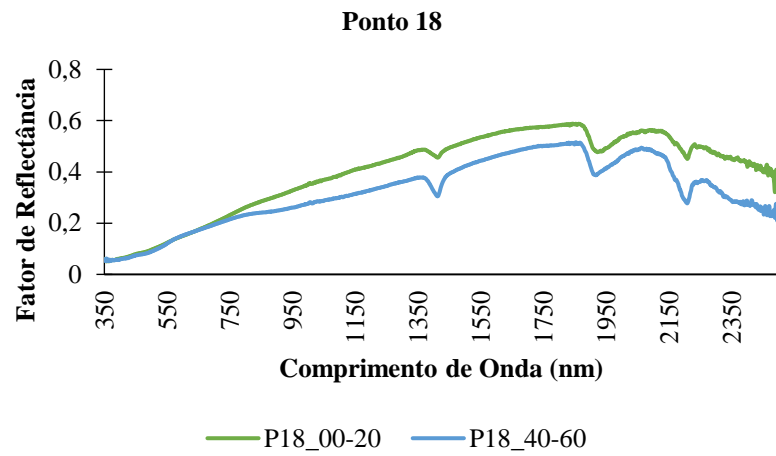
Fonte: Elaborado pelo autor.



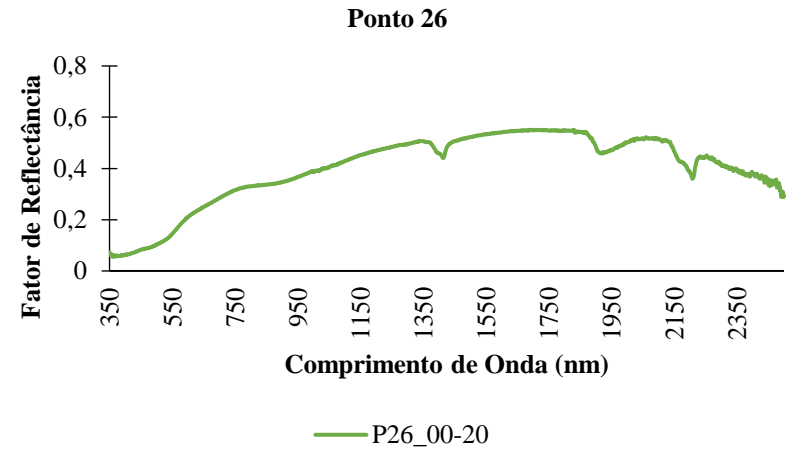
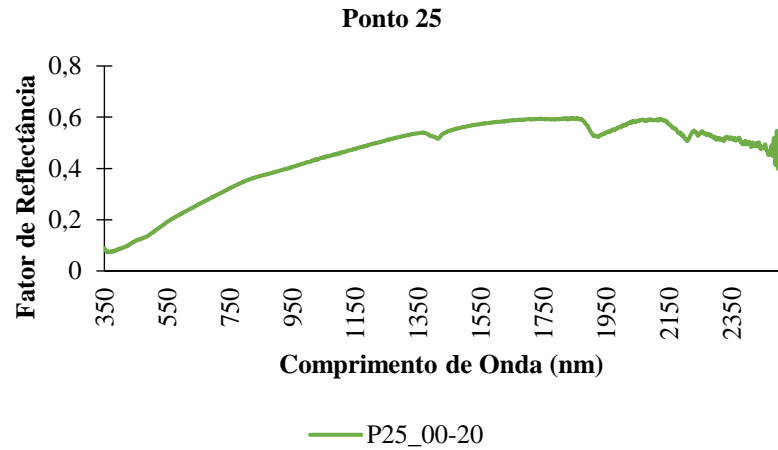
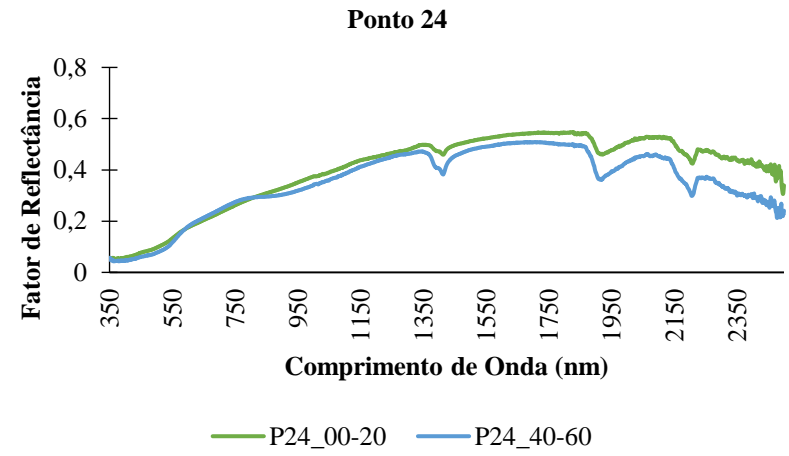
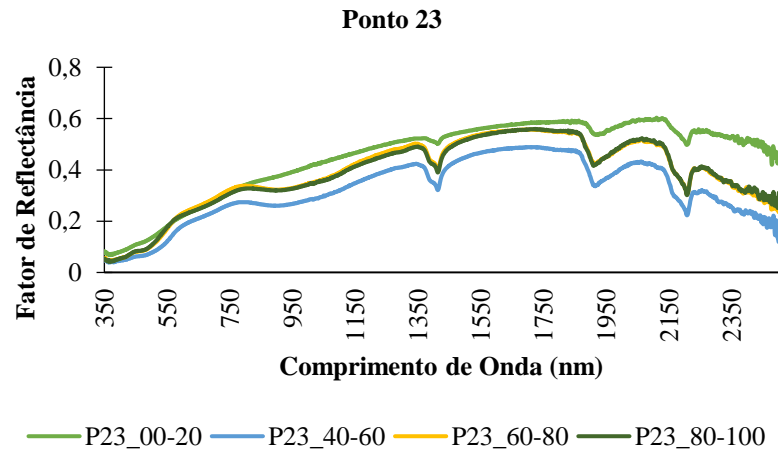
Fonte: Elaborado pelo autor.



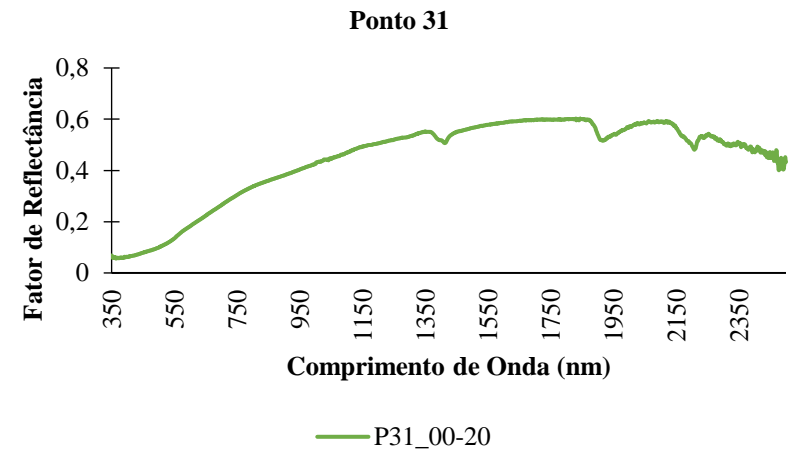
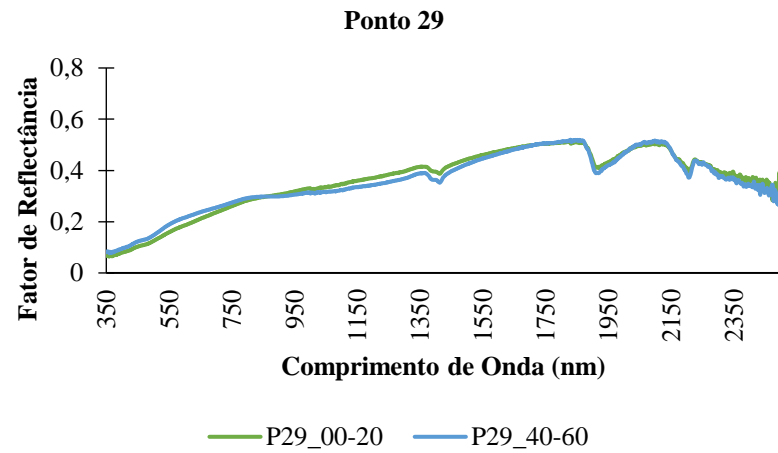
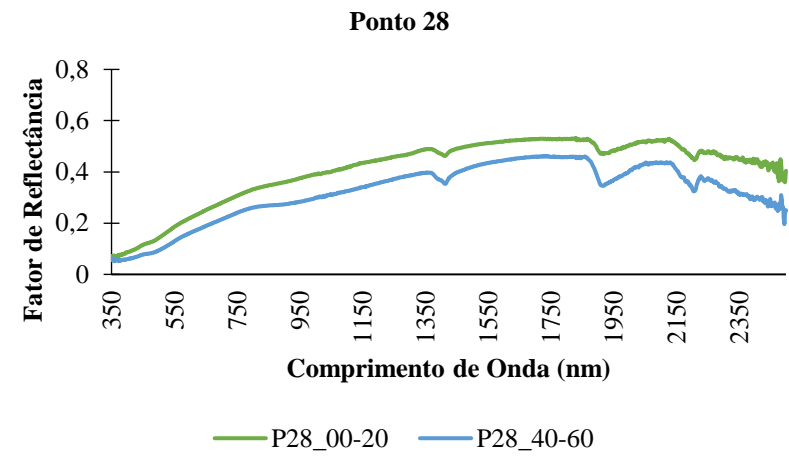
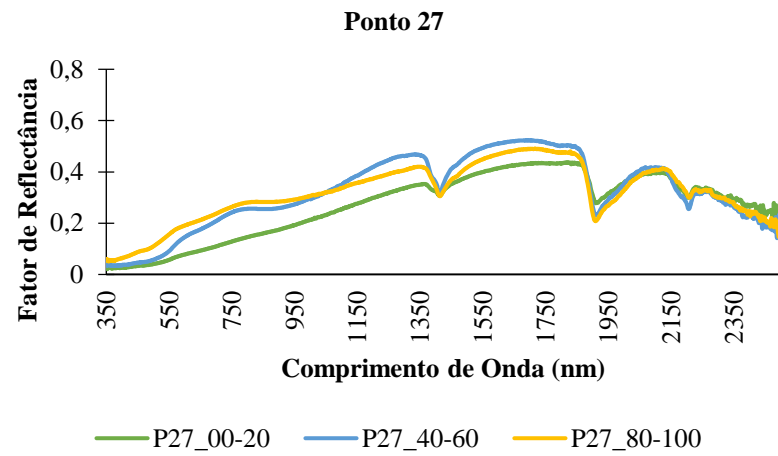
Fonte: Elaborado pelo autor.



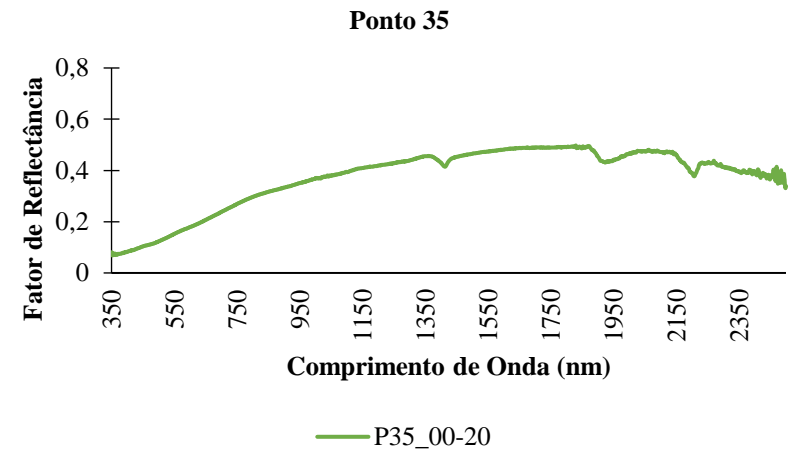
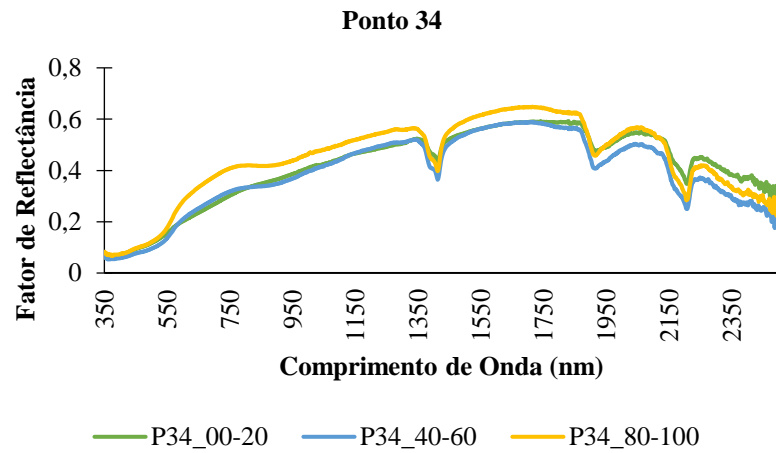
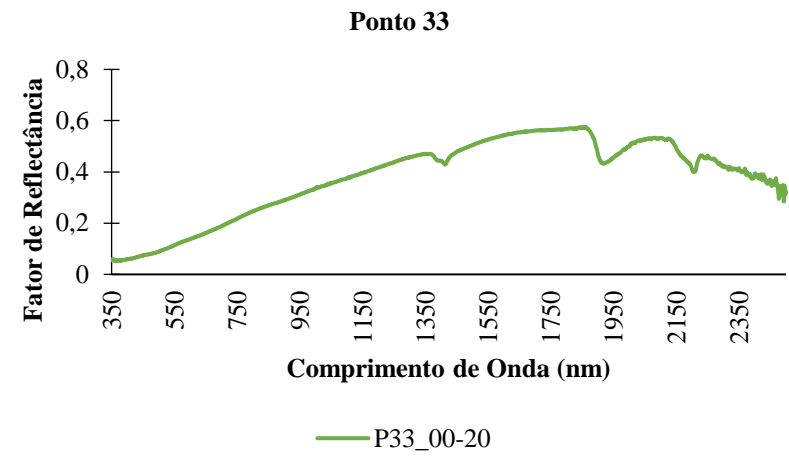
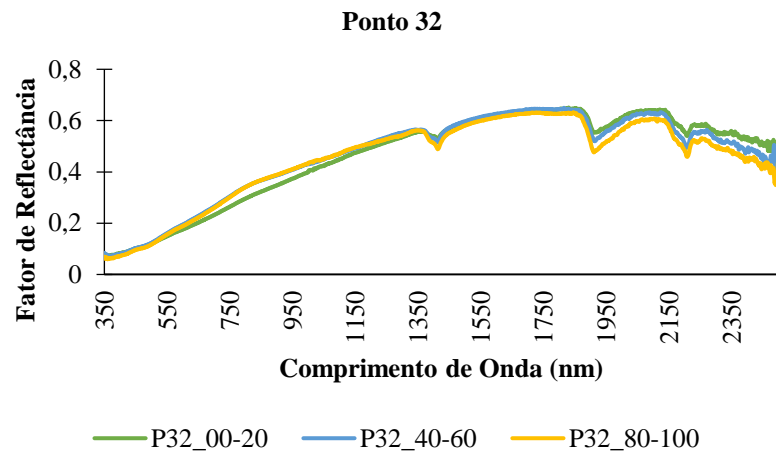
Fonte: Elaborado pelo autor.



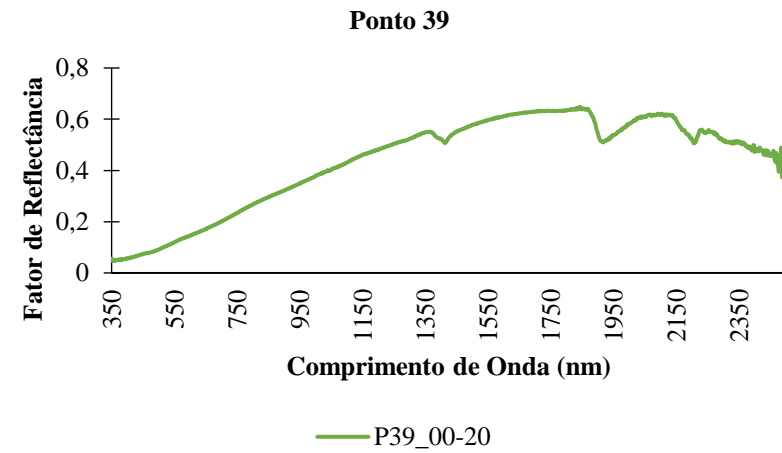
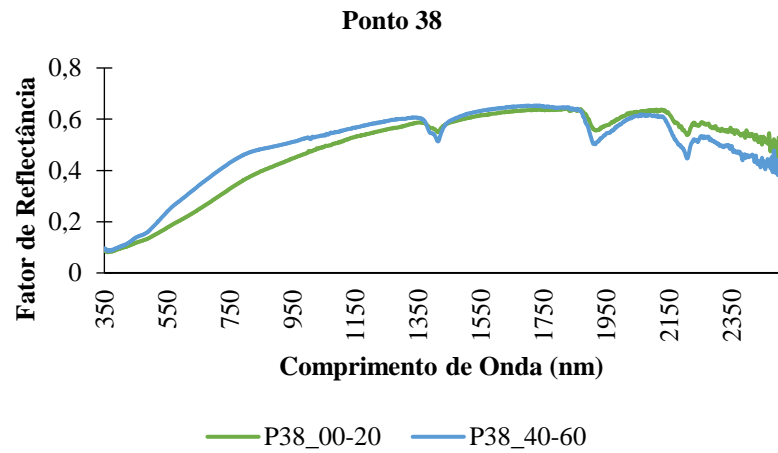
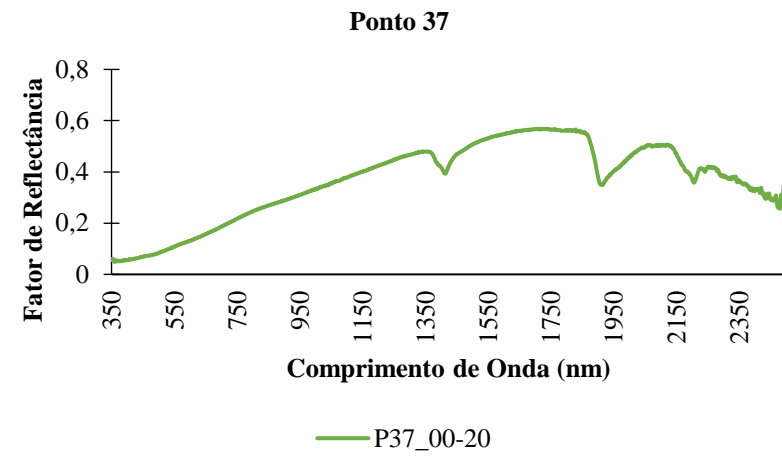
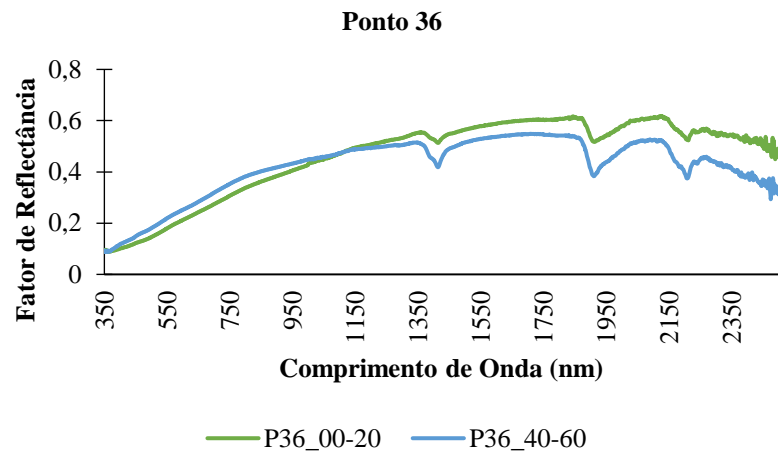
Fonte: Elaborado pelo autor.



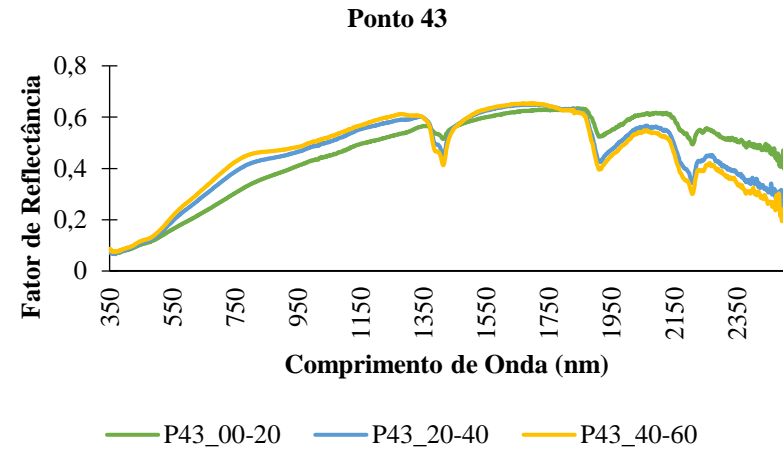
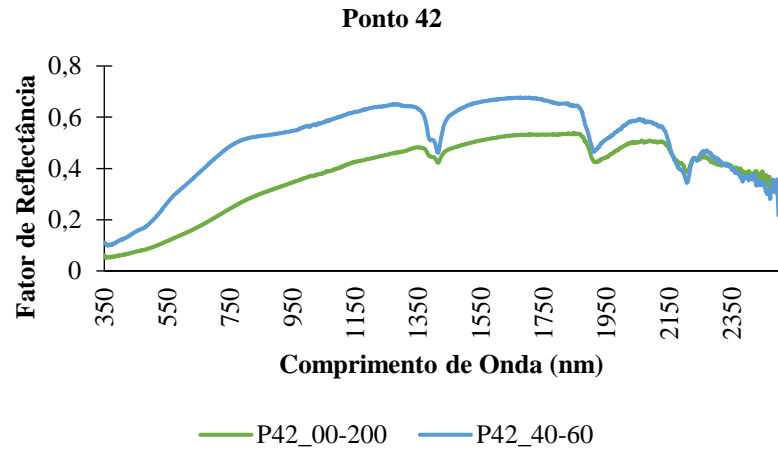
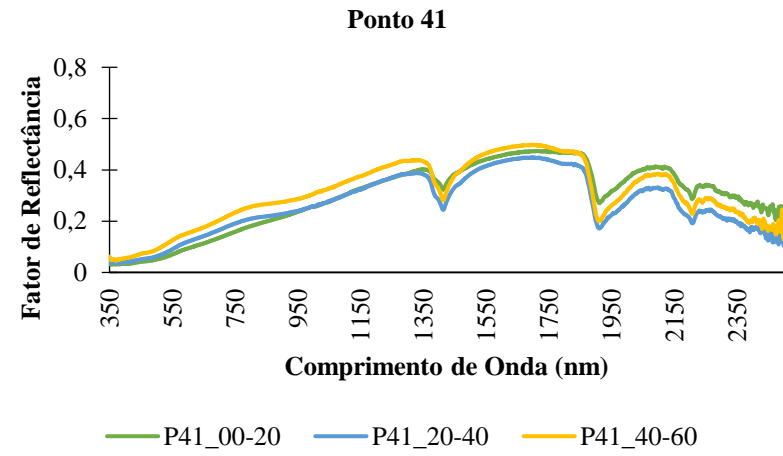
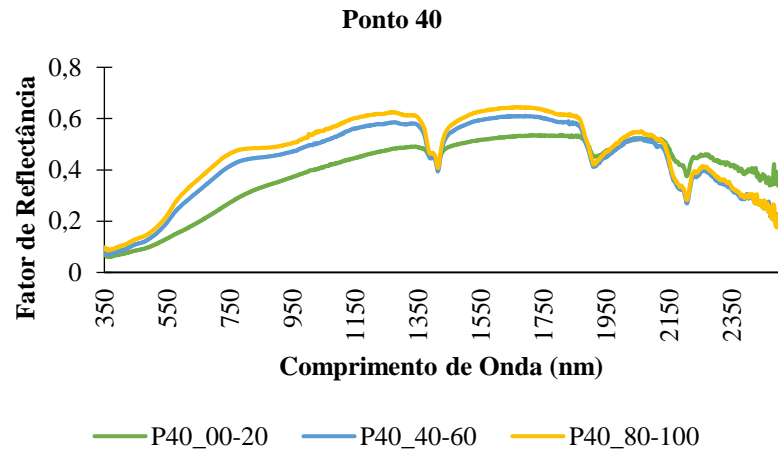
Fonte: Elaborado pelo autor.



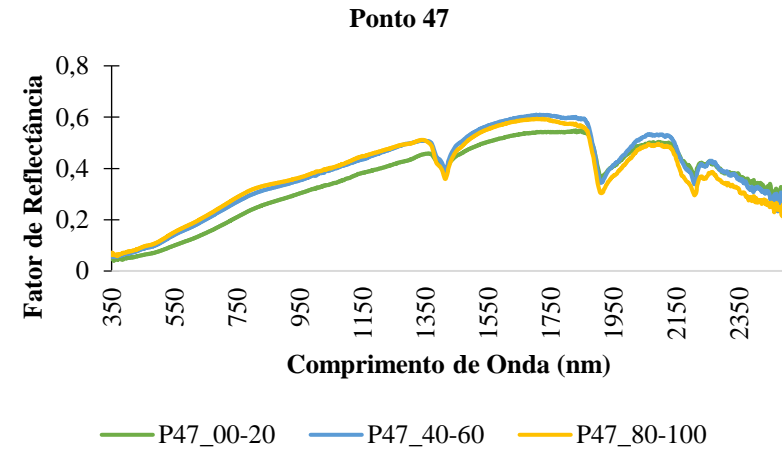
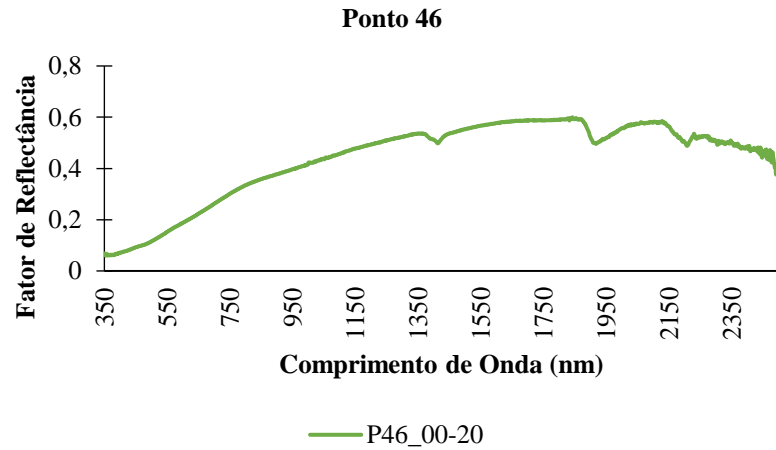
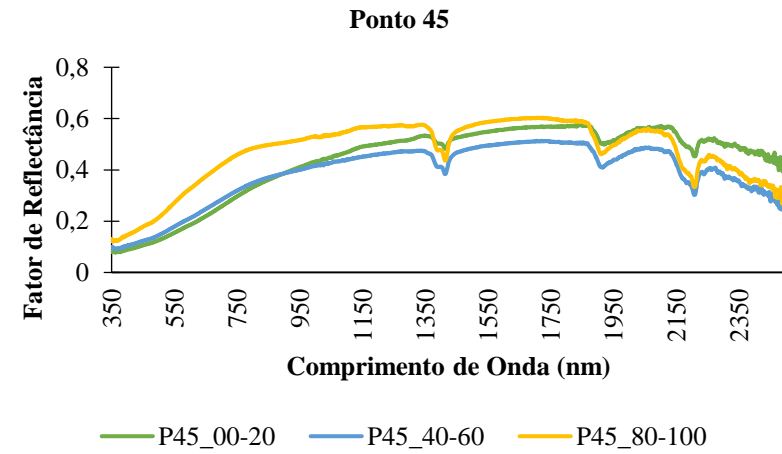
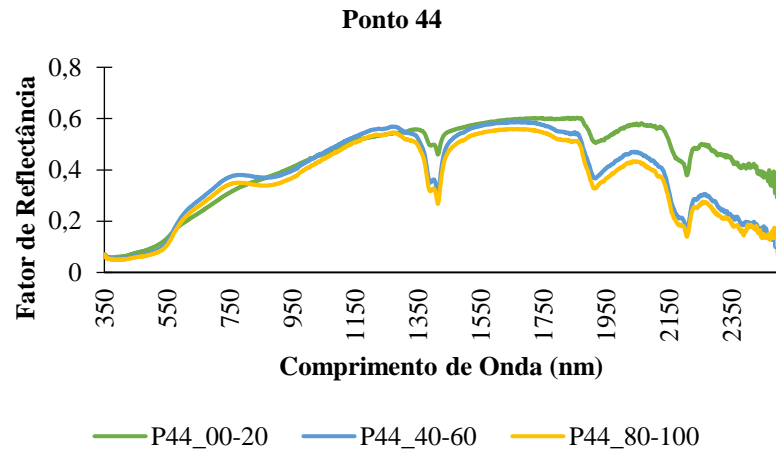
Fonte: Elaborado pelo autor.



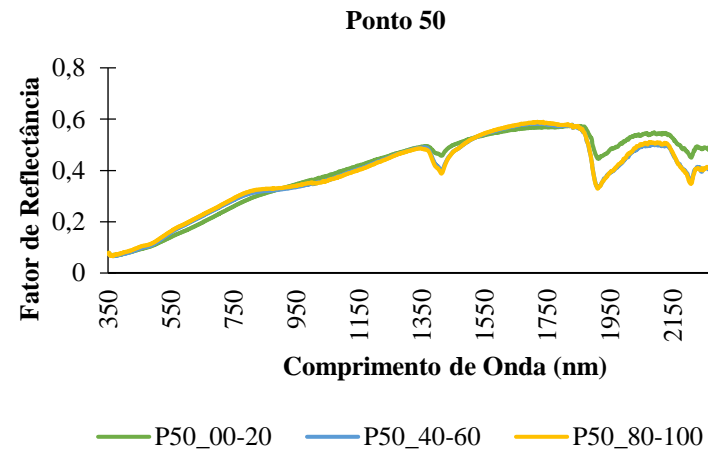
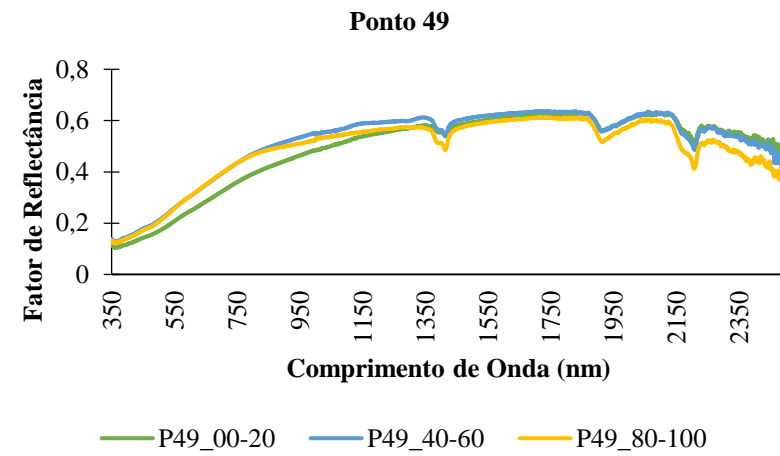
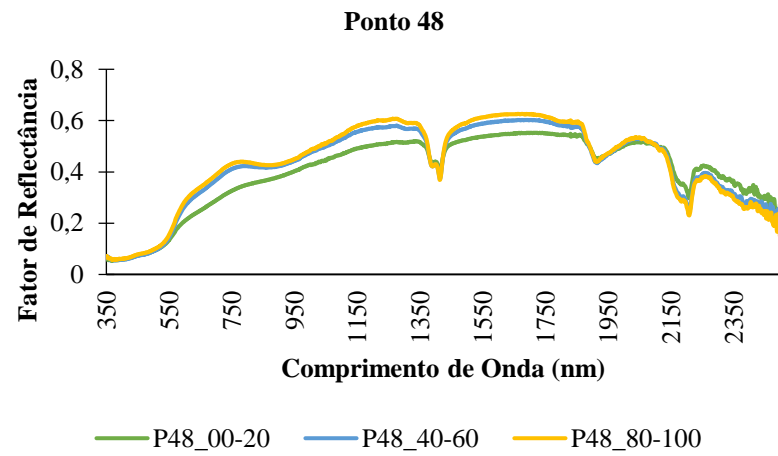
Fonte: Elaborado pelo autor.



Fonte: Elaborado pelo autor.



Fonte: Elaborado pelo autor.



Fonte: Elaborado pelo autor.