



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA – FAV**

**MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS DA MICROBACIA DO RIBEIRÃO EXTREMA, DF, A
PARTIR DE IMAGENS MULTITEMPORAIS ASTER E BIBLIOTECA ESPECTRAL**

JEAN DE JESUS NOVAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

**BRASÍLIA/DF
FEVEREIRO/2017**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS DA MICROBACIA DO RIBEIRÃO
EXTREMA, DF, A PARTIR DE IMAGENS MULTITEMPORAIS ASTER E BIBLIOTECA
ESPECTRAL**

JEAN DE JESUS NOVAIS

ORIENTADORA: MARILUSA PINTO COELHO LACERDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO: ____/2017

BRASÍLIA/DF
FEVEREIRO/2017



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS DA MICROBACIA DO RIBEIRÃO
EXTREMA, DF, A PARTIR DE IMAGENS MULTITEMPORAIS ASTER E
BIBLIOTECA ESPECTRAL**

JEAN DE JESUS NOVAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM AGRONOMIA.

APROVADO POR:

**MARILUSA PINTO COELHO LACERDA, Doutora, Professora Associada IV
(Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - Universidade de Brasília)
(ORIENTADORA) E-mail: marilusa@unb.br /CPF:**

**GUSTAVO MACEDO DE MELLO BAPTISTA, Doutor, Professor Adjunto IV
(Instituto de Geociências – Universidade de Brasília)
(EXAMINADOR EXTERNO) E-mail: gmbaptista@unb.br /CPF:**

**PAULO ROBERTO MENESES, Doutor, Professor Titular
(Instituto de Geociências – Universidade de Brasília)
(EXAMINADOR EXTERNO) E-mail: pmeneses@unb.br /CPF:**

BRASÍLIA/DF, 24 de FEVEREIRO de 2017.

FICHA CATALOGRÁFICA

Novais, Jean de Jesus

Mapeamento digital de solos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF, a partir de imagens multitemporais ASTER e Biblioteca Espectral / Jean de Jesus Novais; orientação de Marilusa Pinto Coelho Lacerda – Brasília, 2017.

211 p.: il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília/ Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2017.

1. Gênese dos solos. 2. Modelagem. 3. Sensoriamento remoto. 4. Espectroscopia de solos. 5. SIG. I. Lacerda, M.P.C. II. Pós Doutora.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NOVAIS, J. J. **Mapeamento digital de solos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF, a partir de imagens multitemporais ASTER e biblioteca espectral**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2017, 211 p. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Jean de Jesus Novais

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Mapeamento Digital de Solos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF, a partir de imagens multitemporais ASTER e Biblioteca Espectral.

GRAU: Mestre

ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Jean de Jesus Novais

CPF:

(77) 99942-2555

E-mail: jjnagron@gmail.com

*Este trabalho é dedicado à minha amada futura
esposa Neyara Macedo e aos meus pais Dudu
(in memorian) e Edite (in memorian).*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida e por preenchê-la de bênçãos.

À Universidade de Brasília (UnB), à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia pelo suporte dado durante o Mestrado.

Pela vida, carinho, perseverança, dedicação e fé; pelo exemplo de humildade e trabalho duro, agradeço aos meus verdadeiros e únicos pais, à minha mãe Edite (*in memoriam*) e meu pai Antoniel (*in memoriam*).

À minha nova família, pela atenção, carinho, compreensão, exemplo, incentivo e apoio em todos os momentos.

À minha eterna namorada, então noiva, e conseqüentemente, futura esposa Neyara Macedo pelo amor dedicado, pela paciência dispensada, pelo incentivo, pelas palavras de apoio, pela motivação, pelo auxílio nos trabalhos, por tudo que me faz feliz. Por existir em minha vida.

À Professora Dra. Marilusa, por direcionar meus estudos, pela solicitude, orientação, compreensão e amizade, simplesmente, minha eterna gratidão.

Ao Manuel e ao Raúl Poppiel, pela atenção, amizade e pelo auxílio nos trabalhos de campo e nas análises laboratoriais, pelo *know-how*. Também devo incluir toda a equipe do Laboratório de Geoprocessamento da FAV/UnB os chamados “Caça Barrancos”.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

LISTA DE ABREVIACOES

| | |
|-----------------|---|
| ASTER | — <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> |
| BES | — Biblioteca Espectral de Solos |
| CODEPLAN | — Companhia de Planejamento do Distrito Federal |
| CTC | — Capacidade de Troca Catiônica |
| CX | — Cambissolo Háplico |
| EMBRAPA | — Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| ENVI | — <i>Environment for Visualizing Images</i> |
| FF | — Plintossolo Pétrico |
| FLAASH | — <i>Fast Line of sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes</i> |
| FX | — Plintossolo Háplico |
| GPS | — <i>Global Position System</i> |
| GX | — Gleissolo Háplico |
| IBGE | — Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IC | — Imagem Composta |
| IS | — Imagem Simples |
| Landsat | — <i>Land Remote-Sensing Satellite System</i> |
| LV | — Latossolo Vermelho |
| LVA | — Latossolo Vermelho-Amarelo |
| MDS | — Mapeamento Digital de Solos |
| MDT | — Modelo Digital do Terreno |
| MESMA | — <i>Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis</i> |
| MNF | — <i>Minimum Noise Fraction</i> |
| MO | — Matéria Orgânica |
| NASA | — <i>National Aeronautics and Space Administration</i> |
| ND | — Número Digital |
| NDVI | — <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> |
| NIR | — <i>Near Infrared</i> |
| nm | — Nanômetro |
| OLI | — <i>Operational Land Imager</i> |
| OX | — Organossolo Háplico |

| | |
|--------------------|--|
| REM | — Radiação Eletromagnética |
| RMSE | — <i>Root Mean Square Error</i> |
| RQ | — Neossolo Quartzarênico |
| RR | — Neossolo Regolítico |
| SEMARH | — Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos |
| SIBCS | — Sistema Brasileiro de Classificação do Solo |
| SICAD | — Sistema Cartográfico do Distrito Federal |
| SIG | — Sistema de Informação Geográfica |
| SINDRI | — <i>Shortwave Infrared Normalized Difference Residue Index</i> |
| SIRGAS | — Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul |
| SMA | — <i>Spectral Mixture Analysis</i> |
| SWIR | — <i>Short Wave Infrared</i> |
| TFSA | — Terra Fina Seca ao Ar |
| TM | — <i>Thematic Mapper</i> |
| USGS | — <i>United States Geological Survey</i> |
| UTM | — Sistema Universal Transverso de Mercator |
| VIPER Tools | — <i>Visualization and Image Processing for Environmental Research Tools</i> |
| VNIR | — <i>Visible + Near Infra-red</i> |
| VIS | — <i>Visible</i> |

SUMÁRIO

CAPÍTULO GERAL

| | |
|--|----|
| I. INTRODUÇÃO GERAL | 19 |
| II. HIPÓTESE | 19 |
| III. OBJETIVO GERAL | 21 |
| III. 1. Objetivos específicos | 22 |
| IV. JUSTIFICATIVA | 23 |
| V. REFERENCIAL TEÓRICO | 25 |
| V.1. Conceito de solo | 25 |
| V.2. Classificação de solos | 25 |
| V.3. Relações Pedomorfogeológicas | 27 |
| V.4. Levantamento e mapeamento pedológico – Método tradicional | 30 |
| V.5. Mapeamento digital de solos | 36 |
| V.6. Sensoriamento remoto | 42 |
| V.6.1 Espectroscopia de reflectância dos solos | 42 |
| V.6.2. Comportamento espectral dos principais constituintes do solo | 45 |
| V.6.3. Bibliotecas espectrais de solos | 56 |
| V.6.4. Sistema sensor ASTER | 57 |
| V.6.4.1 Subsistemas | 59 |
| V.6.4.2. Aquisição dos produtos ASTER/TERRA | 59 |
| V.7. Sistemas de informação geográfica | 61 |
| V.7.1. SIG para produtos de Sensoriamento Remoto | 63 |
| VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 64 |
| CAPÍTULO ÚNICO - MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS DA MICROBACIA DO RIBEIRÃO EXTREMA, DF, A PARTIR DE IMAGENS MULTITEMPORAIS ASTER E BIBLIOTECA ESPECTRAL | 83 |
| I. INTRODUÇÃO | 87 |
| II. MATERIAL E MÉTODOS | 89 |
| II. 1 Revisão bibliográfica e levantamento de dados auxiliares | 89 |
| II.1.1 Localização | 89 |
| II.1.2 Características Socioeconômicas | 90 |
| II.1.3 Clima | 92 |
| II.1.4 Geologia | 94 |
| II.1.5 Geomorfologia | 96 |

| | |
|--|------------|
| II.1.6 Solos | 100 |
| II.2. Delimitação da Bacia do Ribeirão Extrema | 103 |
| II.3. Caracterização pedomorfogeológica e classes de solos representativas da microbacia do Ribeirão Extrema | 104 |
| II.3.1 Litotopossequências representativas da MBRJ | 105 |
| II.3.2 Litotopossequências representativas à noroeste (NOE) da MBRE | 106 |
| II.4. Obtenção de dados espectroscópicos das amostras de solos da microbacia do ribeirão Extrema | 109 |
| II.5. Elaboração da biblioteca espectral de solos da área de estudo | 111 |
| II.5.1. Caracterização morfológica das curvas espectrais | 111 |
| II.5.2. Organização dos espectros obtidos em laboratório | 114 |
| II.5.2.1. Compilação da Biblioteca espectral da MBRE | 116 |
| II.6 Processamento digital de imagens ASTER | 117 |
| II.6.1. Geração de imagens de solo exposto | 123 |
| II.6.2. Geração de imagem composta de solos expostos | 129 |
| II.7 Mapeamento espectral de solos da Bacia do Ribeirão Extrema | 131 |
| II.7.1 Modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Endmembers (MESMA) | 131 |
| II.7.2. Validação do mapeamento espectral de solos | 133 |
| II.8. Fluxograma geral da metodologia | 137 |
| III. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 138 |
| III.1. Classes de solos representativas e Biblioteca espectral de solos da microbacia do Ribeirão Extrema | 138 |
| III.1.1. Litotopossequências e classes de solos representativas da MBRJ similares às da MBRE | 139 |
| III.1.1.1 Atributos morfológicos físicos e químicos dos solos da MBRJ | 139 |
| III.1.1.2 Atributos morfológicos físicos e químicos dos solos da MBRE | 149 |
| III.1.1.3 Critério de diferenciação dentro das classes de solos representativos da MBRE | 152 |
| III.2. Atributos espectroscópicos | 153 |
| III.2.1 Curvas espectrais representativas das classes de solos da MBRE | 153 |
| III.2.2. Caracterização e agrupamento das curvas espectrais das classes de solos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF | 153 |
| III.2.2.1. Curvas espectrais dos solos representativos da MBRJ | 153 |
| III.2.2.2. Curvas espectrais dos solos representativos da porção Noroeste da MBRE | 165 |

| | |
|--|-----|
| III.2.2.3. Curvas espectrais da MBRJ..... | 167 |
| III.2.2.4. Curvas espectrais dos solos à Noroeste da MBRE | 172 |
| III.3 Biblioteca espectral dos solos representativos da microbacia do Ribeirão Extrema | 173 |
| III.3.1. Compatibilização dos dados espectrorradiométricos com dados orbitais ASTER..... | 175 |
| III.4. Imagem composta de solos expostos | 177 |
| III.5. Mapa digital de solos da Bacia do Ribeirão Extrema | 183 |
| III.5.1. Modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos <i>Endmembers</i> (MESMA)..... | 183 |
| III.6. CONCLUSÕES | 195 |
| IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 196 |

ÍNDICE DE TABELAS

CAPITULO GERAL

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Tipos de levantamentos pedológicos, escalas e número de observações por Km ² e por ha | 34 |
| Tabela 2 – Detalhamento dos fatores preditores da função do solo no MDS | 39 |
| Tabela 3 – Características do sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) | 58 |
| Tabela 4 – Dados da produção e área destinada da atividade agropecuária das Regiões Administrativas Paranoá e Planaltina no Distrito Federal do ano 2015 | 91 |
| Tabela 5 – Efetivo Rebanho Bovino, Produção de Carne e Leite, das Regiões Administrativas do Distrito Federal Planaltina e Paranoá – 2015 | 91 |
| Tabela 6 – Distribuição das classes de declividade para a bacia hidrográfica do Ribeirão Extrema | 99 |
| Tabela 7 – Intervalos espectrais das bandas do ASTER utilizadas neste estudo... | 116 |
| Tabela 8 – Série histórica de imagens ASTER da área de estudo | 119 |
| Tabela 9 – Coeficientes de conversão já calculados | 120 |
| Tabela 10 – Classificação da acurácia de mapeamentos mediante valores do coeficiente <i>Kappa</i> | 135 |
| Tabela 11 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência 1 – Estanislau | 142 |
| Tabela 12 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência 2 – Alto Rio Jardim | 143 |
| Tabela 13 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência 3 – São Gonçalo | 145 |
| Tabela 14 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência 4 – Barra Alta..... | 146 |
| Tabela 15 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência 5 – Cariru..... | 147 |
| Tabela 16 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência 6 – Fazenda Ibi-Atã | 148 |
| Tabela 17 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência à noroeste da MBRE – NOE-1..... | 150 |
| Tabela 18 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência à noroeste da MBRE – NOE-2..... | 151 |
| Tabela 19 – Principais atributos responsáveis pelo agrupamento de classes de solos | 174 |
| Tabela 20 – Área composta por solo exposto em cada imagem ASTER da série histórica estudada da microbacia do Ribeirão Extrema, DF | 178 |
| Tabela 21 – Área das classes de solos de ocorrência no o mapa digital da microbacia do Ribeirão Extrema DF..... | 189 |
| Tabela 22 – Matriz de erros entre a verdade de campo e o mapeamento digital de solos da Microbacia do Ribeirão Extrema, DF, obtido pela metodologia MESMA .. | 194 |

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO GERAL

| | |
|---|-----|
| Figura 1 – Influência dos óxidos de ferro no comportamento espectral do solo..... | 49 |
| Figura 2 – Influência da matéria orgânica no comportamento espectral do solo. | 50 |
| Figura 3 – Espectros de reflectância da caulinita ($Al_2SiO_5(OH)_4$) e da montmorilonita ($(Al, Mg)^2 - 3 Si_4O_{10} (OH)_2 \cdot nH_2O$) com particularidades | 53 |
| Figura 4 – Reflectância espectral Argic Aridisol com diferentes níveis de umidade. Umidade estimada com base em medições de massa e é expressa em termos de volume relativo..... | 55 |
| Figura 5 – Comparação de Bandas Espectrais entre ASTER and Landsat-7 Thematic Mapper e Landsat-8 – OLI | 61 |
| Figura 6 – Arquitetura de sistemas de informação geográfica..... | 62 |
| Figura 7 – Mapa de localização da área de estudo, microbacia do Ribeirão Extrema, em relação ao Distrito Federal | 90 |
| Figura 8 – a) Média anual da precipitação (mm) segundo os decêndios, no período de 1974 a 2003. b) Média mensal da precipitação pluviométrica (mm) decendial para o período de 1974 a 2003..... | 93 |
| Figura 9 – Mapa geológico da microbacia do Ribeirão Extrema..... | 95 |
| Figura 10 – Mapa geomorfológico da Bacia do Ribeirão Extrema..... | 97 |
| Figura 11 – Mapa de classes de declividade da Bacia do Ribeirão Extrema..... | 99 |
| Figura 12 – Mapa de solos da Microacia do Ribeirão Extrema..... | 102 |
| Figura 13 – Localização das lito-topossequências da Bacia do Rio Jardim, DF | 106 |
| Figura 14 – Localização das Litotopossequências representativas à noroeste (NO) da MBRE | 107 |
| Figura 15 – Fotografia esquemática de um espectrorradiômetro em condições de laboratório..... | 111 |
| Figura 16 – Tipos de curvas espectrais determinadas por (I) Stoner e Baungarnder (1981) e (II) Formaggio et al. (1996) | 112 |
| Figura 17 – Aspectos da avaliação qualitativa das curvas espectrais de perfis de solo | 113 |
| Figura 18 – Aspectos da avaliação qualitativa das curvas espectrais de perfis de solo | 113 |
| Figura 19 – Aspectos da avaliação qualitativa das curvas espectrais de perfis de solo | 114 |
| Figura 20 – Agrupamento de espectros por classe: curvas espectrais de uma mesma classe de solo (a) e curvas espectrais médias de cada agrupamento (b)..... | 115 |
| Figura 21 – Etapas da geração da Biblioteca Espectral dos Solos da MBRE, reamostrada para as bandas do sensor ASTER | 117 |
| Figura 22 – Comportamento espectral dos principais alvos: água limpa, vegetação sadia e solo exposto seco, com as posições relativas das bandas espectrais VNIR e SWIR do sensor ASTER | 124 |

| | |
|---|-----|
| Figura 23 – Diagrama de dispersão bidimensional, elaborado no programa ENVI, representando a linha do solo (linha pontilhada) por meio da contraposição da banda B-2 – Visível (VIS) - vermelho e a banda B-3N - Infravermelho Próximo (NIR) da imagem ASTER 2006 | 125 |
| Figura 24 – Fragmento da imagem ASTER de 2006 utilizada no estudo e a correspondente máscara aplicada | 128 |
| Figura 25 – Fluxograma da metodologia utilizada para gerar a imagem composta de solos expostos | 130 |
| Figura 26 – Fluxograma Geral da metodologia adotada neste trabalho | 137 |
| Figura 27 – Classes texturais dos solos e valores dos limites das frações granulométricas | 152 |
| Figura 28 – Espectros médios representativos dos Latossolos Vermelhos (LV) estudados na microbacia do Ribeirão Extrema, DF | 155 |
| Figura 29 – Espectro médio representativo de Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) estudados na microbacia do Ribeirão Extrema, DF | 157 |
| Figura 30 – Espectros representativos de Plintossolos Pétricos Concrecionários (FFc) estudados | 159 |
| Figura 31 – Espectro representativo de Plintossolo Háplico (FX) estudado da microbacia do Ribeirão Extrema, DF | 160 |
| Figura 32 – Espectros representativos de Neossolos Regolíticos (RR) estudados da microbacia do Ribeirão Extrema, DF | 161 |
| Figura 33 – Espectro representativo de Cambissolo Háplico (CX) estudado na microbacia do Ribeirão Extrema, DF | 162 |
| Figura 34 – Espectro representativo de Gleissolo Háplico (GX) estudado da microbacia do Ribeirão Extrema, DF | 163 |
| Figura 35 – Espectro representativo de Organossolo Háplico (OX) estudado na microbacia do Ribeirão Extrema, DF | 164 |
| Figura 36 – Espectros médios de Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) estudados na Bacia do Ribeirão Extrema, DF | 166 |
| Figura 37 – Espectros de Neossolos Quartzarênico (RQ) estudados da Bacia do Ribeirão Extrema, DF | 167 |
| Figura 38 – Curvas espectrais dos Latossolos Vermelhos - LV representativos da MBRJ | 168 |
| Figura 39 – Curvas espectrais dos Latossolos Vermelho-Amarelos – LVA representativos da MBRJ | 168 |
| Figura 40 – Curvas espectrais Plintossolos Pétricos concrecionários – FFc representativos da MBRJ | 169 |
| Figura 41 – Curvas espectrais Neossolos Regolíticos – RR representativos da MBRJ | 169 |
| Figura 42 – Curvas espectrais Cambissolos Háplicos – CX representativos da MBRJ | 170 |
| Figura 43 – Curvas espectrais Cambissolos Háplicos – CX representativos da MBRJ | 170 |

| | |
|--|-----|
| Figura 44 – Curvas espectrais Gleissolos Háplicos – GX representativos da MBRJ | 171 |
| Figura 45 – Curva espectral do Organossolos Háplico – OX representativo da MBRJ | 171 |
| Figura 46 – Curvas espectrais dos Latossolos Vermelho-Amarelos LVA-fa representativos da porção Noroeste da MBRE | 172 |
| Figura 47 – Curvas espectrais dos Neossolo Quartzarênico – RQ representativos da porção Noroeste da MBRE | 173 |
| Figura 48 – Biblioteca espectral dos solos estudados da microbacia do Ribeirão Extrema, DF..... | 174 |
| Figura 49 – Comparação das curvas derivadas do sensoriamento remoto terrestre (Fieldspec Pro) em relação à a mesma curva reamostrada para o sensor ASTER | 175 |
| Figura 50 – Biblioteca espectral dos solos estudados, com curvas espectrais reamostradas em: intervalos espectrais das bandas do sensor ASTER (μm) (a) e na faixa de comprimento de onda de 0,35 a 2,35 μm (b) | 176 |
| Figura 51 – Imagem Composta de Solos Expostos da bacia do Ribeirão Extrema nas bandas nas composições coloridas 4R3G2B (a) e 6R3G4B (b) | 177 |
| Figura 52 – Espectros coletados da Imagem Composta de solos expostos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF. a) Amostra por banda em imagens ASTER/TERRA, b) Amostras por comprimento de onda (μm) | 180 |
| Figura 53 – Linha do solo obtida da Imagem Composta de solos expostos da área de estudo, contrapondo valores de reflectância da banda B-2 (VIS) e da banda B-3N (NIR) | 181 |
| Figura 54 – Imagem composta com solo exposto (IC) com fragmentos de áreas vegetadas em 2001 (ASTER – 2001) correspondentes a IC..... | 182 |
| Figura 55 – Imagens obtidas mediante aplicação do modelo MESMA a partir da IC de solos expostos da Microbacia do Ribeirão Extrema e os endmembers representativos das classes de solo de ocorrência na bacia, extraídos da biblioteca espectral de solos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF. Imagem fração FF-II (a), imagem erro do modelo (b), imagem de modelos de mistura (c) e imagem suavizada com filtro de mediana de tamanho 5x5 (d) | 185 |
| Figura 56 – Valores da imagem de fração (a) e da imagem do erro médio quadrático (b) | 186 |
| Figura 57 – a) Imagem fração com pixels da classe LVA-I com os maiores valores fração e LV-I com menores. b) Imagem erro indicando pixels das classes FX e FF modelados com os maiores e menores valores de erro respectivamente | 187 |
| Figura 58 – Mapa digital espectral de solos expostos da Microbacia do Ribeirão Extrema, DF..... | 188 |

Mapeamento digital de solos da microbacia do ribeirão Extrema, DF, a partir de imagens multitemporais ASTER e biblioteca espectral

RESUMO GERAL

O aumento populacional e das práticas agrícolas, cada vez mais intensivas, faz crescer a necessidade de levantamentos de solos mais detalhados no Brasil e no mundo, visando o melhor planejamento e monitoramento da exploração dos recursos naturais, a fim de se reduzir os impactos ambientais produzidos pelas diversas atividades desenvolvidas. No Brasil, entre os anos 1970 e 1980, os levantamentos de solos tiveram maior ênfase, porém, dada às limitações metodológicas da época, foram elaborados em escalas de pouco detalhamento. Deste então, novas técnicas vêm sendo desenvolvidas para potencializar as atividades de mapeamentos pedológicos convencionais. Metodologias envolvendo sensoriamento remoto e técnicas quantitativas para predição da distribuição espacial das classes pedológicas, bem como de seus atributos, têm colocado o mapeamento digital de solos em posição de destaque na realização desta atividade. A principal fonte de informações pedológicas do Distrito Federal (DF) foi elaborada em escala de 1:100.000, pela Embrapa em 1978. Diante das dificuldades apresentadas por material cartográfico realizados em escalas menores, o qual a escassez de detalhes provoca generalizações indevidas sobre a utilização dos solos da região, levantamentos de solos com maior riqueza de informações são imprescindíveis. Este panorama reflete o objetivo geral deste trabalho, que foi mapear classes de solos da microbacia do Ribeirão Extrema (MBRE), no DF, por meio de técnicas de sensoriamento remoto, por meio de extrapolação de biblioteca espectral de solos (BES) disponível em uma microbacia contígua à proposta para esse estudo. Atividades de campo permitiram a avaliação da distribuição dos solos, por meio de relações pedomorfogeológicas, na microbacia detentora da biblioteca espectral de solos e da microbacia deste estudo. Em função da semelhança das feições geomorfológicas e ocorrência de unidades geológicas, a distribuição de solos da MBRE foi considerada muito similar à da microbacia com BES. Análises morfológicas, físicas, químicas e espectroscópicas foram realizadas para as classes de solos de ocorrência em ambas as microbacias e somadas às demais classes de ocorrência restrita na MBRE. As curvas espectrais foram associadas gerando a BES

da MBRE, DF. Para o mapeamento digital dos solos foi utilizada uma imagem composta elaborada a partir das imagens do sensor ASTER de solos expostos de uma série multitemporal entre anos 2001, 2004 e 2006. Mediante a utilização do algoritmo Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis – MESMA, a Biblioteca Espectral gerada, juntamente com a imagem composta dos solos expostos da área estudada, foi submetida à processamentos digitais com utilização de técnicas de análises espectrais, gerando-se o mapa digital de solos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF, o qual foi avaliado pelo índice *Kappa* como de boa qualidade.

Palavras Chaves: Relações pedogeomorfológicas, Sensoriamento Remoto, Espectroscopia de solos, Sistema de Informações Geográficas.

Digital soil mapping of the ribeirão Extrema watershed, Distrito Federal, from multitemporal ASTER images and spectral library

GENERAL ABSTRACT

The increase of the population and the intensive agricultural practices driving the need for more detailed soil surveys around the world. Thus, the exploitation of natural resources can be better planned and monitored in order to reduce the environmental impacts produced by several activities carried out. In the 70s and 80s in Brazil, soil surveys were more emphasized, however, they were elaborated in scales insufficiently detailed because of the technological limitations of that time. Since then, new techniques have been developed to maximize the activities of mappings by conventional techniques. Methodologies involving remote sensing and quantitative techniques to predict the spatial distribution of the pedological classes, such as their attributes, have placed the digital mapping of soils in an outstanding position from the use of other techniques. The main source of pedological information of the Distrito Federal (DF) was elaborated on a scale of 1: 100,000. In face of the difficulties presented by cartographic material in smaller scales, where the scarcity of details causes undue generalizations about the use of the soils of the region, surveys of soils with greater wealth of information are essential. This panorama reflects the main objective of this study that was to map soil classes in the watershed of Ribeirão Extrema, Distrito Federal (DF), through remote sensing techniques. Using soil classification and establishment of pedogeomorphological relations of a contiguous watershed associated to distinct soils from the studied watershed, the soils representative of that region were chosen. Morphological, physical, chemical and spectroscopic analyzes were performed for the soil classes of occurrence in both watershed and added to the other classes of restricted occurrence in the MBRE. The spectral curves were associated generating BES of MBRE, DF. For the digital mapping of the soils, a composite image elaborated from the ASTER sensor images of exposed soils of a multitemporal series between years 2001, 2004 and 2006 was used. Using the Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) algorithm, the Spectral Library Generated, together with the composite image of the exposed soils of the studied area, was submitted to digital processing using spectral analysis techniques, generating the digital map of soils of the Ribeirão Extrema watershed, DF. In the evaluation of the kappa index, the soil map was considered of good quality.

Key words: Pedogeomorphological relations, Remote Sensing, Soil Spectroscopy, Geographic Information System.

I. INTRODUÇÃO GERAL

Levantamentos e mapeamentos de solos representam uma fonte obrigatória de informações para os planejamentos do uso das terras (SANTOS *et al.*, 2015). No entanto, mapeamentos de solos em escalas mais detalhadas são mundialmente escassos, principalmente nos países em desenvolvimento, devido a morosidade com que são produzidos e as despesas exigidas pelas técnicas convencionais de levantamento e mapeamento de solos. Além disso, mapas de solo analógicos obtidos a partir desses procedimentos não conseguem explicitar muitos dos elementos que podem estar interagindo com o solo (TEN CATEN *et al.*, 2012). Antes do advento da rede mundial de comunicação e das geotecnologias para o mapeamento de solo, as informações relacionadas à distribuição das classes de solo na paisagem juntamente com seus respectivos fatores de formação, que norteiam o trabalho de mapeamento, ficavam restritas aos pedólogos responsáveis (McBRATNEY; VOLTZ, 2007). Tais informações auxiliam subseqüentes processos de planejamentos do uso das terras (Embrapa, 1995).

O panorama atual acerca do mapeamento de solos do Brasil expõe a carência de mapeamentos mais detalhados, de maneira que os estados brasileiros contam, na sua maioria, com mapas de reconhecimentos de solos com escalas de cerca de 1:500.000, como os mapas de Zoneamento Agroecológico e de Aptidão Agrícola; ou exploratórios, com escalas cartográficas menores ou iguais a 1:1.000.000, originados pelo Projeto RADAMBRASIL (BRASIL, 1973-1986). Dessa forma, poucas porções do território brasileiro apresentam mapas semidetalhados, com escalas maiores que 1:100.000, e detalhados, maiores que 1:20.000 (MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2006).

Para superar essas limitações, a associação de técnicas tradicionais de levantamentos pedológicos com as novas tecnologias de Mapeamento Digital de Solos (MDS) podem otimizar o processo global de mapeamento, tornando o processo mais quantitativo e possibilitando menor número de análises laboratoriais (LAGACHERIE e McBRATNEY, 2007). Porém, há a necessidade de que os solos estejam descritos em um sistema de classificação oficial para que possam ser reconhecidos por toda a comunidade, sendo ela científica ou não. Os critérios utilizados para a classificação dos solos estão relacionados às características e

propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, consideradas importantes para a interpretação de seu uso agrícola e não agrícola (Embrapa, 2014).

Assim, o advento das geotecnologias proporcionou uma revolução nesse processo no qual o sensoriamento remoto, tal como descrito por Novo (2008), mediante a utilização de modernos sensores, aeronaves, espaçonaves, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre, por meio do registro e análise das interações entre a Radiação Eletromagnética (REM) e os materiais existentes na superfície terrestre, em suas mais diversas manifestações. Além disso, associa-se a utilização crescente dos Sistemas de Informação Geográficas, que integram programas, equipamentos, metodologias, dados e pessoas (usuário) e tornam possível a coleta, o armazenamento, o processamento e a análise de dados georreferenciados, bem como a produção de informação acerca do objeto de estudo (TEIXEIRA, 1995). Essa associação de geotecnologias em mapeamentos pedológicos foi demonstrada em estudos de Teramoto *et al.*, 2001; Motta *et al.*, 2002; Ippoliti *et al.*, 2005; Campos *et al.*, 2006; Lacerda *et al.*, 2008; Lacerda *et al.* (2009) e Barbosa *et al.* (2010), Fiorio *et al.*, 2010; Nawar *et al.*, 2015; Demattê *et al.*, 2016), entre vários outros), que reforçaram as prerrogativas da utilização dessas técnicas em representar a amplitude da ocorrência de cada classe de solo, possibilitando, ainda, construir relações entre os fatores intrínsecos da pedogênese facilitando seu entendimento e consequentemente, sua classificação e mapeamento.

A microbacia Hidrográfica do Ribeirão Extrema (MBRE) é parte integrante da mesobacia Hidrográfica do Rio Preto, na porção leste do Distrito Federal (DF). É considerada uma importante fronteira agrícola da região, sendo responsável por deter maior parte da produção de grãos da região, além de contribuir com parte da produção de hortaliças, frutas, e produção de pescados, carnes ovina, bovina e de aves e leite, além de caprinos e suínos em menor expressão no Distrito Federal (Emater, 2015). O DF conta com um trabalho de mapeamento de solos na escala de 1:100.000 realizado pela Embrapa em 1978 (Embrapa, 1978). Neste contexto a pesquisa e desenvolvimento de material cartográfico que visem minimizar as limitações apresentadas por técnicas convencionais de mapeamento pedológico é muito importante para o manejo e conservação com vistas aos princípios da sustentabilidade.

O MDS realizado por meio de espectroscopia de reflectância dos solos no visível (0,35-0,76 μm) – infravermelho próximo (0,76-1,2 μm) – infravermelho de ondas curtas (1,2-2,5 μm) possuem um grande potencial em relação à identificação e individualização de classes e atributos do solo, pois, são capazes de analisar simultaneamente múltiplos componentes de um determinado material que interferem na resposta espectral deste, conferindo a estas técnicas celeridade nos processos de mapeamento pedológico, além de redução na quantidade amostras utilizadas e consequentemente no uso de reagentes para análises. Estes fatores resultam numa redução considerável nos custos envolvidos nas atividades de levantamento e mapeamento de solos em relação às técnicas convencionais (CHANG *et al.*, 2001; McBRATNEY *et al.*, 2003; MADEIRA NETTO, 2007).

Diante deste cenário, o presente trabalho objetivou realizar o mapeamento digital dos solos da MBRE, DF, a partir de imagens multitemporais do sensor ASTER e biblioteca espectral representativa da ocorrência das classes de solos. Objetivou, ainda, investigar a possibilidade e a eficiência de utilização e extrapolação de biblioteca espectral de solos elaborada em outras áreas com relações pedomorfogeológicas e distribuição de solos similares.

II. HIPÓTESE

O embasamento hipotético deste trabalho refere-se a ideia de que a partir da extração de feições de solo constantes em uma série histórica de cenas do sensor ASTER, com sua posterior sobreposição, as áreas contendo solos expostos são acrescidas devido a dinâmica do uso e ocupação destes ao longo do tempo. Uma área de dimensões expressivas de solos expostos possui capacidade de expressar a distribuição espacial das classes de solos a partir das variações espectrais inerentes a cada classe de solo, com possibilidades de representar as principais classes de solos de ocorrência na MBRE - DF. A extrapolação dos dados de biblioteca espectral de solos (BES) elaborada em uma microbacia contígua apresentando semelhanças fisiográficas e geológicas, assim como as relações pedomorfogeológicas e a distribuição das principais classes de solos de ocorrência da microbacia em estudo com associação de curvas espectrais de classes de solos de ocorrência restrita na área investigada, irá gerar a BES da microbacia de estudo. Essa BES possibilitará a

individualização das classes de solos em um microbacia semelhante por meio de processamento espectral utilizando a BES e a imagem composta de solos expostos do sensor ASTER geradas. Se a metodologia apresentar boa eficiência no MDS, poderá ser extrapolada para todo o DF.

III. OBJETIVO GERAL

Realizar o mapeamento digital e espectral dos solos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF, a partir de imagens multitemporais do sensor ASTER e biblioteca espectral representativa da ocorrência das classes de solos. Objetiva-se, ainda, investigar a possibilidade e a eficiência de utilização e extrapolação de biblioteca espectral de solos elaborada em outras áreas com relações pedomorfogeológicas e distribuição de solos similares.

III. 1. Objetivos específicos

Análise da similaridade pedomorfogeológica das microbacias que permitam a utilização da BES da MBRJ complementada pelos solos de ocorrência restrita na MBRE para a compilação da BES da microbacia de estudo;

Geração de uma Imagem Composta de solos expostos da MBRE com maior proporção de solos expostos em relação a área total para representação da distribuição dos solos a partir de série histórica de imagens multiespectrais do sensor ASTER;

Análise do potencial da aplicação do MESMA para a geração do Mapa digital espectral das classes de solos representativos da MBRE, DF;

Validação do mapa gerado para avaliar a eficiência da técnica utilizada;

Verificação da possibilidade de utilização e extrapolação de biblioteca espectral de solos elaborada em outras áreas com relações pedomorfogeológicas e distribuição de solos similares.

IV. JUSTIFICATIVA

A porção leste do DF é reconhecidamente uma fronteira agrícola de grande importância na região (CAMPOS *et al.*, 2011). A microbacia do Ribeirão Extrema (MBRE), subunidade da mesobacia do Rio Preto, contribui para a economia dada a sua elevada produção agrícola no DF, com registro de altos índices de produtividade que resultam do uso diversificado e intensivo dos seus solos. Em uma crescente expansão, o planejamento de uso de seus recursos acaba por ser ameaçado devido à pouca informação acerca dos recursos da região, por vezes sem planejamento adequado de uso e ocupação das terras, podendo originar problemas ambientais (CARVALHO; LACERDA, 2007; CAMPOS *et al.*, 2011).

Diante desse cenário, esta região do DF necessita de mapeamentos de solos em escala de maior detalhamento para subsidiar o planejamento sustentável do uso das terras e que atenda a demanda crescente do uso cada vez mais intensivo dos solos. O atual mapeamento pedológico oficial existente do DF, que conseqüentemente recobre a MBRE, foi elaborado por Embrapa (1978) e atualizado em formato digital por Reatto *et al.* (2004), apresentando escala 1:100.000.

A grande demanda por alimentos devido ao crescimento acelerado da população intensifica a pressão sobre o uso do recurso natural solo. Com consumidores cada vez mais exigentes por alimentos de qualidade e que preze pela conservação ambiental em seu processo de produção, faz com que estudos dessa natureza ganhem importância, uma vez que solos manejados adequadamente geram alimentos em quantidade e qualidade, respeitando o meio ambiente, fatores que representam parte dos princípios da sustentabilidade. O planejamento o uso das terras, realização de zoneamentos e definição de políticas públicas para a agricultura, passam por um conhecimento profundo e atualizado do recurso solo, que juntamente com os recursos hídricos, devem fazer parte de programas que visem a sustentabilidade ambiental.

Salvo poucas áreas, no Brasil há uma notória escassez de levantamentos e informações sobre os solos em escala adequada, que prejudica e dificulta o desenvolvimento de um país (MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2003). Definir uma nova abordagem para a cartografia dos solos e estabelecer metodologia para

extrapolar/inferir as informações pontuais conhecidas para as áreas desconhecidas similares é um desafio.

Grande parte da atual falta de atualização e realização de levantamentos e mapeamentos pedológicos em escalas de maiores detalhamentos, são decorrentes das técnicas adotadas no processo convencional de levantamento e mapeamento de solos (Embrapa, 1995). Essas técnicas de levantamento convencionais, além de demandarem muito tempo para sua realização, envolvem altos custos e estão sujeitos à subjetividade das informações demandadas pelos diferentes usuários, que por vezes não é adequada para produto final (MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2003).

Neste ínterim, faz-se necessário o desenvolvimento de uma base de mapas pedológicos em escalas de detalhamento maiores que os mapeamentos disponíveis no DF, que sirvam como instrumento de suporte e orientação para o planejamento do uso dos solos e ações promotoras de sustentabilidade da microbacia do Ribeirão Extrema, DF.

Menos onerosas, em termos de custos e tempo dispensado, o mapeamento digital de solos por técnicas de sensoriamento remoto espectral se destaca pela sua capacidade de avaliar de maneira simultaneamente vários fatores e a de não gerar resíduos poluentes, em relação às metodologias tradicionais de levantamento e mapeamento de solos. Portanto, pode-se dizer que estas técnicas potencializam o levantamento convencional de solos e a sua capacidade promover a distribuição espacial dos solos, por possibilitar que um volume maior de informações sobre os fatores de formação do solo seja processado de forma rápida e automatizada.

Imagens ASTER, possuem um maior número de bandas na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR), além disso detem uma melhor resolução espacial (15m) quando comparado à outros sensores amplamente utilizados como o Landsat por exemplo. Essas características estão ligadas à melhor resposta espectral do solo nessa faixa do espectro, no qual permite uma maior capacidade de distinção desses alvos na superfície terrestre.

Ademais, os dados gerados a partir das informações espectrais serão uma fonte de informações para o desenvolvimento de diversos trabalhos de pesquisa e extensão, particularmente o estabelecimento de técnicas de manejos dos solos mais adequados, contribuindo para a sustentabilidade destes, da água e do clima.

V. REFERENCIAL TEÓRICO

V.1. Conceito de solo

A Pedologia configura um ramo da Geologia que se encarrega de analisar vários aspectos intrínsecos ao solo (KAMPF; CURI, 2012a). É considerada uma área relativamente jovem, cujos seus princípios e fundamentos tiveram origem no fim do século XIX, por meio dos estudos realizados pelo cientista russo Vasily Vasil'evich Dokuchaev (ESTADOS UNIDOS, 1999). Os conceitos primários serviram e ainda servem de base para novos conhecimentos; em função disso, é importante analisar o desenvolvimento histórico do recurso solo para que se possa avaliar e compreender o estágio das concepções atuais e suas tendências. Nessa vertente, Kämpf e Curi (2012a) citam que desde os primórdios da civilização, várias definições eram atribuídas ao solo, cujo conceito alterou-se à medida que se evoluíam os estudos.

Teixeira *et al.* (2000) e Espindola (2008) acrescentam que conceitos são atribuídos ao solo de acordo com o tipo de exploração a qual esse é submetido. Por exemplo, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) admite, terminologicamente, o solo como um mero mecanismo provedor de suporte às plantas, fornecedor de elementos nutritivos e produto do intemperismo das rochas (ABNT, 1993). Essa conceituação apresenta uma abordagem técnica mais aprofundada disposta pelo sistema de classificação americana de solos, a *Soil Taxonomy*, na década de 1970, que descreve o solo como um conjunto de elementos naturais, dispostos tridimensionalmente na superfície da terra, que pode ou não ter sido alterado ou mesmo estabelecido por ação antrópica, contendo matéria orgânica viva sendo capaz de comportar à manutenção vegetal *in situ* (ESTADOS UNIDOS, 1999).

Partindo desse princípio, Moreira (2007) descreve o solo como um corpo natural da superfície terrestre cujas propriedades químicas e físicas se devem aos efeitos integrados do clima e dos organismos vivos (plantas e animais) sobre o material de origem, condicionado pelo relevo, durante um período de tempo. Reitera, ainda, que esse se encontra em um constante processo de transformação ao longo do tempo por intermédio de fatores incidentes sobre este, tais como fatores climáticos, bióticos e geomorfológicos (MOREIRA, 2007). Tal descrição concorda com Resende

(2007), que define o solo como uma coleção de corpos naturais e dinâmicos, composto por matéria viva, e que tem sua gênese diretamente associada à ação de fatores interativos como o clima e, também, a biosfera atuando sobre a rocha, sendo imprescindível para a formação desse solo um determinado período de tempo; adiciona-se, ainda a forte influência pelo tipo de relevo.

Disposto tridimensionalmente, o solo, restrito ao ponto de observação, é conhecido como pédon (Embrapa, 1995). O termo tem origem grega e designa o solo propriamente dito, caracterizado por representar a menor porção ou volume para o reconhecimento de um solo. O pédon constitui a unidade básica de referência taxonômica, com limites e dimensões predeterminadas (ESTADOS UNIDOS, 1999). Quando agrupadas, essas unidades compõem os chamados polipédons que, por critérios de similaridade, correlacionam-se, delimitando um solo cujos limites estão localizados na transição para outro conjunto de pédon (Embrapa, 1995; IBGE, 2015). Nesse contexto, o solo apresenta a atmosfera como seu limite superior ou, às vezes, águas superficiais de regime intermitente de alagamento; lateralmente, limita-se em gradiente com rocha consolidada ou parcialmente desintegrada, águas subsuperficiais ou gelo. Quanto ao limite inferior, ainda que difícil de se determinar, não se deve levar em consideração o material rochoso que mostre pouco efeito das interações de seus fatores de formação (ESTADOS UNIDOS, 1999).

Ao reunir essas várias vertentes, pode-se presumir que o solo se constitui de um corpo natural organizado como consta em Kämpf e Curi (2012a) e Embrapa (2014), quando afirmam que representa um recurso natural. O solo é uma compilação de elementos naturais, instituídos a partir de frações de materiais sólidos, líquidos e gasosos, dispostos em três dimensões. São inconsolidados, compostos por estruturas minerais e orgânicas e que ocupam a maior parte da camada superficial da porção continental do planeta. O solo contém organismos vivos e é capaz de ser vegetado em seu estado natural, podendo ter sido ou não acometidos por atividades antrópicas. A grande maioria desses conceitos partiram do trabalho clássico de Jenny (1941), que define os fatores de formação do solo.

Partindo do seu limite superior, onde o solo entra em contato com a atmosfera, em direção vertical descendente, observa-se a presença de seções distintas e horizontais sobrepostas paralelamente no interior do solo, chamadas horizontes ou camadas, as quais são caracterizadas por se distinguirem do material de origem

inicial, como resultado de processos pedogenéticos associados tais como: adições, perdas, translocações e transformações de energia e matéria (RESENDE *et al.*, 2012; EMBRAPA, 2014). Existem dificuldades em definir os limites horizontais dos solos, devido a dinâmica em que esses solos estão dispostos (ESTADOS UNIDOS, 1993; CURI; KÄMPF, 2012a; EMBRAPA, 2014). No entanto, estudos das relações solo-relevo auxiliam nas estimativas da distribuição de cada classe de solo em uma paisagem, uma vez que o relevo influencia fortemente nos processos pedogenéticos (KÄMPF; CURI, 2012b).

V.2. Classificação de solos

A busca do homem por um melhor entendimento da realidade que o cerca leva-o a simplificar muitas das informações nela contida (CLINE, 1949). Para simplificar o mundo para melhor entendê-lo, é necessário classificar – distribuir em classes e nos respectivos grupos, de acordo com um sistema ou método de classificação – simplificar, organizar, e ordenar informações – selecionar, estratificar, adaptar-se a diferentes ambientes (HOUAISS, 2009). Para que os solos sejam oficialmente classificados, há a necessidade de que estejam devidamente descritos em um sistema categórico reconhecido pela comunidade científica e entidades governamentais (Embrapa, 2014). A classificação de um solo é obtida com fundamento na avaliação dos dados morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos dos perfis que os representam. Aspectos ambientais do local dos perfis, tais como clima, vegetação, relevo, material originário, condições hídricas, características externas ao solo e relações solo-paisagem são também utilizadas (RESENDE *et al.*, 2012). A ênfase na utilização de critérios genéticos, morfológicos ou morfogenéticos varia de país para país, o que dá origem a diferentes classificações pedológicas (Embrapa, 2014).

Para citar alguns dos principais Sistemas de Classificação de Solos; além do SiBCS (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos) organizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (Embrapa, 2014), o *Référentiel Pédologique* da Associação Francesa para o Estudo de Solos – AFES (BAIZE; GIRARD, 2008), o WRB (*World Reference Base for Soil Resources*) da FAO (*Food and Agricultural Organization*) (FAO, 1998), e o Sistema de Classificação Americano

Soil Taxonomy (ESTADOS UNIDOS, 1999), configuram alguns dos principais sistemas de classificação de solos (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

A FAO, utilizando seu sistema próprio de classificação de solos, em 1974, publicou um mapa mundial da distribuição de solos por continente ou região continental, objetivando uma melhor abordagem e compartimentação dos problemas relacionados à fome no globo (FAO/UNESCO, 1974). Na mesma época, foi estabelecido o sistema de classificação americano *Soil Taxonomy* (ESTADOS UNIDOS, 1999). Ambos os sistemas são bem estruturados e ricos em informações sobre diversos tipos de solos; entretanto Rezende *et al.* (2007) consideram que o sistema de classificação americano possui uma melhor estrutura se comparado ao da FAO, em que as classes são distribuídas em níveis categóricos nos quais se podem constar doze ordens, contendo subordens e grandes grupos desenvolvidos em caráter organizacional, uma vez que esse apresenta-se estruturado em subgrupos, famílias e séries.

Na prática, o Sistema de Classificação de Solos Americano, voltado para solos de regiões de clima temperado, mostrou-se limitado descritivamente e pouco desenvolvido em relação ao enquadramento de determinadas classes de solos restritas de regiões de clima tropical (RESENDE *et al.*, 2007). Daí surge a necessidade do desenvolvimento de um sistema local específico para cada país, de modo que mais se adapte à realidade da sua distribuição pedogenética, tendo como base o estabelecimento das relações com as classes dos dois sistemas supracitados (ANJOS *et al.*, 2012).

As atuações na área da pedologia no Brasil tiveram início na década de 1930, no Nordeste e, principalmente, em São Paulo, onde eram utilizadas as informações dos solos para fins de irrigação e de conservação de solos (Embrapa, 2014). Mais adiante, sob a Comissão de Solos do Ministério da Agricultura, iniciaram-se os estudos de solos em todo território nacional por meio de um extenso programa de levantamento de solos em escala de reconhecimento exploratório, numa tentativa de suprir rapidamente a inexistência de informação sobre o potencial dos solos brasileiros. Nessa época, o Ministério da Agricultura foi a instituição que mais investiu nos estudos de solos sob todos os aspectos, compreendendo classificação, fertilidade, manejo, conservação e recuperação de solos, e na própria pesquisa básica (Embrapa, 1995; IBGE, 2015).

No Brasil, esse tipo de estudo teve início na Estação Agronômica de Campinas em 1892, porém o Instituto José Augusto Trindade, no Município de Sousa – Paraíba (PB), é considerado pioneiro no estudo minucioso de solos (ESPINDOLA, 2014). O primeiro mapa de solos foi realizado em 1947, quando foi confeccionado o mapa agrológico da bacia de irrigação do açude São Gonçalo (PB) (SOUZA MELLO, 1950). Em 1947, foi criada a Comissão de Solos do Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas do Ministério da Agricultura; a partir desse momento, os levantamentos de solos no Brasil alcançaram grandes avanços (Embrapa 1995; IBGE, 2015); porém, as primeiras tentativas de organização de um sistema nacional de classificação do solo se deram apenas a partir da década de 1970, mediante sucessivas aproximações, buscando definir um sistema hierárquico, multicategórico e aberto, voltado para uso agrícola do solo, que permitisse a inclusão de novas classes e que tornasse possível a classificação de todos os solos existentes no território nacional (ANJOS *et al.*, 2012). Na década de 1980, foram publicados alguns documentos intitulados “Aproximações”. Foram editadas, então, quatro “Aproximações”: em 1980, 1981, em 1988 e 1997. Geradas na Embrapa, essas publicações de caráter experimental tinham sua circulação restrita aos pedólogos da Embrapa e de outras instituições nacionais de ensino e pesquisa (Embrapa, 2014). Finalmente, em 1999, foi publicada a primeira edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Com a coordenação do Centro Nacional de Pesquisa de Solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Solos), o SiBCS é produto de um projeto nacional aberto, multicategórico e hierárquico, de interesse e de responsabilidade da comunidade da Ciência do Solo no país (RIBEIRO *et al.*, 2012).

A classificação pedológica nacional vigente consiste numa evolução do antigo sistema americano, formulado por Baldwin *et al.* (1938) e modificada por Thorp e Smith (1949). Alguns princípios básicos, conceitos e critérios foram mantidos, enquanto outros foram reformulados para melhor descrever a realidade dos solos no Brasil. Além disso, novos aspectos foram adicionados por meio de estudos pedológicos, mediante associações com instituições de ensino superior e órgãos governamentais e de pesquisa do Brasil, coordenados pela Embrapa Solos, utilizando o mapeamento do Projeto RADAMBRASIL, em escala 1:1.000.000, de todo o território nacional (Espindola, 2008).

O Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) desenvolveu, na Amazônia, no início da década de 1970, um projeto de sensoriamento remoto regional que utilizava sensores de radar visando, principalmente, ao reconhecimento e ao monitoramento dos recursos naturais da Amazônia. Esse projeto, denominado RADAM (Radar da Amazônia), possibilitou a confecção de 117 mapas e 18 volumes. O Projeto RADAM promoveu a ampliação de várias áreas mineralizadas na região (DNPM, 1975). Devido ao seu êxito, o projeto RADAM, por volta de 1976, foi ampliado para todo território nacional passando a ser chamado de Projeto RADAMBRASIL. Este gerou 38 volumes, dos quais quatro ainda não foram publicados, contemplando vários mapeamentos temáticos, entre eles os mapas exploratórios de solos, na escala 1:1.000.000 (BRASIL, 1973-1986).

O sistema atual se apresenta de maneira aberta, o que possibilita eventuais alterações em sua estrutura para uma adaptação realista que descreve, da melhor forma, os solos de uma determinada região à medida que os estudos avançam (STRECK *et al.*, 2008). Essa abertura vai de acordo com o que argumentou Olson (1974), que defende o fato de que a maior parte dos sistemas técnicos de classificação de solos necessita de constante revisão, mantendo-os sempre atualizados à geração de novos dados.

Na classificação dos solos, os atributos morfológicos, físicos, químicos e a composição mineralógica compõem os critérios para distinção entre os níveis taxonômicos envolvidos e são consideradas imprescindíveis para elaboração de planejamentos de uso sustentável (Embrapa, 2014). Assim como outros sistemas, o SiBCS tem o perfil do solo como a unidade básica de classificação (Embrapa, 2014). Fundamentado nesses preceitos, Santos *et al.* (2015) puderam assegurar que o enquadramento dos solos em um sistema de classificação taxonômica é imprescindível para a composição da base para o levantamento de solos.

V.3. Relações Pedomorfogeológicas

As investigações acerca das relações entre solos, substrato geológico e a morfologia da superfície de ocorrência compõem importantes parâmetros para o entendimento da dinâmica dos mais variados tipos de solos de ocorrência ao longo de uma paisagem, uma vez que a análise desses fatores permite predizer sua

distribuição, assumindo, assim, importante ferramenta para atividades de mapeamento de solos e de planejamento de uso do solo (CAMPOS, 2012). Os solos estão distribuídos em unidades vizinhas e apresentam seus limites laterais com transição gradual dos atributos que os distinguem ou outras barreiras, que se correlacionam com o ambiente (RANZANI, 1969). As relações entre os solos e as formas da paisagem têm sido por longo tempo a base do mapeamento de solos (Birkeland, 1984).

Para Ippolit *et al.* (2005) a delimitação das unidades de mapeamento é geralmente realizada por meio da análise estereoscópica de fotografias aéreas ou orbitais para o delineamento manual das unidades solo-paisagem, que, posteriormente, serão identificadas e caracterizadas em campo. Esses autores utilizam esses preceitos para realizar o levantamento preliminar de solos baseado na análise digital do terreno em uma região montanhosa do estado de Minas Gerais.

Os componentes do solo estão em constante transformação e revelam uma relação direta entre a rocha matriz ou mesmo seu material em processo de intemperismo, expressando a identidade de determinado solo (CAMPOS, 2012). Essa relação deve associar-se às fitofisionomias da paisagem, apresentando, principalmente, ligações com seus devidos espaços pedomorfogeológicos, que são resultantes da interação entre os fatores determinantes de formação e distribuição dos solos de uma região (BARBOSA *et al.*, 2010). Estudos de Florinsky *et al.* (2002) comprovaram com eficácia a capacidade de predição de solos a partir do modelo digital do terreno. Minasny e McBratney (2007) testaram a incorporação de distância taxonômica para predição espacial e mapeamento digital das classes de solo. Souza (2015) aplicou metodologia semelhante a fim de gerar um modelo de distribuição de solos em uma área-piloto do DF, onde verificou-se que o modelo gerado apresentou alta correlação entre as variáveis geologia e geomorfologia. Birkeland (1984), por sua vez, cita que a abordagem geomorfológica e hidrogeológica permite melhor concepção dos atributos específicos de cada classe de solo e de sua distribuição na paisagem, visando proporcionar elementos de predição de sua ocorrência. Klingebiel *et al.* (1987) enfatizam, ainda, a importância das unidades de relevo em trabalhos de levantamento pedológico, à medida que estas interferem no tempo de exposição dos materiais, na intensidade e na direção do fluxo da água no solo que regulam as variações nos processos pedogenéticos (CAMPOS *et al.*, 2006). De acordo com

Resende *et al.* (2007), as relações estabelecidas entre geomorfologia, geologia e classes de solos possibilitam a elaboração de modelos preditivos da distribuição dos solos em uma paisagem que subsidia os processos de levantamento, mapeamento e classificação dos solos. Essa constatação pode ser complementada em Teixeira *et al.* (2000, p.412) que argumenta que

em função das condições ambientais, que envolvem rocha parental, clima, organismos vivos (flora e fauna, incluindo o ser humano), relevo e tempo, os solos podem apresentar características e propriedades físicas, químicas e físico-químicas diferenciadas. Assim, os solos podem ser argilosos ou arenosos (variações texturais), podem ser vermelhos, amarelos ou cinza esbranquiçados, podem ser ricos ou pobres em matéria orgânica, podem ser espessos (algumas dezenas de metros) ou rasos (alguns pouco centímetros), podem apresentar-se homogêneos ou nitidamente diferenciados em horizontes.

A distribuição das unidades pedológicas de uma área está condicionada à posição que essas unidades ocupam no relevo (RANZANI, 1969). O departamento de agricultura dos Estados Unidos (1993) reitera essa proposição, ao afirmar que as alterações sofridas pelo solo estão intimamente relacionadas com sua posição na paisagem. Ranzani (1969) parte dessa afirmativa para justificar a ocorrência de diferenças significativas nos atributos dos solos, tais como a fertilidade entre os solos de uma topossêquencia (Jenny, 1941). Essas variações nos solos são refletidas nas características da vegetação, expressadas em seu vigor, altura, densidades entre outras características (MENDONÇA-SANTOS *et al.*, 2015).

Em um estudo para caracterizar atributos do solo e sua relação com a paisagem no Estado do Paraná, Chicati *et al.* (2008) verificaram que informações sobre alguns atributos dos solos, associados a um banco de dados geográficos adequado, possibilitaram a produção de um mapa de solos preciso e de alta qualidade. Chagas *et al.* (2013) confirmaram alta correlação, no Estado de Rio de Janeiro, ao investigar a influência da distribuição dos solos na paisagem sobre alguns atributos do terreno, rochas parentais e suas respectivas pedoformas. No âmbito de SIG, Wu *et al.* (2008) valeram-se de modelos de elevação digital para relacionar os atributos do solo e a morfologia do terreno. Garrigues *et al.*, (2008) obtiveram resultados satisfatórios ao utilizar técnicas de estatística multivariada para a quantificação da heterogeneidade espacial da paisagem para predição de classes de solos com base no agrupamento de variáveis, usando critérios de similaridade ou

dissimilaridade. Ten Caten *et al.* (2011b), a partir de uma área piloto, extrapola a relação solo-paisagem para a predição de solos de outras áreas com características morfométricas semelhantes. Lacerda e Barbosa (2012), por sua vez investigaram as relações pedomorfogeológicas e de distribuição dos solos na Estação Ecológica de Águas Emendadas no Distrito Federal, o que os levou a comprovar a importância dessas relações no que se refere à elaboração de modelos preditivos da organização dos solos em uma dada paisagem, auxiliando, portanto, os trabalhos convencionais de levantamento, mapeamento e classificação de solos.

V.4. Levantamento e mapeamento pedológico – Método tradicional

As informações acerca do planejamento do uso das terras advêm, sobretudo, dos levantamentos de solos (SANTOS *et al.*, 2015). O mesmo deve ser objetivo e conter finalidades específicas (RIBEIRO *et al.*, 2012). Nesse contexto, Mulder *et al.* (2011) destacam a importância de se ter informações acerca do solo para orientar ações voltadas às políticas de planejamento que envolvam o manejo dos recursos naturais, assim como para guiar as ações de monitoramento de impactos ambientais.

Os procedimentos utilizados para o levantamento pedológico tradicional correspondem a uma das principais ferramentas para caracterização do solo, em que se objetiva agrupar áreas heterogêneas em parcelas mais homogêneas, de maneira que se reduza, da melhor forma, a variabilidade; que se sigam parâmetros descritos no sistema de classificação do solo vigente e que compreenda os critérios de classificação utilizados para caracterização dos solos em função da escala de mapeamento (Embrapa, 2014).

Após estudos de viabilidade na fase de planejamento, o processo de levantamento e classificação dos solos passa para a etapa de atividades de campo, realizada por meio de observações morfológicas dos perfis a fim de possibilitar melhor identificação, separação, delimitação e nomeação dos horizontes diagnósticos (IBGE, 2015). Com base nesses procedimentos, um perfil de solo poderá ser classificado (Embrapa, 2014).

Flores *et al.* (2006) observaram que o procedimento prévio de estudo do terreno, que influencia os principais atributos dos perfis dos solos, é refletido na caracterização morfológica, física e química, e, por conseguinte, na categorização do

solo em estudo em um sistema taxonômico de classificação. Quanto mais detalhado for o levantamento (cf. Tabela 1), mais homogêneas serão as unidades de mapeamento delimitadas (IBGE, 2015). Além disso, destaca-se que a quantidade de observações por unidade de área varia de acordo com a escala adotada, com o grau de heterogeneidade ou uniformidade da área de trabalho e com a eficiência da análise e da interpretação de fotografias aéreas, imagens de radar e de satélites e os recursos de geoprocessamento disponíveis (Embrapa, 1995).

Tabela 1 – Tipos de levantamentos pedológicos, escalas e número de observações por km² e por ha

| Tipo de levantamento | Escala | Nº de observações |
|----------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Exploratório | 1:750.000 a 1:2.500.000 | < 0,04 * |
| Reconhecimento Baixa Intensidade | 1:250.000 a 1:750.000 | 0,04 * |
| Reconhecimento Média Intensidade | 1:100.000 a 1:250.000 | 1,00 * |
| Reconhecimento Alta Intensidade | 1:50.000 a 1:100.000 | 2,00 * |
| Semidetalhado | ≤ 1:50.000 | 0,02 - 0,20 ** |
| Detalhado | ≤ 1:20.000 | 0,20 - 4,00 ** |
| Ultradetalhado | ≤ 1:5.000 | 4,00 - 10,00 ** |

Fonte: Adaptado de IBGE (2007).

Onde: *observações/km²; **observação/ha

Para investigações mais generalistas acerca dos solos, são utilizados, normalmente, levantamentos exploratórios que abranjam grandes porções do espaço. Os levantamentos de reconhecimento, por sua vez, são executados para fins de avaliação qualitativa e semiquantitativa de solos, visando à estimativa do potencial de uso agrícola e não agrícola.

Quando surge a necessidade de representações mais localizadas, como nos planejamentos gerais de uso e conservação do solo, convém executar levantamentos semidetalhados, em que as classes de solos são determinadas no campo por observações a pequenos intervalos no interior das áreas de padrões diferentes (Embrapa, 1995). No caso de levantamentos detalhados, são separadas unidades de mapeamento bastante homogêneas, com menores variações. Para isto, as classes de solos são identificadas no campo, por meio de observações sistemáticas ao longo de topossequências representativas. Por conseguinte, esse tipo de levantamento é utilizado para gerar de uma base de dados adequada, que possa mostrar as

diferenças significativas dos solos, sendo empregada em projetos conservacionistas, áreas experimentais, uso das terras e práticas de manejo em áreas de uso agrícola, pastoril ou florestal intensivo, entre outros (Embrapa, 1995).

Nos levantamentos ultra-detalhados, são separadas as unidades de mapeamento com pequenas variações, muito homogêneas. Para tal, é percorrida toda a área no campo com intervalos mínimos entre as observações, por meio de malhas com dimensões de célula pré-definidas em função da escala e heterogeneidade da área. Por isso, este tipo de levantamento é utilizado para planejamento e localização de explorações muito pequenas, como por exemplo, em parcelas experimentais, áreas urbanas e industriais, projetos especiais de irrigação, entre outros (Embrapa, 1995). Os produtos finais dos levantamentos pedológicos são os mapas pedológicos e seus respectivos relatórios. O mapa pedológico representa a distribuição espacial dos solos em uma paisagem com a separação das unidades de mapeamento (Embrapa, 1995).

Espindola (2008) considera que os levantamentos exploratórios já alcançaram seus propósitos, pois, apesar de suas contribuições de ordenamento do território, a demanda atual requer informações de maior qualidade e com mais agilidade em sua disponibilização. Mapas em escala detalhada ou semidetalhada descrevem melhor o uso e manejo adequado do solo, uma vez que exemplificam fins específicos, que permitam, ainda, o monitoramento de certos atributos tais como: densidade, porosidade, compactação, permeabilidade, condutividade hidráulica, agregação/estrutura, nutrientes entre outros (ESPINDOLA, 2008). Myers (1983) afirmou que levantamentos e mapeamentos de solos, quando executados em um nível de detalhamento adequado, tornam-se imprescindíveis para o planejamento, desenvolvimento e acompanhamento de diversas atividades agrícolas, tais como implementação de usos e manejos agrícolas adequados, garantindo, dessa maneira, a sustentabilidades dos agroecossistemas.

O mapeamento pedológico denominado clássico ou tradicional faz uso do método *clorpt* (Equação 1), em que o Solo (S) é resultado da interação de cinco fatores: clima (cl), organismos (o), relevo (r), material de origem (p) e tempo (t), verificados, geralmente, com base na interpretação de fotografias aéreas e na verificação a campo dos solos e das características associadas à paisagem (JENNY, 1941). Esse método, consiste basicamente na aplicação de um modelo amplamente

difundido que equaciona os fatores de formação do solo, em que o tempo assume a posição de variável independente, enquanto as demais seriam variáveis dependentes. A resultante da aplicação desse modelo corresponde ao solo no ponto específico (McBRATNEY *et al.*, 2000).

$$S = f (clorpt) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

S = Solo;

cl = clima;

o = organismos;

r = relevo;

p = material de origem;

t = tempo.

Os métodos mais frequentes para fins de coleta de dados, descrição de características dos solos no campo e verificação de limites entre unidades de mapeamento são: investigações ao longo de transeções, levantamentos de áreas-piloto, estudos de topossequências representativas, sistematização de malhas e método do caminamento livre (Embrapa, 1995).

Segundo Curi e Kämpf (2012), entre esses métodos, o mais utilizado para trabalhos de levantamento de solos é o estudo de prospecções em topossequências, em que são identificadas as topossequências que representem de melhor forma as variações da paisagem e em que são definidas as unidades de mapeamento, que abrangem diversos aspectos topográficos, de forma que seja possível estabelecer relações geomorfológicas com os pédons ou perfis devidamente identificados. Os métodos de prospecção de solos por levantamentos de áreas-piloto constam de investigações minuciosas de áreas menores, representativas de uma determinada feição fisiográfica e, posteriormente, são extrapoladas para o restante da área (Embrapa, 1995). Desta forma, polígonos originados da interligação dos pédons contíguos (polipédons) similares resultam em um esboço aproximado da distribuição dos solos na paisagem, que, após devidas correções, é o fundamento para a elaboração de um mapa de solos (BRADY; WEIL, 1996; DOBOS; HENGL, 2009).

A aquisição de conhecimentos empíricos proporcionada pelas atividades de levantamento e mapeamento de solos por métodos convencionais leva o pedólogo a compreender a ocorrência das classes de solos situadas em sua região de trabalho, o que lhe permite prever, entre outros aspectos, sua distribuição, bem como organização na paisagem. Formam-se, assim, padrões de informações para a formulação de hipóteses em relação à ocorrência dos solos, que são comprovadas, posteriormente, com prospecções de campo (RIBEIRO *et al.*, 2012). Assim, o mapeamento de solos clássico está sujeito à subjetividade desse profissional e de experiências em trabalhos anteriores (HUDSON, 1992).

Nos países em desenvolvimento, existem poucos trabalhos que envolvam o mapeamento de solos em escalas mais detalhadas, devido à morosidade com que são produzidos, bem como às despesas exigidas por técnicas de mapeamento tradicionais (Embrapa, 1995). Além disso, os mapas de solo analógicos obtidos a partir desses procedimentos não conseguem explicar muitos dos elementos naturais que podem estar interagindo com o solo. Geralmente, muitas destas informações são elaboradas por intermédio de modelo elaborado por um pedólogo experiente, que, em decorrência, não tem como disponibilizar os dados que nortearam o trabalho de mapeamento de solos, dados que poderiam apoiar o subsequente processo de planejamento do uso das terras (BURROUGH, 1993).

Esses aspectos não configuram, por si só, fatores limitantes a essa técnica, porém comprometem sua eficiência, visto que utiliza as relações existentes entre os atributos do solo e as feições ambientais identificáveis como base para o mapeamento dos solos de uma região de maneira interpretativa. (ESTADOS UNIDOS, 1993). Por conseguinte, esses modelos de previsão empíricos são qualitativos, complexos e raramente transmitidos de maneira clara, apesar de seguirem normas técnicas específicas e protocolos adotados (McBRATNEY *et al.*, 2000).

V.5. Mapeamento digital de solos

O mapeamento digital ou mapeamento preditivo de solos, pode ser definido como o mapeamento de atributos e classes de solos baseado no uso integrado de técnicas pedométricas ou de funções de pedotransferências (McBRATNEY *et al.*, 2000; MINASNY *et al.*, 2003) e de ferramentas computacionais para a espacialização

e armazenamento dessas informações (McBRATNEY *et al.*, 2000; CARRÉ; GIRARD, 2002; CARRÉ *et al.*, 2007; MINASNY; MCBRATNEY, 2007; CARRÉ; JACOBSON, 2009; LAGACHERIE, 2008; SANCHEZ *et al.*, 2009). O mapeamento digital de solos (MDS), assim como o mapeamento tradicional, proporciona um planejamento mais adequado do uso e preservação dos recursos ambientais, sendo indicado para atividades nos setores da produção agrícola, da construção civil, do ordenamento urbano, dentre outros (MENDONÇA-SANTOS *et al.*, 2008). A maior demanda de tempo e de investimento financeiro que as técnicas convencionais requerem justifica o desenvolvimento de artifícios que contornem essas desvantagens (COELHO; GIASSON, 2010).

De acordo com Ten Caten (2012), os estudos acerca do MDS no Brasil são relativamente recentes, mais precisamente, têm seu início na segunda metade dos anos 2000, como resultado da primeira publicação nesse tema, ocorrida em 2006, no 2º *Workshop* Global em Mapeamento Digital de Solos, sediado no Rio de Janeiro. O encontro tinha como objetivo divulgar entre os cientistas do solo brasileiros os métodos e técnicas empregados no MDS. Por outro lado, técnicas relacionadas ao mapeamento de classes de solos utilizando processos automatizados vem sendo praticadas em outros países há muitos anos. Webster e Burrough (1972), destacam que, já na década de 1970, foram empregadas técnicas de estatística multivariada aplicada em sistemas informatizados para mapear classes de solos no sul da Inglaterra.

O MDS – também conhecido como método híbrido – compila o método *clorpt*, que se desenvolve à luz de modelos determinísticos-estocásticos com técnicas quantitativas, como a pedometria, que potencializam a precisão e acurácia e possibilitam, assim, as predições da distribuição espacial das classes e propriedades intrínsecas dos solos (McBRATNEY *et al.*, 2000). No início da década de 2000, McBratney *et al.* (2003) sugeriram uma alteração em relação ao modelo de Jenny (1941), qual seja a inclusão de dois fatores no processo de predição do solo. Um dos fatores é o espacial, partindo do pressuposto de que o solo pode ser predito a partir de informações da sua vizinhança. O outro fator consiste no solo propriamente dito, dada a possibilidade de que o solo pode ser predito por seus próprios atributos ou, ainda, de que os atributos podem ser preditos mediante as classes ou outras

propriedades apresentadas, conforme descrito na equação [2] e detalhado na tabela 2.

$$Sc = f(s,c,o,r,p,a,n) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

s = solo;

c = clima;

o = organismos;

r = relevo;

p = material de origem;

a = idade;

n = espaço.

Tabela 2 – Detalhamento dos fatores preditores da função do solo no MDS

| Variável | Fator | Descrição |
|----------|--------------------|---|
| S | Solo | Propriedades do solo em um determinado ponto |
| C | Clima | Condições climáticas do ambiente em um dado ponto |
| O | Organismos | Incluindo vegetação, fauna e atividades humanas |
| R | Relevo | Topografia e variáveis morfométricas |
| P | Material de origem | Rocha parental incluindo litologia |
| A | Idade | Fator tempo |
| N | Espaço | Posição no espaço |

Fonte: Adaptado de Moore (1993)

Moore *et al.* (1993) aborda o MDS como uma representação das características pedológicas de um ambiente implementadas em sistemas digitais de informação espacial, sistemas alimentados por modelos numéricos com variáveis preditoras que possibilitem inferências das variações espaciais dessas características, com base em observações e conhecimentos dos solos e das variáveis envolvidas na pedogênese. Produtos de Sensoriamento Remoto (SR) e SIG – mediante ao uso de computadores e programas cada vez mais eficazes, contendo algoritmos poderosos – são capazes de executar, quase instantaneamente, inúmeros

cálculos de relações entre os fatores de formação do solo e a sua ocorrência na paisagem (McBRATNEY *et al.*, 2003).

Um SIG deve ser suficientemente capaz de operar modelos abastecidos com informações oriundas de análises de campo e de laboratório acerca dos solos e seus fatores de formação para o estabelecimento das relações estabelecidas nos modelos preditivos (GUERRA, 2006). Dessa maneira, a predição da ocorrência desses solos na paisagem ocorre mediante à introdução de dados quantitativos que representem os fatores de formação dos solos, em sistemas lógico-computacionais como o SIG (ZHU, 2000; CHAGAS *et al.*, 2010). Burrough (1993) destaca que esse projeto depende de uma base de dados sólida e confiável, com escalas compatíveis para a obtenção de resultados mais seguros, de forma a não impactar na qualidade das informações geradas pelas tecnologias SIG, uma vez que dados pobres ou imprecisos podem resultar em interpretações equivocadas e, conseqüentemente, comprometer a tomada de decisões.

Estes sistemas possibilitam inferências geoestatísticas tendo como base os modelos ajustados envolvendo relações entre as variáveis significativas como: fatores de formação, relações solo-paisagem e o solo propriamente dito (GIASSON *et al.*, 2011). Para tanto, varias técnicas de MDS são empregadas, tais como: regressões logísticas múltiplas (TEN CATEN *et al.*, 2011a), lógica *fuzzy* (NOLASCO-CARVALHO *et al.*, 2009), árvores de decisão (CRIVELENTI *et al.*, 2009; GIASSON *et al.*, 2011), redes neurais (CHAGAS *et al.*, 2011; ARRUDA *et al.*, 2013), krigagem (VALLDARES, 2012) e geotecnologias diversificadas (DEMATTE *et al.*, 2004; SOUSA JUNIOR; DEMATTÉ, 2008; LOSS *et al.*, 2011; RAMIRES-LÓPEZ *et al.*, 2013; FARIAS *et al.*, 2015; SOUZA, 2015; POPPIEL, 2016). Além desses trabalhos, tem-se, ainda, estudos com objetivos variados em diversas partes do Brasil e do mundo, em que o MDS é empregado em investigações sobre os recursos naturais e exploração agrícola. Entre essas obras, podem-se citar: Shepherd e Walsh (2002); Viscarra e Rossel *et al.* (2008); Viscarra Rossel e Chen (2011); Viscarra Rossel e Webster (2011) e Nawar *et al.* (2015).

A elaboração de modelos preditivos, bem como o ajuste dos modelos existentes de distribuição dos solos na paisagem melhora a eficiência do MDS, tornando essa atividade mais ágil e precisa e, conseqüentemente, mais confiável (TEN CATEN *et al.*, 2011b). Ao optar por um modelo adequado, com todas as

variáveis estatisticamente significativas, o resultado abrange de maneira uniforme todo espaço a ser mapeado. Cada pixel assume um valor numérico que representa a classe de solo estabelecida naquele ponto georreferenciado (ZHU, 2000).

Os processos de confecção e validação de mapas de solos auxiliada por sistemas computacionais vêm apresentando grande evolução nas últimas décadas, a fim de melhorar a qualidade dos resultados (LAGACHERIE; MCBRATNEY, 2007). A aferição da acurácia dos resultados geralmente é determinada por técnicas apropriadas de amostragem, como a matriz de erros – ou matriz de confusão –, que gera o índice kappa, que corresponde a uma medida de avaliação qualitativa e quantitativa do mapeamento, além de outros índices (CONGALTON; GREEN, 2010).

Por outro lado, o MDS ainda encontra muita resistência por uma grande parte dos profissionais da área de pesquisa de solos, devido, principalmente, à ausência de procedimentos padrão, ao contrário do que ocorre com os levantamentos convencionais, que se utilizam de protocolos conhecidos há quase um século. Porém, Sarmiento *et al.* (2008) relatam que, ao analisar a rotina dos trabalhos com mapeamentos digitais, é possível constatar que a grande maioria segue algumas etapas que podem ser consideradas equivalentes àquelas que são usadas nos levantamentos convencionais. Ambos utilizam dados detalhados obtidos em campo em pontos e perfis pedológicos de controle para ajustar um modelo quantitativo contendo variáveis relativas à verdade de campo. O modelo, uma vez ajustado, é aplicado ao restante da área (LAGACHERIE, 2008). Além disso, O MDS possui a vantagem da utilização da modelagem para extrapolar os limites para áreas adjacentes fisiograficamente semelhantes, o que é considerado um grande avanço, principalmente para áreas em que não se dispunha, anteriormente, de informações pedológicas (COELHO; GIASSON, 2010).

As diferenças de escala contidas nos materiais cartográficos disponíveis é um grande problema para o MDS, pois, nesses casos, há incompatibilidade ao se absorver essas informações, o que gera inconsistências no resultado (ZHU *et al.*, 2001).

O advento e a rápida disseminação das geotecnologias potencializam operações de SIG, conferindo ao MDS uma dinâmica acelerada à medida que novas técnicas são desenvolvidas. Os resultados desse processo geram bases cartográficas residuais que alimentam os próprios sistemas (COELHO; GIASSON, 2010). A

assimilação de novos procedimentos e instrumentos que confirmam mais eficiência e menos custos nos processos de levantamento de solos – tais como o uso de geoestatística, dos sistemas de informação geográfica (SIG) e do sensoriamento remoto (SR) – faz do MDS uma ferramenta importante para o planejamento ambiental (CHAGAS *et al.*, 2010). As técnicas vêm sendo aprimoradas para a geração de dados que reduzam as limitações apresentadas pelo método clássico (DEMATTÊ *et al.*, 2004b). Como justificativa, McKenzie *et al.* (2008) afirmam que novas tecnologias digitais oferecem à pedologia a oportunidade de representar a paisagem de uma forma contínua, retratando as variações naturais mais próximas da realidade, de modo que se contornem as incertezas inerentes ao método tradicional.

No Distrito Federal (DF), a principal fonte de informações pedológicas é o levantamento de reconhecimento de solos realizado pela Embrapa (1978), com elaboração de mapa pedológico em escala 1:100.000, configurando um fator limitante para as investigações mais detalhadas com relação à distribuição e à amplitude das classes de solos de ocorrência em áreas menores. Observa-se, nesse sentido, o surgimento de vários trabalhos acerca da aplicação de técnicas de Mapeamento Digital de Solos (MDS) no Distrito Federal, como o de Barbosa *et al.* (2010), que mapeou a amplitude distribuição pedológica ao longo da paisagem nas chapadas elevadas do DF. Pesquisas nessa região têm gerado mapas digitais de solos com fundamento em várias metodologias. Entre esses pode-se citar o trabalho de Neumann (2012), que testou a aplicação de regressão linear múltipla para o MDS sob diferentes modelos digitais de elevação na bacia do ribeirão do Gama. Souza (2015), por sua vez, realizou o MDS da microbacia do Ribeirão Salinas (DF) empregando a lógica *fuzzy*, por meio da caracterização e da classificação pedológica associada ao estabelecimento das relações pedomorfogeológicas. Já Poppiel (2016) realizou um MDS da Bacia do Rio Jardim (DF) mediante o uso de técnicas de sensoriamento remoto, entre outros.

V.6. Sensoriamento remoto

Conforme Jensen (2009), o Sensoriamento Remoto (SR) é a tecnologia que permite a aquisição de informação sobre objetos ou fenômenos, sem que haja o contato físico entre eles. Para isso, utiliza-se de sensores instalados comumente em

plataformas como aviões e satélites. Para Novo (2008), o sensoriamento remoto caracteriza-se pela utilização de modernos sensores, aeronaves e espaçonaves, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre por meio do registro e análise das interações entre a Radiação Eletromagnética (REM) e as substâncias existentes na superfície terrestre em suas mais diversas manifestações. Meneses e Almeida (2012), por sua vez, consideram o SR como um mecanismo de obtenção de dados e imagens da superfície terrestre por meio da detecção e da aferição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres. Considerando essas premissas, o sensoriamento remoto se aplica à diferentes ramos da Ciência, dada sua capacidade de captar dados em diferentes épocas, oferecendo, assim, a oportunidade de analisar vários fenômenos sinopticamente ao longo do tempo (JENSEN, 2009).

De fato, os solos representam grande parcela da superfície terrestre (KÄMPF; CURTI, 2012b), sendo responsável por boa parte da radiação eletromagnética refletida pelos demais alvos naturais do planeta (MENESES; ALMEIDA, 2012). Esse aspecto faz com que boa parte dos estudos envolvendo o sensoriamento remoto volte-se para a compreensão, desenvolvimento e aprimoramento de técnicas analíticas de interrelação das propriedades dos solos na resposta espectral dos alvos em geral (FORMAGGIO *et al.*, 1996). O SR possibilita o levantamento de informações a respeito dos solos de maneira rápida, relativamente barata, eficiente e não poluente, se comparado a técnicas convencionais de laboratório e campo (BELLINASSO *et al.*, 2010; DEMATTÊ; TERRA, 2010), proposição também constada por (Moreira, 2007, p. 115).

Uma das ferramentas utilizadas para fazer o levantamento e reconhecimento dos solos é o sensoriamento remoto. A partir de 1972, com o lançamento dos sistemas sensores para coleta de informações sobre recursos naturais, têm-se realizado muitas pesquisas na área de solo para atender a esses objetivos. A grande vantagem do uso de sensoriamento remoto orbital é que essas informações são obtidas periodicamente, de modo que, constantemente, é possível fazer uma adequação dos resultados obtidos em datas anteriores. Outra vantagem diz respeito à visão ampla da área de estudo e à maior facilidade de fazer o levantamento e acompanhamento do uso do solo em áreas de difícil acesso.

Seguindo a visão de SR como o produto da interação entre radiação eletromagnética e o alvo, é possível – baseado na composição deste em um dado

instante – captar diferenças na reflectância do solo, de modo que seus atributos físicos, químicos e mineralógicos alteram a faixa do espectro coberta por essas propriedades, causando variação em comprimentos específicos (ANDRONIKOV; DOBROVOLSKIY, 1991; COZZOLINO; MORÓN, 2003).

As informações de SR podem ser adquiridas de três níveis: terrestre, em que espectroradiômetros compactos são levados a campo pelos próprios pesquisadores ou fixados em veículos; aéreo, que ocorre a bordo de aeronaves limitadas à troposfera e orbital, em que sistemas sensores são ligados a plataformas capazes de captar a energia eletromagnética que incide sobre a terra (NOVO, 2008). Esses sensores subdividem-se em sistemas sensores imageadores (que fornece como produto uma imagem do alvo observado) ou sistemas sensores constituídos por radiômetros ou espectrorradiômetros (suas leituras são expressas na forma de dígitos ou gráficos) (JENSEN, 2009).

V.6.1 Espectroscopia de reflectância dos solos

O registro do fluxo de radiação eletromagnética refletida pelos diversos alvos – nesse caso, o solo – é denominado espectroradiometria ou espectroscopia de reflectância em que, por via de regra do SR, não ocorre contato físico entre sensor e o objeto (CLARK, 1999; MADEIRA NETTO, 2001). O espectro eletromagnético corresponde à Radiação eletromagnética (REM) distribuída em determinado comprimento de onda (JENSEN, 2009). Ao atingir um alvo, ela pode ser transmitida, absorvida ou refletida por esse alvo. A espectrorradiometria de reflectância é umas das principais técnicas do SR; pode ser definida como a medida da distribuição da energia radiante – nesse caso, refletida – de um determinado alvo. A espectrorradiometria de reflectância pode ser realizada em experimentos de laboratório ou de campo (MENESES E ALMEIDA, 2012). Dessa forma, é possível obter o comportamento de diferentes alvos com relação à REM incidente em diferentes comprimentos de onda do espectro. A reflectância é detectada por espectrorradiômetros ou radiômetros e pode ser representada na forma de imagens, tabelas e gráficos. No caso de sensores orbitais, a grandeza radiométrica medida é a radiâncias (SPRINGSTEEN, 1998). De acordo com Meneses (2001), a espectrorradiometria é definida como a medida de distribuição da energia radiante

proveniente de um objeto. Como a energia incidente e a refletida têm a mesma unidade de medida ($\text{watts/cm}^2 \lambda$), a medida de reflectância pode ser expressa graficamente em porcentagem na forma de curvas denominadas de espectros de reflectância (STONER; BAUMGARDNER, 1981). A reflectância (ρ) em determinado comprimento de onda (λ) é expressa pela razão entre a quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área no terreno (Radiância) e a quantidade de energia incidente naquela área (Irradiância), medida no mesmo instante de tempo (Equação 3).

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i} \quad \text{Eq. 3}$$

No processo de aferição da radiação incidente, utilizam-se placas de referência padronizadas, de modo que apresentem reflectâncias conhecidas. As placas podem ser revestidas de óxido de magnésio, sulfato de bário e outros tantos materiais com o albedo elevado (MENESES; ALMEIDA, 2012). A reflectância bidirecional é o termo utilizado quando se aborda os aspectos relacionados às medidas entre o sensor, a fonte e o alvo, suas respectivas disposições e configurações, além das interações de suas posições, onde esses passam a influenciar negativa ou positivamente nos resultados, servindo como parâmetros de avaliação da espectroscopia de reflectância (equação 4), onde o fator de reflectância bidirecional (FRB) é a razão entre a radiância do alvo (dL_a) e a radiação da placa de referência que apresenta comportamento lambertiano (dL_p), multiplicado por um fator de correção da placa (k). A radiância de uma superfície permanece constante em qualquer direção observada – um difusor perfeito, na medida em que não existam superfícies lambertianas.

$$FRB = \frac{dL_a}{dL_p} k \quad \text{Eq. 4}$$

O ângulo de posição da fonte de luz (natural ou artificial) e o ângulo de posição do sensor são responsáveis pela bidirecionalidade conferida a essa técnica. As

medidas de reflectância do alvo e da placa de referência devem estar na mesma posição em relação à fonte de luz e ao sensor (MADEIRA NETTO, 2001).

Para a avaliação do comportamento espectral do solo são empregados outros métodos no processamento dos dados espectrorradiométricos (FIORIO *et al.*, 2010; RIZZO *et al.*, 2016). Como exemplo, a técnica de remoção do espectro contínuo, ao objetivar normalizar espectros de reflectância, possibilita a equiparação de feições de absorção individualmente, com base em valor de base comum, realçando as feições de absorção do solo em determinadas faixas do espectro eletromagnético, mediante à normalização das reflectâncias, o que facilita sua análise (DALMOLIN *et al.*, 2005). Outro tratamento aplicado aos dados espectrais dos alvos é o método MESMA (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis*), cujo objetivo é suavizar o efeito que a mistura espectral, advinda dos vários componentes do solo, exerce sobre a assinatura espectral. Cada componente é individualizado para uma análise mais detalhada (GENÚ *et al.*, 2013) e podem consistir de material orgânico, minerais primários e de argila, sais, óxidos e materiais parcialmente intemperizados, que formam a base da classificação dos solos (Embrapa, 2014).

Segundo Mendonça-Santos (2008), a existência de variações espectrais intrínsecas a fenômenos de absorção em sítios de coordenação iônica, o que confere à espectroscopia de reflectância a posição de importante meio para a obtenção de informações sobre os solos e seus constituintes. A aquisição desses dados pode ocorrer em laboratório, em campo ou mesmo mediante análise de imagens de satélite. As respostas espectrais comportam-se de maneira distinta – em caráter qualitativo e quantitativo – ao atingirem alvos terrestres, de acordo com seus constituintes (MENESES, 2001). Em resumo, as particularidades da reflectância espectral das diferentes classes de solos são reflexos de interferências cumulativas de seus atributos, tais como a textura do solo, água, teor de matéria orgânica, óxidos dispostos na solução do solo, inclusive a rugosidade superficial (JENSEN, 2009). Vale ressaltar que esses sítios específicos ao longo do espectro (bandas de absorção) decorrem de processos eletrônicos e vibracionais sofridos pelas moléculas de cada material acometido pela energia eletromagnética (HUNT, 1980).

Desse modo, justifica-se a importância da análise acerca da influência que cada propriedade exerce sobre a resposta espectral de um solo, que é avaliado em diferentes comprimentos de onda (FRANCESCHINI *et al.*, 2013). O uso dessas

técnicas ocupa um campo complementar de subsídio aos métodos convencionais de análise do solo (DEMATTÊ *et al.*, 2004c). Trata-se de uma ferramenta promissora, dada sua capacidade de otimização das análises laboratoriais de diversos parâmetros do solo (BROWN *et al.*, 2006). Seu potencial tem sido evidenciado por vários autores em várias partes do mundo desde a segunda metade do século XX (BOWERS; HANKS, 1965; HUNT; SALISBURY, 1970; STONER; BAUMGARDNER, 1981; CLARK; ROUSH, 1984; BAUMGARDNER *et al.*, 1985; SPRINGSTEEN, 1998; DAVIES, 1998; BEN-DOR *et al.*, 1999; SHEPHERD; WALSH, 2002; DEMATTÊ *et al.*, 2004a, GOLDSHLEGER *et al.*, 2004; BEN-DOR *et al.*, 2008; DEMATTÊ; TERRA, 2010; VISCARRA ROSSEL *et al.*, 2011; VISCARRA ROSSEL; CHEN, 2011; CEZAR *et al.*, 2013; RIZZO *et al.*, 2016). À medida que trabalhos voltados a esta finalidade são publicados, bibliotecas espectrais são alimentadas, o que proporciona aos levantamentos subsídios que possibilitam a formação de padrões de reflectância que contribuem na diferenciação de solos (BELLINASSO *et al.*, 2010).

Estudos de Stoner e Baumgardner, (1981) e Madeira Netto (2001) demonstram que a resposta espectral dos solos é resultante das propriedades acumulativas proveniente das interações dos diferentes constituintes que os integra. Estes incluem aspectos como: granulometria, matéria orgânica, umidade, óxidos de ferro (goethita e hematita) e os argilominerais 1:1 (caulinita) e 2:1 (montmorilonita, vermiculita e illita), que têm influência direta no comportamento espectral do solo, o que possibilita sua distinção e, por conseguinte, sua classificação (EPIPHANIO *et al.*, 1992; FORMAGGIO *et al.*, 1996; MADEIRA NETTO, 2001; DALMOLIN *et al.*, 2005; DEMATTÊ *et al.*, 2014).

Nesse aspecto, Madeira Netto e Baptista (2000) destacam a existência de especificidade em relação a sua assinatura espectral, na qual cada amostra de solo apresenta um caráter cumulativo, derivado da organização e composição de seus constituintes, o levantamento, classificação mediante a discriminação e identificação de solos relacionando seus atributos com a curva espectral exibidas por eles tem justificado o surgimento de vários estudos relacionados ao MDS (FIORIO *et al.*, 2010; MULDER *et al.*, 2011; FRANCESCHINI *et al.*, 2013; DEMATTÊ *et al.*, 2014; NAWAR *et al.*, 2015; RIZZO *et al.*, 2016).

V.6.2. Comportamento espectral dos principais constituintes do solo

Óxidos de ferro – comuns em regiões tropicais e subtropicais, os óxidos de ferro são o resultado de reações de oxidação de minerais primários ricos em ferro. Exercem grande influência sobre as propriedades físico-químicas e espectrais do solo. O tipo e quantidade de óxido de ferro alteram a coloração do solo, que pode variar do amarelo ao vermelho escuro (EIPHANIO *et al.*, 1992; DALMOLIN *et al.*, 2005; DEMATTÊ *et al.*, 2010).

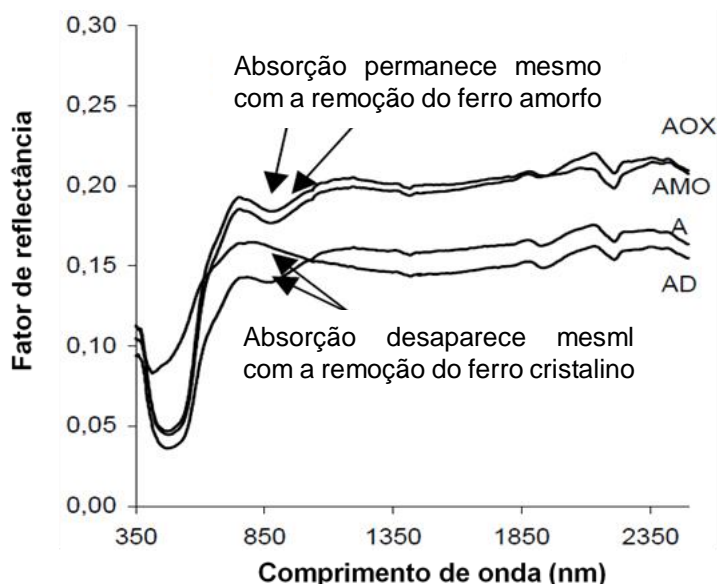
Diante das particularidades que os óxidos de ferro apresentam, Stoner e Baumgardner (1981) relatam que teores de óxidos de ferro maiores que 4% podem mascarar o efeito da matéria orgânica sobre o espectro. Em seus estudos, Fernandes *et al.* (2004) demonstraram que solos com baixos teores de ferro apresentam aumento da reflectância quando removida a matéria orgânica. Além disso, os autores relataram que solos com teores mais elevados de ferro, sem presença de minerais opacos, revelaram um aumento na reflectância de até 600nm e decréscimo até o limite de 2500nm, enquanto solos com presença de magnetita e ilmenita tiveram decréscimo em sua reflectância ao longo do espectro.

Uma coloração acinzentada é característica de reações de redução, o que leva a dedução de que o solo apresentará baixos teores de óxidos de ferro, porém essa não é regra (DALMOLIN *et al.*, 2005). Esse aspecto pode induzir ao erro, dada a influência no escurecimento da cor do solo impetrada pela matéria orgânica, que causa o efeito, levando ao mascaramento dos teores reais desses óxidos (KÄMPF; SCHWERTMANN, 1983; FERNANDES *et al.*, 2004). Os sesquióxidos (ferro férrico – Fe^{3+}) representam as feições mais comuns nos solos tropicais, onde a goethita ($FeOOH$) e a hematita (Fe_2O_3) são responsáveis pela maioria das características espectrais de solos muito intemperizados (BAPTISTA; MENESES, 2009). Nesse sentido, Ben-Dor *et al.* (1999) concluíram que é possível inferir sobre a presença de teores de ferro no solo por meio da utilização da reflectância espectral, observando a interação existente entre esse elemento e outros componentes do solo.

A análise da influência das formas de ferro sobre a reflectância de solos tropicais levou Demattê *et al.* (2003) a considerar que a remoção conjunta da matéria orgânica e do ferro amorfo resulta em um incremento na reflectância em toda extensão do espectro medido nos solos avaliados, especialmente em latossolos ricos em óxidos

de ferro, mas sem modificar o formato geral das curvas espectrais (Figura 4a). Verificaram também que a absorção característica dos óxidos (por volta dos 850 nm) não é condicionada por feições de ferro amorfo (Figura 4b). Esse comportamento é contrário ao efeito causado pela remoção do ferro cristalino (em 400 e 850nm), que promoveu um aumento da reflectância na região do visível em detrimento das regiões do infravermelho próximo e de ondas curtas.

Figura 1 – Influência dos óxidos de ferro no comportamento espectral do solo.



Fonte: Adaptado de Demattê *et al.* (2003).

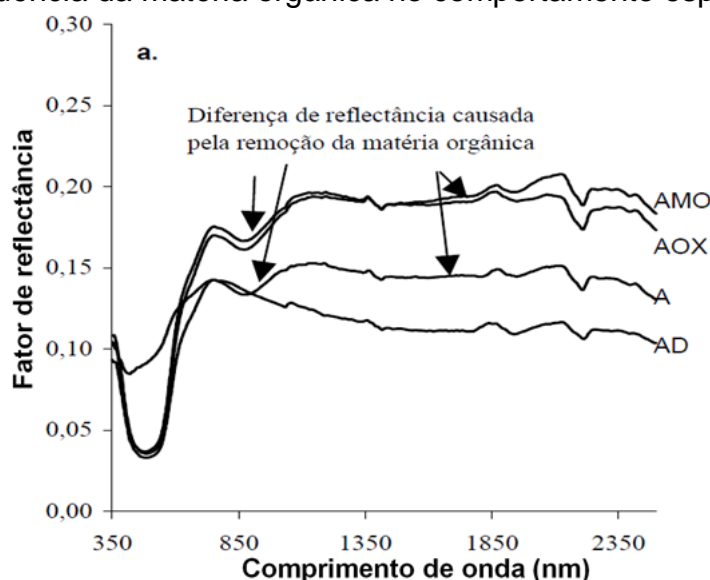
Onde: testemunha (A), remoção: da matéria orgânica (AMO); do ferro cristalino e amorfo (AD); do ferro amorfo (AOX), onde: (a) influência do ferro amorfo e (b) do ferro cristalino na curva espectral em 850 nm.

Matéria Orgânica – constituída por ácidos flúvicos, húmicos e humina, a matéria orgânica (MO) reduz o coeficiente de brilho, escurece e confere ao solo um matiz acinzentado com tendência a coloração acromática (diminuição dos coeficientes de cor) ao solo na faixa de 650 a 750 nm (MADEIRA NETTO, 2001). Diferenças significativas foram verificadas no comportamento geral do espectro de solos tratados com resíduos de cana de açúcar quando comparados com outros que não receberam tal tratamento (DEMATTE *et al.*, 2004b). Segundo os autores, essas alterações se devem, principalmente, aos processos de fermentação que ocorrem no solo durante a decomposição da matéria orgânica. Teores a partir de 1,7% de MO mascaram sinais específicos deixados pela presença de óxidos de ferro no solo ao longo do espectro;

em contrapartida, quando removida, a MO provoca um aumento considerável na reflectância (Figura 2), além de um nivelamento na forma dos espectros. Resultados semelhantes foram encontrados por Chang *et al.* (2005).

No intuito de identificar comprimentos de onda mais propícios à predição do conteúdo de MO do solo por meio da sua reflectância espectral, Krishnan *et al.* (1980) identificaram a região do visível como melhor banda espectral. Essa banda alcançou coeficiente máximo de correlação (r^2) para os modelos estudados, de 0,98 para as bandas na região de 623 e 564 nm; em contrapartida, a região do infravermelho, o coeficiente máximo de correlação foi de 0,87, esses resultados na pouca variação causada pela MO nestas regiões do espectro. Com o mesmo objetivo, Coleman e Montgomery (1987) observaram que, à medida que o teor de MO, juntamente com a umidade, aumentou, houve uma diminuição na reflectância espectral em todos comprimentos de onda. Os autores atribuem à região entre 760 a 900 nm a mais importante para predizer o conteúdo de matéria orgânica no solo.

Figura 2 – Influência da matéria orgânica no comportamento espectral do solo.



Fonte: Demattê *et al.* (2003).

Onde: sítios de alteração causados pela remoção da matéria orgânica em: testemunha (A), remoção: da matéria orgânica (AMO); do ferro cristalino e amorfo (AD); do ferro amorfo (AOX).

Componentes da MO também exercem efeitos diferentes entre si sobre o espectro eletromagnético (OBUKHOV; ORLOV, 1964). Ácidos húmicos apresentam um baixo coeficiente de radiância na faixa de 0,2 a 0,3, ao passo que ácidos fúlvicos ocupam coeficientes entre 0,4 e 0,6 (HENDERSON *et al.*, 1992). Esses autores

revelam, ainda, que o comportamento espectral da MO é regido pelo seu grau de decomposição. Solos orgânicos com material sáprico mostram baixa reflectância na região de 500 a 2300nm quando comparado a material hêmico. Já o material fíbriico exibe reflectância elevada, principalmente na região do infravermelho próximo (HENDERSON *et al.*, 1992). Poucos anos mais tarde, Ben-Dor *et al.* (1997) avaliaram a reflectância da matéria orgânica ao longo de seu processo de decomposição; os autores constataram a presença de alterações no comportamento espectral na região do visível e infravermelho próximo, mudança atribuída à relação Carbono/Nitrogênio, que variou entre as amostras.

Cor – utilizado para classificação e interpretação de solos, esse atributo está previsto em protocolos de descrição morfológica em campo, onde a cor de uma amostra de solo é confrontada com uma base de referência padronizada, denominada Carta de Munsell (*MUNSELL COLORS COMPANY*, 2000). Considera-se o comprimento de onda da luz (matiz), o brilho ou tonalidade (valor) e a intensidade ou pureza da cor em relação ao cinza (croma) (ESTADOS UNIDOS, 1993; EMBRAPA, 2014). Estudos revelam que a cor do solo advém, entre outros fatores, da composição mineralógica (óxidos de ferro), bem como do conteúdo de MO e da classe textural (Schwertmann, 1993; Barrón *et al.*, 2000). Os solos com altos teores do mineral quartzo, associado à baixos teores de óxidos de ferro de MO, revelam cores mais claras (DALMOLIN *et al.*, 2005). A hematita e a goethita são os óxidos de ferro mais comuns (MADEIRA NETTO, 2001). Muitas vezes, essas substâncias condicionam a cor do solo segundo sua concentração e tipo predominante como demonstrado por Kämpf e Schwertmann (1983), que concluíram que a hematita confere tons mais vermelhos e, com goethita livres de hematita, há tendência a solos vermelho-amarelo a amarelos.

De acordo com Jensen (2009), a cor pode ser determinada com maior exatidão pela espectroscopia de reflectância, uma vez que esse aspecto depende, diretamente, da energia eletromagnética incidente, da capacidade perceptiva do observador ou do instrumento de medida, além da energia refletida pelo solo. Dalmolin *et al.* (2005) reforçam essa prerrogativa ao afirmar que os resultados quantitativos da espectrometria de reflectância para a determinação da cor são mais fidedignas, dada as condições controladas e não subjetivas dessa técnica, além da capacidade de detecção de alterações mínimas no espectro, invisíveis a olho nu.

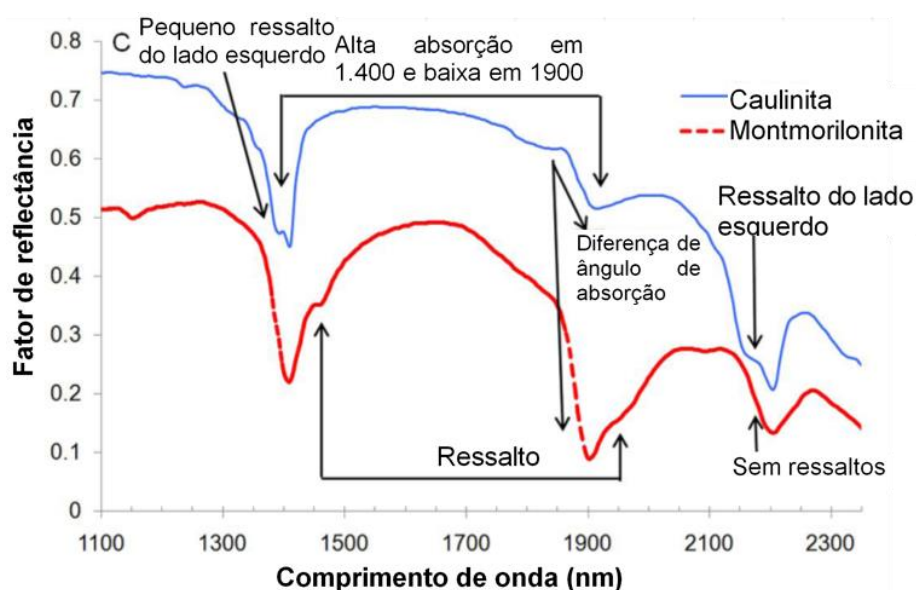
Ao investigar a influência da cor e da umidade reflectância do solo, Post *et al.* (2000) chegaram à conclusão de que o uso dos dados de valores da carta de Munsell, por meio da equação albedo do solo (300 a 2800 nm) = 0,069 (valor Munsell) – 0,114, foi capaz de estimar a cor. O coeficiente de correlação alcançou 0,93. Para tanto, a cor foi aferida por meio da utilização de um colorímetro e as curvas de reflectância espectral foram medidas com um radiômetro multiespectral.

Para validar um modelo capaz de prever a cor do solo com base em sua reflectância, Mattikalli (1997) avaliou amostras de terra fina seca ao ar de vários solos, das quais obteve grande precisão. Os intervalos espectrais do radiômetro utilizado coincidiram com as bandas do sensor multiespectral (MSS) do LANDSAT. As implicações desse estudo revelaram suas potencialidades para o MDS (VISCARA ROSSEL *et al.*, 2009). Nesta linha, Post *et al.* (1994) investigaram as variações de cor da terra fina de solos, obtidas com colorímetro e com o uso de números digitais registrados pelo LANDSAT. Os autores obtiveram dados altamente correlacionados. A obtenção de relações válidas entre os parâmetros de reflectância e os determinados por outros métodos confirma o potencial de utilização da radiometria. Uma correlação significativa ($r = - 0,95$, $p < 0,001$) entre o índice de avermelhamento e a relação goethita/ (goethita + hematita) para algumas argilas de solos brasileiros bastante intemperizados foi obtida por Fontes e Weed (1996).

Minerais da fração argila – o material de origem, juntamente com o grau de intemperismo de um solo, são os maiores responsáveis pela sua composição mineralógica que, por sua vez, tem impacto direto no comportamento espectral do solo, especialmente nas regiões entre 500 e 2.500 nm (JENSEN, 2009). Como exemplo, uma resposta espectral diferenciada foi encontrada na região de 1400 e 1900nm por Mathews *et al.* (1973a), quando os autores investigavam o comportamento espectral dos solos, o que levou a presumir a existência de forte influência da água adsorvida e também da hidroxila estrutural. Esse comportamento foi notado, também, quando analisaram a caulinita. A região de 2200nm é indicativa da influência da hidroxila estrutural. A illita mostrou baixa reflectância para comprimentos de onda menores que 1700nm, além de baixa intensidade de absorção nas bandas de água e hidroxila, quando comparadas com as amostras de caulinita e nontronita. Baseando-se na presença de caulinita e Gibbsita no solo, Madeira Netto *et al.* (1995) sugeriram um índice (iKi) para estimar o seu grau de intemperismo a partir

de feições de absorção do espectro da Gibbsita. Ao comparar esse índice com o índice K_i convencional (Embrapa, 2014) os autores obtiveram correlação de 0,98, o que indica que se trata de uma variável significativa estatisticamente para se calcular o grau de intemperismo do solo. Nesse ínterim, a caulinita e a montmorilonita ocorrem com mais frequência entre os solos. A reflectância desses dois minerais de argila apresentam zonas de absorção na região entre 1.400 e 2.200 nm (infravermelho de ondas curtas). Processos vibracionais moleculares harmônicos de alongamento das ligações (2s) em 1.400 nm, juntamente com o alongamento da hidroxila e com vibrações de dobramento de ligação entre Al-OH (d + s) em 2.200 nm são responsáveis por esse comportamento. Em outras palavras, a água adsorvida na constituição da montmorilonita causa duas quedas características, em 1.900 nm e em 1.400 nm. A presença de água molecular adsorvida, próxima de 1.900 nm, se branda, indica a presença de caulinita (MADEIRA NETTO; BAPTISTA, 2000; MADEIRA NETTO, 2001). Essas particularidades associadas a outros parâmetros combinados ao comportamento espectral do solo levaram Demattê *et al.* (2014) a propor uma metodologia que permitisse a interpretação morfológica da reflectância conexas a uma visão quantitativa, na qual alcançaram 85% de precisão entre o método e a classificação morfológica tradicional (Figura 3).

Figura 3 – Espectros de reflectância da caulinita ($\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$) e da montmorilonita $(\text{Al, Mg})^2 - 3 \text{Si}_4\text{O}^{10} (\text{OH})^2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ com particularidades



Fonte: Adaptado de Demattê *et al.* (2014).

Granulometria – a distribuição de tamanhos de partículas minerais no solo é denominada granulometria ou textura. A estrutura corresponde ao arranjo físico e a agregação destas partículas no solo. A depender da textura e da estrutura, um solo apresenta-se mais ou menos poroso. Os poros, por sua vez, são os interstícios do solo ocupados ou passíveis de ocupação por água e por ar (KÄMPF; CURI, 2012b).

Segundo Dalmolin *et al.* (2005), o quartzo tende a aumentar o albedo de maneira a conferir altos níveis de reflectância aos solos com textura arenosa, quando associado aos baixos teores de MO, de óxidos de ferro e a menores teores de água. Nos solos de textura média a fina, a reflectância aumenta com o aumento do tamanho das partículas (da fração areia) e a diminuição da proporção de areia fina a muito fina (SOUSA JUNIOR *et al.*, 2008). Em outras situações, quanto menor for o tamanho das partículas, maior a reflectância apresentada pelo solo, pois partículas menores exibem um melhor arranjo – como menos faces irregulares – com número menor de poros que retêm a energia incidente, enquanto a maior granulometria cria superfícies mais irregulares, com sombreamentos e maior retroespalhamento interno da luz (MADEIRA NETTO, 2001).

Segundo Stoner e Baumgardner (1981), a diminuição no tamanho de partícula, ou seja, o aumento da proporção de areia fina e de areia muito fina provoca um aumento da reflectância em solos de textura arenosa. Para solos de textura média a fina, ocorre o contrário. Os autores relatam, também, que com teores elevados de umidade, associados ao aumento de argila, houve um decréscimo na reflectância na faixa espectral de 2080 a 2320 nm. Já os solos argilosos têm sua reflectância reduzida em relação aos arenosos, dada a formação de agregados (estrutura) maiores que as partículas de areia (MADEIRA NETTO, 2001).

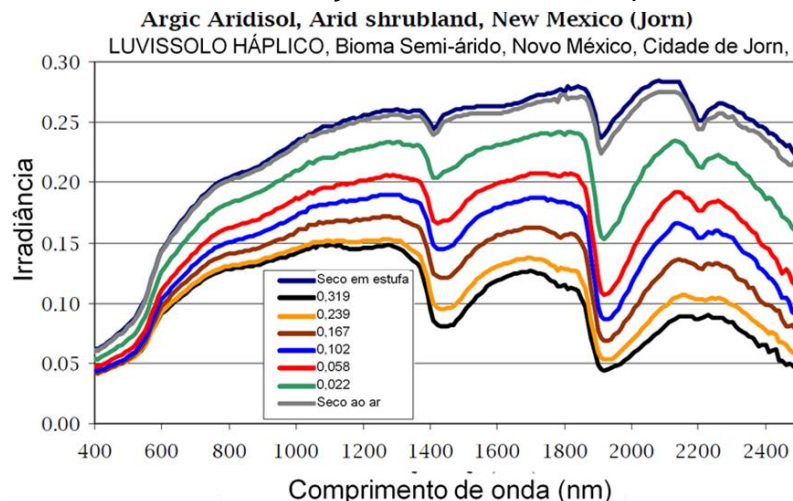
O conteúdo de argila pode reduzir significativamente a reflectância na região de 500 a 700 nm e ao redor das bandas de absorção de 1400, 1900 e 2200 nm (MONTGOMERY, 1976). O autor atribui essas zonas de absorção à atração do vapor de água na superfície do solo. As propriedades espectrais e os teores de silte e argila do solo apresentaram alto coeficiente de correlação nos estudos de Coleman *et al.* (1991), que apontaram as regiões entre 450 e 520 nm, 520 e 600 nm, 630 e 690 nm e 2030 a 2035 nm como mais significantes para a estimativa dos teores de silte. As regiões para estimar os teores de argila foram os comprimentos entre 520 e 600 nm, 1150 e 1300 nm e 2030 a 2035 nm, em solos dos Estados Unidos.

A reflectância decai em solos acometido por atividade agrícola, devido principalmente à rugosidade causada por essas práticas, que desempenham um fator impeditivo à reflectância, resultado do sombreamento decorrente das características dos torrões, da geometria de iluminação e do ângulo de visada do sistema sensor (MADEIRA NETTO, 2001) (Figura 6).

Umidade – A diminuição na reflectância do solo ao longo do espectro óptico se deve, entre outros vários fatores, à umidade apresentada de forma que, o solo escurece a medida em que sua umidade aumenta (Stoner e Baumgardner, 1981). A presença de umidade normalmente não altera, de maneira significativa, a forma das curvas espectrais, salvo as bandas de absorção características da ação da água adsorvida (1.400 e 1.900 nm).

Utilizando a *Soil Taxonomy*, Lobell e Asner (2002) analisaram os efeitos da umidade do solo sobre sua reflectância. Dentre as propriedades investigadas, a umidade se mostrou um importante parâmetro a ser estimado, principalmente entre os *Argids Aridisols* (análogo à Luvisolos Háplico no SiBCS), uma vez que sofrem com o déficit hídrico (Embrapa, 2014). Neste estudo, foram considerados diferentes níveis umidade (Figura 4), de onde abstraiu um modelo que elegeu a região do SWIR como o melhor comprimento de onda para sua predição. Os autores observaram, ainda, que a forma geral da curva não sofria alterações significativas, porém, à medida em que a umidade aumentava, o solo escurecia, devido a influência negativa na reflectância inerente à água.

Figura 4 – Reflectância espectral *Argic Aridisol* com diferentes níveis de umidade. Umidade estimada com base em medições de massa e é expressa em termos de volume relativo.



Fonte: Adaptado de (LOBELL; ASNER, 2002).

A redução da reflectância dos solos em função do aumento da umidade foi avaliada por Stoner *et al.* (1991) ao estudar o comportamento espectral de Latossolos onde a reflectância em comprimentos de onda menores que 520nm manteve praticamente inalterada devido à presença de um elevado teor de hematita (óxido de ferro com alta opacidade). Nesse contexto, os componentes minerais e o comprimento de onda utilizado condicionam a resposta espectral de um solo levando em conta a umidade como fator de alteração do comportamento espectral (BEDIDI *et al.*, 1992).

V.6.3. Bibliotecas espectrais de solos

A compilação das variações de respostas espectrais de um determinado alvo que caracterizam o seu comportamento espectral é denominada biblioteca espectral (BROWN *et al.*, 2006). As bibliotecas espectrais são bancos de dados carregados com assinaturas espectrais de uma determinada categoria de alvos que possibilita a identificação, a distinção e a quantificação de minerais, rochas e solos com base em suas particularidades de reflectância e de absorção espectral registradas (VISCARRA ROSSEL *et al.*, 2008). Os dados captados em laboratório ou em campo com o uso de um espectroradiômetro, resultantes da quantificação das interações entre o objeto analisado e a radiação eletromagnética, são expressos por gráficos denominados curvas espectrais. (DEMATTÊ *et al.*, 2010).

Vários estudos sobre levantamento e classificação de solos têm sido desenvolvidos com base em bibliotecas espectrais oficiais em diferentes regiões do mundo (DUNN *et al.*, 2002; SHEPERD; WALSH, 2002; BROWN *et al.*, 2006; BALDRIDGE *et al.*, 2009; BELINASSO *et al.*, 2010; VISCARRA ROSSEL *et al.*, 2016). Bibliotecas espectrais locais e bibliotecas espectrais construídas para fins específicos de investigação são inúmeras. Entre as maiores e mais importantes bibliotecas espectrais de solos (BES) disponíveis tem-se a *ASTER Spectral Library*, criada por Baldrige *et al.* (2009), que consiste na compilação de 2.400 espectros de solos, rochas, minerais e outros materiais de mais de noventa países. A biblioteca é composta por três grandes bancos de dados: a *Spectral Library of United States Geological Survey* (CLARK *et al.*, 2007), a *Johns Hopkins University Spectral Library* (JHU) e a *JPL Spectral Library* (JET PROPULSION LABORATORY, 2006). Na Europa, a biblioteca espectral de solos é chamada LUCAS (*Land Use/Cover Area*

Frame Survey) e possui cerca de 20.000 amostras de solo de superfície, coletadas de 23 países (STEVENS *et al.*, 2013).

Seguindo protocolos internacionais da WRB (FAO, 1998), vários cientistas do solo ao redor do mundo reuniram-se na tarefa de desenvolver uma biblioteca espectral de solos em escala global, com perspectivas de abranger espectros em diversas regiões geográficas (VISCARRA ROSSEL *et al.*, 2016). No Brasil, tem-se a Biblioteca Espectral de Solos do Brasil (BESB), coordenada pelo pesquisador Dr. José Alexandre de Melo Demattê, e que conta com muitos outros colaboradores e pesquisadores de sete estados brasileiros, somando cerca de 8.000 amostras de solo.

Uma BES deve ser construída com uniformidade de técnicas de aquisição, processamento e gerenciamento de dados, de maneira que a compilação de dados de reflectância sigam três princípios básicos (I) quantidade de amostras suficientemente representativa, que reflita da melhor maneira a variabilidade de solos encontrada na região à qual a biblioteca se refere; (II) as amostras devem ser submetidas a um pré-processamento cauteloso em todas as etapas de agrupamento, manipulação, preparação, armazenamento e digitalização, visando não interferir na curva espectral dessas amostras; (III) os dados de referência de análise das amostras para serem utilizados em calibrações devem ser adquiridos segundo procedimentos analíticos reconhecidos e confiáveis (DUNN *et al.*, 2002; SHEPHERD; WALSH, 2002; BROWN *et al.*, 2006; DEMATTÊ *et al.*, 2010). Nesse âmbito, Baldrige *et al.* (2009) destacam que bancos de dados formados com essas informações espectrais consistem em uma base padrão de referência para incontáveis possibilidades de análises, inclusive com aplicações em outras técnicas do sensoriamento remoto para avaliações qualitativas nas diferentes áreas da ciência do solo.

V.6.4. Sistema sensor ASTER

Lançado em 1999 mediante a ação conjunta entre os governos do Japão e Estados Unidos, na missão TERRA, o sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), corresponde a um dos cinco instrumentos a bordo do Satélite TERRA (*Earth Observing System – EOS-AM1*) e teve sua vida útil projetada para cinco anos (ERSDAC, 2003). Ainda em operação, este equipamento

consiste em três subsistemas de sensores: VNIR (*Visible and Near Infrared*), SWIR (*Shortwave Infrared*) (atualmente danificado) e TIR (*Thermal Infrared*).

As imagens ASTER apresentam 14 bandas ou canais espectrais dando cobertura radiométrica desde o espectro visível até o espectro do infravermelho termal (0,4 μ m e 12 μ m) (Embrapa, 2013) (Tabela 3). Os dados das imagens são adquiridos com um ângulo de retrovisada de aproximadamente 28°, o que permite a construção de pares estereoscópicos para cada imagem e geração dos modelos de elevação (ABRAMS *et al.*, 2007). O satélite Terra possui órbita heliossíncrona, uma altitude nominal de 705 km e cruza o Equador aproximadamente às 10h30min, hora local (ERSDAC, 2003).

Tabela 3 – Características do sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)

| Subsistemas de sensores | Bandas Espectrais | Resolução | | | | Área Imageada (km) |
|---------------------------------|-------------------|----------------------|--------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| | | Espectral (μ m) | Espacial (m) | Radiométrica (bit) | Temporal (dias) | |
| Visível + Infravermelho Próximo | 1 | 0,520 - 0,600 | 15 | | | |
| | 2 | 0,630 - 0,690 | | | | |
| | 3 (Nadir) | 0,760 - 0,860 | | | | |
| | 3 (Off-Nadir) | 0,760 - 0,860 | | | | |
| Infravermelho de ondas curtas | 4 (SWIR 1) | 1,600 - 1,700 | 30 | 8 | 16 | 60 |
| | 5 (SWIR 2) | 2,145 - 2,185 | | | | |
| | 6 (SWIR 3) | 2,185 - 2,225 | | | | |
| | 7 (SWIR 4) | 2,235 - 2,285 | | | | |
| | 8 (SWIR 5) | 2,295 - 2,365 | | | | |
| | 9 (SWIR 6) | 2,360 - 2,430 | | | | |
| Infravermelho Termal | 10 | 8,125 - 8,475 | 60 | | | |
| | 11 | 8,475 - 8,825 | | | | |
| | 12 | 8,925 - 9,275 | | | | |
| | 13 | 10,250 - 10,950 | | | | |
| | 14 | 10,950 - 11,650 | | | | |

Fonte: Adaptado de Abrams *et al.* (2007).

Uma limitação desse sistema, comum a outros sistemas sensores, está na ocorrência de falhas de correlação causadas por, por exemplo, coberturas de nuvens, prédios e matas nas imagens de entrada (RODRIGUES *et al.*, 2010). O ASTER tem uma faixa de imageamento de 60 km (ABRAMS *et al.*, 2007).

V.6.4.1 Subsistemas

VNIR (Visible and Near Infrared) – porção do espectro electromagnético que compreende a faixa do visível e do infravermelho próximo (0,4 a 1,4 μm). Combina o espectro visível completo com uma porção adjacente do infravermelho até a banda a água absorção (aproximadamente 1,4 e 1,5 μm). A região do VNIR tem servido uma gama de aplicações no que concerne ao sensoriamento remoto e espectroscopia de reflectância (NAWAR *et al.*, 2015).

A resolução espacial corresponde a 15 metros nesse sensor, sendo subdividida em 3 bandas na faixa do azul, verde e vermelho voltado ao nadir, além de uma quarta banda em *Off-nadir* nessa mesma faixa, o que permite a estereoscopia (ERSDAC, 2003).

SWIR (Shortwave Infrared) – a região de detecção do infravermelho de ondas curtas (0,9 - 1,7 μm) é captada por sensores de Índium arsenieto de gálio (InGaAs), uma vez que a luz na banda SWIR não é visível para o olho humano (ERSDAC, 2003). Apesar disso, essa luz interage com objetos de maneira semelhante a comprimentos de onda visíveis, como resultado da natureza de sua reflectância.

O sensor ASTER possui 6 bandas nessa região (5 a 10), divididas entre os comprimentos de onda entre 1,60 a 2,43 μm , com resolução espacial de 30m (ABRAMS *et al.*, 2007). Embora disponíveis para os usuários, dados SWIR obtidos a partir de abril de 2008, encontram-se inutilizados devido a uma saturação anômala do subsistema atribuída a um aumento na temperatura do detector Aster SWIR. Contudo, as faixas do VNIR e TIR bandas não foram afetadas por esse problema (NASA JPL, 2009).

TIR (Thermal Infrared) – a Espectroscopia de infravermelho termal (TIR) é o subconjunto de espectroscopia que lida com a radiação emitida na faixa infravermelha do espectro eletromagnético (3 a 14 μm). A radiação infravermelha emitida, embora semelhante à radiação do corpo negro, é diferente, na medida em que a radiação é atada a vibrações características do material (JENSEN, 2009). O método mede a radiação térmica infravermelha emitida em oposição a ser transmitida ou refletida a partir de um volume ou de uma superfície (JENSEN, 2009). Este método é geralmente utilizado para identificar a composição de superfície por análise de seu espectro e comparando-a com os materiais anteriormente medidos. Ela é particularmente

adequada para aplicações aéreas e espaciais (Embrapa, 2013). No sensor ASTER, esse subsistema é seccionado em sete bandas de 8,125 a 11,650 μm (ERSDAC, 2003).

V.6.4.2. Aquisição dos produtos ASTER/TERRA

Desde 1º de abril de 2016, o público em geral passou a ter acesso ilimitado e gratuito ao banco de imagens de um período de mais de 16 anos do sensor japonês ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), a bordo do satélite Terra. As imagens terrestres do sensor mapeiam e monitoram mudanças na superfície terrestre. Ao anunciar a mudança na política, o METI (*Ministry of Economy, Trade, and Industry of Japan*) e a NASA (*United States National Aeronautics and Space Administration*), responsáveis pelo sensor, citaram a longevidade do ASTER, que continua com ampla capacidade de monitoramento ambiental (NASA JPL, 2016).

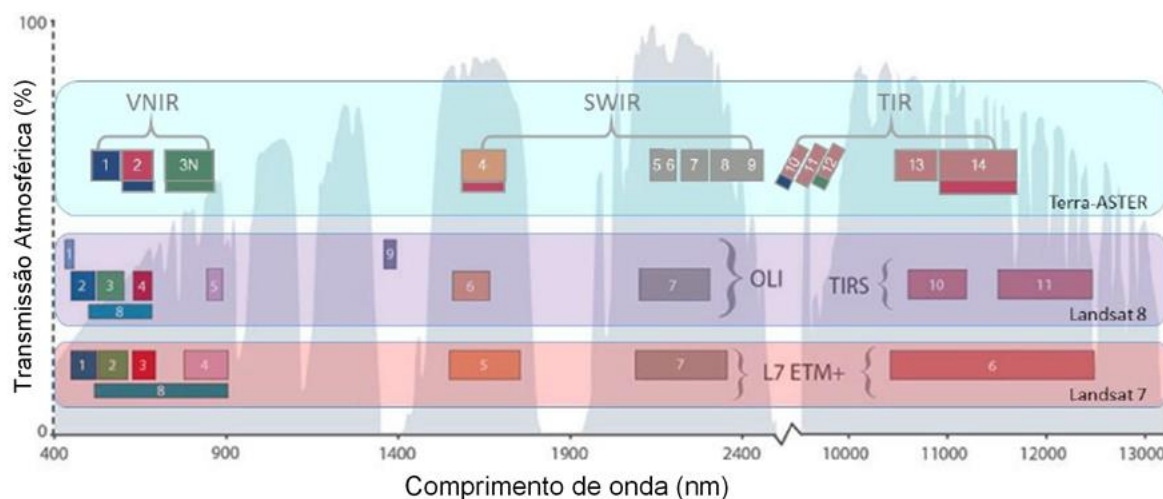
Os produtos ASTER disponíveis incluem vários níveis de processamento, dos quais o Nível-1A (AST_L1A) corresponde às imagens com menos intervenções, de modo que os dados contêm números reconstruídos, instrumentos digitais (DNs) derivados dos fluxos de telemetria adquiridos diretamente dos telescópios: visível e infravermelho próximo (VNIR) e ondas curtas de infravermelho (SWIR) e de infravermelho termal (TIR) (NASA LP DAAC, 2014). Além disso, tem-se disponíveis os coeficientes de correção geométrica e radiométrica, em que os coeficientes de calibração são calculados e anexados aos metadados, mas não são aplicados. Os processamentos digitais contidos nessas imagens limitam-se à correção geométrica, levando em consideração o ângulo de rotação da Terra; a correção geométrica para erros de geolocalização associados com cenas TIR noturnos; e a correção radiométrica para explicar a degradação de lâmpadas de calibração internas do sistema (NASA LP DAAC, 2001).

Os produtos do Nível-1B (AST_L1B) são obtidos pela aplicação dos coeficientes de calibração geométrica (as bandas SWIR e TIR são registradas em relação às bandas do VNIR) e Radiométrica (NASA LP DAAC, 2014). Os produtos do Nível-2 (AST_L2) são produtos secundários, como radiância de superfície, reflectância de superfície (VNIR e SWIR), emissividade de superfície (TIR) e

temperatura cinética de superfície. O Nível-3 (L3) fornece o modelo digital de elevação (MDE), proveniente das bandas 3N (NADIR) e 3B (backward) (ABRAMS *et al.*, 2007).

As especificidades ASTER fornecem aos pesquisadores importantes informações para o mapeamento de superfície e o monitoramento das condições dinâmicas e mudanças ao longo do tempo (NASA AP DAAC, 2014). Estudos nas mais diversas áreas conferem destaque a esse sensor; entre esses constam estudos sobre glaciação (HAN *et al.*, 2016); acompanhamento de atividades vulcânicas (BLACKETT; WOOSTER, 2011; ULUSOY, 2016); óptica de aerossóis e nuvens (HULLEY; HOOK, 2008); temperatura e equilíbrio de calor de superfície terrestre (WANG; LIANG, 2009); geologia (VICENTE; SOUZA FILHO, 2011) e mapeamento de solos (NAWAR *et al.*, 2015). A figura 5 traz uma comparação entre o posicionamento relativo das bandas ASTER/TERRA e dos sensores das plataformas TM/Landsat-7 (*Thematic Mapper*) e OLI/Landsat-8 (*Obeserving Land Information*).

Figura 5 – Comparação de Bandas Espectrais entre ASTER and Landsat-7 Thematic Mapper e Landsat-8 – OLI



Fonte: Adaptado de Abrams *et al.* (2007).

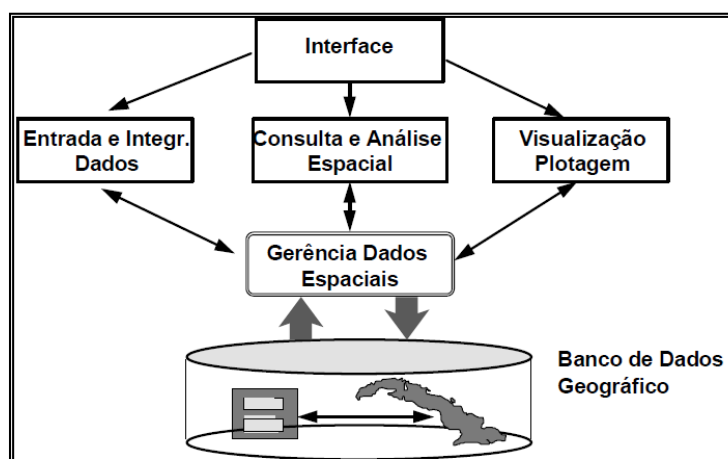
V.7. Sistemas de informação geográfica

As geotecnologias representam um importante instrumento computacional na busca de maior eficiência na verificação da adequação do uso de recursos naturais (ALVES *et al.*, 2015). Como exemplo, tem-se os GIS (*Geographic Information Systems*) ou SIG (Sistemas de Informação Geográfica), a Cartografia Digital, o Sensoriamento Remoto, Sistema de Posicionamento Global, Geodésia, entre outras tecnologias (BITAR, 2000).

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) pode ser descrito como uma tecnologia computacional, desenvolvida a fim de capturar, armazenar, manipular e visualizar dados georeferenciados (BURROUGH e MCDONELL, 1998). Embora seus conceitos tenham origem no século XVII, essa tecnologia teve seu uso ampliado a partir da década de 1960, com o aparecimento do sistema global de navegação por satélite, do sensoriamento remoto e do acesso à internet (MIRANDA, 2010). Atualmente, os SIGs são dotados de uma vasta e complexa lista de ferramentas para processamento e análise de dados espaciais. As recentes melhorias nas interfaces gráficas e a disseminação de dados georeferenciados – como imagens de satélite e mapas temáticos – contribuíram fortemente para a popularização desta tecnologia (REIBEL, 2007), com aplicação nos mais variados setores de segurança, saúde, educação e áreas de cunho socioeconômico e ambiental como hidrologia, agricultura, exploração de petróleo, conservação do solo e aptidão e uso da terra (MIRANDA, 2010).

Segundo Guerra (2006) as geotecnologias representam importantes ferramentas para a tomada de decisão. Estas ferramentas são compostas basicamente de combinações de dispositivos (*hardware*), aplicativos (*software*), usuários (*peopleware*), em que as informações geradas são armazenadas em um banco de dados (*dataware*). A partir de sua estrutura básica (Figura 6), o SIG integra programas, equipamentos, metodologias, dados e pessoas (usuários) de forma a tornar possível a coleta, o armazenamento, o processamento e a análise de dados georeferenciados, bem como a produção de informação acerca do objeto de estudo (TEIXEIRA, 1995).

Figura 6 – Arquitetura de sistemas de informação geográfica



Fonte: Câmara *et al.* (1996).

A utilização de SIGs tem auxiliado na elaboração e no aprimoramento de mapas planialtimétricos, geomorfológicos, geológicos entre outros. Os SIGs correlacionam-nos de maneira a gerar informações passíveis de diversos tipos de análise para tomada de decisão (CÂMARA; MEDEIROS, 1998). De maneira geral, o SIG, bem como outras geotecnologias, tem facilitado a elaboração de mapas de solos em escalas cada vez mais detalhadas, por meio do estabelecimento de modelos preditivos de distribuição de solos na paisagem com base nas relações entre solo, relevo e geologia. Estudos têm mostrado a potencialidade dessas tecnologias na representação dos recursos naturais (SARMENTO *et al.*, 2009).

Lacerda *et al.* (2008), Mendonça Santos (2008), Ballabio (2009), Ge *et al.*, (2011), e Silva *et al.* (2013), aplicaram e calibraram modelos preditivos de solos na paisagem, possibilitando seu mapeamento nas regiões estudadas, utilizando SIG e SR. Lacerda *et al.* (2009), Barbosa *et al.* (2010) e Summers *et al.* (2011) evidenciaram as prerrogativas da utilização desses sistemas, aliados a produtos do sensoriamento remoto para representar a amplitude da ocorrência de cada classe de solos, possibilitando, ainda, as relações entre os fatores intrínsecos da Pedogênese, de modo que se facilitasse seu entendimento e conseqüentemente, sua classificação e mapeamento. Lacerda e Barbosa (2012), inclusive, apontam a vegetação nativa como um dos importantes parâmetros para a correlação com classes de solos, fato justificado pela capacidade desses solos de refletir suas características e potencialidades naturais.

V.7.1. SIG para produtos de Sensoriamento Remoto

Em termos de SIG, o programa computacional ArcGIS® (ESRI, 2015) tem sido o mais utilizado por pedólogos para realização de MDS (TEN CATEN *et al.*, 2012). Esse programa possui código fonte fechado, o que, segundo Wood (2009), dificulta a padronização dos procedimentos executados para a obtenção de determinado resultado. Porém, existem vários outros sistemas com o código aberto disponíveis para avaliação dos usuários, como é o caso do QuantumGis, Saga, Erdas, Idrisi, Grass e o Spring do INPE (Intituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (TEN CATEN *et al.*, 2012).

O ArcGIS® foi desenvolvido para a criação, gerenciamento, compilação e diagnóstico acerca de dados geográficos. O programa destaca-se pela versatilidade oferecida aos seus usuários, uma vez que possibilita a inserção de extensões no sistema, com o objetivo de realizar as mais variadas operações em um único posto de trabalho ou em uma rede global de utilizadores (ESRI, 2015). Os vários módulos existentes podem ser combinados pelo *model building*, que corresponde a uma aplicação desse programa que reúne funções em um único processo, com o objetivo de executar tarefas complexas e repetitivas relacionadas aos dados geográficos (ESRI, 2015). Representa uma ótima alternativa, dada sua potencialidade em atividades que envolvam geoprocessamento.

O programa de computador ENVI (EXELIS, 2015) consiste em uma compilação de funcionalidades para visualização, exploração, análise e apresentação de dados na área de Sensoriamento Remoto/SIG. Dentre suas várias aplicações, o ENVI é capaz de realizar tarefas de análise e processamento espectral, o que o difere da maioria dos demais programas, e que justifica a preferência de diversos profissionais por essa solução no setor de geoprocessamento; porém, o programa é mais indicado para processamento digital de imagens (PDI) e georreferenciamento.

Técnicas de PDI são descritas por Crósta (1993) como a manipulação de uma imagem por computador com o objetivo de aprimorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano e de fornecer outros subsídios para a sua interpretação, bem como o de gerar produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos quantitativos. O termo georreferenciamento de uma imagem ou de outra forma de informação geográfica consiste, basicamente, em tornar conhecidas suas coordenadas num dado sistema de referência, de maneira que haja correção geométrica (NOVO, 2008).

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT [ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS]. **NBR 6502:** informação e documentação: rochas e solos: Terminologia. Rio de Janeiro, 18p. 1993.

ABRAMS, M.; HOOK, S.; RAMACHANDRAN, B. **Aster user handbook:** version 2. 2007. Disponível em: <
https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/product_documentation/aster_l1t_users_guide.pdf. > Acesso em: 24 maio de 2016.

ALVES, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. e BARROS P. P. S. Multiple Geotechnological Tools Applied to Digital Mapping of Tropical Soils. Viçosa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 39, n. 5, Sep./Oct. 2015.

ANDRONIKOV, V.L.; DOBROLVSHIY, G.V. Theory and methods for the use of remote sensing in the study of soils. **Mapping Science and Remote Sensing**, v. 28, p.92-101, 1991.

ANJOS, L. H. C. dos; JACOMINE, P. K. T; SANTOS, H. G. dos; OLIVEIRA, V. A. e OLIVEIRA, J. B. de. Sistema brasileiro de classificação de solos. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E.; TORRADO, P. V. (Org.). **Pedologia: Fundamentos**. 1. ed. Viçosa, MG: SBCS. p. 248–302. 2012.

ARRUDA, G. P.; DEMATTÊ, J. A. M.; CHAGAS, C. S. Mapeamento Digital de Solos por Redes Neurais Artificiais com base na relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 327-338, 2013.

BAIZE, D.; GIRARD, M. C. **Référentiel pédologique**. AFES, Association Française pour l'Etude du Sol. Versailles, Paris, Fra. 405 p., 2008.

BALDRIDGE, A.M.; HOOK, S.J.; GROVE, C.I.; RIVERA, G. The ASTER spectral library version 2.0. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 113, p. 711-715, 2009.

BALDWIN, M., C.E. KELLOGG, AND J. THORP. **Soil Classification**. U.S. Dept. Agriculture Yearbook (Soils and Men) 1938, p. 979-1001.

BALLABIO, C. Spatial prediction of soils properties in temperature mountain regions using support vector machine regression. **Geoderma**, Amsterdam, v. 113, p. 711-715, 2009.

BAPTISTA, G. M. DE M.; MENESES, P. R. Identificação de sesquióxidos de ferro da fração argila de solos tropicais por meio de decomposição espectral linear dos dados do sensor AVNIR-2 do sistema ALOS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17, 2009, Natal. **Anais...** Natal, 2009 p. 7655–7662.

BARBOSA, I.O.; LACERDA, M.P.C. e BILIC H, M.R. Soils distribution model based on relation between geology, geomorphology and pedology, at the High Plateau of Distrito Federal, Brazil. **R. Asoc. Geol. Argentina**, 66:569 - 575, 2010.

BAUMGARDNER, M.F.; SILVA, L.F.; BIEHL, L.L.; STONER, E.R. Reflectance properties of soils. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 38, p. 1-43, 1985.

BEDIDI, A.; CERVELLE, B.; MADEIRA NETTO, J. S.; POUGET, M. Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils. **Soil Science**, v. 153, n. 2, 1992.

BELLINASSO, H.; DEMATTÊ, J.A.M.; ROMEIRO, S.A. Soil spectral library and its use in soil classification. Viçosa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 861-870, 2010.

BEN-DOR, E., INBAR, Y., e 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**, 61, p. 1–15, 1997.

BEN-DOR, E.; HELLER, D.; CHUDNOVSKY, A. A novel method of classifying soil profiles in the field using optical means. Madison, **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, p. 1113-1123, 2008.

BEN-DOR, E.; IRONS, J.R.; EPEMA, G. Soil reflectance. In: RENCZ, A.N. (Ed.). **Remote sensing for the earth sciences**. Toronto: John Wiley, cap. 3, p. 111-188, 1999.

BIRKELAND, P. W. **Soils and geomorphology**. 3° ed. New York: Oxford University, 430p,1984.

BITAR, O. Y.; IYOMASA, W. S.; CABRAL, JR. M. Geotecnologia: tendências e desafios. São Paulo **Perspec.** [online], v.14, n.3, pp. 78-90. ISSN 0102-8839. 2000.

BLACKETT, M.; WOOSTER, M.J. Evaluation of SWIR-based methods for quantifying active volcano radiant emissions using NASA EOS-ASTER data. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 2, n. 1, p. 51-78, 2011.

BOWERS, S. A.; HANKS, R. J. Reflection of radiant energy from soils. **Soil Science**, v. 100, n. 2, p. 130–138, 1965.

BRADY. N.C. & WEIL. R.R. **The nature and properties of soils**. 11.ed. New Jersey: Prentice Hall, 727p. 1996.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto RADAMBRASIL**. Rio de Janeiro, 764p (Levantamento de Recursos Naturais, v.1-34), p. 1973-1986.

BROWN, D.; SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G.; MAYS, M.D.; REINSCH, G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 132, p. 273-290, 2006.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment – Monograph on Soil and Resource**. Oxford: Claredon, 1993.

BURROUGH, P.A.; McDONNELL, R.A. **Principles of geographic information systems**. Oxford University Press, New York. 1998. Disponível em: <[http://dds.cepal.org/infancia/guide-to-estimating-childpoverty/bibliografia/capituloIV/Burrough%20Peter%20A%20y%20McDonnell%20Rachael%20A%20\(199](http://dds.cepal.org/infancia/guide-to-estimating-childpoverty/bibliografia/capituloIV/Burrough%20Peter%20A%20y%20McDonnell%20Rachael%20A%20(199)

8)%20Principles%20of%20geographical%20information%20systems.pdf > Acesso em: 19 de maio de 2015.

CÂMARA, G.; CASANOVA, M.A.; HEMERLY, A. S.; MAGALHÃES, G.; MEDEIROS, C. B. Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica. In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; DAVI, C. **Geoinformática: Teoria e aplicações**. Escola de Computação, São Bernardo do Campo, 1996. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/anatomia.pdf>. Acesso em: dez. 2015.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. de. Princípios básicos em geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistema de Informações Geográficas**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa-SPI/CPAC, p. 3-11,1998.

CAMPOS, M. C. C. Relações solo-paisagem: conceitos, evolução e aplicações. **Revista Ambiência**, v.8, n.3, p.963-982, 2012.

CAMPOS, M. C. C.; CARDOZO, N. P.; MARQUES JÚNIOR, J. Modelos de paisagem e sua utilização em levantamentos pedológicos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.6, n.1, p.104-114, 2006.

CAMPOS, P. M.; LACERDA, M. P. C.; BILICH, M. R.; ALMEIDA PAPA, R.; SILVA, R. A. B. Adequabilidade do Uso Agrícola das Terras no Núcleo Rural do PAD/DF. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011. Curitiba. **Anais...** Curitiba, INPE, p. 0507–0513, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0173.pdf>>. Acesso em 12 de maio de 2015.

CARRÉ, F.; McBRATNEY, A.B.; MAYR, T.; MONTANARELLA, L. Soil digital assessments: beyond DSM. **Geoderma**, Amsterdam, v. 142, p. 69-79, 2007.

CEZAR, E.; NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; CHICATI, M. L. e OLIVEIRA, R. B. Estimativa de atributos do solo por meio de espectrorradiometria difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p.858-868, 2013.

CHAGAS, C. S.; FILHO, E. I. F; ROCHA, M. F.; JÚNIOR, W. de C.; NETO, N. C. S. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 14, n.2, p.218–226. 2010.

CHAGAS, C.S.; CARVALHO JÚNIOR, W.; BHERING, S.B. Integração de dados dos *quickbird* e atributos do terreno no mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p.693-704, 2011.

CHAGAS, C.S.; FERNANDES FILHO, E.I.; BHERING, S. B. Relação entre atributos do terreno, material de origem e solos em uma área no noroeste do estado do Rio de Janeiro. Uberlândia, **Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 1, p.147-162, 2013.

CHANG, C.-W.; LAIRD, D. A.; MAUSBACH, M. J.; HURBURGH, C. R. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy–Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. **Digital Repository @ Iowa State University**, p. 480–490, 2001. Disponível em:

<<https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/65/2/480>>. Acesso em 30 de novembro de 2015.

CHANG, C.W.; LAIRD, D.A.; HURBURGH JR, R. Influence of soil moisture on near-infrared reflectance spectroscopic measurement of soil properties. Philadelphia, **Soil Science**, v. 170, n. 4, p. 244-255, 2005.

CHICATI, M. L.; NANNI, M. R.; CÉZAR, E.; DEMATTÊ, J. A. M.; OLIVEIRA, R. B. Caracterização de alguns atributos do solo e sua correlação com a paisagem em uma porção do noroeste do Estado do Paraná. Maringá, **Acta Scientiarum Agronomy**, v.30, supl., p.719-724, 2008.

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

CLARK, R.N. Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy. In: RENCZ, A.N. (Ed.). **Remote sensing for the earth sciences**. Toronto: John Wiley. chap. 1, p. 3-58, 1999.

CLARK, R.N.; SWAYZE, G.A.; WISE, R.; LIVO, E.; HOEFEN, T.; KOKALY, R.; SUTLEY, S.J. **USGS digital spectral library splib06a**: U.S. Geological Survey. Denver: Digital Data Series, 231 p., 2007.

CLINE, M. G. **Basic Principles Of Soil Classification**. Soil Science, v. 67, n. 2, p. 81–92, 1949.

COELHO, F.F.; GIASSON, E. Métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica. **Ciência Rural**, v. 40, p.099-2106, 2010.

COLEMAN, T.L.; MONTGOMERY, O.L. Soil moisture, organic matter, and iron content effect on the spectral characteristics of selected Vertisols and Alfisols in Alabama. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.53, p.1659-1663, 1987.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices**. New York: Taylor e Francis Group, v. 25, 2010. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1477-9730.2010.00574_2.x>. Acesso em: jun. 2015.

COZZOLINO, D.; MORÓN, A. The potential of near-infrared reflectance spectroscopy to analyze soil chemical and physical characteristics. Toronto, **Journal of Agricultural Science**, v. 140, p. 65-71, 2003.

CRIVELENTI, R.C.; COELHO, R. M.; ADAMI, S. F.; ROBSON, S.; OLIVEIRA, M. Mineração de dados para a inferência de relações solo-paisagem em mapeamentos digitais de solo. **Revista Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 12, p.1707-1715, 2009.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Ed. Ver. Campinas: G/UNICAMP, 1993.

CURI, N. e KÄMPF, N. **Caracterização do solo**. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E.; TORRADO, P. V. (Org.). **Pedologia: Fundamentos**. 1. ed. Viçosa, MG: SBCS, 2012. p. 147–170.

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

DAVIES, T. The history of near infrared spectroscopic analysis: past, present and future - "from sleeping technique to the morning star of spectroscopy. Les Ulis, **Analisis Magazine**, v. 26, n. 4, p. M17-M19, 1998.

DEMATTÊ, J. A. M.; EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Fertilidade do solo e nutrição de plantas influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. Campinas, **Bragantia**, v. 62, n. 3, p. 451-464, 2003.

DEMATTÊ, J. A. M.; TERRA, F. S. Comportamento espectral de perfis modais dos principais solos de Rafard, SP. Campinas, **Bragantia**, v. 69, n. 2, p.249-252, 2010.

DEMATTÊ, J.A.M.; BELLINASSO H.; ROMERO D.J.; FONGARO C.T. Morphological Interpretation of Reflectance Spectrum (MIRS) using libraries looking towards soil classification. **Sci Agric**. v. 71, p. 509-20, 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. Amsterdam, **Geoderma**, v. 121, p. 59-112, 2004a.

DEMATTÊ, J.A.M.; GAMA, M.A.P.; COOPER, M.; ARAÚJO, J.C.; NANNI, M.R. e FIORIO, P.R. Effect of fermentation residue on the spectral reflectance properties of soil. Amsterdam, **Geoderma**, v.120, p.187-200, 2004b.

DEMATTÊ, J.A.M.; TERRA, F.S.; RIZZO, R. Desenvolvimento de uma biblioteca espectral de solos. Viçosa, **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 29- 31, 2009.

DEMATTÊ, J.A.M.; TOLEDO, A.M.A; SIMÕES, M.S, Metodologia para Reconhecimento de Três Solos por Sensores: Laboratorial e Orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 877-889, 2004c.

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

DOBOS, E.; HENGL, T. Soil mapping applications H.I. Reuter, T. Hengl (Eds.), **Geomorphometry: Concepts, Software and Applications**. Elsevier: New York, 2009.

DOKUCHAEV, V.V. Russian Chernozem. In.: KANER, N, Traduction, **Israel Prog. For Sci. Trans.** Jerusalem, 1883, 162p.

DUNN, B.W.; BEERCHER, H.G.; BATTEN, G.D.; CIAVARELLA, S. The potential of nearinfrared reflectance spectra for soil analysis – a case study from the Riverine Plain of southeastern Australia. Collingwood, **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 42, p. 607-614, 2002.

EMATER [Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal]. **Relatórios e informações agropecuárias – Produção agropecuária 2015**. Seagri-DF. Disponível em: http://www.emater.df.gov.br/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=72&Itemid=55#. Acesso em: 25 fev. 2016.

EMBRAPA [Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária]. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 412 p., 2014.

EMBRAPA [Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária]. **Missão Terra**. Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento por Satélite. 2013. Disponível em: http://www.sat.cnpm.Embrapa.br/conteudo/missao_terra.php. Acesso em: mai. 2016.

EMBRAPA [Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária]. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Rio de Janeiro, 101p., 1995.

EMBRAPA [Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária]. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal**. Rio de Janeiro, RJ: EmbrapaSNLCS, 1978.

EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo. São José dos Campos, **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, 131p. Relatório. INPE. 1992.

ERSDAC. Earth Remote Sensing Data Analysis Center, **ASTER Reference Guide**. Version 1.0. 61 p. 2003. Disponível em: <https://unit.aist.go.jp/igg/rs-rg/ASTERSciWeb_AIST/en/documnts/pdf/ASTER_Ref_V1.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2016.

ESPINDOLA, C. R. A institucionalização da pedologia como ciência por Friedrich Albert Fallou – O caso brasileiro. São Paulo, **Revista do Instituto Geológico**, v. 35, n. 1, p. 61-70, 2014.

ESPINDOLA, C. R. **Retrospectiva crítica sobre a Pedologia**: um repasse bibliográfico. Campinas: Editora da Unicamp, 397 p., 2008.

ESRI [Environmental Systems Research Institute, Inc]. ArcGIS. **Professional GIS for the desktop**, versão 10.3.1 CA. Disponível em: <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop/free-trial>. Acesso em: abr. 2015.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Soil Survey Staff**. Soil survey manual. Washington, 503p., (Handbook, 18), 1993.

ESTADOS UNIDOS. United States Department of Agriculture. Soil Survey Division. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. **Soil taxonomy**: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture, Handbook 436, 1999.

ESTADOS UNIDOS. United States Department of Agriculture. Soil Survey Division. Soil Conservation Service SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington: USDA, Natural Resources Conservation Service, 359 p., 2014.

EXELIS – VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **ENVI Tutorials**. Disponível em: <http://www.exelisvis.com/docs/Tutorials.html>. Acesso em: 15 junho de 2015.

FAO/UNESCO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World reference base for soil resources**. Rome, (World Soil Resource Report, 84), 109 p., 1998.

FAO/UNESCO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Soil Map of the World**. Unesco, Paris. 65 p. 1974. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/019/as360e/as360e.pdf> . Acesso em: ago. 2016.

FARIAS, M. F. R.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. de S.; GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; REATTO, A. Integração de atributos morfométricos e sensoriamento remoto na cartografia pedológica do Parque Nacional de Brasília, Distrito Federal. **Espaço e Geografia** (UnB), v. 18, p. 217-243, 2015.

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. Viçosa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 245-257, 2004.

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

FLORES, C.A.; PÖTTER, R.O.; FASOLO, P.J.; HASENACK, H. e WEBER, E. orgs. **Levantamento semidetalhado de solos**: Região da campanha – Folha Palomas. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

FLORINSKY, I. V. The Dokuchaev hypothesis as a basis for predictive digital soil mapping (on the 125th anniversary of its publication). **Eurasian Soil Science**, v. 45, p. 445–451, 2012.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, v. 72, n. 1–2, p. 37–51, 1996.

FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. Viçosa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 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**, v. 48, p. 1569–1582, 2013.

GARRIGUES, S.; ALLARD, D.; BARET, F.; MORISETTE, J. Multivariate quantification of landscape spatial heterogeneity using variogram models. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p.216–230, 2008.

GE, Y.; MORGAN, C.L.S.; GRUNWALD, S.; BROWN, D.J.; SARKONOT, D.V. Comparison of soil reflectance spectral and calibration models obtained using multipli spectrometers. Amsterdam, **Geoderma**, v. 161, p. 202-211, 2011.

GENÚ, A. M.; ROBERTS, D.; DEMATTÊ, J. A. M. The use of multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) for the mapping of soil attributes using Aster imagery. Maringá, **Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 377-386. 2013.

GIASSON, E.; SARMENTO, E.C.; WEBER, E.; FLORES, C.A.; HASENACK, H. Decision trees for digital soil mapping on subtropical basalt steep lands. **Scientia Agricola**, v. 68, p.167-174, 2011.

GOLDSHLEGER, N.; BEN-DOR, E.; BENYAMINI, Y.; AGASSI, M. Soil reflectance as a tool for assessing physical crust arrangement of four typical soils in Israel. Philadelphia, **Soil Science**, v. 169, n. 10, p. 677-687, 2004.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. S. **Geomorfologia ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 192 p., 2006.

HAN, C.; MA, Y.; CHEN, X.; SU, Z. Estimates of land surface heat fluxes of the Mt. Everest region over the Tibetan Plateau utilizing ASTER data. Elsevier. **Atmospheric Research**, v. 168, p. 180-190, 2016.

HENDERSON, T.L.; BAUMGARDNER, M.F.; FRANSMEIER, D. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p. 865-72, 1992. Disponível em:<https://www.researchgate.net/publication/4694928_High_Dimensional_Reflectance_Analysis_of_Soil_Organic_Matter> acesso em 04 de fevereiro de 2016.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2009.

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

HULLEY G.C.; HOOK, S.J. A New Methodology for Cloud Detection and Classification with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection (ASTER) Data., **Geophys. Res. Lett.**, v. 35, L16812, doi:10.1029/2008GL034644, 2008.

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

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA [IBGE]. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de Pedologia**. 3ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

IPPOLITI, R.G.A.; COSTA, L.M.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FERNANDES FILHO, E.I.; GAGGERO, M.R. e SOUZA, E. Análise digital do terreno: Ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de “Mar de Morros” (MG). **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v. 29, p. 267-276, 2005.

JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis: advanced course**. Madison: Wisconsin University, 1969. 895p.

JENNY, H. **Factors of soil formation**: a system of quantitative pedology. New York: Dover Publications, 1941.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução português 2 Ed. São José dos Campos, SP: Parentese Editora 598 p., 2009.

KÄMPF, N.; CURI, N. Conceito de solo e sua evolução histórica. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E.; TORRADO, P. V. (Org.). **Pedologia: Fundamentos**. 1. ed. Viçosa, MG: SBCS. p. 343. 2012.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Relações entre óxidos de ferro e a cor em solos caulíníticos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 7, p. 27–31, 1983.

KLINGEBIEL, A. A.; HORVARTH, E. H.; MOORE, D. G. e REYBOLD, W. U. **Use of slope, aspect, and elevation maps derived from digital elevation model data in making soil surveys**. Madison: Soil Science Society of America, 1987.

KRISHNAN, P. et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.1282-1285, 1980. Disponível em:

<https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/44/6/SS0440061282?access=0&view=pdf> > acesso em: 12 de dezembro de 2015.

LACERDA, M. P. C.; BARBOSA, I. O. Relações Pedomorfogeológicas e Distribuição de Pedoformas na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Distrito Federal. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 36, p. 709-721, 2012.

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**. 2016, 8, 701; doi:10.3390/rs8090701. Disponível em: < <http://www.mdpi.com/2072-4292/8/9/701>> Acesso em: 12 de dezembro de 2016.

LACERDA, M. P. C.; QUEMÉNÉUR, J. J. G.; ANDRADE, H.; ALVES, H. M. R. e VIEIRA, T. G. C. Estudo da relação pedomorfogeológica na distribuição de solos com horizontes B textural e B nítico na paisagem de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 271-284, 2008.

LACERDA, M.P.C.; QUEMÉNEU R, J.J.G.; ANDRADE, H.; ALVES, H.M.R. e VIEIRA, T.G.C. Mapeamento preliminar de solos com horizonte B textural e B nítico na região de Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 788-795, 2009.

LAGACHERIE, P. Digital soil mapping: a state of the art. In.: HARTEMINK, A.E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. (Ed.). **Digital soil mapping with limited data**. New York: Springer. p.3-14., 2008.

LAGACHERIE, P.; McBRATNEY, A. B. Spatial soil information system and spatial soil inference system: perspectives for Digital Soil Mapping. In: LAGACHERIE, P.; McBRATNEY, A. B.; VOLTZ, M. (Ed.). **Digital Soil Mapping: an introductory perspective**. Elsevier: Amsterdam, 2007.

LOBELL, D. B.; ASNER, G. P. Moisture Effects on Soil Reflectance. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 722–727, 2002.

LOSS, A.; CHAVES, A. C.; BERNINI; T. A.; COUTO, W. H. do; MIGUEL, D. L.; FRANCELINO, M. R.; ANJOS, L. H. C. dos. Aplicação de modelo digital de elevação para o levantamento de solos da microbacia do rio Bengala, Cachoeiras de Macacu, RJ, Brasil. **Revista de Ciencia y Tecnología da América**, Interciência, v. 36, n.2, p. 121-127, 2011.

MADEIRA NETTO, J. S. Comportamento espectral dos solos. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Ed). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 262p., cap. 4, p. 127-154, 2001.

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

MADEIRA NETTO, J.; BEDIDI, A.; CERVELLE, B.; POUGET, M.; FLAY, N. Spectral (MIR) determination of kaolinite and gibbsite contents in Lateritic soils. Paris, **C.R. Academy Science**, serie IIA, p.119-128, 1995.

MATHEWS, H. L.; CUNNINGHAM, R. L.; PETERSEN, G. W. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 37, n. 3, p. 421–424, 1973.

MATTIKALLI, N.M. Soil Colour Modelling for the Visible and Near Infrared Bands of Landsat Sensors using Laboratory Spectral Measurements. **Remote Sensing of Environment**, 59, 14-28. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00075-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00075-2). 1997.

McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S. e SHATAR, T. M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. Amsterdam, **Geoderma**, v. 97, n. 3-4, p. 293-327, 2000.

McBRATNEY, A. B.; VOLTZ, B. T. (Org.). **Digital Soil Mapping: an Introductory Perspective**. [S.l.]: Elsevier, 2006. v. 31. p. 39–601.

McBRATNEY, A.B.; MENDONÇA-SANTOS, M.L. e MINASNY, B. On digital soil mapping. Amsterdam, **Geoderma**, v. 117, p. 3-52, 2003.

McKENZIE, N. J.; GRUNDY, M. J.; WEBSTER, R.; RINGROSE-VOASE, A. J. **Guidelines for surveying soil and land resources**. 2. ed. Melbourne, Australia: CSIRO Publishing, 2008.

MENDONÇA-SANTOS, M. DE L.; SANTOS, H. G. The State of the Art of Brazilian Soil Mapping and Prospects for Digital Soil Mapping. In: LAGACHERIE, P.; McBRATNEY,

MENDONÇA-SANTOS, M. DE L.; SANTOS, H. G. The State of the Art of Brazilian Soil Mapping and Prospects for Digital Soil Mapping. In: LAGACHERIE, P.; McBRATNEY, A. B.; VOLTZ, B. T. (Org.). **Digital Soil Mapping An Introductory Perspective**. [S.l.]: Elsevier, 2006. v. 31. p. 39–601.

MENDONÇA-SANTOS, M. DE L.; VARGAS, R.; COMERMA, J.; KRASILNIKOV, P.; ANGELINI, M.; MUNIZ, O.; SCHAD, P.; GARDI, C.; CASTRO, A.; JONES, A.; GAISTARDO, C. C.; ROJAS, A. E.; MONTANARELLA, L.; BARCELO, S. **Atlas de solos de América Latina e do Caribe**. Luxemburgo: Serviço das Publicações da União Europeia, 2015.

MENDONÇA-SANTOS, M.L.; SANTOS, H.G.; DART, R.O.; PARES, J.G. Digital mapping of soil classes in Rio de Janeiro, Brazil: data, modelling and prediction. In: HARTEMINK, A.E.; McBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M.L. **Digital soil mapping with limited data**. Amsterdam: Springer, p. 381-396, 2008.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (org.) **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPq, 266 p., 2012.

MENESES, P.R. Fundamentos da radiometria óptica espectral. In: MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J. (Ed.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001, cap. 1, p. 15-40.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B. Incorporating taxonomic distance into spatial prediction and digital mapping of soil classes. Amsterdam, **Geoderma**, v. 142, p. 285-293, 2007.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B.; MENDONÇA-SANTOS, M.L.; SANTOS, H.G. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. Documentos, 45, 50 p, 2003.

MINASNY, B.; TRANTER, G.; McBRATNEY, A.B.; BROUGH, D.M.; MURPHY, B.W. Regional transferability of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy prediction for soil chemical properties. Amsterdam, **Geoderma**, v. 153, p. 155-162, 2009.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. 2ª ed. Revista e atualizada. Embrapa Informação Tecnológica. Brasília, 2010.

MONTGOMERY, O.L. **An investigation of the relationship between spectral reflectance and the chemical, physical, and genetic characteristics of soils**. PhD. Thesis. Purdue University. West Lafayette, Indiana. 1976.

MOORE, I. D.; GEISSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 443-452, 1993.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3 edição Atualizada e Ampliada. Viçosa: Editora Viçosa, UFV. 320p., 2007.

MOTTA, P. E. F. DA; CARVALHO FILHO, A. DE; KER, J. C.; PEREIRA, N. R.; CARVALHO JUNIOR, W. DE; BLANCANEUX, P. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6, p. 869–878, 2002.

MULDER, V. L.; BRUIN, S.; SCHAEPMAN, M. E.; MAYR, T. R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping – A review. Amsterdam, **Geoderma**, v. 162, p. 1-19, 2011.

MUNSELL COLORS COMPANY. **Munsell soil colors charts**. Baltimore. 2000.

MYERS, V. I Remote sensing applications in agriculture In: American Society of Photogrammetry. **Manual of remote sensing**. 2. ed. Fall Church: [S. I.], 1983.

NASA JPL. **ASTER: All ASTER data products are now available at no charge to all users**. Jet Propulsion Laboratory. Instituto de Tecnologia da Califórnia, 2016. EUA. Disponível em: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/index.asp>. Acesso em: 20 jul. 2016.

NASA JPL. ASTER: **Change in Status Alert - January 12, 2009**. Jet Propulsion Laboratory. Instituto de Tecnologia da Califórnia. EUA. Disponível em: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/swir-alert.asp>. Acesso em: 20 jul. 2016.

NASA LP DAAC. **ASTER Level 1A Data Set - Reconstructed, unprocessed instrument data**. NASA LP DAAC. USGS, 2001. Disponível em: http://doi.org/10.5067/ASTER/AST_L1A.003>. Acesso em: 29 jul. 2016.

NASA LP DAAC. **ASTER Products Table**. USGS 2014. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/aster/aster_products_table. Acesso em: 29 jul. 2016.

NAWAR, S.; BUDDENBAUM, H.; HILL J. Digital Mapping of Soil Properties Using Multivariate Statistical Analysis and ASTER Data in an Arid Region. **Remote Sensing**, v. 7, p. 1181-1205; doi:10.3390/rs 70201181, 2015.

NEUMANN, M. R. B.; ROIG, H. L.; FREITAS, A. L. F. S. Digital elevation models obtained by contour lines and SRTM/Topodata, for digital soil mapping. **Journal of Soil Science and Environmental Management**, v. 3, p. 104-109, 2012.

NOLASCO-CARVALHO, C. C.; FRANCA-ROCHA, W.; UCHA, J. M. Mapa digital de solos: uma proposta metodológica usando inferência *fuzzy*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [online], vol.13, n.1ISSN1415-4366, 2009.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 3º edição revista e ampliada. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 361p. 2008.

OBUKHOV, A.I.; ORLOV, O.S. Spectral reflectance of major soil groups and possibility of using diffuse reflections in soil investigations. **Soviet Soil Science**, New York, v.1, p. 174-84, 1964.

OLSON, G. W. **Land classification**. Ithaca: Cornell University Agricultural Experiment Station, USA, p.104, 1974.

POPPIEL, R. R. **Mapeamento Pedológico por meio de série histórica Landsat-5 TM e Biblioteca Espectral na Bacia do Rio Jardim (DF)**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2016, 158 p. Dissertação de Mestrado.

POST, D. F., Fimbres, A., Matthias, A. D., Sano, E. E., Accioly, L., Batchily, A. K. Predicting soil albedo from soil color and spectral reflectance data. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, 1027–1034. 2000.

POST, D.F.; HORVATR, E.H.; LUCAS, W.M.; VVRTE, S.A.; EHASZ, M.J.; BATCFULY, A.K. Relationship between soil color and Landsat reflectance on semiarid Rangelands. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p.1809-1816, 1994.

RAMIREZ-LOPEZ, L.; BEHRENS, T.; SCHMIDT, K.; ROSSEL, R. VISCARRA; DEMATTÊ, J.A.M.; SCHOLTEN, T. Distance and similarity-search metrics for use with soil vis NIR spectra. Amsterdam, **Geoderma**, v. 199, p. 43-53, 2013.

RANZANI, Guido. **Manual de levantamentos de solos**. 2 ed. [S.I.]: Ed. Edgard Bücher, 1969.

REATTO, A.; MARTINS, E. DE S.; FARIAS, M. F. R.; SILVA, A. V.; CARVALHO, O. A. J.; OLIVEIRA, R. C. J.; RODRIGUES, T. E.; SANTOS, P. L.; VALENTE, M. A. **Mapa pedológico digital** - SIG atualizado do Distrito Federal escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.

RESENDE, M.; CURY N.; OLIVEIRA, J. B. de e KER, J. C. Princípios da classificação dos solos. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E.; TORRADO, P. V. (Org.). **Pedologia: Fundamentos**. 1. ed. Viçosa, MG: SBCS, p. 248–302. 2012.

RESENDE, M.; CURY, N.; REZENDE, S.B. e CORRÊA, G.F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 5.ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 322p., 2007.

RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B. de e ARAÚJO FILHO J. C. de. Caracterização morfológica do solo. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E.; TORRADO, P. V. (Org.). **Pedologia: Fundamentos**. 1. ed. Viçosa, MG: SBCS, 2012, p. 248–302.

RIZZO, R.; DEMATTÊ, J. A. M.; LEPSCH, I. F.; GALLO, B. C.; FONGARO, C. T. Digital soil mapping at local scale using a multi-depth Vis–NIR spectral library and terrain attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 274, p. 19-27, 2016. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706116301379> > DOI: doi:10.1016/j.geoderma.2016.03.019. Acesso em 12 de dezembro de 2016.

RODRIGUES, M. G. F.; NACIF, P. G. S.; COSTA, O. V.; OLSZEWSKI, N. Solos e suas relações com as paisagens naturais no município de Cruz das Almas, BA. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.9, n.2, p.193-205, 2009.

SANCHEZ, P.A.; AHMED, S.; CARRÉ, F.; HARTMINK, A.E.; HEMPEL, J.; HUISING, J.; LAGACHERIE, P.; McBRATNEY, A.B.; McKENZIE, N.J.; MENDONÇA-SANTOS, M.L.; MINASNY, B.; MONTANARELLA, L.; OKOTH, P.; PALM, C.A.; SACHS, J.D.; SHEPHERD, K.D.; VAGEN, T.G.; VANLAUWE, B.; WALSH, M.G.; WINOWIECKI, L.A.; ZHANG, G.L. Digital soil map of the world. Washington, **Science**, v. 325, p. 680-681, 2009.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. Viçosa, MG: SBCS/ Embrapa-CNPS, 102p, 2015.

SARMENTO, E. C.; FLORES, C. A.; WEBER, E.; HASENACK, H.; PÖTTER, R. O. Sistema de informação geográfica como apoio ao levantamento detalhado de solos do Vale dos Vinhedos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Número especial, p. 2795-2803, 2008.

SCHWERTMANN, J. M. Relations Between Iron Oxides, Soil Color, and Soil Formation. In: CIOLKOSZ, E. J.; BIGHAM, U. (Org.). **Soil Color**. Madison: SSSA, 1993. p. 51–69.

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

SHI, Z.; WANG, Q.; PENG, J.; JI, W.; LIU, H.; LI, X.; VISCARRA ROSSEL, R. Development of a national VNIR soil-spectral library for soil classification and prediction of organic matter concentrations. **Science China Earth Sciences**, v. 57, n. 7, p. 1671–1680, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11430-013-4808-x>>. Acesso em: 04 de abril de 2016.

SILVA, C.C; COELHO, R. M; OLIVEIRA, S. R. M; ADAMI, S. F. Mapeamento pedológico digital da folha Botucatu (SF-22-Z-B-VI-3): Treinamento de dados em mapa tradicional e validação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 846-857, 2013.

SOUSA JUNIOR, J. G. A.; DEMATTÊ, J. A. M. Modelo Digital de Elevação na caracterização de solos desenvolvidos e basalto e material arenítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.32, p. 449-456, 2008.

SOUZA MELLO, F.E.S. Estudo agrológico da bacia de irrigação do açude público “São Gonçalo”, na Paraíba. In: SBCS, REUNIÃO BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 1, Rio de Janeiro, **Anais...**288-389, 1950.

SOUZA, R. Q. **Pedomorfogeologia e mapeamento digital de solos com horizonte B textural e B nítico em uma área piloto no Planalto Central do Brasil**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2015, 143p. Dissertação de Mestrado.

SPRINGSTEEN, A. Reflectance spectroscopy: an overview of classification and techniques. In: WORKMAN JR., J.; SPRINGSTEEN, A. (Ed.). **Applied spectroscopy: a compact reference for practitioners**. San Diego: Academic Press, 1998.

STEVENS, A.; NOCITA, M.; TÓTH, G.; MONTANARELLA, L.; VAN WESEMAEL, B. Prediction of Soil Organic Carbon at the European Scale by Visible and Near InfraRed Reflectance Spectroscopy. **PLoS ONE**, v. 8, n. 6, p. e66409-e66422, 19 jun. 2013.

STONER, E.; DERKSEN, I.; MACEDO, J. Discriminação espectral de Latossolos do Planalto Central brasileiro. Brasília, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.26, p.1599-1606, 1991.

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

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E. e PINTO, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 222p. 2008.

SUMMERS, D.; LEWIS, M.; OSTENDORF, B.; CHITTLEBOROUGH, D. Visible near infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties. Amsterdam, **Ecological Indicators**, v. 11, n. 1, p. 123-131, 2011.

TEIXEIRA, A.; MATIAS, L.; NOAL, R.; MORETTI, E. Qual a melhor definição de SIG. Curitiba, **Fator GIS**, n.11, p.20-24, out./nov./dez, 1995.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Coord.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 568p., 2000.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S D.; MENDONÇA-SANTOS, M. DE L.; GIASSON, E. Mapeamento digital de classes de solos: características da abordagem brasileira. Santa Maria, **Ciência Rural**, v.42, n.11, p.1989-1997, nov. 2012.

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, 2011a.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F.de A.; MENDONÇA SANTOS, M. de L. Extrapolação das relações solo-paisagem a partir de uma área de referência. Santa Maria, **Ciência Rural**, v.41, n.5, p.812-816, mai. 2011b.

TERAMOTO, E.R.; LEPSCH, I.F. & VIDAL-TORRADO, P. Relações solo, superfície geomórfica e substrato geológico na microbacia do ribeirão Marins (Piracicaba-SP). **Sci. Agric.**, 58, p. 361-371, 2001.

THORP, J. & SMITH, G.D. Higher categories of soil classification. **Soil Science**, v. 67, p. 117-126, 1949. Disponível em: <
http://journals.lww.com/soilsci/Citation/1949/02000/HIGHER_CATEGORIES_OF_SOIL_CLASSIFICATION__ORDER,.5.aspx > acesso em 14 de novembro de 2015.

ULUSOY, I. Temporal radiative heat flux estimation and alteration mapping of Tendürek volcano (eastern Turkey) using ASTER imagery. Elsevier. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, p. 0377-0273, 2016.

VALLADARES, G. S. Geoestatística no mapeamento digital de solos dos tabuleiros costeiros no litoral norte do Estado do Ceará. **Revista Equador**, v. 1, n. 1, p. 26-43, 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. **Elsevier. Remote Sensing of Environment**. v. 115, p. 1824-1836, 2011.

VISCARRA ROSSEL, R.A.; BEHRENS T.; BEN-DOR, E.; BROWN, D.J.; DEMATTÊ J.A.M.; SHEPHERD, K.D.; SHI, Z.; STENBERG, B.; STEVENS A.; ADAMCHUK, V.; AÏCHI H.; BARTHÈS B.G.; BARTHOLOMEUS H.M.; BAYER A.D.; BERNOUX M.; BÖTTCHER K.; BRODSKÝ L.; DU C.W.; CHAPPELL A.; FOUAD Y.; GENOT, V.; GOMEZ, C.; GRUNWALD, S.; GUBLER, A.; GUERRERO, C.; HEDLEY, C.B.; KNADEL, M.; MORRÁS, H.J.M.; NOCITA, M.; RAMIREZ-LOPEZ, L.; ROUDIER, P.; RUFASO CAMPOS, E.M.; SANBORN, P.; SELLITTO, V.M.; SUDDUTH, K.A.; RAWLINS, B.G.; WALTER, C.; WINOWIECKI, L.A.; HONGS.Y.; JI, W. A global spectral library to characterize the world's soil. **Earth-Science-Reviews**. v. 155, p. 198–230, 2016.

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. Amsterdam, **Geoderma**, v. 150, p. 253-266, 2009.

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

VISCARRA ROSSEL, R.A.; WEBSTER, R. Discrimination of Australian soil horizons and classes from their visible-near infrared spectra. London, **European Journal of Soil Science**, v. 62, p. 637-647, 2011.

WANG, K.; LIANG, S. Evaluation of ASTER and MODIS land surface temperature and emissivity products using long-term surface longwave radiation observations at SURFRAD sites. New York, **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 1556-1565, 2009.

WEBSTER, R.; BURROUGH, P.A. Computer-based soil mapping of small areas from sample data. 1. Multivariate classification and ordination. **Journal of Soil Science**, v.23, p.210-221, 1972. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.13652389.1972.tb01654.x>>. Acesso em: 15 out. 2015.

WU, W.; FAN, Y.; WANG, Z.; LIU, H. Assessing effects of digital elevation model resolutions on soil-landscape correlations in a hilly area. Amsterdam, **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.126, p.209-216, 2008.

ZHU, A. X. Mapping soil landscape as spatial continua: the neural network approach. **Water Resources Research**, v.36, p.663-677. 2000.

ZHU, A. X.; HUDSON, B.; BURT, J.; LUBICH, K. & SIMONSON, D. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. **Sci. Soc. Am. J.**, v. 65, p.885-894, 2001.

CAPÍTULO ÚNICO

MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS DA MICROBACIA DO RIBEIRÃO EXTREMA, DF, A PARTIR DE IMAGENS MULTITEMPORAIS ASTER E BIBLIOTECA ESPECTRAL¹

Jean de Jesus Novais² & Marilusa Pinto Coelho Lacerda³

¹ Projeto desenvolvido com apoio financeiro da CAPES

² Aluno do Programa de Mestrado e Doutorado em Agronomia, Área de concentração em Produção Sustentável e linhas de pesquisa em Solo, água e qualidade ambiental, da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, da Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Instituto Central de Ciências Ala Sul, Caixa Postal 4.508, CEP: 70.910-970, Brasília, DF, jjnagron@gmail.com

³ Professora Associado III da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, marilusa@unb.br

RESUMO

O recurso solo é cada vez mais reconhecido pela sua importância nos ecossistemas, na produção de alimentos e regulação do clima global. A medida que cresce a pressão exercida pelas atividades antrópicas sobre o solo, surge a necessidade de se dispor de informações relevantes e atualizadas sobre este recurso. Mapas de solos compreendem as informações mais utilizadas para o planejamento e tomadas de decisão intrínsecas à exploração agrícola, pois fornecem muitos dados de natureza física, química, e/ou morfológicas dos solos de uma região. Entretanto, mapas pedológicos em escalas adequadas são escassos para planejamento do manejo e conservação sustentável dos solos. Neste contexto, o presente trabalho objetivou a geração de um mapa digital de classes de solos da microbacia do Ribeirão Extrema (MBRE) no Distrito Federal (DF), mediante o emprego de técnicas de sensoriamento remoto visando a disponibilização de material cartográfico de solos representativos atualizado e mais detalhado do que os então disponíveis para a microbacia estudada. Para tanto seis litotopossequências representativas da microbacia de Rio Jadim (MBRJ), contígua à área de estudo, com características fisiográficas semelhantes, associadas aos solos de ocorrência restrita na (MBRE) foram designadas para classificação e estabelecimento das relações as

pedogeomorfológicas. As amostras de solos de 42 pontos do horizonte A de solos da região, na qual: 34 amostras solos da MBRJ e 8, à Noroeste da MBRE foram submetidas à espectrorradiometria para a obtenção das leituras de reflectância. Observados seus comportamento e feições características dos atributos, os espectros foram agrupados, em onze classes espectrais das quais extraiu-se a média aritmética de cada agrupamento. Os espectros médios foram compilados em uma biblioteca espectral de solos representativos da MBRE, estes foram reamostrados nos intervalos espectrais das bandas do sensor ASTER. Paralelamente, três imagens do satélite ASTER dos anos de 2001, 2004 e 2006 da área de estudo, foram adquiridas e processadas para a extração de feições de solos expostos que, sobrepostas, constituíram a imagem composta de solo exposto. Para a classificação o modelo de análise da mistura espectral (MESMA) foi executado na imagem composta utilizando os 10 *endmembers* da biblioteca espectral, gerando o mapa digital de solos. Pontos aleatórios criados a partir de uma malha retangular com células de 1.100 x 1.100 m, para operações de validação. O desempenho do MESMA foi avaliado por meio do índice *Kappa*. Os solos das seis litotopossequências apresentaram características pedogeomorfológicas semelhantes às da porção Noroeste da MBRE, o atributo textura diferiu dos demais solos, o qual foi critério de agrupamento dos espectros dos solos. Os solos estudados foram classificados no 5º nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. A imagem composta alcançou 39,7% da área total da microbacia estudada. O mapa digital de classes de solos obtido pelo modelo MESMA apresentou índice *Kappa* de 74%, o que revela uma representação mais fiel da distribuição espacial das classes de solos quando comparada às informações pedológicas da área avaliada.

Palavras Chaves: Litotopossequências, Espectrorradiometria, Série histórica, ASTER, Mapeamento digital de Solos, MESMA.

DIGITAL SOIL MAPPING OF THE RIVER JARDIM WATERSHED, DF, USING REMOTE SENSING TECHNIQUES

ABSTRACT

Soil resource is increasingly recognized for its importance in ecosystems, food production and global climate regulation. As the pressure exerted by the anthropic activities about the soil increases, the need arises to access relevant and updated information about that resource. Soil maps covers the most used information for the planning and intrinsic decision to the agriculture because they provide many data of physical, chemical or morphological nature of the soils of a region. Nonetheless, pedological maps at appropriate scales are scarce for soil management planning and sustainable soil conservation. In this regard, this work aimed to cause a digital map of soil classes in the watershed of Ribeirão Extrema (MBRE), Distrito Federal (DF) using remote sensing techniques to provide cartographic material of representative soils and more detailed than those available for the watershed studied. For this purpose, six litotoposequences representative of the watershed of Jardim River (MBRJ), contiguous to the study area, with similar physiographic characteristics, associated to restricted soils (MBRE) were designated for classification and establishment of pedogeomorphological relations. Soil samples of 42 points of the A horizon of soils of the region, where: 34 soil samples from the MBRJ and 8 to the northwest of the MBRE were submitted to spectroradiometry to obtain the reflectance readings. After observing their characteristic behavior and features, the spectra were grouped into eleven spectral classes from which the arithmetic mean of each grouping was extracted. The mean spectra were compiled into a spectral library of MBRE representative soils, which were rescheduled at the spectral intervals of the ASTER sensor bands. In parallel, three images of the ASTER satellite of the study area in 2001, 2004 and 2006 were acquired and processed for the extraction of exposed soil features that, overlapping, constituted the composite image of exposed soil. To classify the analysis model of the spectral mixture (MESMA) was executed in the composite image using the 10 endmembers of the spectral library, producing the digital map of soils. Random points created from a rectangular mesh with cells of 1,100 x 1,100 m for validation operations. The performance of the MESMA was evaluated using the Kappa index. The soils of the six litotoposequences presented pedogeomorphological characteristics similar to those of the Northwestern portion of the MBRE, the texture attribute differed from the other soils, which was a criterion for the grouping of the soil spectra. The studied soils were classified in the 5th categorical level of the Brazilian Soil Classification System. The composite image reached 39.7% of the total

area of the watershed studied. The digital map of soil classes obtained by the MESMA model presented a Kappa index of 74%, which show a more realistically represent of the spatial distribution of soil classes when compared to the pedological information of the evaluated area.

Key Words: Litotoposequences, Spectroradiometry, Historical series, ASTER, digital soil mapping, MESMA.

I. INTRODUÇÃO

O conhecimento profundo sobre o recurso solo de qualquer região é extremamente necessário, para que assim se adote medidas que visem sua conservação. Produção de alimentos e manutenção da qualidade ambiental são apenas duas funções desempenhadas pelos solos que sugerem que todas as comunidades se voltem para a importância deste recurso sustentação da vida no planeta. Para identificar a importância de solos na agricultura, mapas pedológicos podem ser usados para representar a diversidade de solos de uma região. As grandes dificuldades em se dispor desse tipo de material estão na demanda de tempo e pessoal especializado exigida por estas técnicas que, em consequência, envolvem altos custos financeiros. Assim, a necessidade de se desenvolver métodos de mapeamento de solos mais eficientes e menos onerosos tem levado a comunidade científica a procurar inovações tecnológicas.

O advento das geotecnologias proporcionou uma revolução nesse processo onde o sensoriamento remoto, tal como descrito por Novo (2008), mediante a utilização de modernos sensores, aeronaves, espaçonaves, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre, por meio do registro e análise das interações entre a Radiação Eletromagnética (REM) e os materiais existentes na superfície terrestre, em suas mais diversas manifestações. Além disso, associa-se a utilização crescente dos Sistemas de Informação Geográficas, que integram programas, equipamentos, metodologias, dados e pessoas (usuário) e tornam possível a coleta, o armazenamento, o processamento e a análise de dados georreferenciados, bem como a produção de informação acerca do objeto de estudo (TEIXEIRA, 1995).

No Brasil, entre os anos 70 e 80, os levantamentos de solos tiveram maior ênfase, porém, dada às limitações metodológicas da época, foram elaborados em escalas de pouco detalhamento. Deste então, novas técnicas vêm sendo desenvolvidas para potencializar as atividades de mapeamentos pedológicos convencionais. Neste sentido, o Mapeamento Digital de Solos (MDS) surgiu para contornar as limitações apresentadas por técnicas de mapeamento convencionais, no que se refere à tempo e recursos financeiros além de não gerar resíduos (McKENZIE e RYAN, 1999; McBRATNEY *et al.*, 2003; SCULL *et al.*, 2003; MULDER *et al.*, 2011). Assim como o mapeamento clássico, o MDS tem como elemento

essencial e pré-requisito a classificação pedológica em um sistema taxonômico oficializado local ou internacional. O uso do Sensoriamento Remoto (SR), em todos os seus níveis de aquisição, para fins de classificação do solo tem sido estudado desde Stoner e Baumgardner (1981), que aplicou o SR para mapear solos americanos.

Na região do espectro eletromagnético correspondente à faixa do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (0,35 a 2,5 μm), a espectrorradiometria de solos é responsável por medir o fluxo de radiação eletromagnética refletida pelos solos e representá-la em forma de curva espectral, permitindo a identificação e avaliação de suas características (MADEIRA NETTO, 2001). Esta técnica permite a análise do comportamento espectral dos solos, a qual extraem-se muitas informações sobre as características de cada solo dos (Demattê, 2002). Neste sentido, é possível a identificação de solos mediante às variações espectrais associadas a feições de absorção específica, forma, intensidade e inclinação da curva espectral o que faz da espectrorradiometria de reflectância uma importante ferramenta para o estudo dos solos (MADEIRA NETTO, 2001; DEMATTÊ *et al.*, 2014).

Portanto, estudos pedológicos que associam as informações obtidas do sensoriamento remoto com dados pedomorfogeológicos e campanhas de campo, representam uma alternativa eficaz e fidedigna para o mapeamento de solos.

Para Cline e Buol (1973), o Distrito Federal (DF) possui solos representativos dos solos do Bioma Cerrado, no entanto, o DF dispõe apenas de levantamentos de solos realizados pelo Serviço Nacional de Levantamento de Solos em escala 1:100.000 (Embrapa, 1978). Para atender as demandas ambientais econômicas e sociais relacionadas a exploração dos solos, é preciso que novos mapas sejam confeccionados em escala compatível com a necessidade (DEMATTÊ *et al.*, 2004).

A microbacia hidrográfica do Ribeirão Extrema é parte integrante da mesobacia hidrográfica do Rio Preto. A porção leste do Distrito Federal (DF) é considerada uma importante fronteira agrícola da região (EMATER, 2015).

Diante desse cenário, o presente trabalho foi elaborar um mapa digital de classes de solos da microbacia do Ribeirão Extrema (DF), mediante técnicas de sensoriamento remoto, com o objetivo de disponibilizar material cartográfico mais detalhado e atualizado acerca da distribuição espacial de solos na microbacia.

II. MATERIAL E MÉTODOS

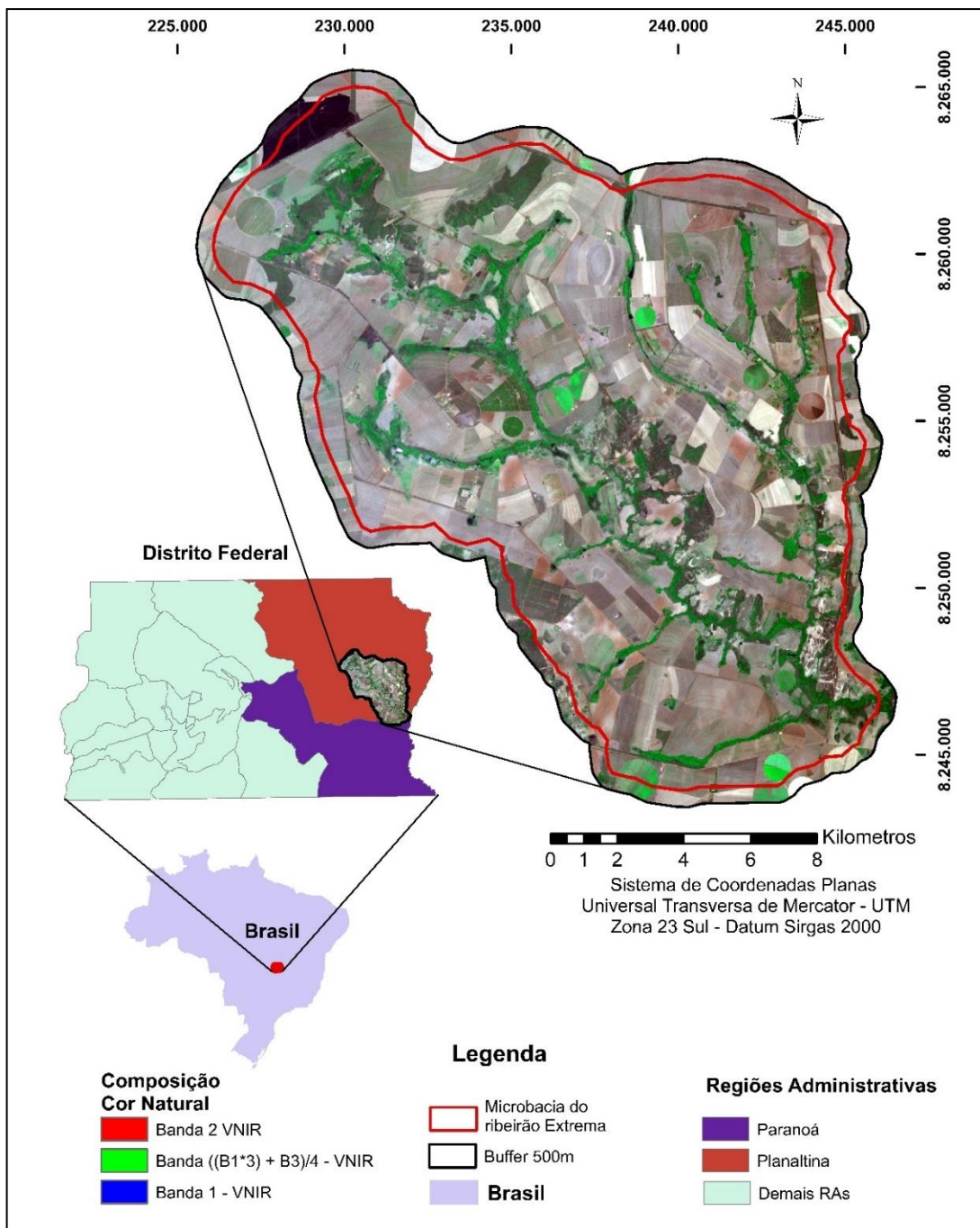
II. 1 Revisão bibliográfica e levantamento de dados auxiliares

Bibliografias referentes a sensoriamento remoto, geoprocessamento e outras técnicas de mapeamento digital foram reunidas para construir embasamento teórico científico para esta pesquisa. Além disso, dados cartográficos, digitais e analógicos do Distrito Federal (DF) foram compilados em um banco de dados, sendo eles: mapa pedológico, em escala 1:100.000 (Embrapa, 1978), mapa geológico, em escala 1:100.000 (Freitas-Silva e Campos, 1998a, b), e dados planialtimétricos, tais como curvas de nível, redes de drenagem e pontos cotados, em escala 1:10.000 (CODEPLAN, 1991). Juntamente com esses dados auxiliares, foram obtidas imagens orbitais multitemporais do sensor ASTER da plataforma TERRA. Dados de análises físicas e espectrais referentes a amostras de solos da microbacia do Rio Jardim (MBRJ) foram selecionados a partir do banco de dados de pedológicos e da biblioteca espectral de solos do laboratório de Geoprocessamento da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV/UnB.

II.1.1 Localização

A mesobacia do Rio Preto é composta por sete subunidades hidrográficas de gerenciamento: Alto Rio Preto, Córrego São Bernardo, Ribeirão Extrema, Ribeirão Jacaré, Ribeirão Jardim, Ribeirão Santa Rita e Rio Jardim (BORGES, 2007). A microbacia do Ribeirão Extrema é considerada um dos principais afluentes do rio Preto no Distrito Federal (DF) (CARNEIRO *et al.*, 2007). Cerca de 13,5% (136.500 ha) da sua área total se encontra nos limites do DF, entre as Regiões Administrativas (RA) de Planaltina e Paranoá (CARNEIRO *et al.*, 2007). Localizada no terço médio da mesobacia do Rio Preto, a MBRE (Figura 7) abrange uma área de mais de 25 mil ha, onde 97,18% de sua área estão sob o domínio da RA Planaltina; restante (2,82%) ocupa a RA Paranoá, mais precisamente, está entre as coordenadas UTM zona 23S: 225.547 m, 8.265.080 m e 246.189 m 8.243.663 m (CODEPLAN, 1991).

Figura 7 – Mapa de localização da área de estudo, microbacia do Ribeirão Extrema, em relação ao Distrito Federal



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de IBGE (2011).

II.1.2 Características Socioeconômicas

A microbacia do Ribeirão Extrema se destaca pela importância social, política e econômica e, há tempos, é fonte de estudos agroambientais voltados, principalmente, ao planejamento da exploração de seus recursos naturais, dada a alta capacidade

produtiva de suas terras (BORGES *et al.*, 2007). Nesse contexto, Carneiro *et al.* (2007) destaca que boa parte da mesobacia do Rio Preto no Distrito Federal é destinada à produção agropecuária, à produção de grãos – como milho, soja e feijão (Tabela 4) – e à pecuária de corte e leite (Tabela 5).

Tabela 4 – Dados da produção e área destinada da atividade agropecuária das Regiões Administrativas Paranoá e Planaltina no Distrito Federal do ano 2015

| Ano / Safra – 2015 | | | | |
|-------------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
| Discriminação | Área | Participação* | Produção | Participação* |
| | (ha) | (%) | (t) | (%) |
| RA PARANOÁ | | | | |
| Feijão | 3.528,50 | 2,35 | 8.717,00 | 1,12 |
| Milho | 33.012,00 | 22,04 | 274.526,00 | 35,33 |
| Soja | 27.441,00 | 18,32 | 78.895,00 | 10,15 |
| Subtotal | 63.981,50 | 42,71 | 362.138,00 | 46,60 |
| RA PLANALTINA | | | | |
| Feijão | 11.456,37 | 7,65 | 32.097,00 | 4,13 |
| Milho | 28.247,51 | 18,85 | 232.958,00 | 29,98 |
| Soja | 39.368,45 | 26,29 | 119.985,00 | 15,44 |
| Subtotal | 79.072,33 | 52,79 | 385.040,00 | 49,55 |
| DISTRITO FEDERAL | | | | |
| Feijão | 15.708,32 | 10,49 | 42.529,84 | 5,47 |
| Milho | 65.221,81 | 43,54 | 528.194,49 | 67,98 |
| Soja | 68.861,95 | 45,97 | 206.234,00 | 26,55 |
| Total | 149.792,08 | 100,00 | 776.958,33 | 100,00 |

Fonte: Adaptado de (Emater, 2015).

* Participação na produção total do DF.

Em 2015, essas RA foram responsáveis por 96,16% da produção total de soja, milho e feijão de todo o DF. Este resultado foi obtido em uma área plantada de aproximadamente 143.054 ha do total destinado a essas culturas.

Tabela 5 – Efetivo Rebanho Bovino, Produção de Carne e Leite, das Regiões Administrativas do Distrito Federal Planaltina e Paranoá – 2015

| Discriminação | Plantel | Produção de Carne | | Produção de leite | |
|---------------|----------------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|
| | | Quantidade | Participação | Quantidade | Participação |
| | (Cabeças) | (kg) | (%) | (L) | (%) |
| Núcleo | RA PLANALTINA | | | | |
| Pipiripau | 1.430 | 057.658 | 1,48 | 1.314.743 | 04,40 |
| Planaltina | 7.839 | 316.068 | 8,12 | 4.847.491 | 16,22 |
| Rio preto | 0.000 | 000.000 | 0,00 | 0.000.000 | 00,00 |

Continuação da tabela 5

| | | | | | |
|-------------------------|-------------------|------------------|--------------|-------------------|---------------|
| Tabatinga | 4.837 | 195.028 | 5,01 | 3.148.348 | 10,53 |
| Taquara | 3.888 | 156.764 | 4,03 | 950.884.0 | 03,18 |
| Subtotal | 17.994 | 725.518 | 18,63 | 10.261.466 | 34,33 |
| Núcleo | RA PARANOÁ | | | | |
| Jardim | 7.382 | 297.642 | 7,64 | 1.722.141 | 5,76 |
| PADF | 10.993 | 443.238 | 11,38 | 2.887.664 | 9,66 |
| Paranoá | 3.543 | 142.854 | 3,67 | 397.317 | 1,33 |
| Subtotal | 21.918 | 883.734 | 22,70 | 5.007.122 | 16,75 |
| DISTRITO FEDERAL | | | | | |
| Distrito Federal | 96.576 | 3.893.944 | 100 | 29.890.000 | 100,00 |

Fonte: Adaptado de Emater (2015).

* Participação na produção total do DF.

Os números da produção de origem animal foram bastante expressivos em 2015, com destaque para a pecuária de corte, que produziu aproximadamente 1.610 toneladas de carne ao somarmos a produção das duas RA das quais a MBRE faz parte (Planaltina e Paranoá). Este volume representa mais de 41% de toda a carne produzida em todo território distrital. Além disso, estas RA foram responsáveis por cerca de 51% da produção total de leite no DF em 2015, chegando a faixa de 15.268.588 litros nesse mesmo ano (Emater, 2015).

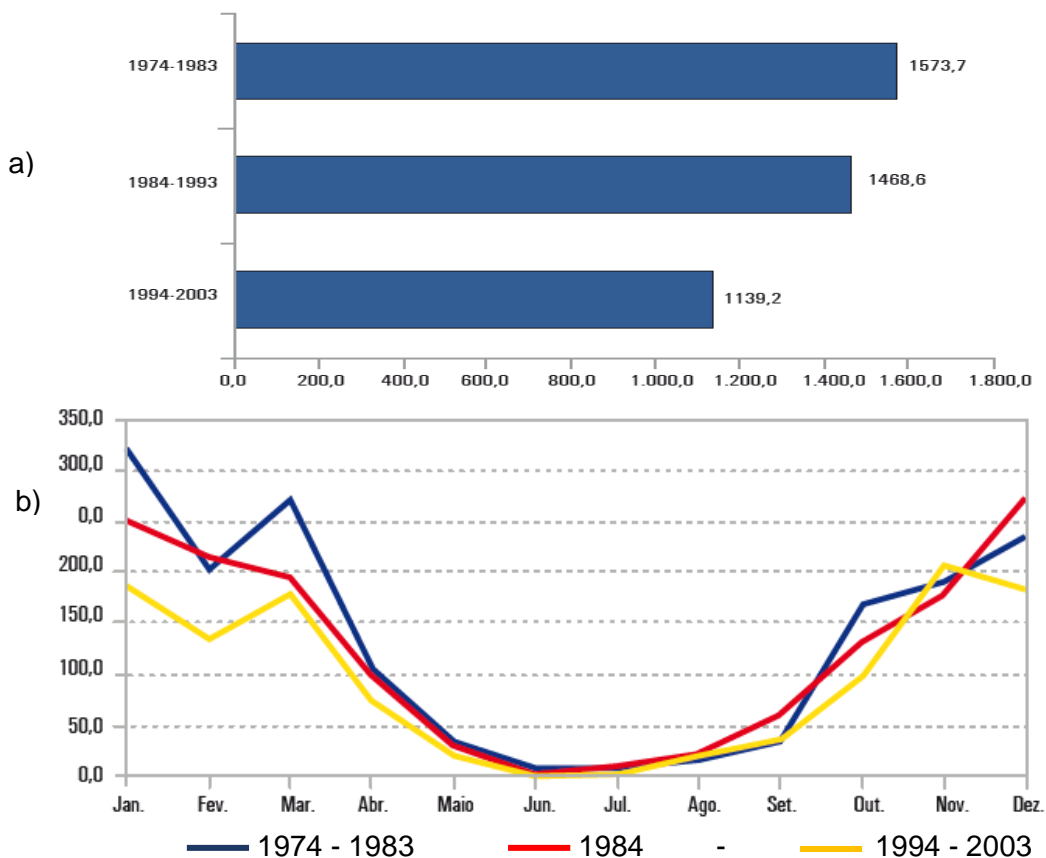
II.1.3 Clima

O DF está localizado na região central do Brasil, inserido no Domínio Morfoclimático do Cerrado, caracterizando-se por apresentar extensos chapadões recobertos por vegetação de Cerrado, de alta biodiversidade, adentrados por Matas de Galerias que acompanham os riachos de pequeno porte e os córregos. A região é marcada pelo predomínio de climas tropicais úmidos com duas estações bem definidas: chuva no verão e seca no inverno (IBRAM, 2015).

A média anual das precipitações no DF oscila entre 1.200 a 1.800 milímetros (COSTA *et al.*, 2012). Malaquias *et al.* (2010), por meio de uma série histórica de 1974 a 2003 na RA Planaltina, registraram uma precipitação média anual de 1.393,83 mm, com uma tendência decrescente no volume de chuva entre os decênios estudados (Figura 8). A estação seca é bastante rigorosa e estende-se, aproximadamente, de maio a setembro, chegando a ocorrer ausência de chuvas nesses meses em alguns anos, considerados extremamente secos. Por outro lado, a estação chuvosa vai de

outubro a abril e apresenta maior pluviosidade no período de dezembro a março, quando se concentram mais de 80% do total anual de chuvas (Embrapa, 1978).

Figura 8 – a) Média anual da precipitação (mm) segundo os decêndios, no período de 1974 a 2003. b) Média mensal da precipitação pluviométrica (mm) decendial para o período de 1974 a 2003



Fonte: Adaptado de Malaquias *et al.* (2010).

De acordo com a classificação climática de Köppen (1918), as áreas com cotas altimétricas entre 1.000 e 1.200 metros possuem clima Tropical de Altitude do tipo Cwa (inverno seco e verão quente), com temperatura média do ar, para o mês mais frio (julho), ligeiramente inferior a 18° C, e média superior a 22° C nos meses mais quentes (setembro e outubro). As áreas que possuem cotas superiores a 1.200 metros apresentam temperaturas que não chegam a 22° C, mas que superam os 10° C durante os quatro meses mais quentes, correspondente ao clima Tropical de Altitude do tipo Cwb (inverno seco e verão temperado) (CODEPLAN, 1984; SEMARH, 2012).

Por sua vez, as áreas com cotas altimétricas abaixo de 1.000 m enquadram-se na classificação climática Aw. Esta classificação caracteriza-se por temperaturas para o mês mais frio superiores a 18° C, verão chuvoso e inverno seco, sendo que, para o mês mais seco, as precipitações são inferiores a 60 mm. A microbacia do Ribeirão Extrema apresenta dados pluviométricos, de novembro a março, variando entre 150 a 300 mm/mês, e temperaturas máximas de 30° C e mínimas de 18° C, também dentro desses meses (MALAQUIAS *et al.*, 2010).

II.1.4 Geologia

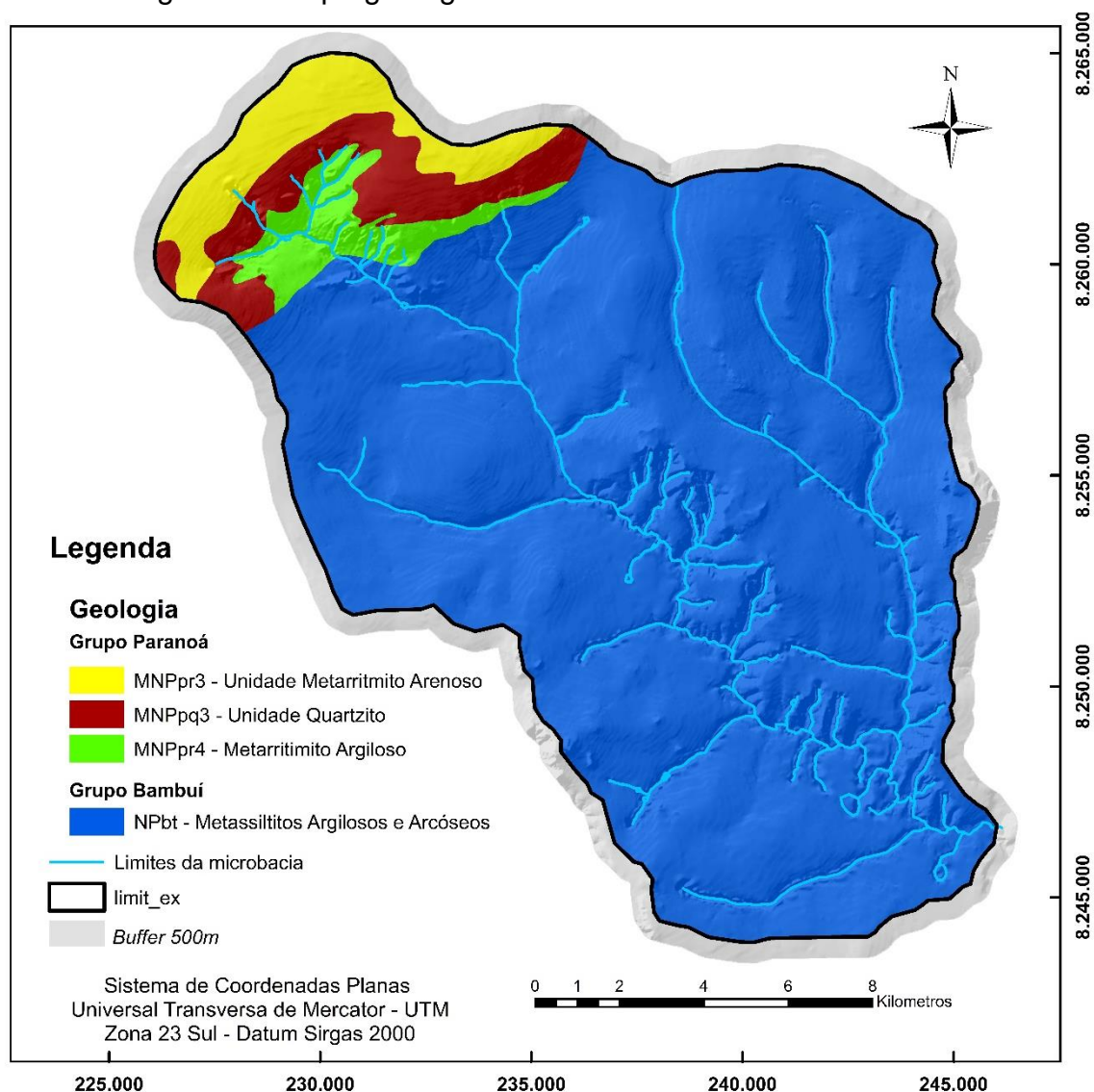
Na microbacia do Ribeirão Extrema, conforme proposta de compartimentação geomorfológica apresentada no Zoneamento Ecológico Econômico do Distrito Federal (SEMARH, 2012), observa-se que há predomínio do compartimento Geomorfológico Plano Intermediário, que é associado ao Grupo Bambuí (Figuras 9 e 10). Esse compartimento exibe um padrão de relevo plano a suave ondulado, baixa densidade de drenagem, ampla predominância de Latossolos, declividades inferiores 12% e cotas entre 950 e 1.050m (FREITAS-SILVA; CAMPOS, 1998a). Esta microbacia está geologicamente inserida na Plataforma Sul-Americana e, em conjunto com a Plataforma da Patagônia e a Cordilheira dos Andes, constitui as três grandes regiões tectônicas do Continente Sul Americano (ALMEIDA; HASUI, 1984; SCHOBENHAUS; CAMPOS, 1984). No DF, são encontrados quatro conjuntos litológicos, que são denominados: Grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí (FREITAS-SILVA; CAMPOS, 1998a; SEMARH, 2012).

A microbacia do Ribeirão Extrema desenvolveu-se sobre rochas dos Grupos Paranoá e Bambuí, consistindo, respectivamente, cerca de 20 e 80% de sua área total (FREITAS-SILVA; CAMPOS, 1998a) (Figura 9). O Grupo geológico Paranoá apresenta idade Meso/Neoproterozóica entre 1.100 e 900 milhões de anos, ocorrendo em uma pequena parte à noroeste da microbacia do Ribeirão Extrema. Já o Grupo Bambuí possui idade Neoproterozóica, entre 850 e 600 milhões de anos, e ocupa quase toda a extensão da área.

De acordo com Freitas-Silva e Campos (1998a) e Campos *et al.* (2010), o Grupo Paranoá na microbacia em questão é representado por três unidades – da base para topo: MNPpr3 – Metarritmito Arenoso, constituído por uma alternância de

quartzitos finos a médios com níveis de metassiltitos argilosos, metalamitos siltosos e metalamitos micáceos; MNPpq3 – Quartzito médio, esta unidade, por sua elevada resistência aos processos de intemperismo, sustenta as áreas de chapadas mais elevadas do DF. Os litotipos presentes são quartzitos finos a médios, por vezes grosseiros, de coloração branca ou cinza clara (cinza mais escuro quando frescos), bem selecionados, mineralogicamente maduros, muito silicificados, o que origina um aspecto maciço na maioria das ocorrências no DF. MNPpr4 – Metarritmito Argiloso, representado por metarritmitos homogêneos com camadas centimétricas regulares de metassiltitos, metalamitos e quartzitos finos de coloração cinza, amarelada, rosada ou avermelhada devido aos diferentes graus de intemperismo.

Figura 9 – Mapa geológico da microbacia do Ribeirão Extrema



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Freitas-Silva e Campos (1998a).

II.1.5 Geomorfologia

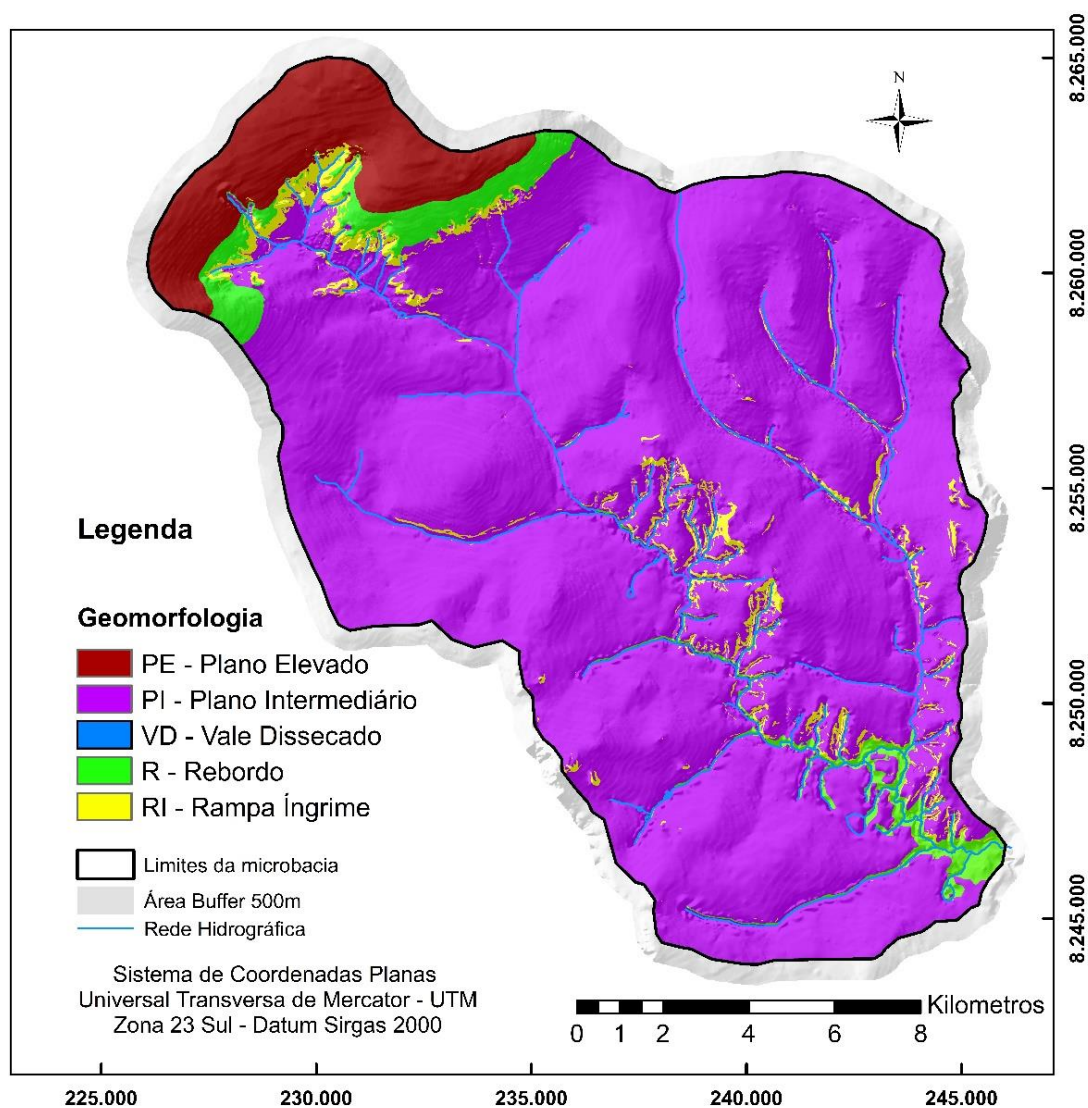
O DF situa-se em uma das porções mais elevadas do Planalto Central do Brasil, onde se encontram as cabeceiras de afluentes dos três maiores rios brasileiros: o Rio Maranhão (afluente do Rio Tocantins), o Rio Preto (afluente do Rio São Francisco) e os rios São Bartolomeu e Descoberto (tributários do Rio Paraná) (FREITAS-SILVA; CAMPOS, 1998a). Segundo King (1956) e Braun (1971), as porções mais elevadas do Planalto Central, correspondem aos remanescentes dos aplainamentos resultantes dos ciclos de erosão Sul Americano e Velhas, que se desenvolveram há bilhões de anos atrás. Assim, para explicar as características geomorfológicas da paisagem, vários estudos foram desenvolvidos, tais como os elaborados por Belcher (1954), Penteado (1976), IBGE (1977), Embrapa (1978), Brasil (1982), CODEPLAN (1984), Novaes Pinto e Carneiro (1984), Novaes Pinto (1987, 1988), Novaes Pinto (1994) e Martins e Baptista (1998). Seguindo esta classificação, foi elaborado um mapa de classes hipsométricas delimitando as áreas descritas nesses trabalhos (Figura 10).

Com o objetivo de entender melhor a compartimentação geomorfológica do DF, a SEMARH (2012) propôs a integração e adaptação das propostas de Novaes Pinto (1994) e Martins e Baptista (1998). O trabalho resultou na divisão de cinco classes, sendo a Plano Intermediário a de maior destaque dentro da Bacia do Ribeirão Extrema. Desta forma, tem-se a seguinte classificação:

- PE – Plano Elevado: padrão de relevo plano a suave ondulado, baixa densidade de drenagens, predominância de Latossolos, declividades inferiores a 10% e cotas superiores a 1.100 m. A pedogênese supera a erosão e o transporte no balanço morfodinâmico;
- PI – Plano Intermediário: padrão de relevo plano a suave ondulado, baixa densidade de drenagem, ampla predominância de Latossolos, declividades inferiores a 12% e cotas entre 950 e 1.050 m. A pedogênese supera a erosão e o transporte no balanço morfodinâmico;
- VD – Vale Dissecado: padrão de relevo ondulado a forte ondulado, elevada densidade de drenagem, ampla predominância de Cambissolos, declividades superiores a 20% e cotas inferiores a 800 m. A erosão supera a pedogênese na morfogênese;

- R – Rebordo: padrão de relevo ondulado, moderada densidade de drenagem, predominância de Cambissolos, declividades entre 10 e 20% e cotas entre 950 e 1.100 m. A erosão supera a pedogênese no balanço morfodinâmico;
- RI – Rampa Íngrime: padrão de relevo forte ondulado a escarpado, alta densidade de drenagem, ampla predominância de Latossolos, declividades superiores a 25% e cotas entre 800 e 1.100 m. A erosão e transporte superam fortemente a pedogênese no balanço morfodinâmico.

Figura 10 – Mapa geomorfológico da Bacia do Ribeirão Extrema

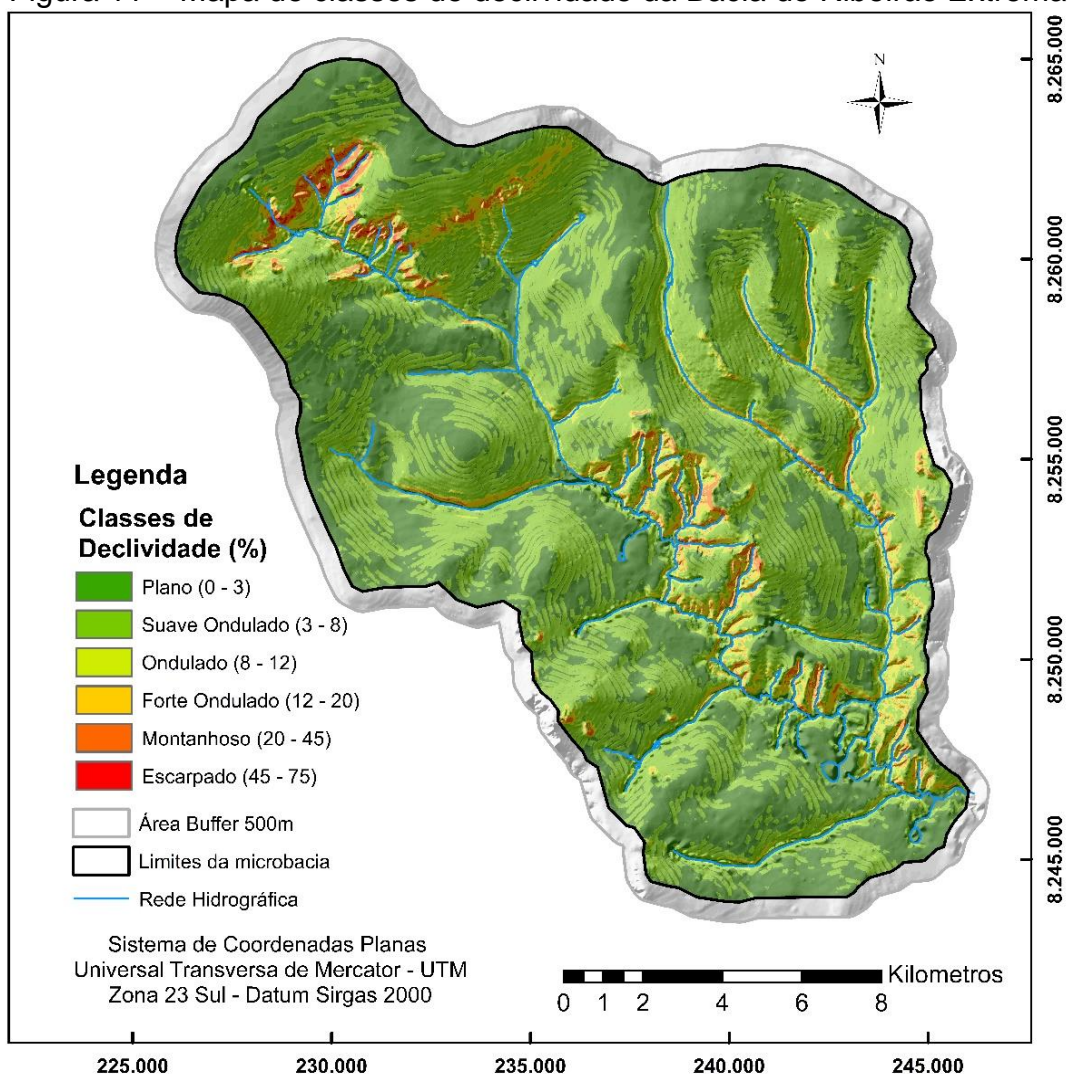


Fonte: Elaborado pelo autor a partir das propostas de Novaes Pinto (1994) e Martins e Baptista (1998) pela SEMARH (2012).

Para um levantamento de solos, considera-se que as classes de relevo são importantes parâmetros para estabelecimento das relações pedomorfogológicas, bem como servem de base para a classificação dos solos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2014). Deste modo, foram realizados o Modelo Digital do Terreno (MDT) do Ribeirão Extrema e o mapa de classes de declividade através do programa ArcGIS 10.3, de acordo com as seguintes classes de declividade (Figura 11):

- Plano: topografia horizontal em que os desnivelamentos são muito pequenos, com declividades variáveis de 0 a 3%;
- Suave ondulado: topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas (elevações de até 50 m) e/ou outeiros (elevações de 50 a 100 m), apresentando declives suaves, variáveis de 3 a 8%;
- Ondulado: topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros, apresentando declives moderados, variáveis de 8 a 20%;
- Forte ondulado: topografia movimentada, formada por outeiros e/ou morros (100 a 200 m) e, raramente, colinas, com declives fortes, variáveis de 20 a 45%;
- Montanhoso: topografia muito movimentada, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes e muito fortes, variáveis de 45 a 75%;
- Escarpado: predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes e escarpas, tais como aparados, itaimbés, frentes de cuevas, falésias e vertentes de declives muito fortes, usualmente, ultrapassando 75%.

Figura 11 – Mapa de classes de declividade da Bacia do Ribeirão Extrema



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da CODEPLAN (1991) e classificado segundo Embrapa (2014).

A distribuição das classes de declividade na microbacia estudada foi calculada a fim de fornecer dados para o entendimento da dinâmica da pedogênese. Estes cálculos podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Distribuição das classes de declividade para a bacia hidrográfica do Ribeirão Extrema

| Relevo | Classe de declividade (%) | Área (ha) | Área (%) |
|----------------|---------------------------|-----------------|------------|
| Plano | 0 - 3 | 9.298,4 | 35,4 |
| Suave ondulado | 3 - 8 | 12.833,3 | 50,1 |
| Ondulado | 8 - 20 | 1.767,4 | 6,9 |
| Forte ondulado | 20 - 45 | 1.152,7 | 4,5 |
| Montanhoso | 45 - 75 | 537,9 | 2,1 |
| Escarpado | > 75 | 25,6 | 0,1 |
| Total | - | 25.615,4 | 100 |

Fonte: Elaborado a partir de dados da CODEPLAN (1991) e classificado segundo Embrapa (2014).

II.1.6 Solos

Os solos do DF representam os solos da região do Cerrado Brasileiro (CLINE; BUOL, 1973). O levantamento e mapeamento desta área disponível foi realizado pelo Serviço Nacional de Levantamento de Solos da Embrapa Solos (Embrapa, 1978), na escala 1:100.000, e são considerados a melhor fonte de informações sobre os solos encontrados no DF. A Microbacia estudada apresenta as seguintes ordens de solos, segundo Martins (1998) e Embrapa (1978): Latossolos, Cambissolos, Plintossolos, Gleissolos, Argissolos e Neossolos, sendo as duas primeiras as de maior expressão.

Os Latossolos representam aproximadamente 65% da área total desta Microbacia e estão associados, geralmente, às áreas de relevo plano ou suave ondulado (declividades inferiores a 8%) com espessura quase sempre maior que 2,5 m e de baixa fertilidade natural. Além disso, apresentam elevada tolerância e resistência à erosão (SEMARH, 2012). Por outro lado, em virtude da topografia favorável ou da ausência de impedimentos físicos e hídricos para a agricultura (pedregosidade, deficiência de oxigênio e outros) são os solos mais intensamente utilizados na bacia para atividades agrícolas. Usualmente, possuem alta permeabilidade de água, podendo ser fortemente drenados. São solos ácricos, distróficos e álicos de muito baixa à média capacidade de troca catiônica (Embrapa, 1978). Assim, na região da Microbacia do Ribeirão Extrema, têm-se como principais representantes desta ordem: os Latossolos Vermelhos (LV), os quais apresentam coloração avermelhada e teores de argila variando entre 67% e 75%, posicionados nos topos das chapadas; e os Latossolos Vermelhos-Amarelos (LVA), de matiz mais amarelada e teores de argila variando entre 38% e 71%, localizados nos rebordos das chapadas e nos divisores de água (SEMARH, 2012).

Os Cambissolos são solos pouco desenvolvidos, com espessura quase sempre menor que 0,70 m e caracterizados, principalmente, por apresentarem horizonte B incipiente, onde alguns minerais primários facilmente intemperizáveis podem estar presentes (Embrapa, 1978). São solos rasos que apresentam cascalhos, concreções e fragmentos de rochas ao longo dos perfis. Ocupam, na paisagem, o relevo forte ondulado (20 a 45% de declive) e exibem coloração avermelhada ou amarelada, com estruturas e texturas variadas, proporcionando drenagem moderada. Em geral, estes solos possuem reduzida fertilidade, o que ocorre devido à baixa saturação por bases

(distróficos), ou pela elevada saturação por alumínio (álícos) (Embrapa, 1978). Apresentam elevada suscetibilidade à erosão, pois a baixa permeabilidade associada à ocorrência de chuvas torrenciais produz as enxurradas que favorecem a formação de sulcos erosivos. Devido a esse processo, sugere-se que as áreas com desenvolvimento de Cambissolos sejam destinadas, prioritariamente, à preservação natural (SEMARH, 2012).

Os Plintossolos possuem textura de muito argilosa a arenosa, são distróficos, pouco profundos, moderadamente ácidos, mal drenados (quando hidromórficos), com séria restrição à percolação de água, apresentando alagamento temporário e escoamento lento. Ocorrem em relevo plano e suave-ondulado (0 a 8% de declive), como áreas deprimidas e terços inferiores das encostas, onde há importante movimentação lateral de água. As plintitas, quando endurecidas de maneira irreversível, transformam-se gradualmente em petroplintitas (MARTINS, 1998).

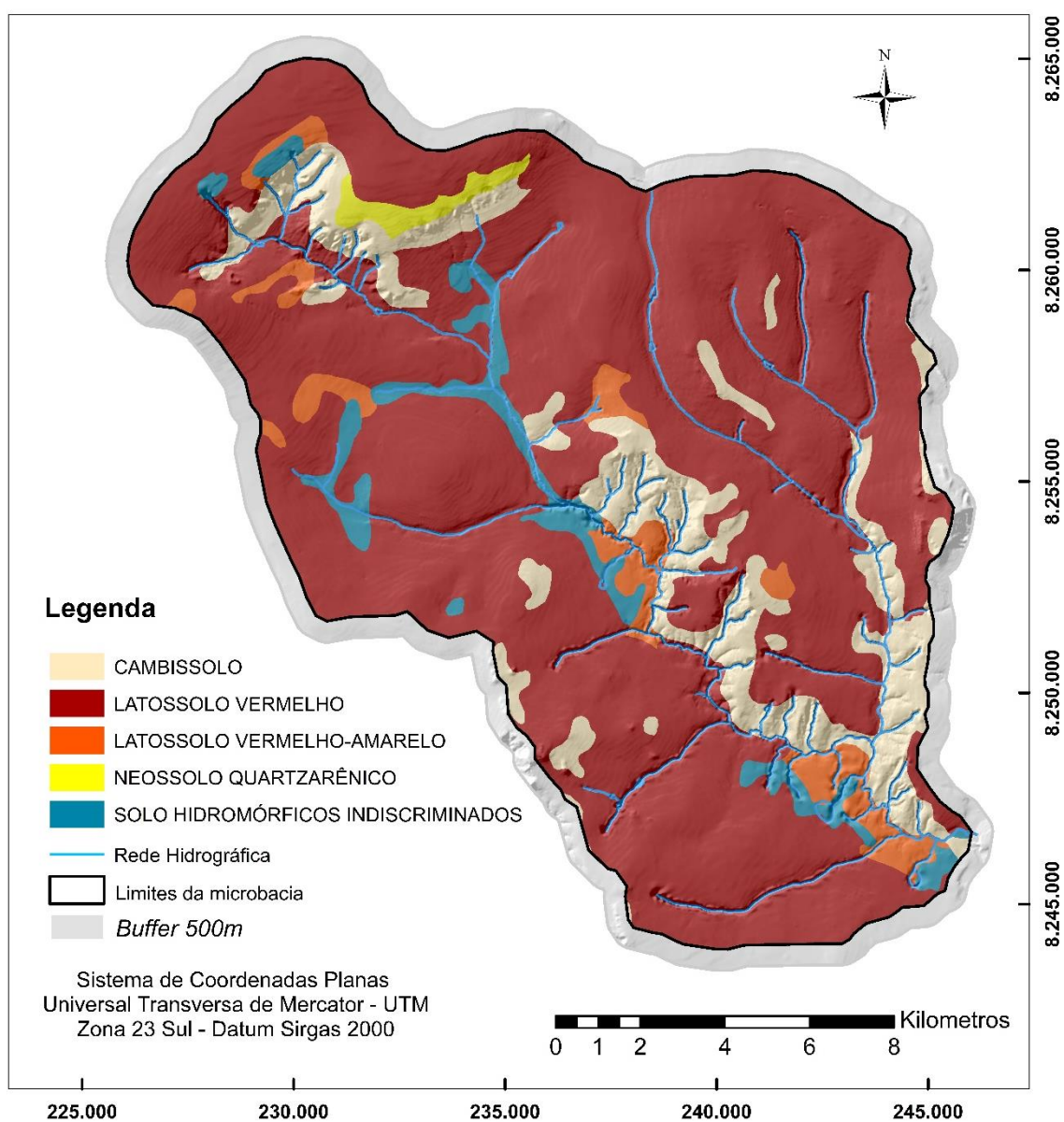
Os solos hidromórficos, como os Gleissolos, geralmente ocupam as depressões da paisagem sujeitas a inundações, cabeceiras de rios ou córregos, assim como, também, ao longo deles, sendo imperfeitamente drenados ou muito mal drenados. Apresentam textura variável, sendo solos fracamente estruturados, podendo ser ricos ou pobres em bases, ou com teores de alumínio elevados (alumínicos) (Embrapa, 1978).

Os Argissolos correspondem a solos bastante heterogêneos, aumentando substancialmente o teor de argila com o aumento da profundidade, apresentando, portanto, permeabilidade diferenciada e susceptibilidade à erosão em sulcos. Na paisagem, ocupam a porção inferior das encostas, onde o relevo é ondulado (8 a 20% de declive) ou forte-ondulado (20 a 45% de declive) (Embrapa, 1978).

Os Neossolos Flúvicos são solos pouco evoluídos, não hidromórficos. Apresentam horizonte A assentado diretamente sobre o horizonte C, composto de uma sucessão de camadas estratificadas sem relação pedogenética entre si. Na paisagem, estes solos ocorrem em relevo plano e são associados à vegetação de Mata de Galeria, exibindo níveis variáveis de coloração, teor de argila, saturação por alumínio e saturação por bases (MARTINS, 1998). Os Neossolos Quartzarênicos são solos mais profundos, de coloração cinza-claro e apresentam textura arenosa ou franco-arenosa. Basicamente, estão constituídos por quartzo, com valores máximos de 15% de argila e sequência de horizontes do tipo A-C, ocorrendo em relevo plano

ou suave-ondulado (0 a 8% de declividade). Apresentam baixa disponibilidade de nutrientes para as plantas, sendo, geralmente álicos e distróficos (Embrapa, 1978) (Figura 12).

Figura 12 – Mapa de solos da Microacia do Ribeirão Extrema



Fonte: Adaptado de Embrapa (1978), com atualização da nomenclatura das ordens conforme Embrapa (2014).

II.2. Delimitação da Bacia do Ribeirão Extrema

Com o auxílio dos dados bibliográficos e planialtimétricos adquiridos, foi delimitada a área que compõe a microbacia selecionada para o estudo e gerado um arquivo em formato vetorial, com base nas curvas de nível e hidrografia extraídas das cartas planialtimétricas do DF (CODEPLAN, 1991) no programa ArcGIS 10 (ESRI, 2014). Além disso, também foi produzido um arquivo vetorial de um *buffer* de 500m contornando os limites definidos da bacia. Este arquivo foi criado para evitar a perda dos pixels localizados na região que contorna a bacia, nas operações de recorte dos mapas temáticos e imagens de satélite, além da otimização da realização de operações em arquivos matriciais.

Para a geração do banco de dados digital, os dados disponíveis foram os seguintes: cartas planialtimétricas do Distrito Federal (DF), em escala 1:10.000, elaboradas pela Companhia de Desenvolvimento do Planalto – CODEPLAN (CODEPLAN,1991); mapas temáticos de solos e aptidão agrícola das terras do DF elaborados pela Embrapa (1978). Estes dados foram inseridos no programa ArcGIS® 10.3. A partir de arquivos vetoriais de pontos cotados, hidrografia e curvas de nível do DF extraídos da base planialtimétrica do DF utilizada, foi elaborado o MDT (Modelo Digital do Terreno) da Microbacia estudada. Como subprodutos, foram gerados, a partir do MDT, o mapa de classes hisométricas (altitudes), o mapa de classes de declividade e o mapa de compartimentação geomorfológica, todos de acordo com as propostas de Novaes Pinto (1994) e Martins e Baptista (1998) pela SEMARH (2012), além do efeito sombra do relevo (*Hillshade*) que ajuda na visualização das relações pedogeomorfológicas.

Os mapas temáticos foram devidamente recortados pela área da microbacia estudada, estabelecendo-se os mapas de solos, aptidão agrícola e geomorfologia da microbacia do Ribeirão Extrema (MBRE). O mapa de solos teve sua legenda reclassificada de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SiBCS) com atribuição das cores das classes conforme as normas do SiBCS para a representação em mapas de classes de solo (Embrapa, 2014).

II.3. Caracterização pedomorfogeológica e classes de solos representativas da microbacia do Ribeirão Extrema

A microbacia do Ribeirão Extrema possui características fisiográficas e geológicas análogas à da microbacia do Rio Jardim (MBRJ), uma vez que são contíguas. Nesse sentido, foram realizadas, mediante atividades de campo, verificações das relações pedomorfogeológicas existentes na MBRJ, ou seja: o padrão de distribuição dos solos em função da sua relação com as unidades geomorfológicas (feições do relevo como: declividade, concavidade e altimetria) e material de origem (litologias do Grupo Paranoá e Bambuí). Nesta microbacia, as relações pedomorfogeológicas já foram devidamente estabelecidas em trabalhos de mapeamento digital de solos do Distrito Federal realizados pela equipe de pesquisadores do Laboratório de Geoprocessamento da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (FAV da Universidade de Brasília – UnB), incluindo a MBRJ.

Os dados gerados na MBRJ disponíveis no laboratório de geoprocessamento da FAV-UnB foram derivados de 6 litopossequências. Foram coletadas 34 amostras de solos dos horizontes A e de horizontes subsuperficiais diagnósticos, todas com análises físicas de textura do solo e análises químicas do complexo sortivo, realizadas segundo metodologias descritas em Embrapa (1997). Além dessas, foram feitas análises espectroscópicas, que originaram a Biblioteca Espectral dos Solos da MBRJ.

Posteriormente, foram avaliadas as relações pedomorfogeológicas na microbacia do Ribeirão Extrema por intermédio de litopossequências representativas, observando semelhanças e variabilidades destas em relação às já definidas na MBRJ. As observações de campo permitiram verificar grande similaridade nas relações pedomorfogeológicas com as classes de solos de ocorrência nestas microbacias. Isto ocorreu em função da compartimentação geomorfológica e dos materiais de origem semelhantes, com predomínio de litologias desenvolvidas a partir de composição pelítica, sendo, portanto, o padrão pedo-evolutivo condicionado, principalmente, pela evolução geomorfológica da região.

Durante as verificações de campo na MBRE, foram verificadas classes de solos que não ocorrem de maneira significativa na MBRJ. Esses solos localizam-se na porção noroeste da microbacia estudada, constituindo solos de textura arenosa a média, associados ao substrato quartzítico e metarritimítico das unidades MNPpr3 e

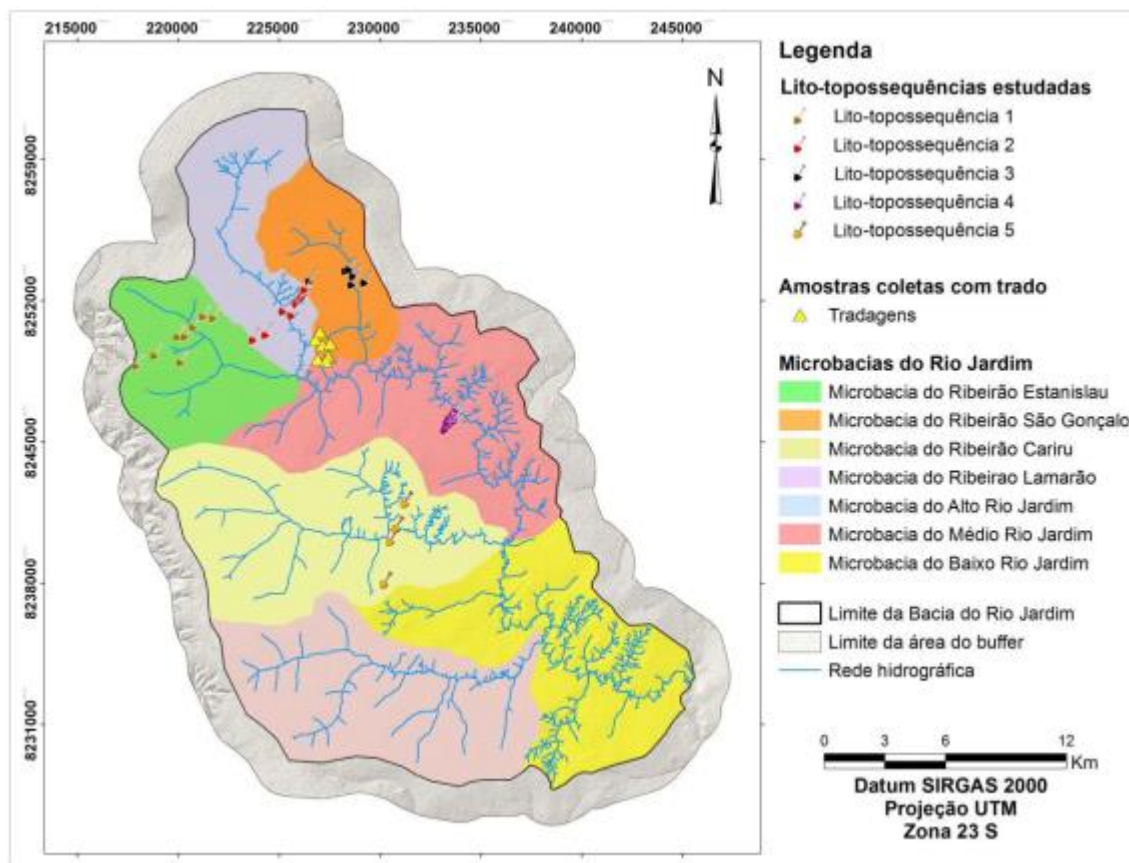
4 e MNPpq3 do Grupo Paranoá, que apresentam maior área de ocorrência nesta porção da MBRE. Assim, foram realizadas litotopossequências representativas a fim de complementar a variabilidade e a distribuição de classes de solo em relação às classes de solo da MBRE.

Do mesmo modo, nestas litotopossequências, foram estabelecidas as relações pedomorfogeológicas, bem como foram selecionados pontos de coleta de amostras de solos para descrição morfológica em perfis pedológicos, expostos por meio de aberturas de trincheiras ou em cortes de barrancos, ou mediante tradagens, de acordo com Santos *et al.* (2015). As amostras foram, também, encaminhadas para análises físicas (textura do solo) e químicas (complexo sortivo), segundo Embrapa (1997).

II.3.1 Litotopossequências representativas da MBRJ

Para este trabalho, foram consideradas 34 amostras de solos oriundas dos perfis pedológicos das cinco litotopossequências representativas da MBRJ devidamente ordenadas e nomeadas. A primeira foi denominada de Litotopossequência Estanislau, pois está localizada na microbacia do Ribeirão Estanislau, entre as rodovias DF-130 e DF-455, abrangendo o Núcleo Rural de Tabatinga. A segunda, nomeada de Alto Rio Jardim, localiza-se na microbacia do Alto Rio Jardim, entre as rodovias DF-455, DF-120 e DF-355. A terceira, chamada de São Gonçalo, acha-se localizada na microbacia do Ribeirão São Gonçalo, entre as rodovias DF-355 e DF-322, compreendendo o Núcleo Rural de Tabatinga. A quarta, denominada de Barra Alta, encontra-se localizada no Núcleo Rural Tabatinga, entre as rodovias DF-260 e DF-232, sobre a margem esquerda do Rio Jardim. A quinta, nomeada de Litotopossequência Cariru, localiza-se na microbacia do Ribeirão Cariru, entre as rodovias DF-270, DF-120 e DF-260 no Núcleo Rural PAD-DF, além de uma sexta litotopossequência na parte central da MBRJ denominada fazenda Ibi-Atã (Figura 13).

Figura 13 – Localização das lito-topossequências da Bacia do Rio Jardim, DF



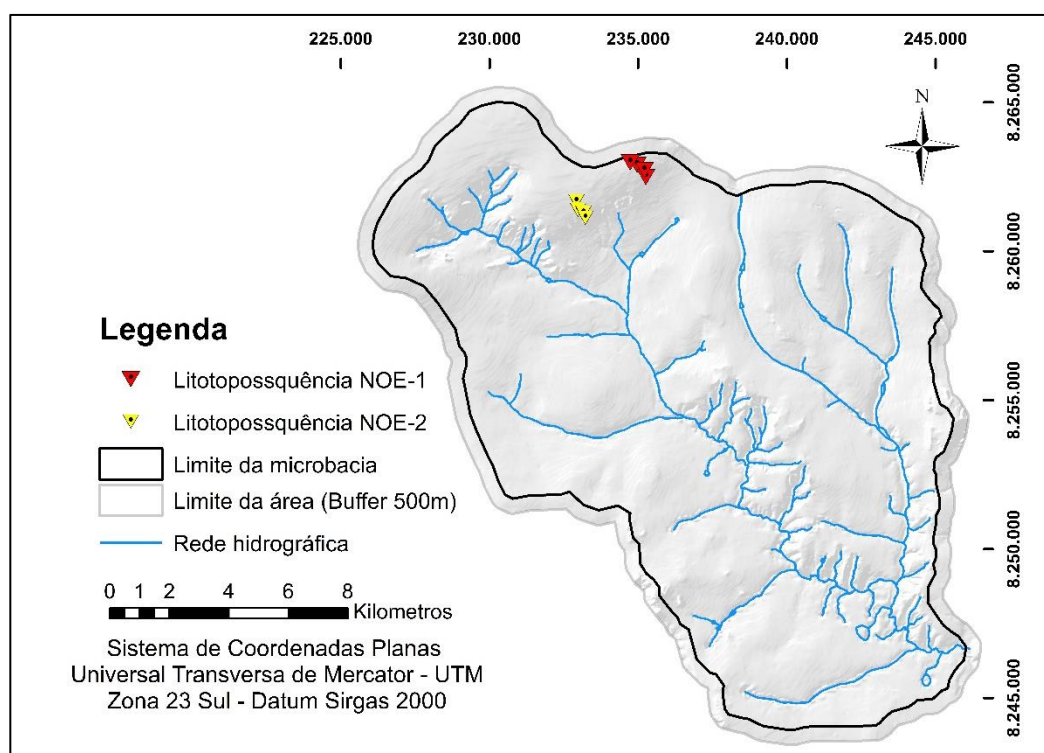
Fonte: Adaptado de CODEPLAN (1991).

II.3.2 Litotopossequências representativas à noroeste (NOE) da MBRE

Nesta etapa, foram analisadas duas litotopossequências representativas (NOE-1) e (NOE-2) (Figura 14), que somam um total de oito pontos de coleta de solos supostamente arenosos, obtidas por abertura de trincheira, cortes em estradas ou por tradagem (no caso de solos arenosos, que impossibilitam a exposição do perfil pedológico). Essas amostras foram submetidas a análises laboratoriais físicas, em seus respectivos horizontes A e o restante, dos horizontes subsuperficiais diagnósticos (B ou C); e espectrais nos horizontes A. Os pontos de coleta foram distribuídos segundo os parâmetros pedogeomorfológicos definidos por Lacerda e Barbosa (2012), que fazem menção à ocorrência de solos arenosos segundo o substrato geológico associado à geomorfologia do local. Nesse sentido, as duas litotopossequências NOE-1 e NOE-2 foram alocadas seguindo pontos com maior probabilidade de ocorrência de solos arenosos.

Na organização do banco de dados espectrais de solos do Laboratório de Geoprocessamento da FAV/UnB, as amostras foram nomeadas de acordo sua litotopossequência de origem: DFE – Estanislau, DFAJ – Alto Rio Jardim/Extrema, DFSG – São Gonçalo, DFBA – Barra Alta, DFCA – Cariru, ANT020 – Antena BR 020, ASCXDA – Associação Caixa D'água e FZOLAG – Fazenda Olhos D'água.

Figura 14 – Localização das Litotopossequências representativas à noroeste (NO) da MBRE



Fonte: CODEPLAN (1991).

As amostras do horizonte A foram fracionadas para a realização da descrição morfológica, das análises físicas e espectroscópicas. As coordenadas dos perfis pedológicos e dos pontos de amostragem foram registradas por meio de GPS de navegação Garmin® MAP 60CSX. Os números foram inseridos em planilhas Microsoft® Excel e importadas para o programa ArcGIS®. Com o auxílio de um clinômetro, foram medidas as declividades dos terrenos onde os perfis de solos avaliados se localizam.

Todas as amostras coletadas foram integradas ao banco de dados do Laboratório de “Geoprocessamento” da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV da Universidade de Brasília – UnB/DF. As amostras de solo coletadas dos horizontes A e B ou C da MBRJ foram submetidas ao processo de secagem ao ar por um período de aproximadamente 72 horas, desterradas e peneiradas para a obtenção da fração menor que 2 mm, fração terra fina seca ao ar (TFSA). Em seguida, foram submetidas a análises físicas e químicas, segundo a orientação da Embrapa (1997), para caracterização e classificação no segundo ao quarto nível categórico (subgrupos) do SiBCS (Embrapa, 2014). Dessa forma, foram analisados os atributos de natureza física e espectral para todas as amostras com a análise da composição granulométrica (método do densímetro) (Disp.com (NaPO₃) n); e química para os solos da MBRJ: complexo sortivo: cálcio, magnésio (método do complexometria com EDTA), potássio, sódio (método do Fotometria de chama); soma de bases – SB (cálcio, magnésio, potássio, sódio); capacidade de troca de cátions: hidrogênio, alumínio, CTC a pH 7,0 (CTC = SB+[H⁺+Al³⁺]); alumínio trocável (Al³⁺); saturação por bases (V% = [SB/CTC] * 1000); saturação por Alumínio m% = Al³⁺/[Al³⁺+SB] *1000); saturação por sódio; carbono – CO (método do oxidação via úmida com dicromato de potássio); nitrogênio (método do Kjeldahl destilação a vapor); relação C/N; matéria orgânica (MO); fosforo assimilável (Mehlich) de acordo com Embrapa (1997).

A textura foi escolhida como parâmetro principal para diferenciação das classes dos solos nos perfis das litotoposequências estudadas. Oscilaram de muito argilosa a arenosa, de acordo com a classificação textural do solo proposta por Santos *et al.* (2015). Esta variação mostra relação textural com os materiais de origem, uma vez que foram originados a partir de rochas metasedimentares pré-intemperizadas dos Grupos Bambuí e Paranoá (FREITAS-SILVA; CAMPOS, 1998a). Esta informação concorda com Vieira *et al.* (2007), que relataram que a textura é dependente do material de origem e dos agentes naturais de formação do solo, não sendo modificada pelo cultivo e outras práticas agrícolas. No entanto, a erosão diferencial pode promover, na camada superficial do solo, pequenas variações na proporção das frações granulométricas.

Para as análises espectrais de reflectância bidirecional (400 a 2500 nm), foram pesadas 300g de cada uma das 42 amostras dos horizontes A as quais foram secas

ao ar por um período de 48 horas, destorroadas e, por fim, peneiradas em frações < 2 mm obtendo-se a fração de TFSA.

II.4. Obtenção de dados espectroscópicos das amostras de solos da microbacia do Ribeirão Extrema

Em um primeiro momento, as 34 amostras de solos dos perfis pedológicos da MBRJ na fração TFSA foram submetidas a análises de espectroscopia de reflectância na faixa de 350 a 2.500 nm em laboratório para caracterização do padrão espectral dos solos. Parte dessas amostras seguiu para o Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicado a Solos (LSO-ESALQ-USP), coordenado pelo Prof. Dr. José Alexandre Melo Demattê, do Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz” da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP). Ademais, oito das amostras coletadas na porção noroeste da microbacia do ribeirão Extrema registraram ocorrência de classes de solos distintas dos solos de ocorrência na microbacia do Rio Jardim e foram analisadas no Laboratório de Sensoriamento Remoto do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG-UnB).

Em ambos os laboratórios, foi utilizado, para obtenção dos dados de reflectância, o espectrorradiômetro *FieldSpec® Pro* (ASD INC, 2002). Trata-se de um sensor cuja resolução espectral é de 3nm nos comprimentos de onda de 350 a 700 nm e de 10 nm na faixa de 700 a 2.500 nm, sendo todos esses valores interpolados pelo sensor para um intervalo de 1 nm (BELLINASO *et al.*, 2010). A coleta dos dados espectrais foi realizada em um ambiente de laboratório escuro para minimizar os efeitos aditivos da atmosfera (NAWAR *et al.*, 2015).

A fração de TFSA dos solos foram dispostas de maneira uniforme em placas de *Petri* com diâmetro de 9 cm, formando uma camada com espessura de 1,5 cm, com o objetivo de se obter uma superfície suficientemente plana para realização das leituras, conforme descrito por Bellinaso *et al.* (2010). Seguindo o protocolo desta técnica, foram feitas três leituras da reflectância de cada amostra (350-2.500 nm) obtidas em posições diferentes rotacionando a placa de *Petri* de cada uma (NAWAR *et al.*, 2015).

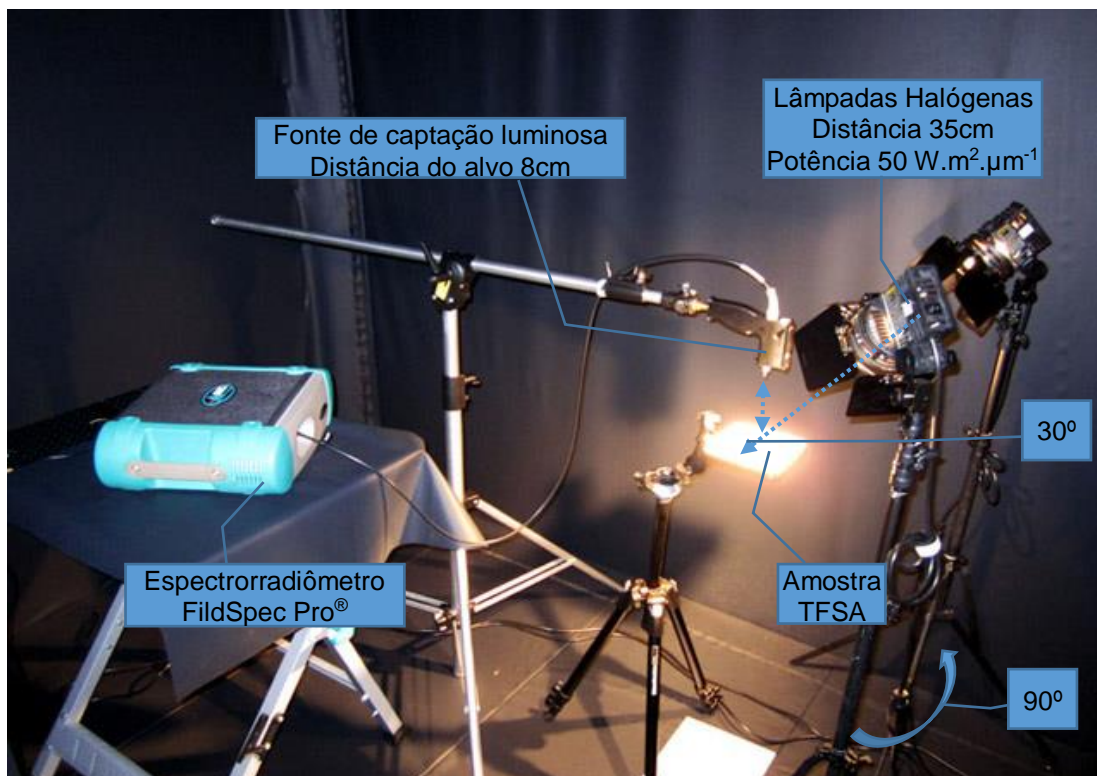
O sensor de captação da radiação eletromagnética (REM) do equipamento foi posicionado verticalmente a uma distância de 8cm da amostra, onde foi medida a REM refletida numa área de aproximadamente 2cm² no centro da amostra. A fonte de iluminação é constituída por duas lâmpadas de filamento Halógenas de Quartzotungstênio de 50W, posicionadas a 35cm da amostra em suportes refletores de alumínio, orientadas a 30cm da horizontal (ângulo de incidência). Utilizou-se como padrão de referência absoluto para calibrar o equipamento, uma placa de *Spectralon* branca (BaSO₄) considerada com mais de 99% de reflectância (LABSPHERE, 2016). Para evitar o efeito de ruído nas leituras, o sensor foi calibrado no início e a cada 20 minutos ou 20 amostras analisadas.

A geometria dos equipamentos e a metodologia utilizada correspondem ao protocolo de uso padrão adotado no laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicado a Solos, coordenado pelo Prof. Dr. José Alexandre Melo Demattê do Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz” (LSO-ESALQ-USP) para a elaboração da Biblioteca Espectral de Solos do Brasil - BESB (BELLINASO *et al.*, 2010; FRANCESCHINI *et al.*, 2013; DEMATTÊ *et al.*, 2014; SATO, 2015) (Figura 15).

Os dados espectrais obtidos das amostras de solo foram armazenados pelo programa RS₃TM (ASD INC, 2008 a) e salvos automaticamente em arquivos de dados com extensão *.asd*. Após o término das leituras das amostras de solo, os arquivos de dados espectrais foram importados para o programa ENVI e exibidos pela extensão *Spectral Library Viewer*, e, por fim, estes arquivos foram exportados e salvos em arquivos de texto no formato ASCII, compatíveis com o programa Excel.

Posteriormente, esses arquivos de texto com as informações espectrais foram importados em planilhas do programa Excel e calculadas as médias para cada amostra de solo e convertidos para micrômetros (µm). Com esses dados, foram elaborados os gráficos correspondentes às curvas espectrais das amostras de solos (Reflectância versus Comprimento de onda) (FIORIO *et al.*, 2010; CEZAR *et al.*, 2013; DEMATTÊ *et al.*, 2014).

Figura 15 – Fotografia esquemática de um espectrorradiômetro em condições de laboratório



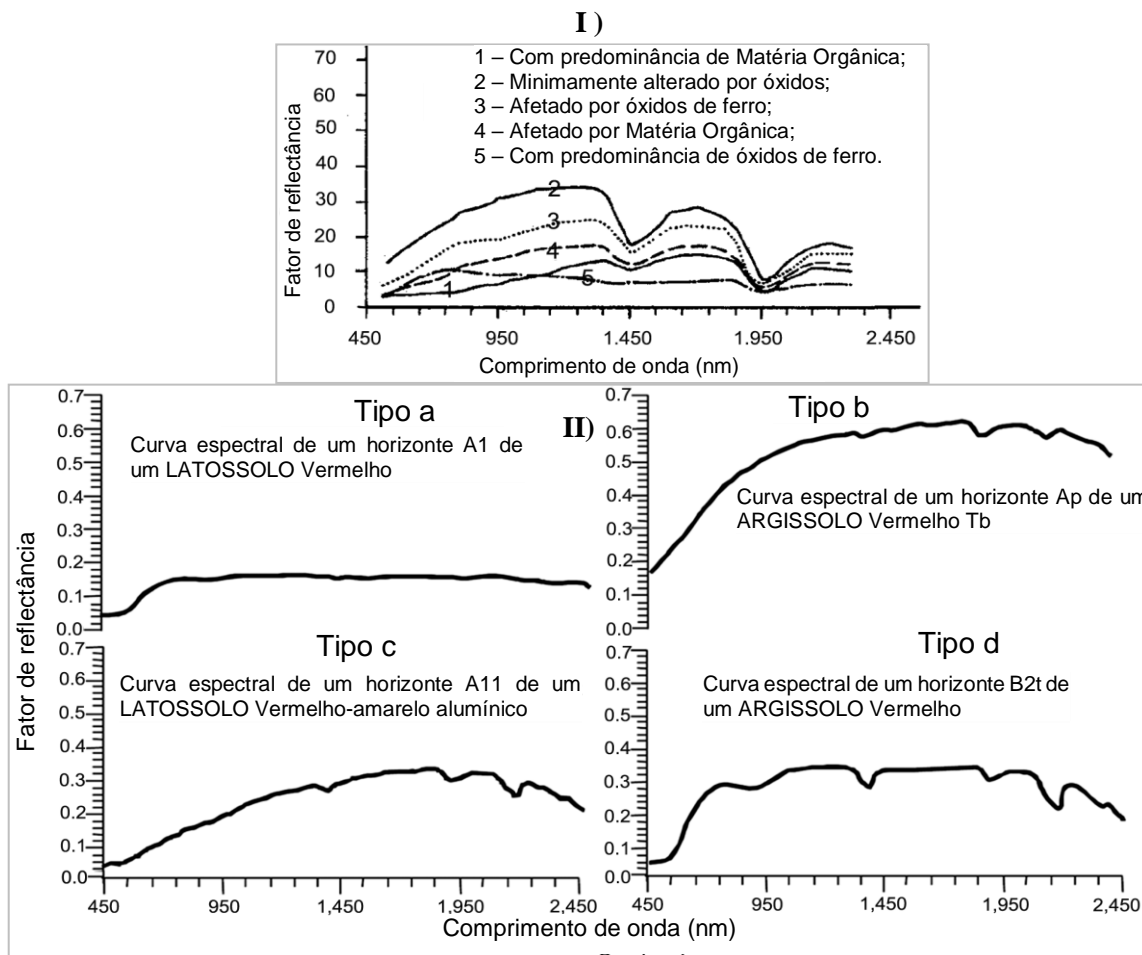
Fonte: Adaptado de Bellinaso *et al.* (2010), Demattê *et al.* (2014) e Lineas (2017) – Disponível em: www.lineas.cchs.csic.es/biospec/sites/lineas.cchs.csic.es/biospec/files/Laboratory2.jpg. Acesso em: 24 de setembro de 2016.

II.5. Elaboração da biblioteca espectral de solos da área de estudo

II.5.1. Caracterização morfológica das curvas espectrais

A caracterização morfológica das curvas espectrais dos solos permite avaliações qualitativas fundamentadas nos métodos empregados por Demattê (2002), Bellinaso (2009), Demattê e Terra (2010) e Terra (2011). A análise qualitativa foi obtida pelo comportamento morfológico das curvas espectrais de acordo com a intensidade (albedo), aspectos de forma (plano, convexo e côncavo), inclinação geral (ascendente, descendente ou plano), mudanças de inclinação, e feições de absorções específicas nas diferentes faixas do comprimento de onda eletromagnético de 400 a 2500 nm (Figura 16 I e II).

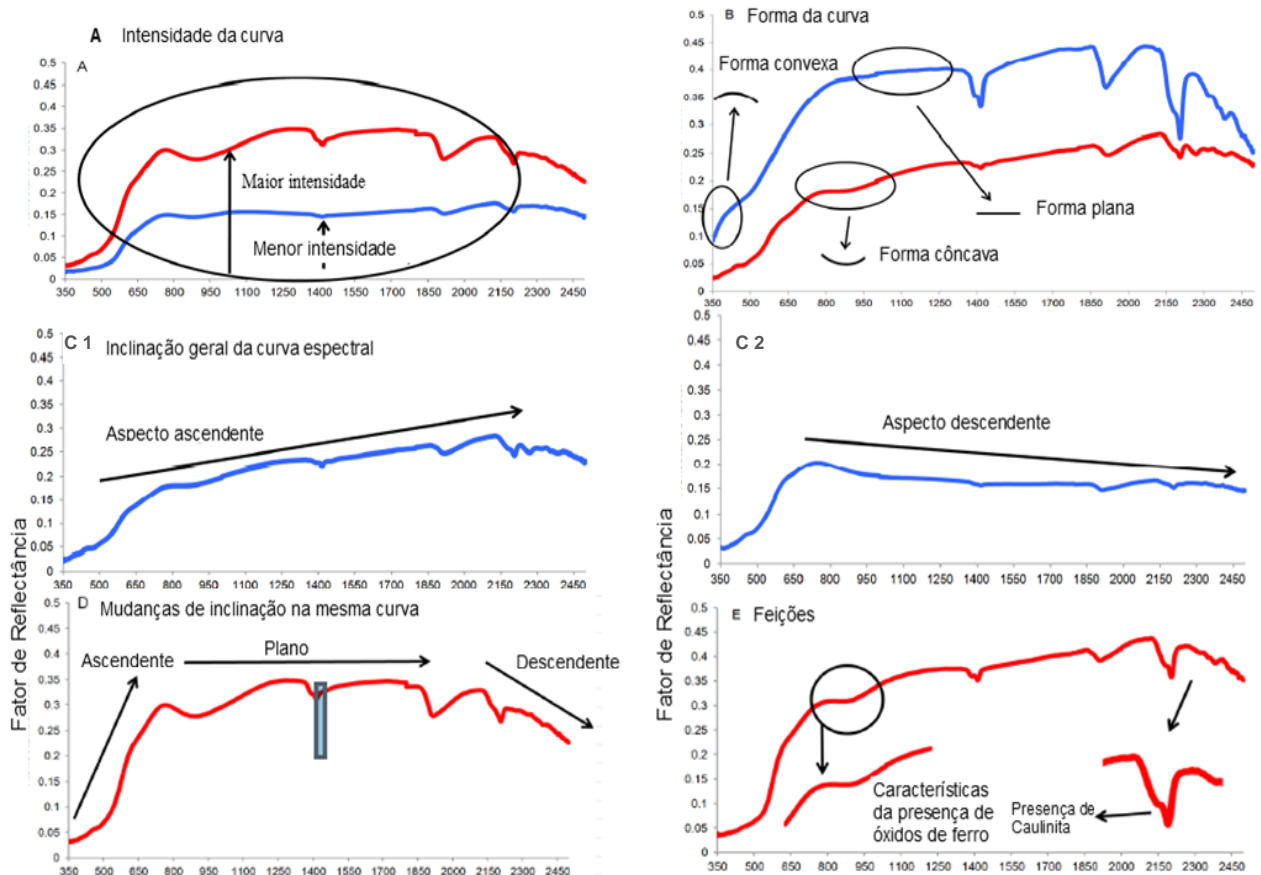
Figura 16 – Tipos de curvas espectrais determinadas por (I) Stoner e Baungarnder (1981) e (II) Formaggio *et al.* (1996)



Fonte: Adaptado de Stoner e Baungarnder (1981); Formaggio *et al.* (1996).

Os procedimentos para a análise morfológica do espectro se resumiram em algumas etapas onde a primeira refere-se à interpretação da intensidade da reflectância da curva espectral (Figura 17A). O segundo passo é observar a forma geral das curvas ao longo do espectro (Figura 17B) e seu comportamento ascendente, descendente ou constante (Figura 17C1 e C2). É possível que uma curva espectral tenha um aspecto ascendente em um determinado comprimento de onda, mudando para constante ou vice-versa (Figura 17D). O terceiro passo consiste na avaliação de características de absorção, geralmente promovido pela mineralogia em comprimentos de onda específicos (Figura 17E); que encontram-se descritos na literatura (isto é, hematita, goethita, gibbsita, caulinita, montmorilonita, água, matéria orgânica e outros).

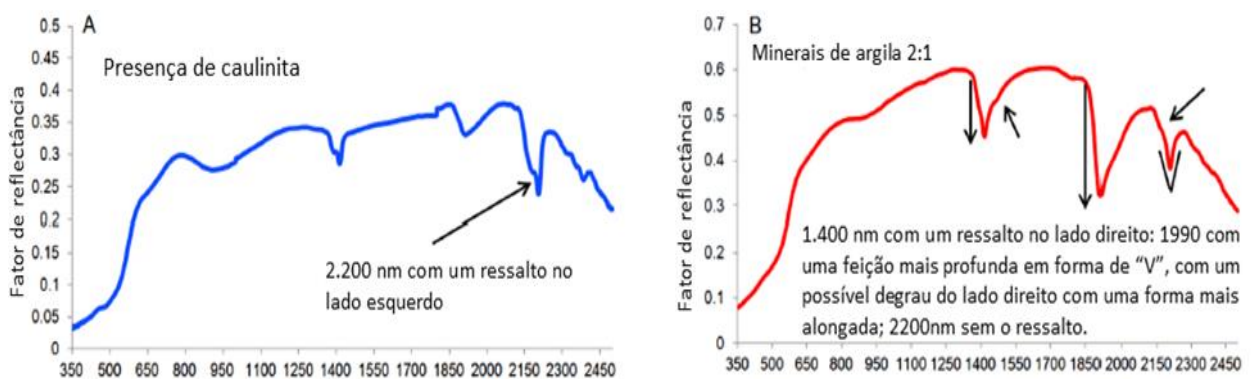
Figura 17 – Aspectos da avaliação qualitativa das curvas espectrais de perfis de solo



Fonte: Adaptado de Demattê *et al.* (2014).

Diante das particularidades apresentadas pelas curvas espectrais, as principais características dos minerais também podem ser observadas em uma curva espectral, tais como a presença de minerais 1:1 como caulinita (Figura 18 A); minerais primários 2:1, como por exemplo a montmorilonita (Figura 18 B).

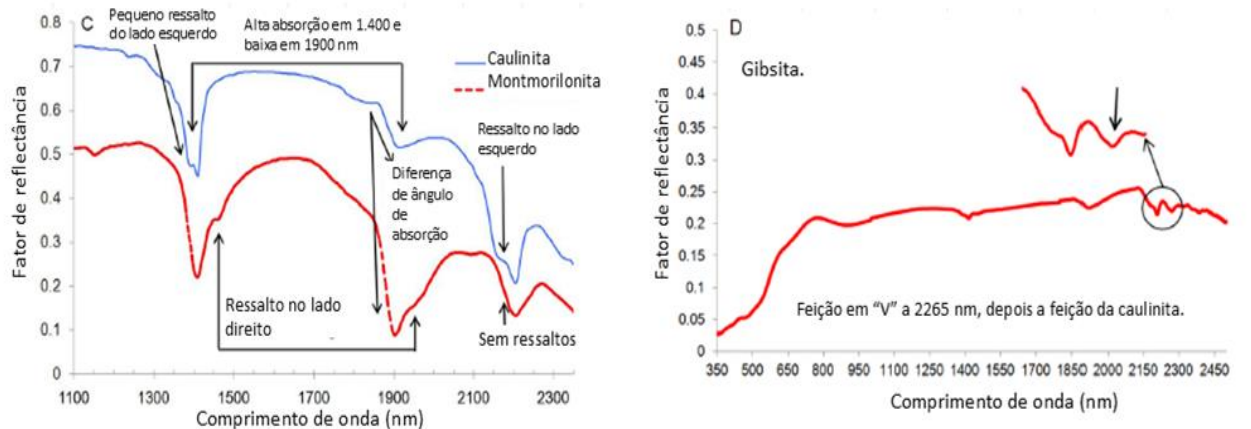
Figura 18 – Aspectos da avaliação qualitativa das curvas espectrais de perfis de solo



Fonte: Adaptado de Demattê *et al.* (2014).

Assim como outros minerais, a Gibbsita (Figura 19 B) é detectada a partir de feições específicas deixadas por estes e inúmeros outros minerais presentes no solo. Por meio da análise morfológica das curvas espectrais, é possível detectar e até quantificar minerais, óxidos ou até atributos (DEMATTÊ *et al.*, 2004).

Figura 19 – Aspectos da avaliação qualitativa das curvas espectrais de perfis de solo



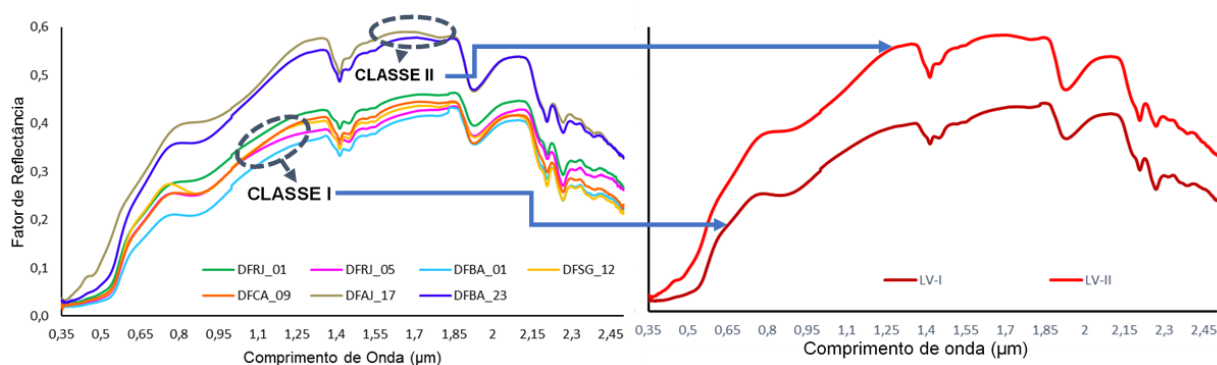
Fonte: Demattê *et al.* (2014).

II.5.2. Organização dos espectros obtidos em laboratório

Dentre todas as litotopossequências da MBRJ, já devidamente classificadas no SiBCS, foram agrupados os 34 espectros por classe de solo, compondo, preliminarmente, uma biblioteca espectral para cada classe, gerando 8 gráficos distintos: LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico – LVd, LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico I – LVAd, PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico, FFc, PLINTOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico – FXd, CAMBISSOLO HÁPLICO tb Distrófico – CXbd, NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico – RRd, GLEISSOLO HÁPLICO tb Distrófico - GXbd e ORGANOSSOLO HÁPLICO Hêmico típico – OXy. Em seguida, para os solos das duas litotopossequências, NOE-1 e NOE-2, da MBRE, dois gráficos foram criados a partir da classificação dos solos da área para que se preservasse a representatividade pedológica desta MBRE. Assim, foram dispostos os gráficos das classes NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico – RQo e LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico textura franco-arenosa – LVA-fa.

Todos os espectros obtidos em laboratório foram reunidos em gráficos organizados por classe de solo para a análise morfológica das curvas espectrais. Desta forma, espectros que apresentaram características similares foram agrupados por classes ou grupos espectrais (Figura 20a). Observa-se que a textura afeta a intensidade da resposta espectral. Solos mais argilosos absorvem mais energia e refletem menos, ao contrário dos solos mais arenosos que, devido à presença de quartzo, refletem a energia eletromagnética (NANNI; DEMATTÊ; 2006a). Nesse sentido, foi observada a textura de cada amostra agrupada dentro da classe de solo segundo Santos *et al.* (2015), pois foram considerados apenas os solos que apresentassem mesma classe textural e comportamento espectral semelhante para que fossem agrupados. Uma vez determinados os diferentes agrupamentos, foram calculadas as médias dos espectros agrupados em cada classe espectral (Figura 20b). Então, uma classe de solo pode apresentar uma ou mais classes espectrais que a representa, o que depende do número de agrupamentos realizados em função das variáveis consideradas distintivas de acordo com Demattê e Nanni (2003), Franceschini *et al.* (2013) e Genú *et al.* (2013).

Figura 20 – Agrupamento de espectros por classe: curvas espectrais de uma mesma classe de solo (a) e curvas espectrais médias de cada agrupamento (b)



Fonte: Adaptado pelo autor de Demattê e Nanni (2003), Franceschini *et al.* (2013) e Genú *et al.* (2013).

Após o procedimento de submissão das curvas espectrais à análise morfológica de maneira a estabelecer classes espectrais dentro de cada classe de solo, os espectros médios, obtidos a partir da média aritmética de cada agrupamento de classes espectrais, foram utilizados na construção da biblioteca espectral (BE) da MBRE. Essa BE contou com os espectros médios de solos dos perfis da MBRJ e dos solos avaliados neste trabalho coletados na MBRE.

II.5.2.1. Compilação da Biblioteca espectral da MBRE

A biblioteca espectral (BE) da MBRE foi elaborada mediante a ferramenta *Spectral Library Builder* no ENVI (EXELIS VIS, 2015h). Posteriormente, a BE, por meio da função *Spectral Library Resampling* do programa ENVI (EXELIS VIS, 2015h), foi reamostrada para os intervalos das 8 primeiras bandas do sensor ASTER (VNIR+SWIR). Foram inseridos como parâmetros de reamostragem os valores centrais de reflectância, bem como a largura (intervalos espectrais) (Tabela 7) de cada banda ASTER utilizada, a partir de filtros editados e importados para o programa ENVI. Tais filtros foram obtidos em NASA LP DAAC (2014) (DEMATTE *et al.*, 2004). Este procedimento possibilita a comparação entre dados obtidos pelo espectrorradiômetro (sensoriamento remoto próximo) e os dados do ASTER (orbital).

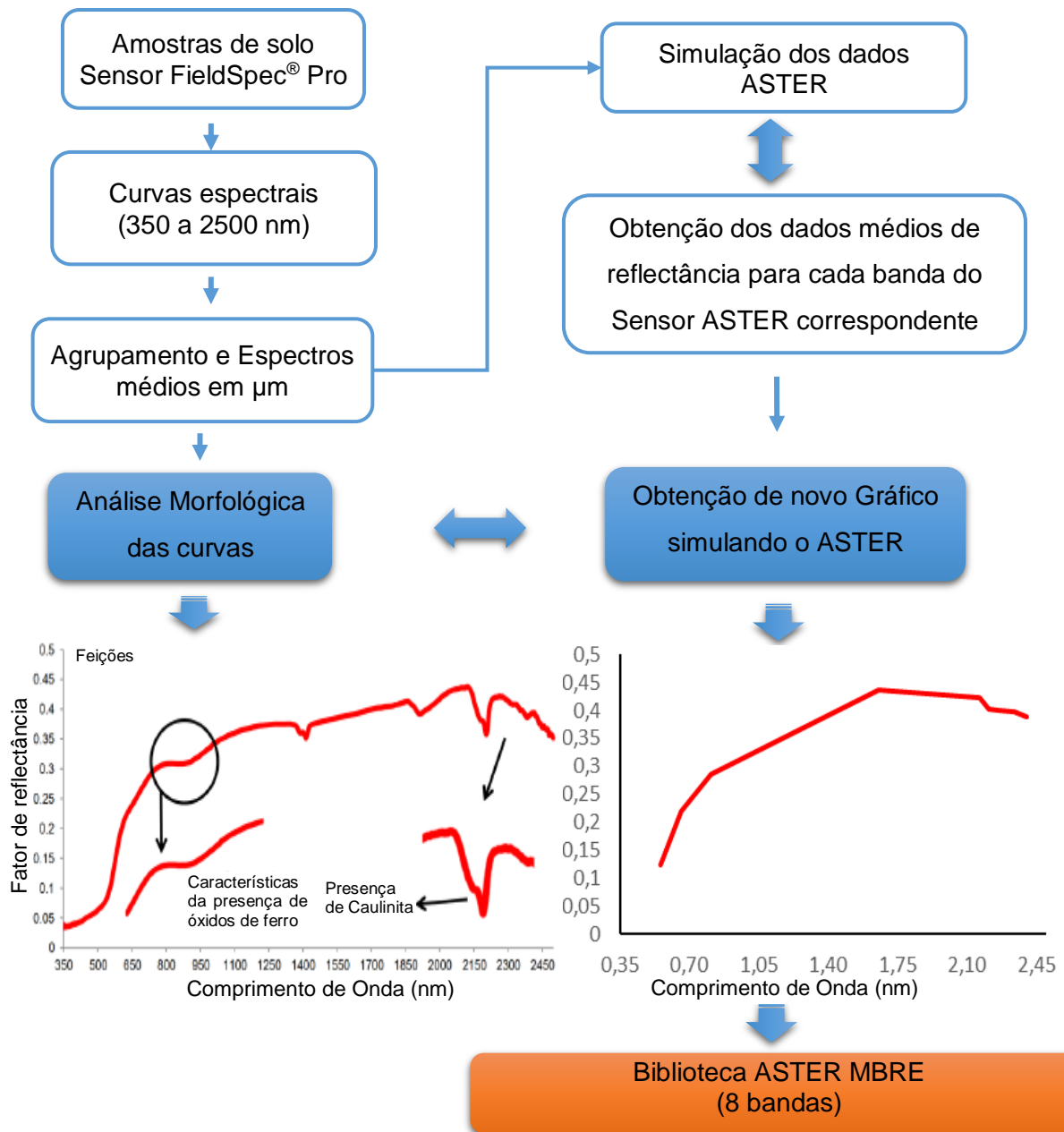
Tabela 7 – Intervalos espectrais das bandas do ASTER utilizadas neste estudo

| Nº de banda | Região da banda | Comprimento de onda (µm) | | |
|-------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------|---------|
| | | Intervalo | Comprimento Médio | Largura |
| 1 | Visível + | 0,520 - 0,600 | 0,556 | 0,08 |
| 2 | Infravermelho | 0,630 - 0,690 | 0,661 | 0,06 |
| 3-Nadir | Próximo | 0,760 - 0,860 | 0,807 | 0,10 |
| 4 | | 1,600 - 1,700 | 1,656 | 0,10 |
| 5 | Infravermelho de Ondas Curtas | 2,145 - 2,185 | 2,167 | 0,04 |
| 6 | | 2,185 - 2,225 | 2,209 | 0,04 |
| 7 | | 2,235 - 2,285 | 2,262 | 0,05 |
| 8 | | 2,295 - 2,365 | 2,336 | 0,07 |
| 9 | | 2,360 - 2,430 | 2,400 | 0,07 |

Fonte: NASA LP DAAC (2014).

As etapas da geração da Biblioteca Espectral dos Solos da MBRE, que foram reamostrada para o sensor ASTER, desde a aquisição de dados espectrais por meio de espectrorradiômetro até a análise das curvas espectrais dos solos, bem como a reamostragem para os intervalos de bandas ASTER estão representadas na Figura 21.

Figura 21 – Etapas da geração da Biblioteca Espectral dos Solos da MBRE, reamostrada para as bandas do sensor ASTER



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Demattê *et al.* (2004).

II.6 Processamento digital de imagens ASTER

Para esse estudo, foram adquiridas cenas do sensor ASTER em diferentes períodos, o que resultou em uma série histórica composta por três mosaicos de imagens cobrindo toda a área da microbacia do ribeirão Extrema. Estas imagens

foram obtidas no período seco, quando há pouca umidade e maior percentual de solo exposto no DF (MALAQUIAS *et al.*, 2014). As datas das imagens variaram entre os meses de julho a novembro, sendo obtidas em 24/10/2001, 28/07/2004 e 20/09/2006 (Tabela 8). O período de aquisição de imagens digitais para a constituição de uma série histórica foi limitado em função do intervalo de tempo no qual o sensor ASTER se manteve em funcionamento, desde 2000, com o seu lançamento, até a desativação do subsistema SWIR em 2008 (NASA JPL, 2009).

Como critérios de aquisição, foram obtidas as imagens que apresentaram menos de 15% de cobertura por nuvens e maior ocorrência de solos expostos por avaliação visual e, além disso, foi dada preferência aos mosaicos com menor número de cenas para a cobertura da área de estudo. As imagens foram obtidas no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2015), no nível de processamento L1A, 8-bits. Essas imagens foram registradas segundo seu sensor (ASTER) com o *Datum* WGS84, que é compatível com o *Datum* oficial brasileiro SIRGAS 2000 (IBGE, 2015). As imagens selecionadas para o estudo encontram-se listadas na Tabela 8.

Os dados espectrais foram extraídos de oito bandas do sensor ASTER: B-1 (Visível - verde - 0,52-0,60 μm), B-2 (Visível - vermelho, 0,63-0,69 μm), B-3N (Infravermelho Próximo, 0,76-0,86 μm , Nadir); e cinco bandas do Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR): B-4 (SWIR 1, 1,60-1,70 μm), B-5 (SWIR 2, 2,15-2,19 μm), B-6 (SWIR 3 - 2,19-2,23 μm), B-7 (SWIR 4, 2,24-2,29 μm) e B-8 (SWIR 5, 2,3-2,37 μm) (NASA LP DAAC, 2012). A banda B-3B (*Backward Looking*) e as bandas do termal foram dispensadas: a primeira, por corresponder ao mesmo comprimento de onda da 3N (0,76-0,86 μm) e as bandas do termal, por cobrir a faixa do espectro acima de 2,5 μm dispensável nesse tipo de estudo. No entanto, a banda B-9 também não foi utilizada devido a erros observados nos valores de radiância dos produtos ASTER/TERRA em seus vários níveis de processamento. Tais inconsistências culminaram na remoção desse intervalo (2,4 μm) visando evitar erros durante a execução do modelo de mistura espectral com múltiplos membros de referência (MESMA), apesar de prejudicar essa análise com a supressão de uma das variáveis espectrais para distinção das classes. Esse problema foi, também, observado por Sousa Júnior *et al.* (2008), Genú e Demattê (2012), Genú *et al.* (2013) e Nawar *et al.* (2015); porém, esses autores não apontaram causas que justificassem a instabilidade dessa banda. Todavia, Ben Dor *et al.* (2009) atribui essas distorções ao tipo de

aerossol usado na correção atmosférica. Conseqüentemente, uma vez que a absorção pelos gases atmosféricos e aerossóis pode conter características espectrais fracas, estreitas e misturadas aos cromóforos do solo e, portanto, afetando sua resposta espectral captada pelo sensor.

Tabela 8 – Série histórica de imagens ASTER da área de estudo

| CÓDIGO | Data Aquisição |
|--|-----------------------|
| AST_L1A_00310242001133717_20161011092656_32092 | 24/10/2001 |
| AST_L1A_00310242001133725_20161011092656_32089 | |
| AST_L1A_00307282004133153_20161020201708_3720 | 28/07/2004 |
| AST_L1A_00307282004133144_20161020201708_3718 | |
| AST_L1A_00309202006133133_20161011092656_32084 | 20/09/2006 |
| AST_L1A_00309202006133142_20161011092656_32079 | |

Fonte: USGS (2015).

Os dados digitais brutos contêm, normalmente, distorções geométricas tão significativas que inviabilizam sua utilização em forma de mapas e cartas temáticas. Esse tipo de distorção provém de fatores como variações na altitude, posição e velocidade da plataforma onde está instalado o sistema sensor. Estes fatores são decorrentes da distorção panorâmica, da refração atmosférica, de variações de relevo e de peculiaridades do sensor. Assim, para que os dados tenham integridade geométrica aceitável, é necessária a correção geométrica para que as variações decorrentes dos fatores supracitados sejam compensadas (ABRAMS; HOOK, 2007).

Uma anomalia foi detectada no sensor ASTER logo no início de seu funcionamento. O “vazamento da energia refletida” da banda B-4, banda mais larga do SWIR (0,092 μm), bem maior que a largura média das demais bandas (0,052 μm), acabou por influenciar negativamente a sensibilidade das demais bandas dessa região do espectro (ERSDAC, 2003). Além disso, o seu domínio espectral está entre 1,6 e 1,7 μm , apresentando a maior reflectância, o que contribuiu para o agravamento desse problema (IWASAKI; TONOOKA, 2005). Esse vazamento é denominado *crosstalk*. A correção do efeito *crosstalk* foi realizada por meio do aplicativo *Crosstalk Correction* desenvolvido pela *Spectral Sciences, Inc* (ERSDAC, 2003).

Todas as etapas de pré-processamento a seguir (registro, correção atmosférica e geométrica) e processamento digital de imagens multiespectrais

(recorte, índices, máscaras, análises espectrais) foram realizadas no programa ENVI 5.3 (*Environment for Visualizing Images*) (Exelis, 2015c). Como os produtos ASTER em nível de processamento L1A não possuem os coeficientes de calibração aplicados às imagens, foi necessário inserir estes valores que relacionam a radiância (L) e o contador digital (DN) para cada uma das bandas de acordo com a Equação 4.

$$\text{Radiância} = (\text{DN} - 1) \times \text{Coeficiente de Unidade de Conversão} \quad \text{Eq. 4}$$

Esta operação requer a inserção dos valores de calibração de ganhos e *offsets* de acordo com os dados disponibilizados por Abrams *et al.* (2007) (Tabela 9).

Tabela 9 – Coeficientes de conversão já calculados

| Número da banda | Coeficiente de Ganho (W/(m ² sr um)/DN) | | | |
|-----------------|--|--------|---------|---------|
| | Alto | Normal | Baixo 1 | Baixo 2 |
| 1 | 0,676 | 1,688 | 2,25 | |
| 2 | 0,708 | 1,415 | 1,89 | NA |
| 3N,3B | 0,423 | 0,862 | 1,15 | |
| 4 | 0,1087 | 0,2174 | 0,290 | 0,290 |
| 5 | 0,0348 | 0,0696 | 0,0925 | 0,409 |
| 6 | 0,0313 | 0,0625 | 0,0830 | 0,390 |
| 7 | 0,0299 | 0,0597 | 0,0795 | 0,332 |
| 8 | 0,0209 | 0,0417 | 0,0556 | 0,245 |
| 9 | 0,0159 | 0,0318 | 0,0424 | 0,265 |

Fonte: Abrams *et al.* (2007).

Em uma segunda etapa, o pré-processamento digital de imagens teve como finalidade melhorar a aparência visual das imagens, facilitando a extração de informações nelas contidas. Para normalizar os dados digitais e eliminar os efeitos aditivos da atmosfera, aplicou-se a correção atmosférica baseada no módulo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), disponível no programa ENVI (Exelis, 2015d). Esta correção é necessária visto que foi utilizada uma série histórica de imagens ASTER adquiridas em condições atmosféricas diferentes. Esta técnica é composta das seguintes etapas, de acordo com Abrams *et al.* (2007):

- a) Transformação da imagem de radiância em reflectância aparente (reflectância no topo da atmosfera), mediante a Equação 6 descrita por (ABRAMS *et al.*, 2007).

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_{Sol\lambda} \cdot \cos\theta_s} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

ρ_{λ} é a reflectância aparente ou de topo da atmosfera (adimensional);

L_{λ} é a radiância espectral aparente ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$);

d^2 é a distância Sol-Terra em unidade astronômica;

$E_{Sol\lambda}$ é a irradiância solar exoatmosférica média no topo da atmosfera ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$);

θ_s é o ângulo zenital solar (graus) no horário de aquisição da imagem.

- b)** Transformação da imagem de reflectância aparente em reflectância de superfície, mediante o módulo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) (ENVI, 2009; EXELIS, 2015c), que se baseia no código de transferência radiativa MODTRAN4 (*Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model*) (ADLER-GOLDEN *et al.*, 1998; COOLEY *et al.*, 2002), eliminando-se, assim, os efeitos aditivos atmosféricos que ocasionam perda de contraste na imagem (NAZEER *et al.*, 2014).

O conhecimento de parâmetros que forneçam dados reais das condições óticas da atmosfera no momento em que a imagem de satélite foi capturada é fundamental, pois este método trata de variáveis físicas. Esses parâmetros correspondem aos dados das efemérides do satélite, como data e horário de aquisição, a latitude e longitude da cena, juntamente com outros parâmetros de modelagem atmosférica, como a elevação média da superfície, ângulo solar, modelo de atmosfera, tipo de aerossol, concentração de CO₂ e alcance da visibilidade inicial (NOVO, 2010). Para a correção, foram estabelecidos os seguintes parâmetros: elevação média da superfície de aproximadamente 944m (extraído do MDT); modelo de atmosfera tropical; tipo de aerossol rural; alcance da visibilidade inicial de 50 km.

- c)** Com estes dados o módulo FLAASH inicia o tratamento das imagens aplicando a equação 7 (COOLEY *et al.*, 2002):

$$L_{\text{sensor}} = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_{\text{atm}} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

L_{sensor} é radiância total medida no sensor;

ρ é a refletância de superfície do alvo (no pixel);

ρ_e é a média da refletância de superfície do alvo (no pixel) e sua vizinhança;

S é o albedo esférico da atmosfera;

L_{atm} é a radiância (aditiva) da contribuição do espalhamento atmosférico.

Por definição, A e B são coeficientes determinados pelas condições atmosféricas e geométricas da cena. O valor dos coeficientes A , B , S e L_{atm} é diretamente determinado pelo código MODTRAN4 (*Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model*) para uma dada condição atmosférica e, assim, determinar a radiância da superfície (para cada pixel em cada banda) para, em seguida, observar a reflectância de superfície (COOLEY *et al.*, 2002; ENVI, 2009; GOMES *et al.*, 2012).

Após a aplicação do módulo FLAASH, os valores, mínimo (0) e máximo (255), passam a corresponder aos valores de reflectância 0 e 1, respectivamente, representados por uma escala de tons de cinza em cada banda da imagem. Nelas, 0 (0%) corresponde ao tom de cinza mais escuro e 1 (100%) ao tom de cinza mais claro. Dessa forma, uma vez padronizados por esta técnica, estes valores ser comparados (FORTES *et al.*, 2009).

Em seguida, a imagem foi submetida a procedimentos de correção geométrica conforme descrito por Lillesand *et al.* (2007). Com esta técnica, as imagens foram adequadamente georreferenciadas mediante pontos de controle obtidos no campo por intermédio do equipamento GPS Garmin MAP60X e pontos de controle extraídos de ortofotos do Distrito Federal, em escala 1:10.000, obtidas em 2009 (TERRACAP, 2013).

As bandas na região do SWIR (30 m de resolução espacial) foram reamostradas para 15 m compatíveis com os *pixels* das bandas do VNIR das cenas ASTER por meio da operação *layer stacking*, disponível no programa ENVI, em que

todas as bandas foram devidamente reamostradas para 15m, renomeadas e posicionadas em seus respectivos comprimentos de ondas centrais. Posteriormente, as cenas de mesmas datas foram mosaicadas a fim de se cobrir toda a área de estudo, gerando três imagens, referentes aos anos de 2001, 2004 e 2006. Estas imagens foram submetidas a recorte por meio de geração e aplicação de máscara construída a partir do arquivo vetorial do limite determinado da microbacia do ribeirão Extrema com *buffer* de 500m.

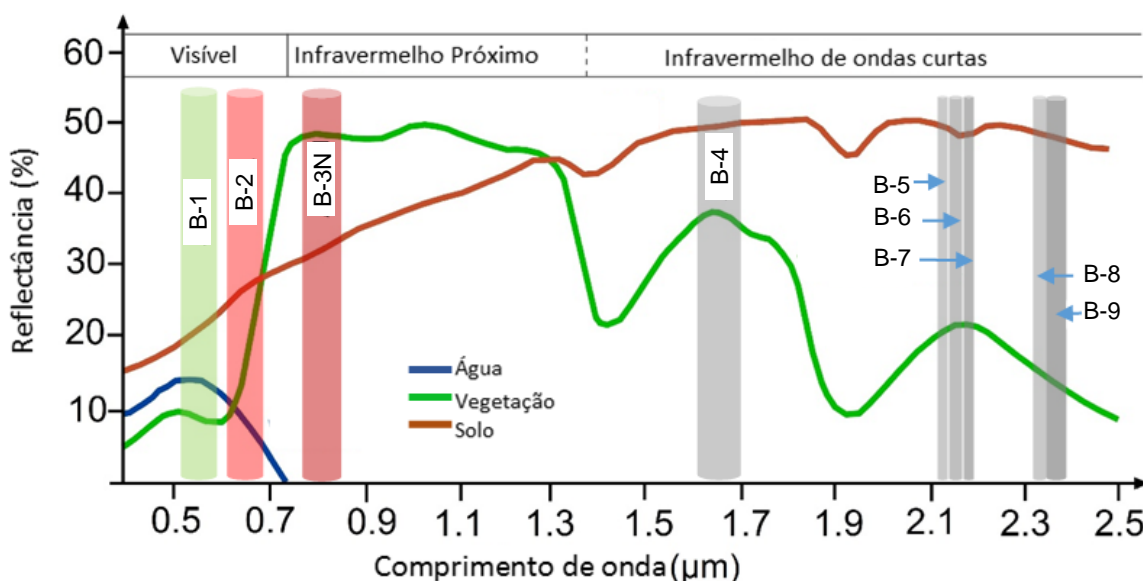
II.6.1. Geração de imagens de solo exposto

Para a geração da imagem de solos expostos, foram aplicadas técnicas que permitiram detectar e extrair áreas com maior probabilidade de representar solos expostos nas imagens de satélite da série histórica estudada.

A princípio, foram feitas composições RGB com as bandas R4G3B2 (B-4, 1,60-1,70 μm ; B-3N, 0,76-0,86 μm e B-2, 0,63-0,69 μm) e R6G3B4 (B-6, 2,19-2,23 μm ; B-3N, 0,76-0,86 μm ; B-4, 1,60-1,70 μm) para destacar vegetação, solo e água e, assim, detectar áreas com solos expostos nas imagens da região estudada. A banda B-2 situa-se na região de forte absorção pela vegetação verde e de reflexão da água, permitindo bom contraste entre áreas ocupadas com vegetação e aquelas sem vegetação (solo exposto) (MENESES; ALMEIDA, 2012). Ainda segundo estes autores, a faixa do infravermelho próximo (banda 3N) situa-se na região de forte absorção da água limpa, na qual a vegetação verde, densa e uniforme reflete muito a radiação eletromagnética, aparecendo em tons de cinza claro nas imagens (MENESES; ALMEIDA, 2012). As bandas B-4 a B-6 (região do infravermelho de ondas curtas) se posicionam na região de forte reflexão de solos ou rochas e elevada absorção da vegetação sadia, permitindo alto contraste entre estes alvos (NOVO, 2010) (Figura 22).

Estas composições permitem verificar se os pixels selecionados possuem as características de cor de um solo não-vegetado. Dessa forma, as bandas utilizadas foram escolhidas por estarem situadas nas regiões de maior diferença de reflectância (maior contraste) entre os alvos de estudo, como exemplificado na Figura 22.

Figura 22 – Comportamento espectral dos principais alvos: água limpa, vegetação sadia e solo exposto seco, com as posições relativas das bandas espectrais VNIR e SWIR do sensor ASTER



Fonte: Adaptado de Phillips *et al.* (1978).

Em seguida, foi aplicado o NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index* (ROUSE *et al.*, 1973), que salienta a reflectância da vegetação e melhora a distinção entre solos e demais alvos presentes (vegetação e água) nas imagens ASTER (MOREIRA, 2007; SCHOWENGERDT, 2007; MENESES; ALMEIDA, 2012). Este índice é descrito pela Equação 8:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{B-3N} - \text{B-2}}{\text{B-3N} + \text{B-2}} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

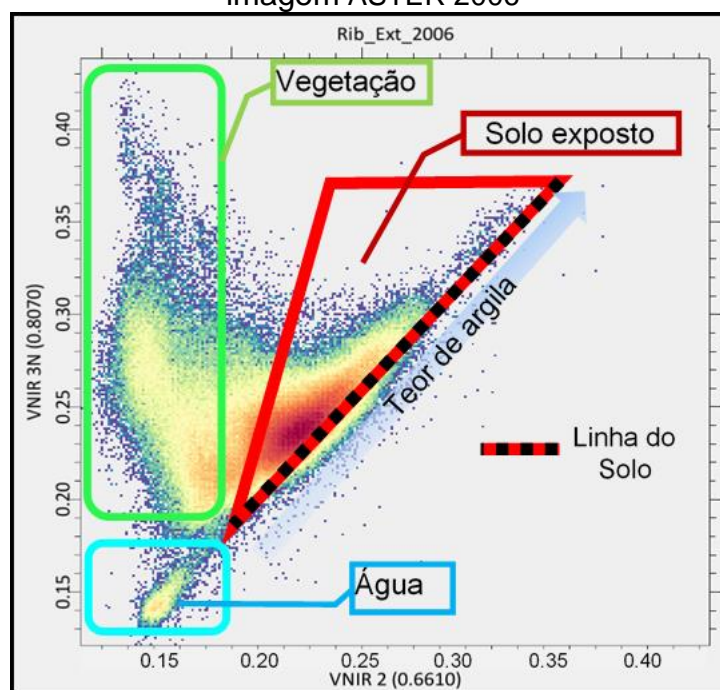
RED = a reflectância do pixel na banda do vermelho;

NIR = a reflectância do pixel na banda do infravermelho próximo.

Este índice é proporcional à biomassa presente e varia entre +1 e -1. Para áreas de densa vegetação, o NDVI se aproxima de +1, para áreas com total ausência de vegetação (água), se aproxima de -1 e, para solos expostos, os valores se aproximam de zero. Ademais, foram detectadas as áreas com solo exposto por meio da linha do solo (BARET *et al.*, 1993; NANNI; DEMATTÊ, 2006a; JENSEN, 2009;

YOSHIOKA *et al.*, 2010). Foi gerado um diagrama de dispersão bidimensional, que contrapõe os valores de reflectância obtidos diretamente das imagens ASTER nas bandas B-2 (região do vermelho, 0,63 – 0,69 μm) e B-3N (região do infravermelho próximo, 0,76 – 0,86 μm), pois estas bandas aumentam o contraste do solo com a vegetação. A linha do solo começa entre o eixo “X” e eixo “Y” a 45 graus de inclinação, apresentando correlação linear (1:1). Desta forma, quanto mais perto da linha 1:1, maior a probabilidade de o pixel apresentar solo exposto. Assim, foram marcados os pontos perto da linha 1:1 (dentro do triângulo vermelho na figura 17) no escatergrama elaborado, onde foram selecionados os pixels com alta probabilidade de apresentarem solos expostos na imagem, obtendo-se a linha do solo.

Figura 23 – Diagrama de dispersão bidimensional, elaborado no programa ENVI, representando a linha do solo (linha pontilhada) por meio da contraposição da banda B-2 – Visível (VIS) - vermelho e a banda B-3N - Infravermelho Próximo (NIR) da imagem ASTER 2006



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Nanni e Demattê (2006a).

*Em vermelho, área de ocorrência dos pixels de solo exposto. Em verde, com valores de reflectância baixos no visível e altos no infravermelho, representa a região de ocorrência dos pixels ocupados por maiores proporções de cobertura vegetal. Em azul, valores de reflectância baixos no VIS e no NIR, correspondem os pixels dentro dos quais estariam os corpos de água e regiões sombreadas da imagem.

Após estas análises, as imagens ASTER selecionadas foram utilizadas para a individualização de solos expostos de outros alvos presentes nas imagens (vegetação, água, sombra e áreas de queimadas).

Para classificar a vegetação, foi utilizada a ferramenta *SPEAR Vegetation Delineation*, no programa ENVI, que gera a imagem NDVI e a classifica em quatro classes, sendo utilizados os seguintes valores categóricos (limiares) padrão do programa ENVI: não vegetado (água e solo exposto): -1 a 0,35; vegetação esparsa/rala: 0,35 a 0,50; vegetação moderada: 0,50 a 0,70; vegetação densa: 0,70 a 1 (Exelis, 2015g). O limiar de “corte” que representa a classe não-vegetado foi aumentado de 0,30 para 0,35. Dessa forma, valores inferiores a este foram preservados e os superiores foram excluídos usando como referência a área de estudo e os rios (GENÚ *et al.*, 2013).

Corpos hídricos e áreas de queimadas foram classificados por meio da ferramenta *Classification Workflow* no programa ENVI, através do algoritmo MAXVER (máxima verossimilhança), que efetua uma classificação supervisionada separando a água dos diferentes alvos presentes na imagem (EXELIS VIS, 2015b). Não obstante, o conteúdo de umidade no solo reduz a sua reflectância (LOBELL; ASNER, 2002), e os comprimentos de onda de 1,8 e 2,119 μm são os melhores para o seu estudo, de acordo com Haubrock *et al.* (2008). No sensor ASTER, as bandas que mais se aproximam desse intervalo de comprimento de onda são as B-4 (1,65 μm) e B-5 (2,16 μm) (ABRAMS *et al.*, 2007). Para maximizar a aproximação do primeiro comprimento de onda (1,8 μm), recorreu-se a uma operação matemática entre bandas B-4 e B-5 no programa ENVI por meio da funcionalidade *band math*, representada na equação 5, proposta por Philpot (2010), que identifica o conteúdo de água na superfície do solo.

$$\frac{2(B-4) + B5}{3}$$

Eq. 9

Para uniformizar a umidade dos solos, foi estabelecida a seleção de pixels das imagens que representam solos secos. Para tanto, foram selecionadas nas imagens as áreas de solos expostos com o menor valor da razão da Equação 5, que representará os pixels de solos expostos secos. A banda simulada resultante da Equação 5 (com um comprimento de onda central de 1,82 μm) foi utilizada como numerador para realização de razão de bandas, onde foi relacionada a banda simulada (1,82 μm) com a banda B-5 (2,16 μm) de maneira que a banda gerada expôs área com tons de cinza mais claros (solos mais secos) e tons de cinza mais escuros

(solo mais úmidos). Com isso, foi criada uma máscara em que os pixels com valores de reflectância baixos foram suprimidos, uma vez que foram considerados como solos sob efeito de umidade em diferentes limiares nas imagens.

A palhada é representada por restos culturais em vários estágios de decomposição deixados propositadamente em áreas cultivadas no sistema de plantio direto (SILVA *et al.*, 2009), considerado o sistema de cultivo mais sustentável e, portanto, atualmente utilizado em larga escala. Autores como Biard e Baret (1997), Nagler *et al.* (2000) e Streck *et al.* (2002) relatam em seus trabalhos a forte influência deste material sobre a reflectância do solo, bem como sua similaridade espectral quando comparado com áreas de solo totalmente exposto.

Abaixo de 1,92 μm , resíduos de culturas e solo podem apresentar comportamento espectral muito semelhante, com exceção de uma absorção característica em torno de 1,44 μm que a palhada compartilha com a vegetação e vapor de água atmosférica (Streck *et al.*, 2002). Como demonstrado por Daughtry *et al.* (2010), existem peculiaridades presentes na palhada que a diferem de um solo exposto. Por exemplo, uma combinação de flexão e de alongamento da curva espectral decorrente da presença de água adsorvida e hidróxidos (O-H) e de carbono orgânico (C-O) a 2,101 μm , que diferencia a celulose e outros compostos da palhada, que não é encontrada em minerais comuns do solo (NAGLER *et al.*, 2000) e fornece um claro contraste entre solos e resíduos de culturas.

Para minimizar o efeito da palhada sobre a resposta espectral do solo, foi utilizado o SINDRI (*Shortwave Infrared Normalized Difference Residue Index*) ou, em Português, Índice de Resíduos por Razão Normalizada do Infravermelho de Ondas Curtas (Equação 6), desenvolvido por Serbin *et al.* (2009), que relaciona as bandas ASTER aos comprimentos de onda contrastantes entre solo e palhada.

$$\text{SINDRI} = \frac{(\text{B-6} - \text{B-7})}{(\text{B-6} + \text{B-7})}$$

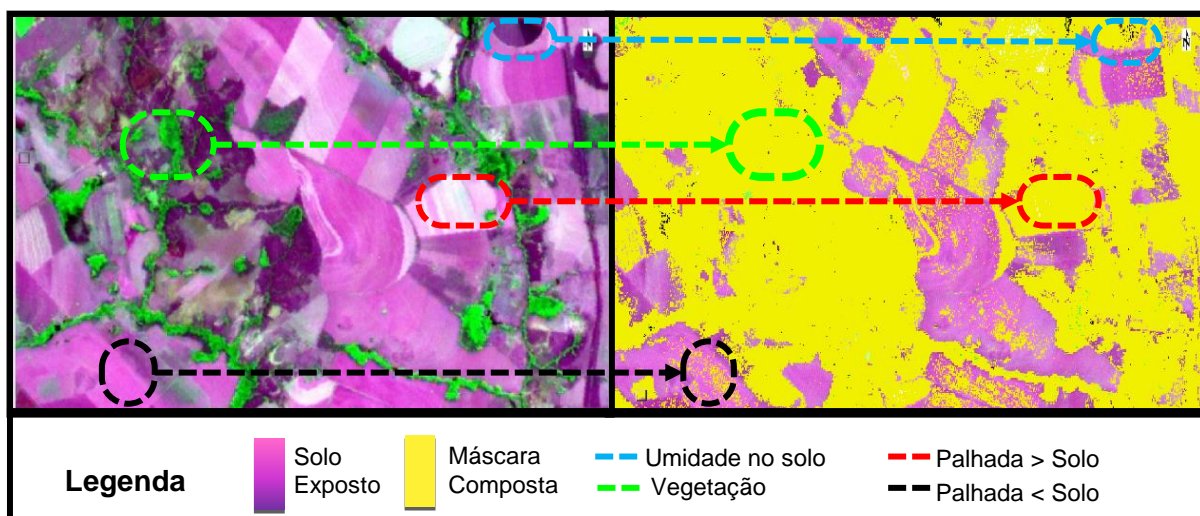
Eq. 10

Esta técnica que destaca os pixels da imagem por meio das relações entre os comprimentos de onda utiliza as bandas B-6 (2,185 – 2,225 μm) e B-7 (2,235 – 2,285 μm), que são consideradas como as melhores faixas para a diferenciação

solo/palhada (SERBIN *et al.* 2009). De acordo com Daughtry (2010), valores superiores a 0,30 são considerados como palhada.

Após a classificação da vegetação, de queimadas, da água, da uniformização da umidade do solo e da eliminação da palhada, em cada imagem simples, foi gerada uma máscara composta por todas estas feições. Para isso, utilizou-se a ferramenta *Build Mask* do ENVI (Exelis, 2015f), quando as regiões de interesse (ROIs) foram utilizadas como arquivos de entrada para suas respectivas classificações, resultando numa única máscara contendo as feições classificadas nas etapas anteriores, restando, quase que exclusivamente, solo exposto (Figura 24).

Figura 24 – Fragmento da imagem ASTER de 2006 utilizada no estudo e a correspondente máscara aplicada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observação: as linhas pontilhadas indicam as áreas com solos cobertos por vegetação (verde), umidade (ciano) e proporção de palhada, onde (vermelho, maior quantidade de palhada; preto, maior quantidade de solo).

Posteriormente, as máscaras geradas, uma para cada imagem ASTER da série histórica, foram aplicadas diretamente sobre as imagens correspondentes, permitindo isolar as áreas com solos expostos secos de maneira que os pixels que apresentaram vegetação rala, moderada e densa, água e queimadas, solo úmido e palhada foram mascarados, mantendo-se somente pixels com áreas de solos expostos secos (Figura 24). Para tal fim, foi empregada a ferramenta *Apply Mask* do ENVI (Exelis, 2015f). As imagens geradas são compostas por áreas que mostram a distribuição espacial de solos expostos secos nas datas da aquisição de cada imagem

ASTER (LAMPARELLI *et al.*, 2011; TRENTIN *et al.*, 2011; JOHANN *et al.*, 2012; PALUDO *et al.*, 2014; ELSAID *et al.*, 2014). Essas imagens foram exportadas para o programa ArcGIS 10.3, onde foram calculadas as suas áreas de solos expostos.

II.6.2. Geração de imagem composta de solos expostos

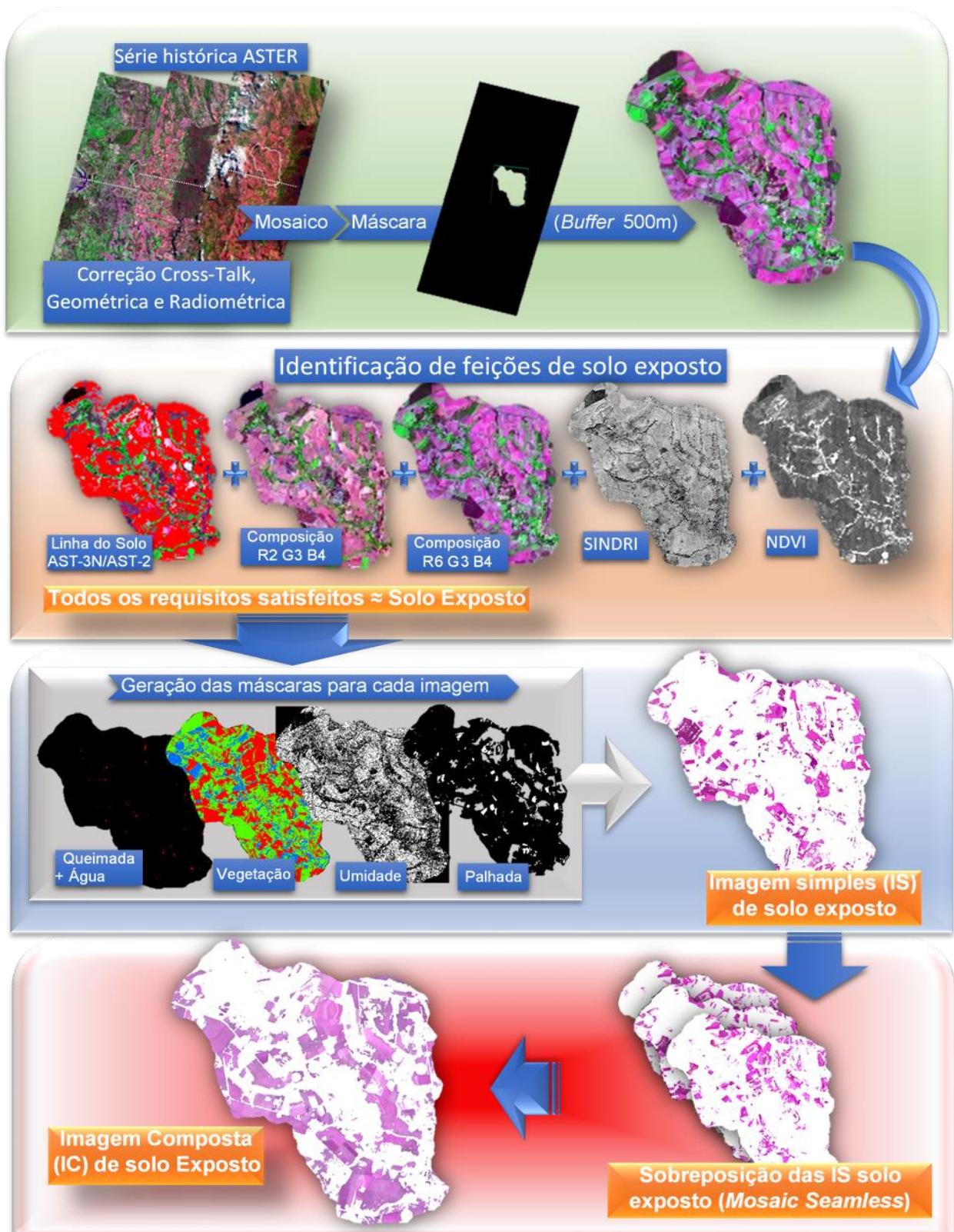
Para a geração de uma imagem composta (IC) de solos expostos, com a associação das três imagens de solos expostos geradas, estas imagens foram compiladas em um único arquivo mediante a aplicação *Seamless Mosaic* do programa ENVI. Este algoritmo é responsável por construir um mosaico de imagens a partir da sobreposição destas com base em uma imagem de referência, pelo método de reamostragem pelo vizinho mais próximo (Exelis, 2015f). Neste estudo, foi selecionada como referência a imagem ASTER de 2006, por conter uma área com maior quantidade de solos expostos. Nesta imagem, foi realizada uma linha do solo com a seleção de todos os pixels gerando um único *ROI (Region of Interest)*, que foi convertido em um arquivo *shapefile (.shp)* e exportado para o programa ArcGIS 10.3. Por meio da tabela de atributos desse arquivo vetorial, foi calculada a área total da IC. O mesmo procedimento foi realizado em cada imagem simples, subtraindo-se o valor da área total da IC da soma dos valores das outras duas imagens de solos expostos de datas distintas.

A avaliação da área de contribuição de solo exposto na IC (Cont IC) de cada imagem é dada pela diferença entre a área total de solos expostos (A_{TIC}) e a diferença em módulo entre duas IS. O montante das áreas de contribuição de cada IS de solo exposto da área de estudo será equivalente à área total de solos expostos da IC, tal como descrito pela Equação 9. A metodologia para geração da IC em ambiente ENVI encontra-se apresentada na Figura 25.

$$\text{Cont IC} = A_{TIC} - (|A_{TIS1} - A_{TIS2}|)$$

Eq. 11

Figura 25 – Fluxograma da metodologia utilizada para gerar a imagem composta de solos expostos



Fonte: Elaborado pelo autor

II.7 Mapeamento espectral de solos da Bacia do Ribeirão Extrema

Os produtos de imageamento orbital (imagens de satélites) são caracterizados por conterem uma combinação de pixels puros e misturados com vários alvos dependendo da resolução espacial do sensor (GENÚ *et al.*, 2013). Ponzoni *et al.* (2012) reiteram que cada material influencia a resposta espectral do pixel de maneira que interfere diretamente no comportamento da resposta espectral de acordo com as proporções dos alvos contidos nestes pixels. Sendo assim, ocorre a mistura espectral, que é considerada indesejada para diferenciação dos alvos imageados.

Existem vários modelos de análise da mistura espectral dos pixels. Neste trabalho, foi utilizado o modelo proposto por Roberts *et al.* (1998), que é conhecido como MESMA (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis*). Uma vez que este modelo é constituído por um algoritmo que realiza a análise de mistura espectral com múltiplos membros de referência, foram utilizados 10 *endmembers* (LV-I, LV-II, LVA-I, LVA-fa, RR, RQ, CX, FX, FF-I, FF-II), que foram determinados e descritos na etapa anterior deste trabalho.

Essa região da MBRE apresenta vales bem encaixados com escassas áreas de planície de inundação, concordando com relatos de Freitas-Silva e Campos (1998a). Nesse sentido, as classes de solos hidromórficos (Gleissolos e Organossolos), que se desenvolvem em planícies de inundação, foram desconsideradas do mapeamento espectral, sendo de ocorrência restrita na área estudada, fato confirmado por Martins (1998).

II.7.1 Modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Endmembers (MESMA)

A análise de mistura espectral com múltiplos *endmembers* (MESMA) é uma técnica que visa a corrigir algumas limitações de um método de análise de mistura chamado SMA (*Spectral Mixture Analysis*), que utiliza apenas um grupo reduzido de *endmembers* (ROBERTS *et al.*, 1998). Para Quintano *et al.* (2013), o MESMA permite modificar o número e o tipo de *endmember(s)* para cada tipo de pixel da imagem, melhorando sua capacidade de mapeamento. Este algoritmo possibilita a extração de

frações com um menor RMSE (*Root Mean Square Error*) por meio da seleção do *endmember* de melhor ajuste para cada pixel (DUDDLEY *et al.*, 2015).

Com interface disponível no programa ENVI 5.3, o algoritmo do MESMA está inserido no pacote de aplicações VIPER Tools (*Visualization and Image Processing for Environmental Research Tools*). Trata-se de um programa de distribuição gratuita, desenvolvido em linguagem IDL (*Interactive Data Language*), capaz de processar dados em número digital, radiância ou reflectância, oferecendo um conjunto de ferramentas adicionais para o processamento de imagens multiespectrais e hiperespectrais (ROBERTS *et al.*, 2007). Na interface deste aplicativo, o MESMA comporta no máximo três bibliotecas espectrais com seus respectivos *endmembers* múltiplos. Desta forma, se apenas uma biblioteca espectral for selecionada, o modelo possuirá duas componentes (uma imagem fração + uma imagem sombra); caso duas bibliotecas sejam selecionadas, o modelo terá três componentes (duas imagens fração + uma imagem sombra). Por fim, se forem selecionadas três bibliotecas, o modelo terá quatro componentes (três imagens fração + uma imagem sombra) (ROBERTS *et al.*, 2007). Este autor ressalta, ainda, que quanto maior o número de *endmembers* selecionados em cada biblioteca, maior será o número de combinações aplicado para cada pixel, o que permite representar a variabilidade espectral de um determinado material.

A geração de imagens fração consiste na expressão das proporções dos *endmembers* na mistura espectral, representados em ND. Quanto maior o ND do pixel (cores de cinza mais claros), maior será a proporção de um determinado componente (PONZONI *et al.*, 2012). Adicionalmente, esta técnica gera uma imagem contendo o *endmember* que foi utilizado para cada pixel (modelo de mistura), o RMSE produzido pelo modelo e um arquivo de metadados (formato CSV) que reporta os parâmetros do modelo e a proporção da imagem que foi modelada por cada *endmember*. Além disso, há a possibilidade de incluir uma imagem “individualizada”, em que, para cada *endmember* utilizado (modelo de mistura), é atribuída uma cor (ROBERTS *et al.*, 2007).

Após a separação dos *endmembers* em classes por meio da execução do modelo resultante do processo de desmistura espectral, a imagem foi suavizada mediante um filtro que aplica a convolução estatística da mediana, utilizando uma máscara de tamanho 5x5 (MENESES; SANTA ROSA, 2012). Posteriormente, esta

imagem foi exportada para o programa ArcGIS para ser realizado o cálculo das áreas correspondentes à resposta da classificação espectral segundo seus endmembers correspondentes. Ademais, foram conferidas as cores das classes de solos de acordo com Embrapa (2014).

II.7.2. Validação do mapeamento espectral de solos

Mapas digitais de solos devem ser avaliados quanto à exatidão do mapeamento (CONGALTON; GREEN, 2010). Nesse sentido, a validação do mapa de solos foi realizada com base na verificação em campo de pontos de validação obtidos mediante malha retangular.

Em ambiente ArcGis 10.3, foi criada uma malha de pontos 1.100X1.100, que foi inserida na área da microbacia estudada. De maneira aleatória, foram determinadas 360 posições e salvas em formato *shapefile*. Em um segundo momento, esta malha de pontos foi recortada a partir do arquivo vetorial de polígonos correspondentes às áreas de exposição de solos expostos da IC. Desta forma, as células alocadas em espaços não mapeados foram eliminadas, restando 161 pontos para prosseguir no processo de validação. A malha foi sobreposta ao mapa de classes de solos obtido pelo método MESMA.

A malha de pontos de validação foi exportada como planilha para o programa Excel com as coordenadas de cada célula da malha. Esta planilha foi alimentada com as classes de solo verificadas em cada ponto de validação, avaliando a concordância com as classes de solos mapeadas.

A verificação da verdade de campo foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa, de escritório, foram confrontadas as informações do mapeamento realizado da MBRE, de acordo com as células da malha, por meio do banco de dados de classes de solos do DF disponível no Laboratório de Geoprocessamento da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV/UnB. Na segunda etapa, 100 pontos foram validados em campanhas de campo. Como base cartográfica para a localização mais precisa dos pontos de validação, foram utilizadas aerofotografias digitais ortoretificadas com resolução espacial nominal de 24 cm, em escala 1:5.000 (TERRACAP, 2013).

Com os dados da validação de campo e de escritório organizados na malha elaborada, foram avaliados os dados do mapeamento da MBRE pelo MESMA com a confecção da matriz de confusão (CONGALTON; GREEN, 2010). No mapa de distribuição dos solos da microbacia do ribeirão Extrema gerado, foi avaliada a acurácia do mapeamento pelo índice *Kappa*, além da acurácia do usuário e do produtor e dos erros de omissão e de comissão.

Ao avaliar a eficácia de três índices de acurácia de mapeamentos digitais, ou seja, exatidão global (EG), *Kappa* (K) e Tau (τ), Brites *et al.* (1996) e Figueiredo e Vieira (2007) concluíram que a EG tende a apresentar índices mais altos em relação aos outros dois e que a diferença entre os índices K e τ é pequena. Além disso, K e τ são mais consistentes que a EG por envolverem, no índice final, todas as células da matriz de confusão. Desta forma, a análise da matriz de confusão foi realizada por meio do coeficiente de acurácia *Kappa* (COHEN, 1960), calculado segundo a Equação 11:

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

P_o = o produto entre o somatório da diagonal principal da matriz ($\sum X_{ii}$) e o número total de observações (N);

P_e = pelo somatório do produto dos elementos das linhas e colunas marginais ($\sum X_{i+} X_{+i}$);

1 = número total de observações (N) ao quadrado (COHEN, 1960).

Os valores para este índice variam de 0 (concordância nula) a 1 (concordância perfeita) (MENESES; SANO, 2012).

Segundo Landis e Koch (1977), a avaliação da acurácia de mapeamentos por meio do coeficiente *Kappa* pode ser realizada com base nos valores apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Classificação da acurácia de mapeamentos mediante valores do coeficiente Kappa

| Coeficiente Kappa | Classificação |
|-------------------|---------------|
| < 0 | Péssima |
| 0 – 0,2 | Ruim |
| 0,21 – 0,4 | Razoável |
| 0,41 – 0,6 | Boa |
| 0,61 – 0,8 | Muito Boa |
| 0,81 – 1,0 | Excelente |

Fonte: Adaptado de Landis e Koch (1977).

Do mesmo modo, a acurácia também pode ser analisada individualmente por meio da análise dos erros de exclusão (erros de omissão) e erros de inclusão (erros de comissão), que levam em consideração os valores das marginais da matriz (CONGALTON; GREEN, 2010). As linhas da matriz são os valores que indicam o número de amostras que, pertencendo a uma determinada classe de solo, não foram incluídos nela. Os erros de omissão foram calculados pela Equação 12, proposta por Congalton e Mead (1986):

$$EO = \frac{X_{i+} - X_{ii}}{X_{i+}} \times 100$$

Eq. 13

Onde:

EO = erros de omissão (exclusão);

X_{i+} = marginal da linha;

X_{ii} = diagonal da linha.

Os valores das células nas colunas referem-se aos pixels que foram atribuídos a uma classe de solo a qual eles não pertencem. Proposta por Congalton e Mead (1986), a Equação 13 representa o cálculo dos erros de comissão:

$$EC = \frac{X_{+i} - X_{ii}}{X_{+i}} \times 100$$

Eq. 14

Onde:

EC = erros de comissão (inclusão);

X_{+i} = marginal da coluna;

X_{ii} = diagonal coluna.

Segundo Congalton e Mead (1986), a acurácia do usuário é expressa pela razão do número de elementos corretamente classificados em uma classe pelo número total de elementos classificados na mesma classe (Equação 14). Esta medida reflete os erros de inclusão ou comissão na classificação e indica a probabilidade de um pixel classificado no mapa representar a classe de solo (LILLESAND *et al.*, 2007; CONGALTON; GREEN, 2010).

$$AU = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \times 100 \quad \text{Eq. 15}$$

Onde:

AU = Acurácia do Usuário;

X_{ii} = diagonal da linha (elementos corretamente classificados);

X_{i+} = marginal da linha (total de elementos classificados para essa classe).

A razão entre o número de elementos corretamente classificados em uma determinada classe pelo número de pontos de referência amostrados para a mesma classe resulta na acurácia do produtor (CONGALTON; MEAD, 1986) (Equação 15). Trata-se do reflexo dos erros de exclusão ou omissão da classificação e indica a probabilidade de um pixel de referência (verdade de campo) ter sido corretamente classificado (LILLESAND *et al.*, 2007; CONGALTON; GREEN, 2010).

$$AP = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \times 100 \quad \text{Eq. 16}$$

Onde:

AP = Acurácia do Produtor;

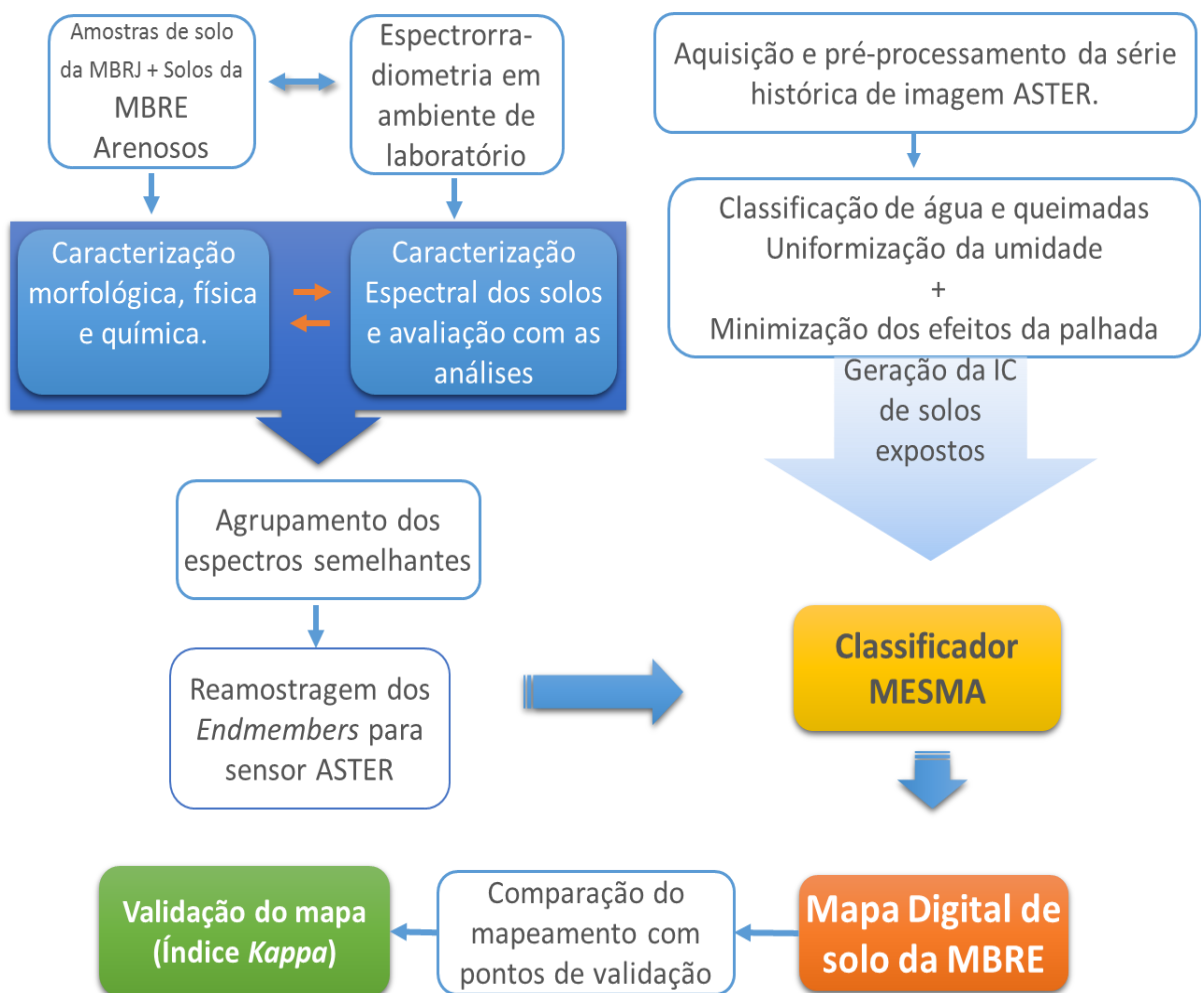
X_{ii} = diagonal da coluna (elementos corretamente classificados);

X_{+i} = marginal da coluna (total de elementos classificados para essa classe).

II.8. Fluxograma geral da metodologia

Para um melhor entendimento da metodologia utilizada neste trabalho, foi elaborado um fluxograma com um resumo esquemático das etapas anteriormente descritas (Figura 26).

Figura 26 – Fluxograma Geral da metodologia adotada neste trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

III.1. Classes de solos representativas e Biblioteca espectral de solos da microbacia do Ribeirão Extrema

Por intermédio das atividades de campo, com avaliações das classes de solo de ocorrência na microbacia do Ribeirão Extrema e as relações pedomorfogeológicas, foi possível observar a grande semelhança na distribuição de classes de solo em relação à da microbacia do Rio Jardim. Como a área de estudo é contígua à MBRJ, acontece certa similaridade nas feições geomorfológicas e geológicas em ambas microbacias que proporcionaram o desenvolvimento de classes de solos semelhantes. A exceção foi observada na porção noroeste da MBRE, onde ocorre maior área de exposição da Unidade MNPpq3 – Quartzito Médio, além das Unidades MNPpr3 – Metarritmito Arenoso e MNPpr4 – Metarritmito Argiloso do Grupo Paranoá, que originam solos de textura arenosa a média, raramente notados na MBRJ (REATTO et al., 2004).

Nas áreas com semelhanças nas relações pedomorfológicas e distribuição de classes de solos em relação às da MBRJ, que corresponde à grande extensão da microbacia estudada, foram utilizados os dados de caracterização morfológica e física (textura do solo), química (saturação de bases) e espectroscópica (Biblioteca Espectral de Solos da MBRJ) destas classes de solos disponíveis no Laboratório de Geoprocessamento da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília (FAV-UnB).

Na porção noroeste da microbacia do Ribeirão Extrema, foram realizadas litopossequências para a obtenção das relações pedomorfológicas, caracterização morfológica e física (textura do solo) dos solos evoluídos a partir das Unidades MNPpq3, MNPpr3 – Metarritmito Arenoso e MNPpr4 do Grupo Paranoá, visando a complementação da Biblioteca Espectral de Solos da MBRE a fim de realizar o mapeamento digital espectral desta microbacia.

III.1.1. Litotopossequências e classes de solos representativas da MBRJ similares às da MBRE

III.1.1.1 Atributos morfológicos físicos e químicos dos solos da MBRJ

As descrições morfológicas e a caracterização física e química das classes de solos dos perfis das Litotopossequências Estanislau, Alto Rio Jardim, São Gonçalo, Barra Alta, Cariru e Fazenda Ibi-Atã, representativas da distribuição pedomorfogeológica da microbacia do Rio Jardim (MBRJ), assim como os solos estudados da microbacia do Ribeirão Extrema (MBRE), disponíveis no Laboratório de Geoprocessamento da FAV-UnB, estão resumidas nas Tabelas 11, 12, 13, 14, 15 e 16. Nota-se a pouca variação entre o atributo textura entre as classes de solos, confirmando a relação textural das classes de solos com os seus materiais de origem, uma vez que foram originados a partir de rochas metassedimentares, predominante pelíticas, já pré-intemperizadas dos Grupos Bambuí e Paranoá (FREITAS-SILVA; CAMPOS, 1998a) (Figura 19).

Nestas litotopossequências, as relações pedomorfogeológicas estabelecidas foram importantes para o entendimento e definição da distribuição das classes de solos presentes na MBRJ. Foram caracterizadas as seguintes classes de solos, listadas em ordem de maior área de ocorrência: em áreas aplainadas a suave onduladas ocorrem Latossolos Vermelhos distróficos típicos (LV), Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos típicos (LVA) e Plintossolos Pétricos concrecionários típicos (FF); nos locais onde a declividade se acentua, desenvolvem-se Neossolos Regolíticos distróficos típicos (RR), Cambissolos Háplicos Tb distróficos típicos (CX); já nas esparsas planícies de inundação, ocorrem Gleissolos Háplicos (GX), Plintossolos Háplicos (FX) e Organossolos Háplicos (OX).

A textura destas classes de solos nas litopossequências representativas da MBRJ predominou de argilosa a muito argilosa, uma vez que se originam de litologias predominantemente pelíticas do Grupo Bambuí (FREITAS-SILVA; CAMPOS, 1998a), porém, em áreas restritas, em uma pequena porção no extremo Norte desta bacia, ocorrem litologias da Unidade MNPpq3 do Grupo Paranoá, constituídas predominantemente por quartzitos médios, com desenvolvimento de solos de texturas

arenosas a médias, que, no entanto, apresentam distribuição não significativa na MBRJ, concordando com relatos de Martins (1998).

Além da textura herdada das rochas de origem, ressalta-se a baixa fertilidade destes solos, todos distróficos, até mesmo os solos mais jovens, tais como os Cambissolos, Neossolos, Regolíticos e Solos Hidromórficos. Isso acontece porque as rochas de origem se tratam de litologias já pré-intemperizadas na sua gênese sedimentar (LACERDA; BARBOSA, 2012).

Nos Latossolos Vermelhos (LV), a textura variou de argilosa a muito argilosa, já os Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) exibiram textura argilosa à média devido à influência de litologias metarritimíticas. A variação da cor nos LV é proveniente da mineralogia diferenciada dos óxidos de Fe – hematita predominante dos LV e goethita nos LVA.

Os Plintossolos Pétricos Concrecionários (FFc) e Plintossolos Háplicos (FX) encontrados na MBRJ apresentaram textura muito argilosa à argilosa em sua matriz latossólica, com colorações variando de vermelho (10R 5/8) no horizonte C a bruno (10YR 6/8) no horizonte A, com horizontes de coloração variegada. Barbosa *et al.* (2009) e Motta *et al.* (2002) atribuíram o motivo da presença de horizonte concrecionário ou litoplíntico nas Chapadas Elevadas do DF, bem como no Planalto Central do Brasil, à alternância do regime hídrico nas extremidades das unidades geomorfológicas, onde a declividade se acentua, o que torna as condições de drenagem interna deficiente e, associada a outros fatores, formam plintita, que, por sua vez, enrijecida por processos físicos e químicos dá origem às petroplintitas.

Não houve variação na textura argilosa entre os Neossolos Regolíticos (RR) presentes na MBRJ, que apresentam horizonte A com coloração variando de bruno avermelhado escuro (5YR 4/4) a amarelo avermelhada (10YR 5/4), e o horizonte C apresentando uma coloração variando de vermelho escuro (10R 3/6) a amarelo-avermelhado (2,5YR 6/8). Estes solos evoluem a partir de rochas pelíticas argilosas do Grupo Bambuí, apresentando cores que tendem ao vermelho (FREITAS-SILVA; CAMPOS, 1998), devido a teores elevados de Fe₂O₃ presentes nestas litologias. Os RR são formados quando a atuação dos processos pedogenéticos não é suficientemente capaz de promover transformações significativas no material de origem em decorrência da resistência ao intemperismo apresentada por este material (SANTOS *et al.*, 2012).

Os Cambissolos (CX) apresentam ocorrência rara na MBRJ, com textura argilosa semelhante aos RR. Pereira *et al.* (2010), que estudaram a gênese de CX desenvolvidos sobre rochas pelíticas do Grupo Bambuí em Minas Gerais, encontraram características parecidas, pois esta classe apresentou variações nos matizes entre 10YR e 7,5YR nos horizontes A e Bi, nesta ordem. De acordo com Freitas-Silva e Campos (1998), a cor avermelhada do horizonte C dos CX também é atribuída ao material de origem constituído por rochas pelíticas ricas em óxidos de ferro.

Os Gleissolos Háplicos (GX) e Organossolos Háplicos (OX) também apresentam textura argilosa em função da pequena área de influência da intemperização e sedimentação hidromórfica, abrangendo rochas pelíticas argilosas do Grupo Bambuí (Freitas-Silva e Campos, 1998a).

A relação silte/argila apresentou valores muito baixos a baixos para os Latossolos e Plintossolos (Tabelas 11 e 14) mostrando elevado grau de intemperização destes (Embrapa, 2014). Segundo Santos *et al.* (2005), valores inferiores a 0,6 nos solos de textura argilosa ou muito argilosa ou abaixo de 0,7 nos solos de textura média representam alto grau de intemperismo. Assim, é possível traçar um perfil de evolução dos solos, dos mais intemperizados, caracterizado pela menor relação silte/argila, para os solos mais jovens, com maior relação silte/argila. No que se refere aos Cambissolos, Neossolos Regolíticos e Gleissolos, como era de se esperar, a relação silte/argila apresentou valores mais elevados, demonstrando menor grau de evolução desses solos. A relação silte/argila muito baixa dos Latossolos e Plintossolos é decorrente do grau elevado de intemperização destes solos associada ao material de origem, rochas meta-sedimentares já intemperizado nos seus processos genéticos. Estes resultados estão dentro da normalidade, uma vez que concordam com os encontrados por Barbosa *et al.* (2009), Pereira *et al.* (2010) e Rodolfo Junior *et al.* (2015) em solos desenvolvidos a partir de litologias pelíticas do Planalto Central Brasileiro.

Tabela 11 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência 1 – Estanislau

| Am. ⁽¹⁾ | Horiz. ⁽²⁾ | Prof. ⁽³⁾ (cm) | Descrição Morfológica | | | | | | | Análises Físicas | | | | | Quím. | |
|--|--|------------------------------|---------------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|------|------|------------------|----------------------|-------|-------|------|----------|-------|--------|
| | | | Cor úmida ⁽⁴⁾ (Munsell) | T ⁽⁵⁾ | Estrutura ⁽⁶⁾ | Consistência ⁽⁷⁾ | | | p ⁽⁸⁾ | Granulometria (g/Kg) | | | B/A | Silt/Arg | Text | V % |
| | | | | | | S | U | M | | Argila | Silte | Areia | | | | |
| <i>Perfil 1 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico – LVd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFE-01 | A | 0-15 | 2,5YR 4/4 | m. a. | for. mto. p. gru. | m. | mfr. | lpl. | lpg. | 792 | 87 | 120 | 0,99 | 0,11 | M.A. | 23 |
| | AB | 15-25 | 2,5YR 4/6 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | BA | 25-40 | 2,5YR 5/6 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | Bw | 40+ | 2,5YR 5/8 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | 785 | 107 | 108 | | 0,14 | M.A. | 27 |
| <i>Perfil 2 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFE-05 | Ac | 0-20 | 7,5YR 4/4 var. 2,5YR 5/8 | m. a. | for. mto. p. gru. | m. | mfr. | pl. | pg. | 605 | 130 | 265 | 1,11 | 0,21 | M.A. | 17 |
| | ABc | 20-35 | 7,5YR 5/4 var. 2,5YR 5/8 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | lpg. | | | | | | | |
| | BAc | 35-50 | 7,5YR 7/8 var. 2,5YR 5/8 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | lpg. | | | | | | | |
| DFE-07 | Bc | 50+ | 5YR 6/8 var. 2,5YR 5/6 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | lpg. | 675 | 65 | 260 | | 0,10 | M.A. | 16 |
| | <i>Perfil 3 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Ac | 0-20 | 10YR 3/6 var. 10YR 5/6 | m. a. | for. mto. p. gru. | m. | mfr. | pl. | pg. | 607 | 213 | 180 | 0,97 | 0,35 | M.A. | 16 |
| DFE-07 | Bc | 20-60 | 10YR 6/8 | a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | CR | 60+ | 10R 5/8 var. 2,5Y 7/4 | a. | mod.p.grd. ang. | d. | fm. | pl. | pg. | 587 | 246 | 167 | | 0,42 | A. | 17 |
| <i>Perfil 4 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico - LVd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFE-11 | A | 0-20 | 10R 4/3 | m. a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 755 | 74 | 171 | 1,02 | 0,10 | M.A. | 19 |
| | AB | 20-30 | 10R 4/6 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | BA | 30-51 | 10R 4/4 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | Bw | 51+ | 10R 5/8 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | 773 | 91 | 136 | | 0,12 | M.A. | 16 |
| <i>Perfil 5 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico petroplíntico – LVAdcc</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFE-13 | A | 0-15 | 10YR ¾ | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | lpg. | 692 | 133 | 175 | 1,05 | 0,19 | M.A. | 19 |
| | AB | 15-25 | 10YR 4/6 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | lpg. | | | | | | | |
| | BA | 25-35 | 10YR 5/6 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | lpg. | | | | | | | |
| | Bw | 35-70 | 10YR 6/6 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | lpg. | 725 | 90 | 185 | | 0,12 | M.A. | 19 |
| | Bc | 70+ | 10R 5/8 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | lpg. | | | | | | | |
| <i>Perfil 6 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFE-15 | Ac | 0-25 | 7,5YR 4/6 | m. a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 623 | 89 | 289 | 1,13 | 0,14 | M.A. | 16 |
| | Bc1 | 25-75 | 7,5YR 5/8 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | 702 | 89 | 209 | | 0,13 | M.A. | 22 |
| | Bc2 | 75-175 | 10R 5/8 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | C | 175+ | 10R 6/8 var. 7,5YR 7/4 | a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |

(¹) amostras de solo, (²)Horizonte, (³)Profundidade, (⁴)var.: variegada, (⁵)Textura: m.: muito, a.: argilosa, (⁶)Estrutura: for.: forte, mod.: moderada, mto.: muito, p.: pequena, grd.: grande, gru.: grumosa, gran.: granular, ang.: angular, (⁷)Seca: m.: macia, d.: dura – Úmida: fr.: friável, fm.: firme, mfr.: muito friável – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica, lpg.: ligeiramente pegajosa. Text.: Fração Granulométrica: A. argilosa, M.A. Muito argilosa. Quím. Análises Químicas:, V.: Saturação de bases.

Tabela 12 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotoposequência 2 – Alto Rio Jardim

| Descrição Morfológica | | | | | | | | | | Análises Físicas | | | | Quím. | | |
|---|-----------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|-----|------|------------------|------------------|-------|-------|------|----------|------|--------|
| Am. ⁽¹⁾ | Horiz. ⁽²⁾ | Prof. ⁽³⁾ (cm) | Cor úmida ⁽⁴⁾ (Munsell) | T ⁽⁵⁾ | Estrutura ⁽⁶⁾ | Consistência ⁽⁷⁾ | | | P ⁽⁸⁾ | Granulometria | | | B/A | Silt/Arg | Text | V % |
| | | | | | | S | U | M | | Argila | Silte | Areia | | | | |
| <i>Perfil 1 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico – FFc</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFAJ-01 | Ac | 0-18 | 10YR ¾ | a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | 500 | 280 | 220 | | 0,56 | A. | 36 |
| | AF | 18-45 | 10YR 4/6 | a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | F | 45-120 | 10YR 6/8 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | 651 | 263 | 85 | - | 0,40 | M.A. | 18 |
| | FC | 120-160 | 2,5YR 5/8 | a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | C | 160+ | 10YR ¾ | a. | for. mto. p. bl. | ld. | fm. | lpl. | pg. | | | | | | | |
| <i>Perfil 2 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico – FFc</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFAJ-03 | Ac | 0-30 | 10YR 4/4 | as. | for. mto. p. gru. | st. | fr. | pl. | pg. | 436 | 453 | 111 | | 1,04 | A. | 16 |
| | AF | 30-48 | 10YR ¾ | a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | F | 48-105 | 10YR 4/6 | m.a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | 621 | 312 | 67 | - | 0,50 | A. | 24 |
| | FC | 105-150 | 5YR 5/6 var. 2,5Y 8/2 | a. | for. mto. p. gran. | d. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| <i>Perfil 3 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico – FFc</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFAJ-05 | Ac | 0-20 | 7,5YR ¾ | a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | lpg. | 550 | 381 | 69 | | 0,69 | A. | 21 |
| | AF | 20-40 | 7,5YR 4/6 | a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | lpg. | | | | | | | |
| | F | 40-96 | 7,5YR 4/4 | a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | 583 | 374 | 43 | - | 0,64 | A. | 15 |
| <i>Perfil 4 - CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico – CXbd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFAJ-07 | A | 0-10 | 7,5YR 4/6 | as. | fra. mto. p. bl. | d. | fm. | pl. | pg. | 502 | 417 | 82 | | 0,83 | A.S. | 19 |
| | Bi | 10-20 | 7,5YR 5/6 | a. | fra. mto. p. bl. | d. | fm. | pl. | pg. | 514 | 397 | 89 | 1,02 | 0,77 | A. | 14 |
| | BiC | 20-25 | 5YR 5/6 var. 2,5YR 4/8 | a. | fra. mto. p. bl. | d. | fm. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | C | 25+ | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Perfil 5 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico- RRd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFAJ-09 | A | 0-8 | 10YR 5/4 | a. | fra. p. bl. | d. | fm. | pl. | pg. | 493 | 358 | 148 | | 0,73 | A. | 40 |
| | AC | 8-14 | 10YR 5/3 | a. | fra. p. bl. | d. | fm. | pl. | pg. | 435 | 422 | 144 | - | 0,97 | A. | 14 |
| | C | 14+ | 10R 3/6 var. 7,5YR 8/0 | as. | | | | | | | | | | | | |
| <i>Perfil 6 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico - RRd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFAJ-11 | A | 0-10 | 10YR 5/4 | as. | for. p. bl. | d. | fm. | pl. | pg. | 489 | 412 | 99 | | 0,84 | A. | 23 |
| | AC | 10-22 | 10YR 5/6 | as. | for. p. bl. | d. | fm. | pl. | pg. | 528 | 435 | 37 | - | 0,82 | A. | 11 |
| | C | 22+ | 2,5YR 3/6 var. 2,5Y 7/2 | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Perfil 7 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico - RRd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFAJ-13 | A | 0-3 | 5YR 5/5 | a. | mod. p. bl. | d. | fm. | pl. | pg. | 422 | 382 | 197 | | 0,90 | A. | 34 |
| | C | 3-70+ | 10R 4/8 | a. | fra. p. bl. | d. | fm. | pl. | pg. | 415 | 365 | 219 | - | 0,88 | A. | 24 |

Continuação da tabela 12

| <i>Perfil 8 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico - GXbd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|--------|-----------------------|-------|-------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|----|
| DFAJ-15 | A | 0-33 | 10YR 5/2 | a. | fra. p. bl. | md. | fm. | pl. | pg. | 402 | 414 | 185 | | 1,03 | A. | 51 |
| | ACg | 33-40 | 10YR 6/2 var. 5YR 6/8 | a. | fra. p. bl. | md. | fm. | pl. | pg. | 435 | 422 | 143 | - | 0,97 | A. | 19 |
| | Cg | 40-70+ | 10YR 7/2 var. 5YR 6/8 | a. | maciça | md. | fm. | pl. | pg. | | | | | | | |
| <i>Perfil 9 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico - LVd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFAJ-17 | A | 0-20 | 10R 3/6 | m. a. | for. mto. p. gru. | ld. | fr. | pl. | pg. | 684 | 248 | 67 | | 0,36 | M.A. | 19 |
| | ABw | 20-35 | 10R 4/6 | m. a. | for. mto. p. gru. | ld. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | BwA | 35-55 | 10R 4/8 | m. a. | mto. p. gran. | ld. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | Bw | 55+ | 10R 5/8 | m. a. | mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | 702 | 225 | 73 | 1,03 | 0,32 | A. | 43 |

¹⁾Amostra de solo ⁽²⁾Horizonte, ⁽³⁾Profundidade, ⁽⁴⁾var.: variegada, ⁽⁵⁾Textura: m.: muito, a.: argilosa, ⁽⁶⁾Estrutura: for.: forte, mod.: moderada, mto.: muito, p.: pequena, grd.: grande, gru.: grumosa, gran.: granular, ang.: angular, ⁽⁷⁾Seca: m.: macia, d.: dura – Úmida: fr.: friável, fm.: firme, mfr.: muito friável – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica, lpg.: ligeiramente pegajosa. Text.: Fração Granulométrica: A. argilosa, M.A. Muito argilosa. Quím. Análises Químicas:, V.: Saturação de bases.

Tabela 13 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litopossequência 3 – São Gonçalo

| Am. ⁽¹⁾ | Horiz. ⁽²⁾ | Prof. ⁽³⁾ (cm) | Descrição Morfológica | | | | | | | Análises Físicas | | | | | Quím. | |
|---|-----------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|------|------|------------------|----------------------|-------|-------|------|----------|-------|--------|
| | | | Cor úmida ⁽⁴⁾ (Munsell) | T ⁽⁵⁾ | Estrutura ⁽⁶⁾ | Consistência ⁽⁷⁾ | | | P ⁽⁸⁾ | Granulometria (g/Kg) | | | B/A | Silt/Arg | Text | V % |
| | | | | | | S | U | M | | Argila | Silte | Areia | | | | |
| <i>Perfil 1 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico – LVAd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFSG-01 | A | 0-25 | 7,5YR 3/4 | as. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | 719 | 52 | 229 | 0,76 | 0,23 | M.A. | 21 |
| | AB | 25-45 | 7,5YR 4/6 | a | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | Bw | 45-300+ | 7,5YR 6/8 | m.a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | 544 | 46 | 410 | | 0,10 | A. | 17 |
| <i>Perfil 2 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico – LVd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFSG-04 | A | 0-20 | 10R 3/6 | m.a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 651 | 163 | 185 | - | 0,40 | M.A. | |
| | AB | 20-28 | 10R 4/6 | m.a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | 25 |
| | BA | 28-34 | 10R 5/8 | m.a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | Bw | 34-300+ | 10R 4/8 | m.a. | for. mto. p. gru. | m. | mfr. | pl. | pg. | 702 | 174 | 124 | - | 0,40 | M.A. | 16 |
| <i>Perfil 3 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico – GXbd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFSG-06 | A | 0-25 | 10YR 3/6 | a. | mod. mto. p. gru. | ed. | fm. | pl. | pg. | 494 | 282 | 224 | | 0,60 | A. | 44 |
| | ACg | 25-75 | 10YR 4/2 | a. | fra. mto. p. bl. | ed. | fm. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | Cg | 75+ | 2.5Y 8/2 | m.a. | fra. mto. p. bl. | ed. | fm. | pl. | pg. | 655 | 129 | 215 | | 0,20 | M.A. | 27 |
| <i>Perfil 4 - ORGANOSSOLO HÁPLICO Hêmico típico – Oxy</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFSG-09 | A | 0-60 | 10YR 2/1 | a. | fra. p. gru. | m. | fr. | lpl. | pg. | 436 | 165 | 299 | | 0,40 | A. | 50 |
| | AC | 60-105 | 10YR 4/2 | a. | fra. p. gru. | m. | fm. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | CA1 | 105-160 | 10YR 7/6 | a. | fra. p. subg. | d. | fm. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | CA2 | 160+ | 10YR 7/3 | a. | mod. p. subg. | ed. | fm. | pl. | pg. | 613 | 238 | 149 | | 0,40 | A. | 64 |
| <i>Perfil 5 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico – LVd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFSG-12 | A | 0-21 | 2,5YR 4/2 | m. a. | for. mto. p. gran. | ld. | fr. | lpl. | pg. | 597 | 88 | 315 | 1,26 | 0,15 | A. | 22 |
| | AB | 21-30 | 2,5YR 5/2 | m. a. | for. mto. p. gran. | ld. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | BA | 30-45 | 2,5YR 4/4 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | Bw | 45+ | 2,5YR 5/8 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | 755 | 74 | 171 | - | 0,10 | M.A. | 13 |

(1) código das amostras de solo, (2)Horizonte, (3)Profundidade, (4)var.: variegada, (5)Textura: m.: muito, a.: argilosa, (6)Estrutura: for.: forte, mod.: moderada, fra.: fraca, mto.: muito, p.: pequena, grd.: grande, gru.: grumosa, gran.: granular, bl: blocos, (7)Seca: st.: solta, m.: macia, d.: dura, ld.: ligeiramente dura, md.: muito dura – Úmida: fr.: friável, fm.: firme, mfr.: muito friável – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica, lpg.: ligeiramente pegajosa. Text.: Fração Granulométrica: A. argilosa, M.A. Muito argilosa. Quím. Análises Químicas:, V.: Saturação de bases.

Tabela 14 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência 4 – Barra Alta

| Am. ⁽¹⁾ | Horiz. ⁽²⁾ | Prof. ⁽³⁾ (cm) | Descrição Morfológica | | | | | Análises Físicas | | | | | Quím. | | | |
|---|-----------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|------|------------------|------------------|-------------------------|-------|-------|--------------|------|--------|----|
| | | | Cor úmida ⁽⁴⁾ (Munsell) | T ⁽⁵⁾ | Estrutura ⁽⁶⁾ | Consistência ⁽⁷⁾ | | | P ⁽⁸⁾ | Granulometria (g/Kg) | | | B/A Silt/Arg | Text | V % | |
| | | | | | | S | U | M | | Argila | Silte | Areia | | | | |
| <i>Perfil 1 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico – LVd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFBA-01 | A | 0-20 | 10R 3/6 | a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 702 | 225 | 73 | 0,32 | M.A. | 20 | |
| | AB | 20-45 | 10R 4/8 | a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | Bw | 45+ | 10R 5/8 | a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | 754 | 205 | 105 | 1,07 | 0,27 | M.A. | 16 |
| <i>Perfil 2 - PLINTOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico – FX</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFBA-08 | A | 0-18 | 2,5Y 3/2 | a. | for.p. mto.p. gru. | d. | fm. | pl. | pg. | 533 | 101 | 356 | 0,18 | A. | 25 | |
| | ACg | 18-31 | 2,5Y 4/0 | a. | mod. mto.p.subg. | d. | fm. | pl. | pg. | 529 | 158 | 312 | - | 0,30 | A. | 41 |
| | ACgf | 31+ | 2,5Y 6/2 var. 10R 5/8 | a. | mod. mto.p.subg. | md. | mfm. | pl. | pg. | | | | | | | |
| <i>Perfil 3 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico – FFc</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFBA-14 | Ac | 0-45 | 10YR 4/3 | a. | for. mto. p. gru. | m. | fm. | pl. | pg. | 583 | 374 | 43 | - | 0,64 | A. | 29 |
| | ACc | 45-70 | 7,5YR 5/4 | a. | fra. mto. p. subg. | d. | fm. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | C | 70+ | 10R 5/8 var. 10YR 7/8 | a. | fra. mto. p. subg. | md. | mfm. | lpl. | lpg. | 651 | 263 | 85 | - | 0,40 | M.A. | 30 |
| <i>Perfil 4 - NEOSSOLO REGOLITICO Distrófico típico – RRd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFBA-17 | A | 0-10 | 7,5YR 5/6 | as. | fra. p. bl. | md. | fm. | pl. | pg. | 489 | 412 | 99 | 0,84 | A.S. | 18 | |
| | AC | 10-95 | 7,5YR 5/4 | as. | fra. p. bl. | md. | fm. | pl. | pg. | 528 | 435 | 37 | - | 0,82 | A. | 22 |
| | C | 95+ | 10R 6/4 | as. | fra. p. bl. | md. | mfm. | npl. | npg. | | | | | | | |
| <i>Perfil 5 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico – LVd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFBA-20 | A | 0-18 | 10R 4/5 | a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 513 | 101 | 386 | 0,19 | A. | 27 | |
| | AB | 18-32 | 10R 4/8 | a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | Bw | 32+ | 10R 5/8 | a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | 510 | 158 | 332 | 1,00 | 0,30 | A. | 18 |
| <i>Perfil 5 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico – LVd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFBA-23 | A | 0-15 | 10R 4/6 | a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 597 | 88 | 315 | 0,15 | A. | 19 | |
| | AB | 15-30 | 10R 4/8 | a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | Bw | 30+ | 10R 5/8 | a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | 638 | 91 | 271 | 1,06 | 0,14 | A. | 14 |
| <i>Perfil 4 - NEOSSOLO REGOLITICO Distrófico típico – RRd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFBA-26 | A | 0-8 | 7,5YR 5/4 | a. | fra. p. bl. | d. | fm. | pl. | pg. | 422 | 382 | 197 | 0,90 | A. | 16 | |
| | C | 8+ | 10R 6/4 | as. | fra. mto. p. bl. | d. | fm. | npl. | npg. | 415 | 365 | 219 | - | 0,88 | A. | 31 |

⁽¹⁾amostras de solo, ⁽²⁾Horizonte, ⁽³⁾Profundidade, ⁽⁴⁾var.: variegada, ⁽⁵⁾Textura: a.: argilosa, as.: argilossiltosa, ⁽⁶⁾Estrutura: for.: forte, mod.: moderada, fra.: fraca, mto.: muito, p.: pequena, gru.: grumosa, gran.: granular, bl: blocos, subg.: subangular, ⁽⁷⁾Seca: m.: macia, d.: dura, md.: muito dura – Úmida: fr.: friável, fm.: firme, mfm.: muito firme – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica, lpg.: ligeiramente pegajosa, npl.: não plástica, npg.: não pegajosa. Text.: Fração Granulométrica: A. argilosa, M.A. Muito argilosa. Quím. Análises Químicas:, V.: Saturação de bases.

Tabela 15 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência 5 – Cariru

| Am. ⁽¹⁾ | Horiz. ⁽²⁾ | Prof. ⁽³⁾ (cm) | Descrição Morfológica | | | | | | Análises Físicas | | | | | Quím. | | |
|---|--|------------------------------|---------------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|------|------|------------------|-------------------------|-------|-------|------|----------|------|----|
| | | | Cor úmida ⁽⁴⁾ (Munsell) | T ⁽⁵⁾ | Estrutura ⁽⁶⁾ | Consistência ⁽⁷⁾ | | | P ⁽⁸⁾ | Granulometria (g/Kg) | | | B/A | Silt/Arg | Text | V |
| | | | | | | S | U | M | | Argila | Silte | Areia | | | | |
| <i>Perfil 1 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico – LVd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFCA-01 | A | 0-12 | 10R 4/4 | a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | 684 | 248 | 67 | | 0,36 | M.A. | 18 |
| | AB | 12-24 | 10R 4/6 | a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | BA | 24-42 | 10R 4/8 | a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | Bw | 42+ | 10R 5/6 | m.a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | 713 | 214 | 73 | 1,04 | 0,32 | M.A. | 18 |
| <i>Perfil 2 - CAMBISSOLO HÁPLICO tb distrófico – CXbd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Validação (8) | A | 0-30 | 5YR 4/6 | a. | fra. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 502 | 417 | 82 | | 0,83 | A. | 20 |
| | ABi | 30-46 | 5YR 5/8 | a. | fra. mto. p. bl. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | Bi | 46-65 | 5YR 6/8 | m.a. | fra. mto. p. bl. | m. | fr. | pl. | pg. | 514 | 397 | 89 | 1,02 | 0,77 | A. | 16 |
| | BiC | 65-110 | 5YR 4/8 | a. | fra. mto. p. bl. | d. | fm. | lpl. | pg. | | | | | | | |
| Validação (8) | C | 110+ | 10R 6/4 | a. | fra. p. bl. | d. | fm. | lpl. | pg. | | | | | | | |
| | <i>Perfil 3 - NEOSSOLO REGOLITICO Distrófico típico- RRd</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| Validação (8) | A | 0-20 | 5YR 4/4 | a. | fra. mto. p. gru. | ed. | fm. | lpl. | pg. | 493 | 358 | 148 | | 0,73 | A. | 17 |
| | C | 20+ | 2.5YR 6/8 var. 10R 6/4 | as. | fra. mto. p. bl. | ed. | fm. | lpl. | pg. | 435 | 422 | 144 | - | 0,97 | A. | 25 |
| <i>Perfil 4 - NEOSSOLO REGOLITICO Distrófico típico – RRd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Validação (8) | A | 0-8 | 7.5YR 5/4 | a. | fra. mto. p. gru. | m. | fr. | lpl. | pg. | 489 | 412 | 99 | | 0,84 | A.S. | 17 |
| | C | 8+ | 10R 6/4 | a. | fra. mto. p. bl. | ed. | fm. | pl. | pg. | 528 | 435 | 37 | - | 0,82 | A. | 19 |
| <i>Perfil 5 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico – LVd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFCA-09 | A | 0-21 | 10R 4/6 | m. a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | lpl. | pg. | 782 | 97 | 120 | 0,99 | 0,12 | M.A. | 16 |
| | AB | 21-30 | 10R 4/8 | m. a. | for. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| | Bw | 45+ | 10R 5/8 | m. a. | | m. | mfr. | pl. | pg. | 785 | 107 | 108 | | 0,14 | M.A. | 13 |

(¹) amostras de solo, (²)Horizonte, (³)Profundidade, (⁴)var.: variegada, (⁵)Textura: m.: muito, a.: argilosa, as.: argilossiltosa (⁶)Estrutura: for.: forte, fra.: fraca, mto.: muito, p.: pequena, gru.: grumosa, gran.: granular, subg.: subangular (⁷)Seca: m.: macia, d.: dura, ed.: extremamente dura – Úmida: fr.: friável, fm.: firme, mfr.: muito friável – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica, (⁸)Perfis de solo não considerados no mapeamento espectral, mantidos para conservar a representatividade de solos da geo-topossequência e utilizados para validação dos resultados. Text.: Fração Granulométrica: A. argilosa, M.A. Muito argilosa. Quím. Análises Químicas: V.: Saturação de bases.

Tabela 16 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência 6 – Fazenda Ibi-Atã

| Am. ⁽¹⁾ | Horiz. ⁽²⁾ | Prof. ⁽³⁾ (cm) | Descrição Morfológica | | | | | Análises Físicas | | | | | Quím. V % | | | |
|--|-----------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|------|------------------|------------------|-------------------------|-------|-------|-----------------|------|----------|------|
| | | | Cor úmida ⁽⁴⁾ (Munsell) | T ⁽⁵⁾ | Estrutura ⁽⁶⁾ | Consistência ⁽⁷⁾ | | | p ⁽⁸⁾ | Granulometria (g/Kg) | | | | B/A | Silt/Arg | Text |
| | | | | | | S | U | M | | Argila | Silte | Areia | | | | |
| <i>Perfil 1 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico – LVd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFRJ-1 | A | 0-20 | 10R 4/6 | a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 617 | 57 | 316 | | 0,10 | A. | 19 |
| | Bw | 40-80 | 10R 4/8 | a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | 658 | 101 | 281 | 1,06 | 0,15 | M.A. | 13 |
| <i>Perfil 2 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFRJ-3 | Ac | 0-20 | 7,5YR 4/6 - 10R 5/8 | a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | lpl. | pg. | 436 | 351 | 213 | | 0,80 | A. | 22 |
| | Bc | 40-60 | 7,5YR 5/8 - 2,5YR 5/8 | a. | fra. mto. p. subg. | m. | fr. | lpl. | pg. | 621 | 312 | 67 | - | 0,50 | A. | 26 |
| <i>Perfil 3 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico – LVd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFRJ-5 | A | 0-20 | 10R 3/6 | a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 608 | 92 | 240 | | 0,10 | A. | 17 |
| | Bw | 40-80 | 10R 4/8 | a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | 649 | 118 | 337 | 1,06 | 0,18 | A. | 15 |
| <i>Perfil 4 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico petroplíntico – LVAdcc</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFRJ-7 | A | 0-20 | 7,5YR 4/4 | a. | fra. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 523 | 91 | 386 | | 0,17 | A. | 14 |
| | Bw | 40-80 | 7,5YR 6/8 | a. | for. mto. p. gran. | m. | mfr. | pl. | pg. | 527 | 148 | 325 | 1,00 | 0,28 | A. | 12 |
| <i>Perfil 5 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFRJ-9 | Ac | 0-20 | 7,5YR 5/4 7,5YR ¾ | a. | for. mto. p. gru. | m | fr. | pl. | pg. | 436 | 453 | 111 | | 1,04 | A. | 25 |
| | Bc | 40-80 | 5YR 6/8 5YR 5/6 | a. | fra. mto. p. subg. | m. | fr. | pl. | pg. | 621 | 312 | 67 | - | 0,50 | A. | 22 |
| <i>Ponto 6 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico petroplíntico – LVAdcc</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFRJ-11 | A | 0-20 | 7,5YR 5/6 | a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 513 | 101 | 386 | | 0,20 | A. | 21 |
| | Bw | 20-100 | 7,5YR 6/8 | a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 611 | 157 | 233 | 1,19 | 0,25 | A. | 23 |
| | F | 100+ | 2,5YR 5/8 | a. | | m. | fr. | pl. | pg. | | | | | | | |
| <i>Perfil 7 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico petroplíntico – LVAdcc</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFRJ-14 | A | 0-20 | 5YR 4/4 | a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 526 | 98 | 376 | | 0,18 | A. | 19 |
| | Bw | 40-80 | 5YR 6/8 | a. | for. mto. p. gru. | m. | mfr. | pl. | pg. | 595 | 144 | 261 | 1,13 | 0,24 | A. | 16 |
| <i>Perfil 8 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico petroplíntico – LVAdcc</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFRJ-16 | A | 0-20 | 7,5YR 5/4 | a. | for. mto. p. gru. | m. | fr. | pl. | pg. | 612 | 110 | 278 | | 0,17 | A. | 18 |
| | Bw | 40-80 | 7,5YR 6/8 | a. | for. mto. p. gru. | m. | mfr. | pl. | pg. | 606 | 167 | 227 | 1,00 | 0,27 | A. | 13 |

(¹) amostras de solo, (²) Horizonte, (³) Profundidade, (⁴) var.: variegada, (⁵) Textura: a.: argilosa (⁶) Seca: m.: macia – Úmida: fr.: friável, mfr: muito friável – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica. Text.: Fração Granulométrica: A. argilosa, M.A. Muito argilosa. Quím. Análises Químicas:, V.: Saturação de bases.

III.1.1.2 Atributos morfológicos físicos e químicos dos solos da MBRE

As descrições morfológicas e a caracterização física das classes de solos dos perfis das da Litotopossequências NOE-1 (Tabela 13) e NOE-2 (Tabela 14), representativas da distribuição pedomorfogeológica da porção noroeste da MBRE, assim como na MBRJ estão disponíveis no Laboratório de Geoprocessamento da FAV-UnB, estão resumidas nas tabelas 13 e 14. A textura destes solos em particular variou desde franco arenosa a arenosa segundo Santos *et al.* (2015) o que evidencia a influencia da classe textural dos solos com os seus materiais de origem, uma vez que foram originados a partir de rochas quartzíticas e metarrítmicas arenosas já pré-intemperizadas do Bambuí (BARBOSA; LACERDA, 2012).

Ambas as litotopossequências, as relações pedomorfogeológicas estabelecidas foram importantes para o entendimento e definição da distribuição das classes de solos presentes na porção Noroeste da MBRE. Foram caracterizadas as seguintes classes de solos, em ordem de maior área de ocorrência: em áreas aplainadas a suave onduladas ocorrem Latossolos Vermelhos distróficos típicos (LV), Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos típicos (LVA) e, nos locais onde a declividade se acentua, desenvolvem Neossolos Quartzarênicos Órticos típicos em menor proporção. Não abordado neste estudo, mas de ocorrência na região pode-se constar os Gleissolos Háplicos (GX) e Organossolos Háplicos (OX) (Martins, 1998).

Tabela 17 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência à noroeste da MBRE – NO-1

| Am. ⁽¹⁾ | Horiz. ⁽²⁾ | Prof. ⁽³⁾ (cm) | Descrição Morfológica | | | | | | | Análises Físicas | | | | Quím. | | |
|---|-----------------------|------------------------------|------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|------|------|------------------|----------------------|-------|-------|------|----------|-------|--------|
| | | | Cor úmida (Munsell) | T ⁽⁴⁾ | Estrutura ⁽⁵⁾ | Consistência ⁽⁶⁾ | | | P ⁽⁷⁾ | Granulometria (g/Kg) | | | B/A | Silt/Arg | Text | V % |
| | | | | | | S | U | M | | Argila | Silte | Areia | | | | |
| <i>Ponto 1 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico – Rqo</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ANT020 | A | 0 - 20 | 10YR 5/6 | ar | Grãos simples | s | s | npl. | np | 94 | 10 | 896 | | 0,10 | AREIA | 24 |
| | C | 20 - 40 | 10YR 5/8 | ar. | Grãos simples | s | s | npl. | np | 69 | 73 | 858 | - | 0,95 | AREIA | 18 |
| <i>Perfil 1 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico – LVAd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DFAJ | A | 0 - 20 | 7,5YR 4/6 | as. | fra. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | 248 | 46 | 707 | | 0,18 | F.A. | 15 |
| | B | 20 - 40 | 7,5YR 4/8 | a | fra. mto. p. gran. | m. | fr. | pl. | pg. | 288 | 49 | 663 | 1,17 | 0,17 | F.A. | 14 |
| <i>Perfil 2 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico – LVAd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Faz. Larga | A | 0 - 20 | 7,5YR5/6 | a.s. | fra. mto. p. gran. | m. | fr. | npl. | lpg. | 168 | 73 | 760 | | 0,43 | F.A. | 17 |
| | B | 20 - 40 | 7,5YR 6/8 | a.s | fra. mto. p. gran. | m. | mfr. | npl. | lpg. | 215 | 97 | 687 | 1,27 | 0,45 | F.A. | 14 |
| <i>Perfil 3 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico – LVAd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FZBR | A | 0 - 20 | 7,5YR 4/4 | a. | fra. mto. p. gran. | m. | fr. | npl. | lpg. | 191 | 122 | 687 | | 0,63 | F.A. | 20 |
| | B | 20 - 40 | 7,5YR 6/8 | a | fra. mto. p. gran. | m. | mfr. | npl. | lpg. | 240 | 146 | 614 | 1,25 | 0,60 | F.A. | 18 |

(¹) amostras de solo, (²)Horizonte, (³)Profundidade, (⁴)var.: variegada, (⁵)Textura: a.: argilosa, as.: argilossiltosa, (⁶)Estrutura: for.: forte, mod.: moderada, fra.: fraca, mto.: muito, p.: pequena, gru.: grumosa, gran.: granular, bl: blocos, subg.: subangular, (⁷)Seca: m.: macia, d.: dura, md.: muito dura – Úmida: fr.: friável, fm.: firme, mfm.: muito firme – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica, lpg.: ligeiramente pegajosa, npl.: não plástica, npg.: não pegajosa. Text.: Fração Granulométrica: a.f.: areia franca, f.a.: franco-arenosa

Tabela 18 – Características morfológicas, físicas e químicas dos perfis da Litotopossequência à noroeste da MBRE – NO-2

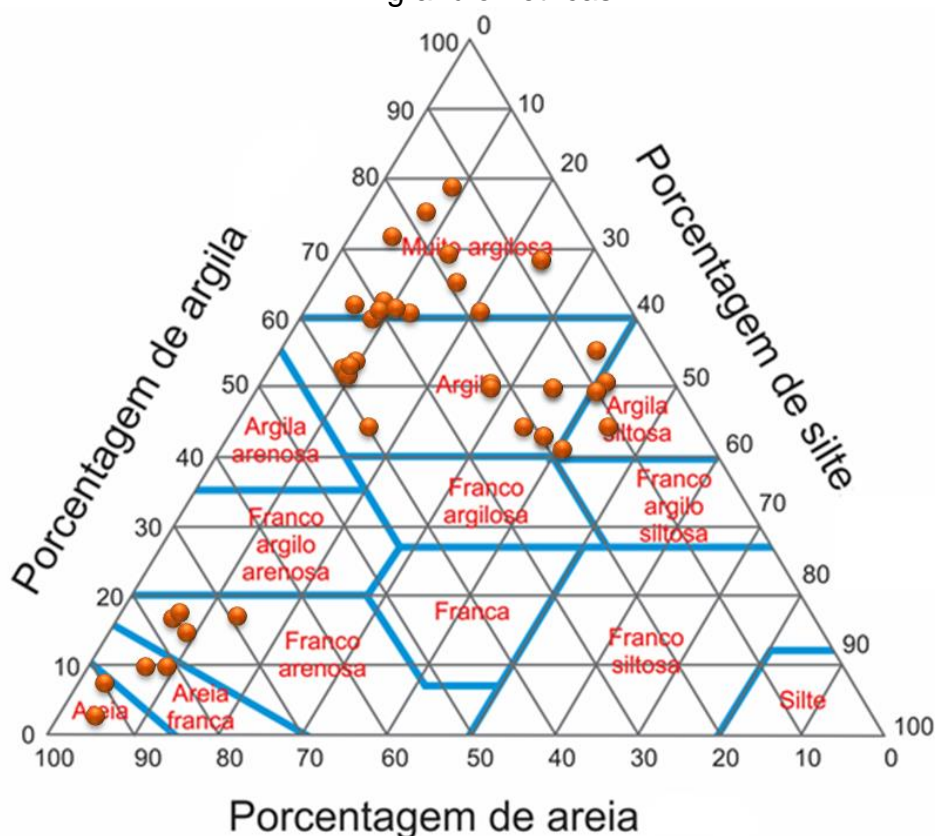
| Am. ⁽¹⁾ | Horiz. ⁽²⁾ | Prof. ⁽³⁾ (cm) | Descrição Morfológica | | | | | | Análises Físicas | | | | | Quím. | | |
|---|-----------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|------|------|------------------|----------------------|-------|-------|------|----------|-------|----|
| | | | Cor úmida ⁽⁴⁾ (Munsell) | T ⁽⁵⁾ | Estrutura ⁽⁶⁾ | Consistência ⁽⁷⁾ | | | P ⁽⁸⁾ | Granulometria (g/Kg) | | | B/A | Silt/Arg | Text. | V |
| | | | | | | S | U | M | | Argila | Silte | Areia | | | | % |
| <i>Perfil 1 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico – LVAd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FZOLAG 1 | A | 0 - 20 | 7,5YR 4/6 | a. | fra. mto. p. gran. | s. | mfr. | npl. | lpg. | 118 | 48 | 833 | | 0,40 | A.F. | 22 |
| | Bw | 20 - 40 | 7,5YR 5/6 | a. | fra. mto. p. gran. | m. | mfr. | npl. | lpg. | 167 | 122 | 711 | 1,40 | 0,73 | A.F. | 16 |
| <i>Perfil 2 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico – LVAd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FZOLAG 2 | A | 0 - 20 | 7,5YR 5/4 | as. | fra. mto. p. gran. | s. | s. | npl. | lpg. | 118 | 73 | 809 | | 0,61 | F.A. | 19 |
| | Bw | 20 - 40 | 7,5YR 6/8 | a | fra. mto. p. gran. | m. | mfr. | npl. | lpg. | 142 | 97 | 760 | 1,20 | 0,68 | F.A. | 15 |
| <i>Perfil 3 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico – LVAd</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ASCXDA 1 | A | 0 - 20 | 7,5YR 4/6 | as. | fra. mto. p. gran. | m. | s. | npl. | lpg. | 337 | 49 | 614 | | 0,14 | F.A. | 17 |
| | Bw | 20 - 40 | 7,5YR 6/8 | a | fra. mto. p. gran. | m. | mfr. | npl. | lpg. | 386 | 73 | 711 | 1,14 | 0,19 | F.A. | 18 |
| <i>Ponto 4 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico – Rqo</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ASCXDA 2 | A | 0 - 20 | 10YR 5/6 | ar. | Grãos simples | s | s | npl. | np | 45 | 24 | 931 | | 0,53 | AREIA | 19 |
| | C | 20 - 40 | 10YR 5/8 | ar. | Grãos simples | s | s | npl. | np | 69 | 48 | 882 | - | 0,69 | AREIA | 18 |

(¹) amostras de solo, (²)Horizonte, (³)Profundidade, (⁴)var.: variegada, (⁵)Textura: a.: argilosa, as.: argilossiltosa, (⁶)Estrutura: for.: forte, mod.: moderada, fra.: fraca, mto.: muito, p.: pequena, gru.: grumosa, gran.: granular, bl: blocos, subg.: subangular, (⁷)Seca: m.: macia, d.: dura, md.: muito dura – Úmida: fr.: friável, fm.: firme, mfm.: muito firme – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica, lpg.: ligeiramente pegajosa, npl.: não plástica, npg.: não pegajosa. Text.: Fração Granulométrica: a.f.: areia franca, f.a.: franco-arenosa

III.1.1.3 Critério de diferenciação dentro das classes de solos representativos da MBRE

Desta forma, a textura foi escolhida como parâmetro principal para diferenciação dos solos nos perfis das litopossequências estudadas e dos solos arenosos extraídos pontualmente na região. Oscilaram de muito argilosa a arenosa (Figura 27), de acordo com a classificação textural de Santos *et al.* (2015). Esta variação mostra relação textural com os materiais de origem, uma vez que foram originados a partir de rochas metasedimentares pré-intemperizadas dos Grupos Bambuí e Paranoá (FREITAS-SILVA; CAMPOS, 1998a). Esta informação concorda com Vieira *et al.* (2007), que relataram que a textura é dependente do material de origem e dos agentes naturais de formação do solo, não sendo modificada pelo cultivo e outras práticas agrícolas. No entanto, a erosão diferencial pode promover, na camada superficial do solo, pequenas variações na proporção das frações granulométricas.

Figura 27 – Classes texturais dos solos e valores dos limites das frações granulométricas



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Santos *et al.* (2015).

III.2. Atributos espectroscópicos

III.2.1 Curvas espectrais representativas das classes de solos da MBRE

Segundo Demattê (2002), a visualização da curva espectral dos solos é possível mediante a representação gráfica da relação fator de reflectância e comprimento de onda. As representações gráficas contendo as informações espectrais obtidas para cada classe de solo nas regiões do VIS-NIR-SWIR, separadas em classes espectrais por critério de similaridade no comportamento espectral, foram agrupadas e tiveram suas médias calculadas de acordo com Demattê e Nanni (2003), Franceschini *et al.* (2013) e Genú *et al.* (2013). Como há relação inversa entre o teor de argila de um solo e sua reflectância (Genú e Demattê 2013), a semelhança dos solos muito argilosos rebaixaram o fator de reflectância. Solos com textura ligeiramente mais grosseira aumentaram o albedo. Dalmolin *et al.* (2005) ressalta que, assim como a textura, a cor do solo também promove modificações na curva espectral, uma vez que os teores de matéria orgânica e/ou teores de óxidos de ferro interferem na intensidade do fator de reflectância.

III.2.2. Caracterização e agrupamento das curvas espectrais das classes de solos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF

III.2.2.1. Curvas espectrais dos solos representativos da MBRJ

A presença de minerais em um solo, bem como sua textura, teor de óxidos de ferro e de MO podem ser detectadas pela análise morfológica da curva espectral apresentada pelo solo em questão. Demattê *et al.* (2014) descreveram morfológicamente as assinaturas espectrais médias de solos representativos em alguns municípios do estado de São Paulo, de Minas Gerais e do Mato Grosso do Sul e demonstraram a capacidade desta metodologia de identificar e quantificar os principais atributos dos solos destas localidades.

As informações fornecidas pelos espectros de reflectância possibilitaram o subagrupamento das curvas semelhantes em algumas classes de solos com maior ocorrência na área de estudo. Do total de 46 espectros de solos analisados, o

agrupamento das classes de solos realizado de acordo a avaliação e diferenciação constatada a partir da descrição morfológica das curvas espectrais resultaram em 12 espectros representativos, provenientes das médias dos agrupamentos das classes de solo de ocorrência na microbacia do Ribeirão Extrema.

Segundo Martins (1998), os Latossolos são a classe de maior ocorrência na bacia do Ribeirão Extrema. Os Latossolos têm sua gênese ligada, principalmente, ao processo de latossolização ou ferratização, resultante da intensa dessilicatização dos minerais primários e secundários menos resistentes, com acumulação residual de argilominerais mais estáveis e sesquióxidos de ferro e alumínio, resultando na pequena variação de atributos entre seus horizontes (KÄMPF; CURI, 2012).

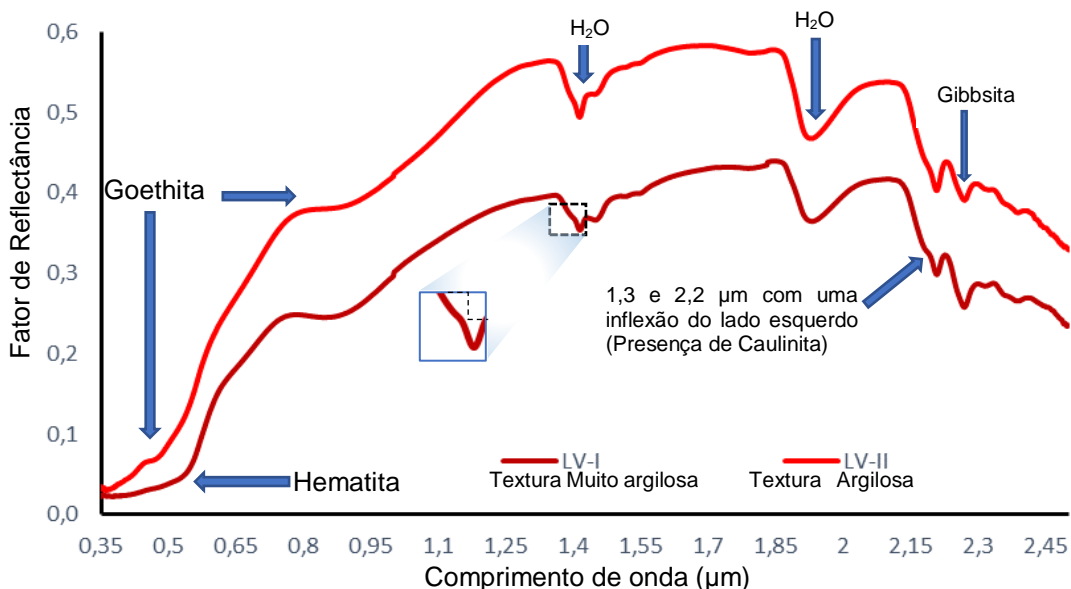
Os picos de reflectância que os espectros médios dos Latossolos Vermelhos apresentaram foram de 0,45 para o LV-II e 0,57 para o LV-I (Figura 35). O padrão geral da curva apresentou um formato inicialmente ascendente entre 0,35 e 1,3 μm , passando para um aspecto aplainado no intervalo 1,3 a 1,85 μm , e decrescendo em seguida, nas curvas espectrais de ambas as classes de solo, entre os comprimentos de onda 1,85 a 2,5 μm . O LV-II, apresenta menor índice do fator de reflectância. Representam Latossolos Vermelhos com textura muito argilosa e cores vermelho-escuro, com matizes 10R e tonalidades de valor 4 e croma 4, possivelmente em função de maior influência dos óxidos de ferro, associados ao material de origem, que são constituídas por rochas metassedimentares pelíticas que contém cimento ferruginoso, além da influência de um maior teor de MO.

O LV-I exibiu um espectro com maior valor de reflectância, que foi atribuído a sua textura menos argilosa que o LV-II (muito argilosa). Vale ressaltar, porém, que as reflectâncias mais altas em Latossolos, estão ligadas, também, às cores vermelhas mais intensas (RODRIGUES; KLAMT, 1978). Esses solos apresentaram colorações com matizes predominantes 10R com valor 4 e croma 6, provavelmente com menores teores de óxidos de ferro. De acordo com Stoner *et al.* (1980), Epiphânio *et al.* (1992) Demattê e Garcia, (1999) Demattê *et al.* (2014), as feições ocasionadas pela presença de hematita se pronunciam entre os comprimentos de onda de 0,58 μm e 0,85 μm , comprimentos em que a primeira se confunde com as feições de goethita (feição de absorção principal em 0,48 μm). Madeira Netto e Baptista, (2000) afirmam que as primeiras feições de absorção da hematita são mais largas em relação às de goethita, e estão associadas com as cores mais avermelhadas dos Latossolos Vermelhos (LV-

II) (MADEIRA NETTO *et al.*, 1997). Destaca-se, ainda, que as feições dos óxidos de ferro são mascaradas pela presença de MO, de feição de absorção de 0,6 a 1,0 μm , de acordo com Mathews *et al.* (1973), Epiphanyo *et al.* (1992), Bellinaso *et al.* (2010) e Demattê *et al.* (2014).

Tanto nos espectros médios dos horizontes A do LV-I e LV-II quanto nas curvas dos LV da figura 28, as feições de caulinita (1,4 e 2,2 μm) e de Gibbsita (2,265 μm) podem ser claramente observadas nos espectros agrupados, que vão de menor a maior fator de reflectância e que estão de acordo com os padrões encontrados por Demattê *et al.* (2014). A presença da caulinita é detectada por sua feição caracterizada por uma pequena inflexão do lado esquerdo nos comprimentos 1,4 e 2,2 μm , no formato da banda de absorção relacionado à água adsorvida do solo (DEMATTÊ *et al.*, 2015). Foi possível notar a presença sutil da feição típica da Gibbsita em ambos os espectros dos LV. A região de 1,4, 1,9 μm possui dois picos de absorção da água adsorvida, de água higroscópica e de grupos hidroxila estrutural de argilominerais (DALMOLIN *et al.*, 2005). Buol *et al.* (2011) e Kämpf e Curi (2012) afirmam que a presença de oxihidróxidos de alumínio (gibbsita) no solo indica um maior grau de intemperismo. A avaliação do aspecto morfológico das curvas e feições da absorção dos perfis de LV estudados mostram que os resultados estão de acordo com os padrões observados por Bellinaso *et al.* (2010) e Demattê *et al.* (2014) em Latossolos Vermelhos.

Figura 28 – Espectros médios representativos dos Latossolos Vermelhos (LV) estudados na microbacia do Ribeirão Extrema, DF



Fonte: Elaborado pelo autor.

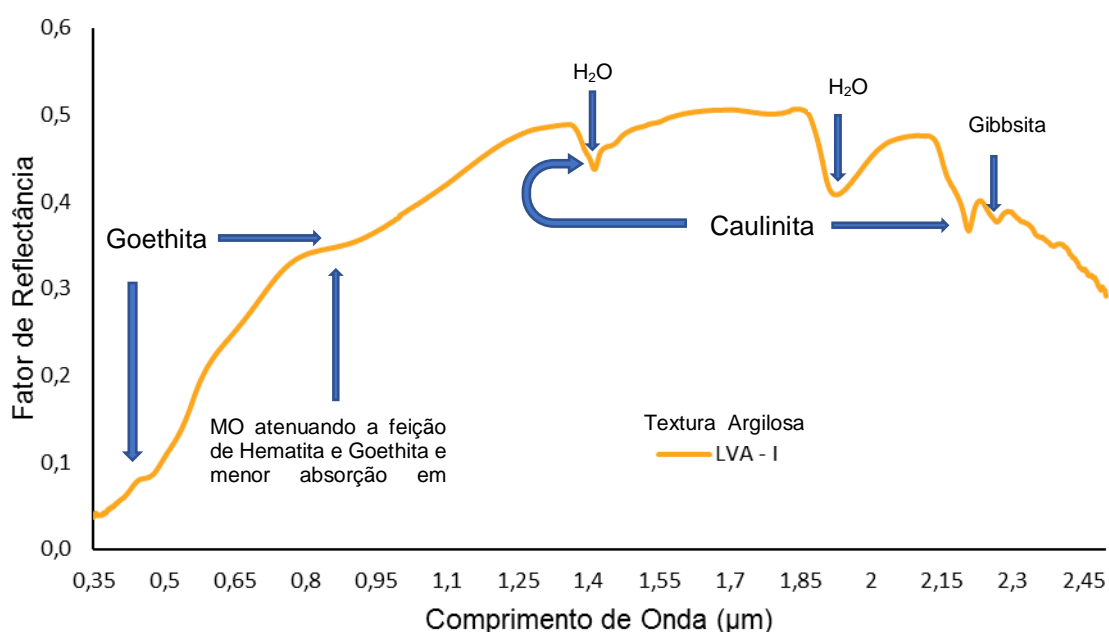
Na região da bacia do Ribeirão Extrema, os Latossolos Vermelho-Amarelos ocupam o segundo lugar em ocorrência (Martins, 1998). A maior intensidade de fator de reflectância dos LVA alcançou 0,5 no LVA-I. Suas informações espectrais geraram curvas com aspecto geral com tendência ao aplainamento na faixa espectral estudada (0,35 a 2,5 μm).

O LVA-I se tornou representante dos LVA argilosos da MBRE (Figura 29), com cores com matizes 5YR, possivelmente pelo menor teor de óxidos de ferro ou de MO, aliada a uma textura menos argilosa, suficientes para mascarar as feições dos óxidos de ferro como descrito por Dalmolin *et al.* (2005). Madeira Netto e Baptista (2000) destacam as feições de goethita, nos comprimentos 0,48 e 0,9 – 0,95 μm , que na presença deste óxido de ferro, fazem que os solos tendam a apresentar cores mais amareladas. Com a observação das curvas, foi possível a identificação da feição em “degrau” (pequena inflexão do lado esquerdo) da caulinita (1,4 e 2,2 μm), feições da Gibbsita (2,265 μm), e dos grupos hidroxila (na região de 1,4 μm e 1,9 μm) (DALMOLIN *et al.*, 2005). Para Buol *et al.* (2011) e Kämpf *et al.* (2012), a presença de óxidos de alumínio (Gibbsita) no solo está relacionada a seu grau de evolução, indicando um alto grau de intemperismo.

Observou-se, também, um abrandamento das feições na faixa espectral de 0,35 a 1,0 μm , possivelmente causado pela presença de MO, que além de provocar esse efeito na curva espectral, reduz o fator de reflectância em toda a faixa VIS-NIR-SWIR, mascarando as feições típicas da caulinita (1,4 e 2,2 μm), além dos óxidos de ferro (DEMATTÊ *et al.*, 2000).

Bellinaso *et al.* (2010) lembram que, no geral, os LVA exibem curvas espectrais semelhantes às dos LV, fato constatado na comparação entre os espectros desses solos. Contudo, com a observação da figura 29, é possível perceber que a absorção típica da presença de hematita (0,8 μm), exibida pelos LVA, mostra-se menos pronunciada do que nos LV. A coloração vermelha amarelada é decorrente da maior proporção de goethita em relação à hematita (DEMATTÊ *et al.*, 2015).

Figura 29 – Espectro médio representativo de Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) estudados na microbacia do Ribeirão Extrema, DF



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a Embrapa (2014), os Plintossolos são solos constituídos por material mineral e apresentam horizonte plíntico ou litoplíntico ou concrecionário que se iniciam dentro de 40 cm ou dentro de 200 cm, quando imediatamente abaixo do horizonte A ou E ou, ainda, de outro horizonte que apresente cores pálidas, variegadas ou com mosqueados em maior quantidade. De acordo com Kämpf e Curi (2012), a plintita advém da segregação, mobilização, transporte e concentração de íons e compostos de Ferro (hematita e goethita), em que esse elemento pode ser tanto proveniente do material de origem quanto translocado de outros horizontes, ou mesmo proveniente de áreas adjacentes mais elevadas, formando de nódulos ou concreções ferruginosas ancoradas em pequenos cristais de quartzo ou de outro mineral. A esse processo pedogenético dá-se o nome de plintitização, com ou sem formação de petroplintita (plintita endurecida irreversivelmente).

Ocorrências da classe Plintossolos Pétricos concrecionários na região são comuns (FREITAS-SILVA; CAMPOS, 1998). Essas ocorrências são verificadas, principalmente, em pequenos morros residuais ao longo de toda a microbacia estudada, sobretudo associados às litologias do Grupo Paranoá e em áreas com resquícios da Superfície Geomorfológica Chapadas Elevadas do DF (NOVAES PINTO, 1994). Altamente resistentes ao intemperismo, as petroplintitas em morrotes

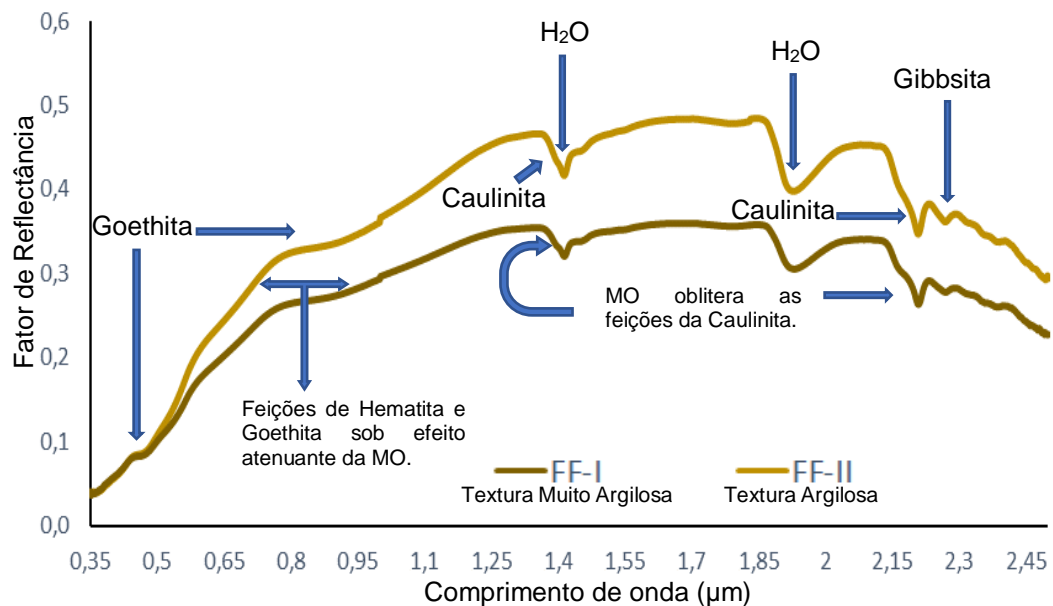
residuais resistiram às transformações decorrentes da dinâmica pedogeomorfológica (MARTINS *et al.*, 2004). Os morrotes resilientes evidenciam a evolução geomorfológica a partir da superfície geomorfológica denominada de Chapadas Elevadas, cujos processos erosivos e pedogenéticos subsequentes originaram uma outra superfície, de altitudes discretamente menores que a primeira, ocorrendo em toda a porção leste do DF. Frequentemente, materiais de origem metassedimentar pelíticos do Grupo Bambuí encontram-se pouco alterados sob os Plintossolos Pétricos Concrecionários (FFc) nessa superfície geomorfológica.

As curvas espectrais dos FFc apresentaram um fator de reflectância máximo de 0,35, em FF-I, e 0,5, em FF-II (Figura 30). A baixa reflectância em FF-I possivelmente foi influenciada pela textura muito argilosa associada ao efeito atenuante da MO sobre as feições da curva; ainda assim, foi possível observar feições predominantes de goethita (0,48 e 0,9 – 0,95 μm), que, de acordo com Ribeiro *et al.* (2012), confere a esses solos uma coloração mais amarelada. Observa-se que as feições características da presença de óxidos de Fe em pontos específicos da curva (0,48 e 0,9 – 0,95 μm) foram mascaradas no FF-I, muito provavelmente em decorrência do efeito atenuante do alto teor de MO na curva espectral desses solos. A MO também causou modificações nas feições de absorção de caulinita (1,4 e 2,2 μm), de grupos hidroxila (1,4 e 1,9 μm) e de Gibbsita (2,265 nm). Não obstante, a textura argilosa do FF-II nos horizontes superficiais ocasionou um maior albedo, apesar da suavização de feições ao longo de toda a faixa espectral de 0,35 a 2,5 μm , o que, segundo Dalmolin *et al.* (2005), é decorrente da influência da MO nestes horizontes.

Ao observar as características morfológicas e físicas dos FFc, nota-se uma certa semelhança com a classe dos Latossolos, especialmente à dos LVA, uma vez que a análise espectroscópica foi realizada na fração TFSA, que corresponde à matriz latossolólica desses solos. Esse fato também é observado nas curvas espectrais destes solos. Nos espectros dos Plintossolos, particularmente os Pétricos Concrecionários, as características que distingue dos LVA estão na feição da Gibbsita (2,265 μm), menos marcante nos FFc, e em que se verifica maior influência da MO na suavização das curvas nos FFc. A ocorrência de maior umidade ao longo dos perfis destes solos em função do impedimento à percolação de água pelas petroplintitas e formação dos horizontes concrecionários ou litoplínticos acaba por incorrer no

aumento nos teores de MO. Muito dessa semelhança reside no fato de as análises espectroscópicas terem sido conduzidas na fração TFSA no horizonte A; dessa forma, as petroplintitas foram suprimidas, o que resultou em uma curva espectral do FFC constituindo uma matriz latossólica, cuja resposta espectral comportou-se de maneira análoga à apresentada pelos Latossolos, em especial a dos LVA.

Figura 30 – Espectros representativos de Plintossolos Pétricos Concrecionários (FFc) estudados

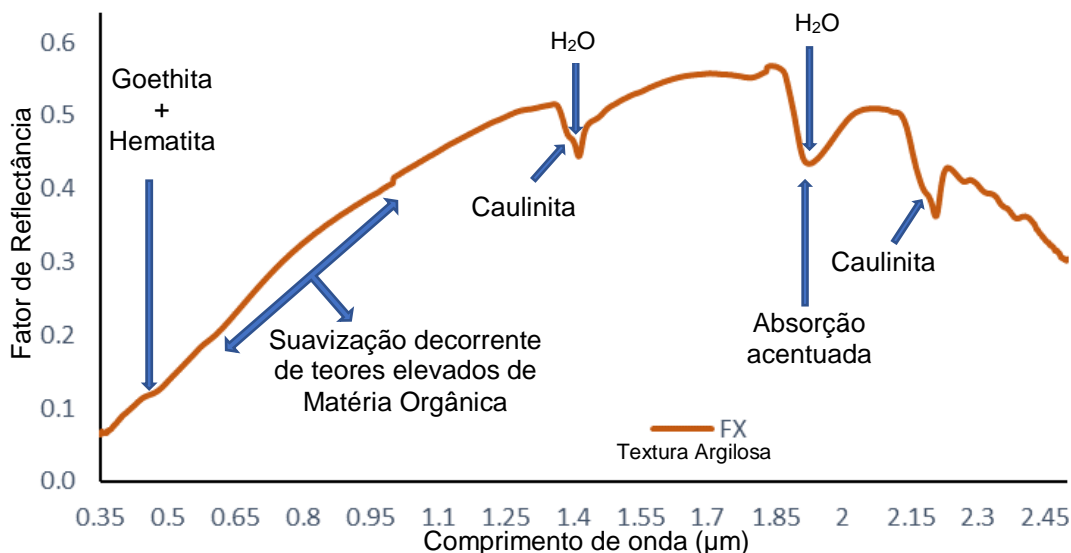


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os Plintossolos Háplicos correspondem a solos de ocorrência restrita na área estudada. Por esse motivo, foi avaliada somente uma curva espectral considerada representativa dos horizontes “A” desta classe de solo (Figura 31). O aspecto geral desta curva espectral apresentou fator de reflectância máxima de 0,5, em que a MO influenciou bastante, principalmente na região entre 0,35 e 1,35 µm, em que mascarou as impressões comuns atribuídas à presença de óxidos de ferro, tanto da goethita (0,48 e 0,9-0,95 µm) quanto da hematita (0,58 e 0,85 µm). Resultados semelhantes foram encontrados por Bellinaso *et al.* (2010) e Demattê e Terra (2014). São visíveis as feições de absorção causadas pela caulinita, evidenciada pela inflexão do lado esquerdo à altura de 1,4 e 2,2 µm. Além disso, apresentou feição pouco pronunciada de Gibbsita (2,265 µm) e feições de absorção do grupo hidroxila em 1,4, 1,9 (probabilidade de presença de argilominerais 2:1) e 2,2 µm (Figura 39). Dalmolin *et*

al. (2005) consideram que o pico de absorção acentuado em 2,2 μm deve-se, possivelmente, às condições de restrição à percolação da água dos FX, sujeitos ao efeito temporário de excesso de umidade (Embrapa, 2014).

Figura 31 – Espectro representativo de Plintossolo Háplico (FX) estudado da microbacia do Ribeirão Extrema, DF

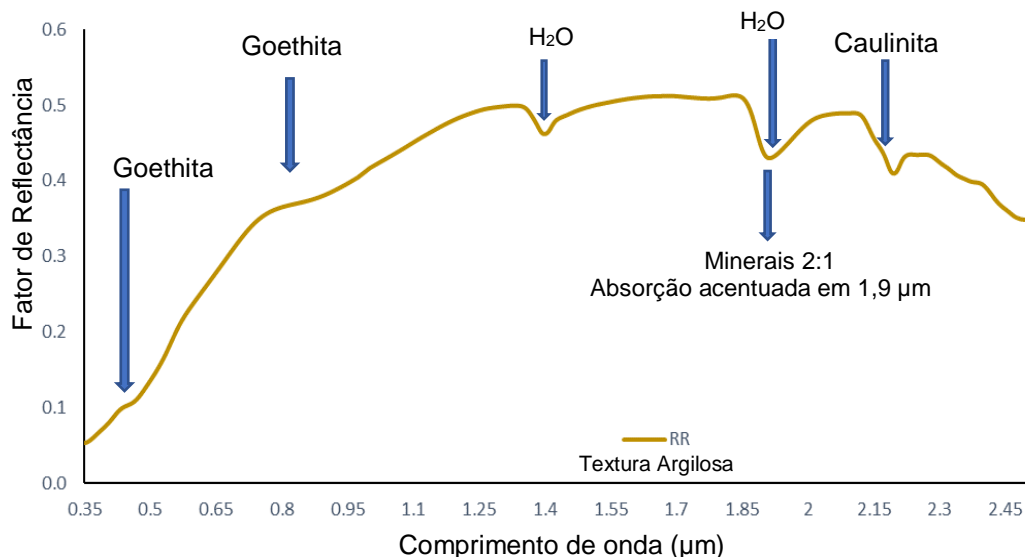


Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a Embrapa (2014), os Neossolos Regolíticos são solos jovens, que apresentam baixo grau evolutivo. São características marcantes desses solos a presença de minerais facilmente alteráveis, argilominerais 1:1 e 2:1, bem como sesquióxidos de Ferro e Alumínio na fração argila, demonstrando raras modificações do material de origem, devido à insignificante atuação dos processos pedogenéticos.

O espectro médio dos Neossolos Regolíticos (RR) apresentou um fator de reflectância de 0,5 (Figura 32). De acordo com Clemente *et al.* (2000), apesar de ser um solo argiloso, o teor de minerais mais estáveis, como o quartzo – particularmente na fração areia – é responsável pelo aumento da reflectância no RR. A curva espectral apresentou feições de absorção típicas de óxidos de ferro, com predomínio da goethita (0,48 e 0,9 μm), além de caulinita pouco pronunciada no pico de absorção (2,2 μm). Também foi verificada a presença de grupos hidroxila e água adsorvida (1,4 e 1,9 μm). A absorção acentuada em 1,9 μm indica a presença das feições de argilominerais 2:1 (DEMATTÊ *et al.*, 2014).

Figura 32 – Espectros representativos de Neossolos Regolíticos (RR) estudados da microbacia do Ribeirão Extrema, DF



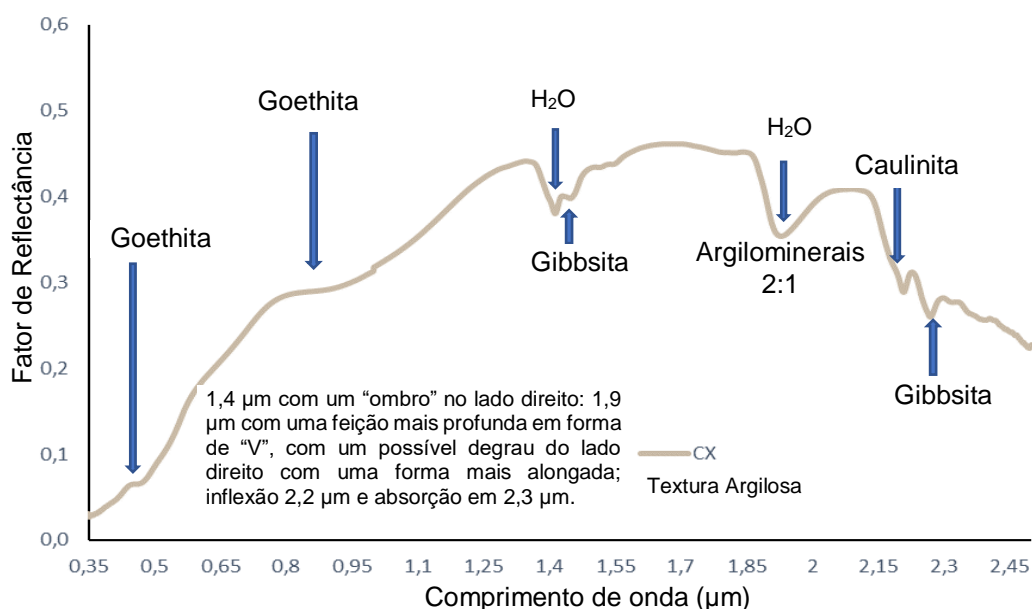
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os Cambissolos constituem solos de baixo grau de evolução, rasos, com cores variadas, e que apresentam elevados teores de silte (Embrapa, 2014). Segundo Pereira *et al.* (2010), alguns exemplares destes solos apresentam, feições claras de argilominerais 2:1, além de notar-se presença minerais primários mais instáveis, com grande herança do material de origem em função pelo baixo grau de pedogênese destes solos.

O Cambissolo Háptico exibiu uma curva espectral com intensidade média do fator reflectância do solo de 0,45, contendo feições típicas da presença de óxidos de ferro, minerais 2:1; hidroxilas além das implicações dos efeitos de máscara provenientes da presença de MO e óxidos de ferro. As curvas espectrais dos CX (Figura 33) apresentaram comportamento semelhante ao CX analisado por Bellinaso *et al.* (2010), em que o aspecto geral foi ascendente até 1,9 µm e descendente até 2,5 µm, com as bandas de absorção centradas em 1,4, 1,9 e 2,2 µm (caulinita). O espectro médio do CX mostrou as feições de goethita (0,48 µm), de hematita (0,58 µm), de argilominerais 2:1 (1,9 µm), de caulinita (2,2 µm) e dos grupos hidroxila (1,4 e 1,9 µm). Pode-se perceber as feições de presença de óxido de ferro (absorção na região de 0,9 µm) e uma inflexão típica da presença de goethita (0,45 a 0,48 µm). Também são percebidas rochas metassedimentares pelíticas do Grupo Paranoá e afins (Bambuú e Canastra), já pré-intemperizadas na sua formação, quando originam solos pouco evoluídos, como o CX. De acordo com Barbosa *et al.* (2009), o argilomineral 1:1 é

predominante e, quando ocorre argilomineral 2:1, é geralmente representado pela illita, de maneira mais expressiva na fração silte. Demattê (2002) atribui à presença de quartzo na fração areia o aumento do fator de reflectância do visível ao infravermelho nestes solos. O baixo número de perfis pedológicos contendo esta classe de solo fez com que se analisasse apenas um espectro médio dessa classe, já que os dois CX encontrados possuíam características semelhantes.

Figura 33 – Espectro representativo de Cambissolo Háplico (CX) estudado na microbacia do Ribeirão Extrema, DF



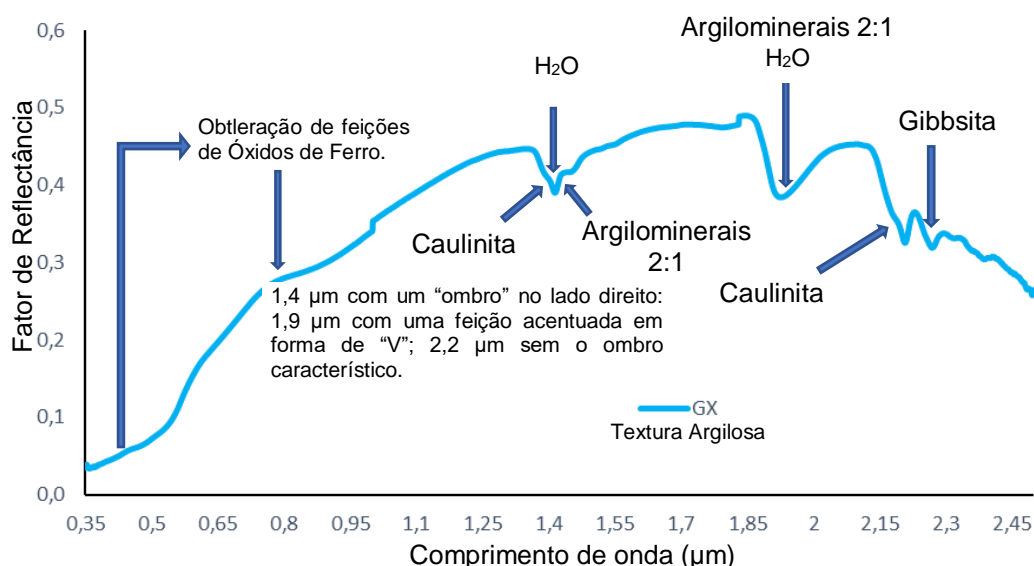
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como regra, os Gleissolos ocupam áreas pontuais na região da MBRE, assim como na MBRJ, decorrente da escassez de áreas inundáveis onde esses solos (Solos Hidromórficos) são formados, já que os vales das drenagens são bem encaixados. De acordo com Kämpf e Curi (2012), a intensa atividade hidromórfica é caracterizada por processos de redução e de remoção de compostos de ferro, e de acúmulo de MO – com ou sem alternância de oxidação-redução – por efeito de flutuação de nível do lençol freático, em condições de saturação por umidade, em regime constante ou intermitente. Esse processo pedogenético é denominado gleização ou redoximorfismo (Embrapa, 2014).

Os valores máximos de fator de reflectância da curva foram de 0,5 para os Gleissolos Háplicos (GX) estudados (Figura 34), com forte influência da MO, evidenciada pelo formato aplainado ascendente assumido por sua curva na faixa entre

0,35 e 1,3 μm . Para Epiphânio *et al.* (1992), a ausência ou a presença de apenas pequenos traços de óxidos de ferro nesses solos é característica de hidromorfismo, uma vez que o Ferro presente nestes solos se encontra – quase em sua totalidade – sob forma reduzida. Portanto, a curva espectral do GX, apresentou fracas impressões deixadas por esses óxidos de ferro: goethita (0,48 e 0,9-0,95 μm) e hematita (0,58 e 0,85 μm). A presença de argilominerais 2:1 foi detectada nos comprimentos de onda 1,45 μm – a partir de um pequeno degrau do lado direito da feição de absorção pela água – e em 1,9 μm , pela forte absorção exibida pela curva espectral. Também foi possível perceber feições de caulinita (1,3 e 2,2 μm), dos grupos hidroxila (1,4, 1,9 e 2,2 μm) e de Gibbsita (2,265 μm), concordando com a descrição de GX realizada por Sato (2015). As oscilações de intensidade dos regimes de alagamento das planícies de inundação justificam a variação na composição granulométrica e mineralógica apresentadas por esses solos.

Figura 34 – Espectro representativo de Gleissolo Háptico (GX) estudado da microbacia do Ribeirão Extrema, DF



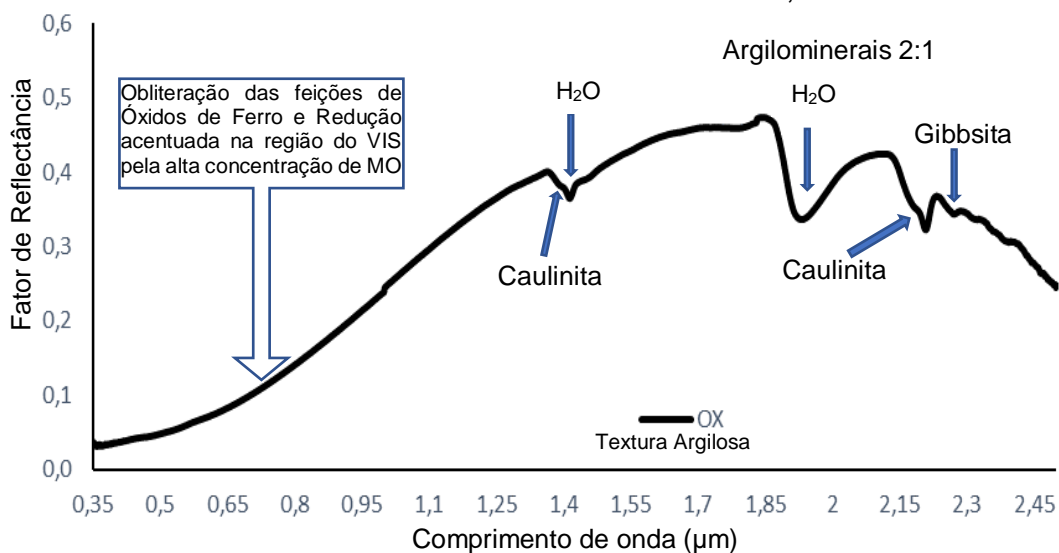
Fonte Elaborado pelo autor.

Dentre os solos com baixo grau evolutivo, os Organossolos se destacam, uma vez que são solos formados pelo acúmulo de material orgânico em diferentes níveis de decomposição, o que lhes confere níveis variados de escurecimento em decorrência dos altos teores MO (Embrapa, 2014). Segundo a Embrapa (2014), a pluviosidade periódica, associada a superfícies mal drenadas, leva o solo a

permanecer saturado com água por algum tempo, fato que resulta em uma decomposição mais lenta da MO; dessa maneira, o material orgânico acumulado na superfície se mistura aos minerais presentes formando os Organossolos.

A curva espectral do Organossolo Háplico (OX) estudado apresentou valores baixos de fator de reflectância na faixa entre 0,35 e 1,35 μm (Figura 35), em função de altos teores de MO, que reduzem consideravelmente a reflectância nesse intervalo de comprimento de onda, produzindo formato plano a côncavo, em acordo com as conclusões de Demattê e Terra (2014). A baixa resposta espectral apresentada pelo OX na faixa espectral do visível (0,35 a 0,76 μm) justifica as cores escuras exibida por esses solos. Esta região do espectro do OX apresentou valores de fator de reflectância variando desde de 0 a cerca de 0,17, decorrente da elevada absorção (baixa reflectância) da REM nessa faixa do espectro (EPIPHÂNIO *et al.*, 1992). Apesar da influência negativa da MO sobre as feições de argilominerais 2:1 (1,9 μm), marcada pela intensa absorção neste comprimento de onda, foi possível notar a presença esparsa desses, de caulinita (2,2 μm) e de grupamento hidroxila (1,4, 1,9 e 2,2 μm). Essas feições se mostraram bastantes pronunciadas ao longo da faixa espectral analisada. A feição de Gibbsita (2,265 μm) apresentou-se pouco acentuada, sem constatação da presença de feições de óxidos de ferro na região de 0,35 a 1,2 μm (Figura 42).

Figura 35 – Espectro representativo de Organossolo Háplico (OX) estudado na microbacia do Ribeirão Extrema, DF



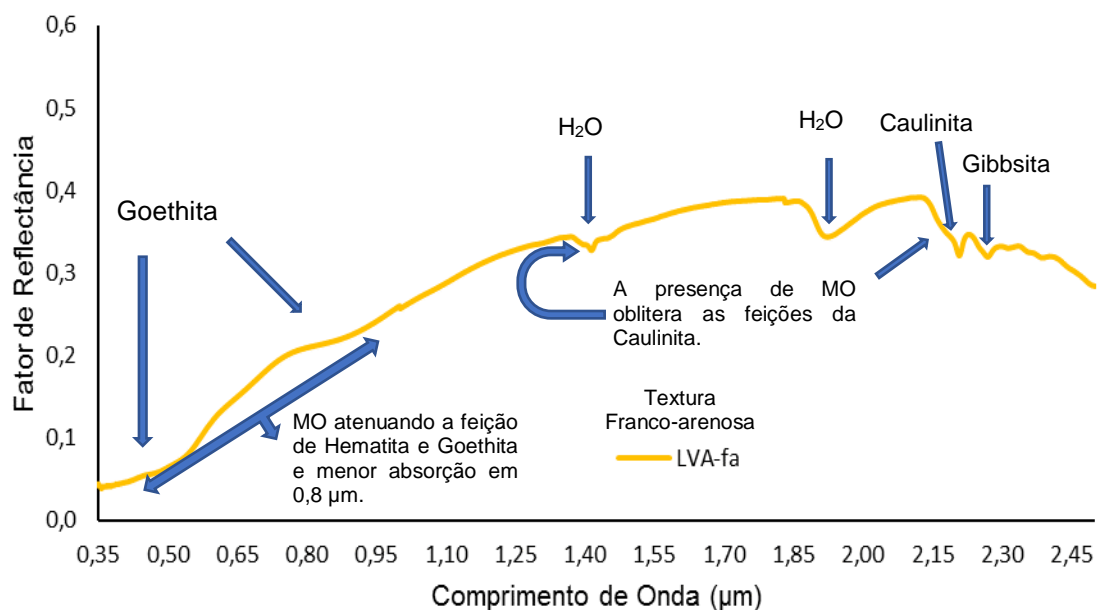
Fonte: Elaborado pelo autor.

III.2.2.2. Curvas espectrais dos solos representativos da porção Noroeste da MBRE

Na região da microbacia do Ribeirão Extrema, os Latossolos Vermelho-Amarelos ocupam o segundo lugar em ocorrência (MARTINS, 1998). A maior intensidade de fator de reflectância do LVA alcançou 0,35, valor baixo para solos com textura mais grosseira. Suas informações espectrais geraram curvas com aspecto geral com tendência ao aplainamento na faixa espectral estudada (0,35 a 2,5 μm). O LVA-af corresponde aos Latossolos Vermelho-Amarelos de textura franco arenosa matizes em torno de 7,5YR, o que pode estar relacionado com maior teor de óxidos de ferro e forte influência de MO (DALMOLIN *et al.*, 2005). Madeira Netto e Baptista (2000) chamam a atenção para as feições de goethita nos comprimentos 0,48 e 0,9 – 0,95 μm . Na presença deste óxido, os solos tendem a apresentar cores mais amareladas. Com a observação das curvas, foi possível a identificação da feição em “degrau” (pequena inflexão do lado esquerdo) da caulinita (1,4 e 2,2 μm), feições da Gibbsita (2,265 μm), e dos grupos hidroxila (na região de 1,4 μm e 1,9 μm) (DALMOLIN *et al.*, 2005). Para Buol *et al.* (2011) e Kämpf *et al.* (2012) a presença de óxidos de alumínio (Gibbsita) no solo está relacionada a seu grau de evolução, indicando um alto grau de intemperismo. Observou-se também, um abrandamento das feições na faixa espectral de 0,35 a 1,0 μm , possivelmente causado por teores elevados de MO que, além de provocar este efeito na curva espectral, também reduz fator de reflectância em toda a faixa VIS-NIR-SWIR, mascarando as feições típicas da caulinita (1,4 e 2,2 μm) (DEMATTÊ *et al.*, 2000).

Bellinaso *et al.* (2010) lembra que, no geral, os LVA exibem curvas espectrais semelhantes às dos LV, fato constatado na comparação entre os espectros desses solos. Contudo, com a observação da Figura 36, é possível perceber que a zona de absorção típica da presença de óxidos de ferro (0,8 μm) exibida pelos LVA se mostra menos pronunciada do que nos LV. A coloração vermelha amarelada é decorrente da maior proporção de goethita em relação à hematita (DEMATTÊ *et al.*, 2015).

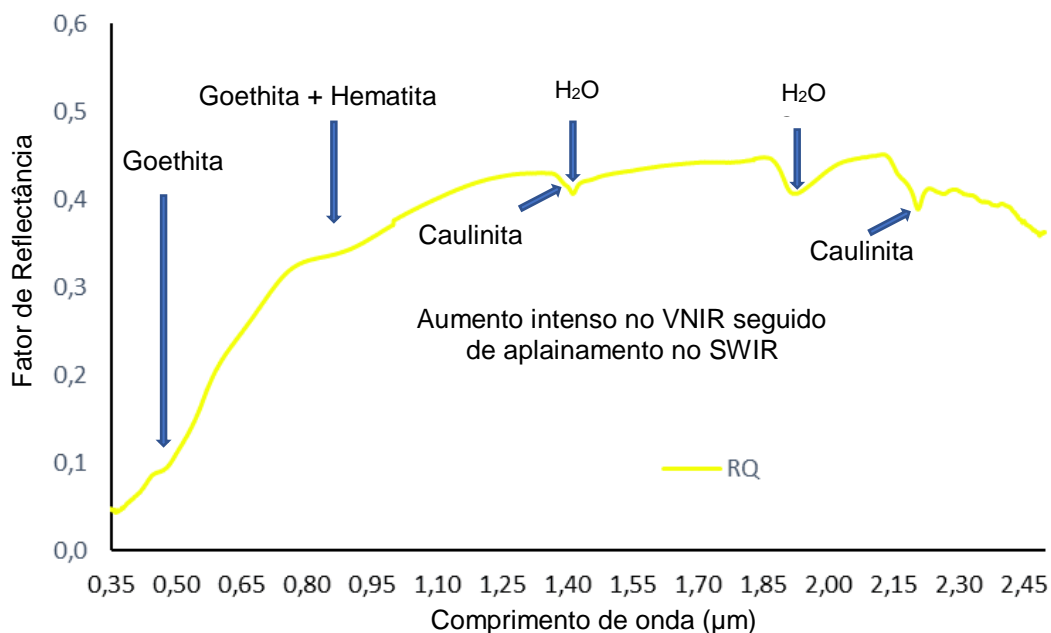
Figura 36 – Espectros médios de Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) estudados na Bacia do Ribeirão Extrema, DF



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Neossolo Quartzarênico (RQ), por definição, é um solo de textura arenosa, com baixos teores de matéria orgânica e de óxidos de Ferro. Sua mineralogia na fração areia é constituída, predominantemente, por quartzo (RESENDE *et al.*, 2007), o que resulta em elevada intensidade de reflectância (Figuras 37). Nota-se que as amostras representativas de RQ da área estudada mostraram comportamento característico desse tipo de solo, como um alto albedo – resultado, dentre outros fatores, do baixo teor de óxidos de Fe, dos minerais opacos, do material de origem arenoso e baixos teores de MO, assim como descrito em Genú e Demattê (2012). Esse solo apresentou regiões de absorção em 1,4 e 1,9 µm, porém menos intensas, devido ao efeito hidrocópico do quartzo. Essa classe de solo foi a que mais se diferenciou espectralmente das demais, em com concordância com os dados obtidos por Demattê *et al.* (2004).

Figura 37 – Espectros de Neossolos Quartzarênico (RQ) estudados da Bacia do Ribeirão Extrema, DF



Fonte: Elaborado pelo autor.

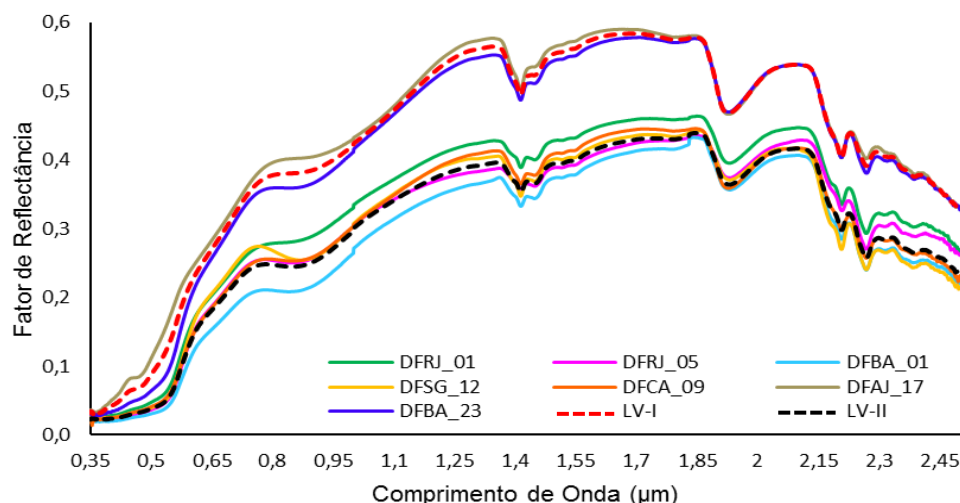
III.2.2.3. Curvas espectrais da MBRJ

As 34 curvas espectrais de horizontes superficiais “A” dos solos representativos da microbacia hidrográfica do Rio Jardim (MBRJ), indexados à Biblioteca Espectral de Solos da MBRJ, disponível no Laboratório de Geoprocessamento da FAV-UnB, formaram gráficos por classes de solos.

As classes de solos das litotopossequências foram representadas por Latossolos Vermelhos (LV), Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA), Plintossolos Pétricos concrecionários (FFc), Neossolos Regolíticos (RR), Neossolos Quartzarênicos, (RQ), Cambissolos Háplicos (CX); já nas esparsas planícies de inundação ocorrem Plintossolos Háplicos (FX), Gleissolos Háplicos (GX), Organossolos Háplicos (OX).

As sete curvas analisadas dentre os Latossolos Vermelhos resultaram em dois agrupamentos para o Latossolo Vermelho distrófico típico: Latossolo Vermelho distrófico típico textura argilosa (LV-I) e Latossolo Vermelho distrófico típico textura muito argilosa (LV-II) (Figura 38).

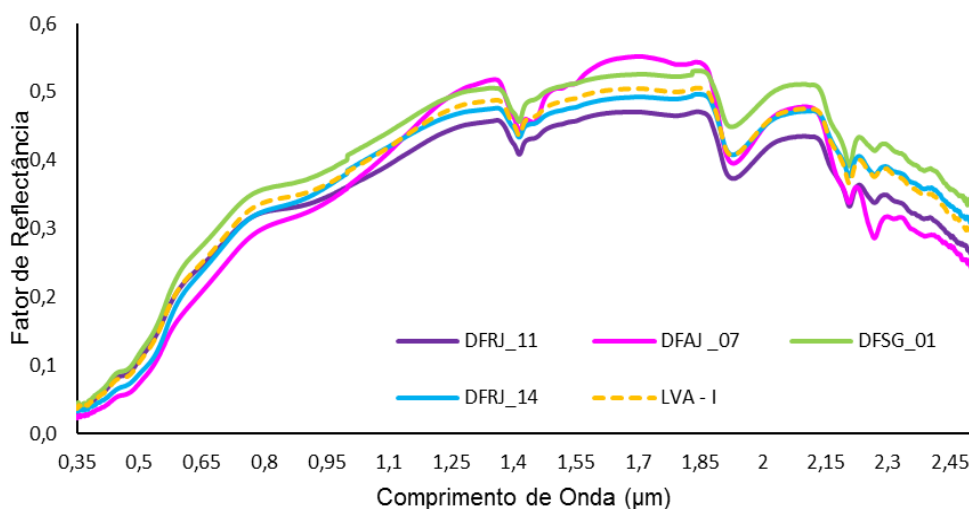
Figura 38 – Curvas espectrais dos Latossolos Vermelhos - LV representativos da MBRJ.



Fonte: Elaborado pelo autor.
Linhas pontilhadas representam os espectros médios de seus respectivos agrupamentos.

Um agrupamento representou os Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos típicos (Figura 39), que associado à granulometria apresentada por esses solo, passaram a compor os Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico textura argilosa (LVA-I).

Figura 39 – Curvas espectrais dos Latossolos Vermelho-Amarelos – LVA representativos da MBRJ

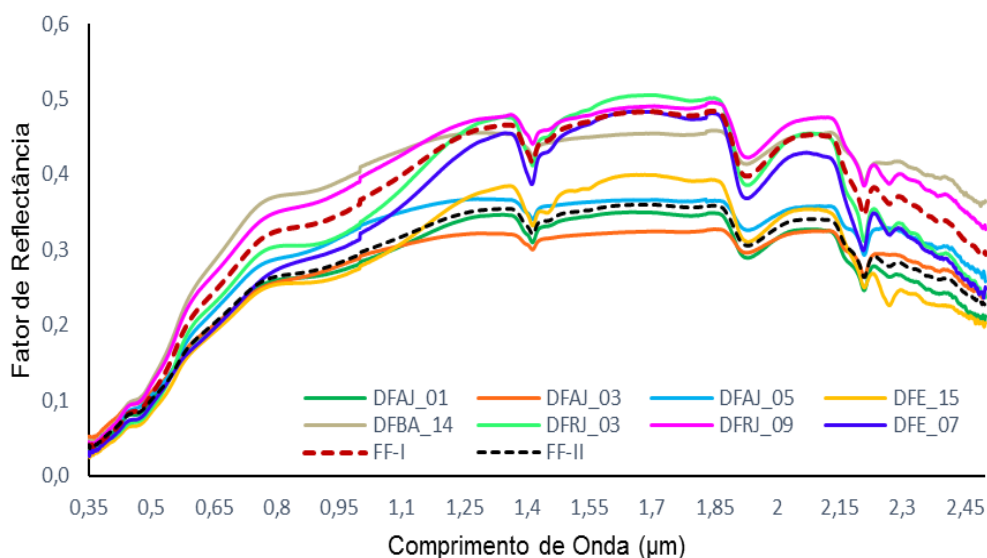


Fonte: Elaborado pelo autor.
Linha pontilhada representa o espectro médio oriundo do agrupamento espectral.

Os Plintossolos Pétricos concrecionários formaram duas classes espectrais, porém contaram com cinco assinaturas espectrais, das quais constaram: Plintossolo

Pétrico concrecionários distrófico típico textura argilosa (FF – I) e Plintossolo Pétrico concrecionários distrófico típico textura muito argilosa (FF – II) (Figura 40).

Figura 40 – Curvas espectrais Plintossolos Pétricos concrecionários – FFC representativos da MBRJ

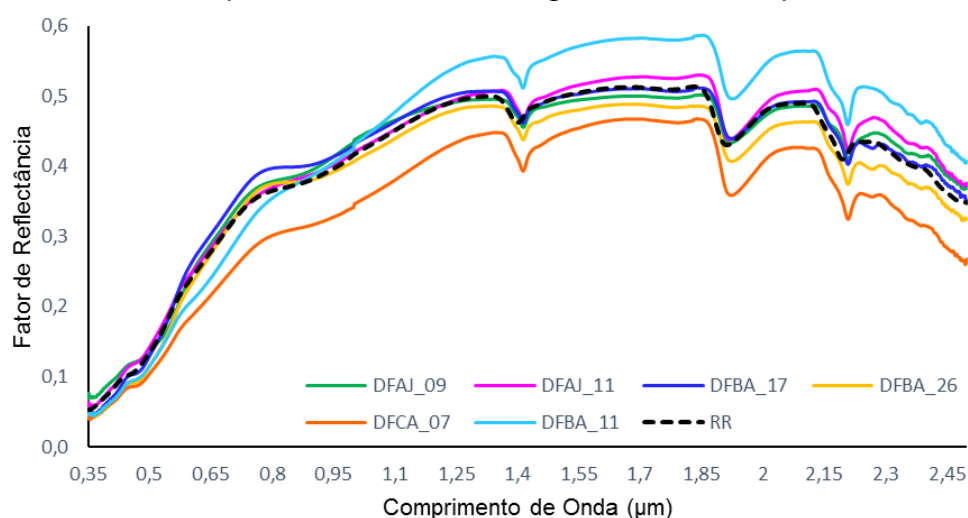


Fonte: Elaborado pelo autor.

Linhas pontilhadas representam os espectros médios de seus respectivos agrupamentos.

Os espectros das classes dos Neossolos Regolíticos geraram apenas um agrupamento com base na análise morfológica de seis curvas espectrais, dada sua similaridade, em que RR (Figura 41) representa a classe Neossolo Regolítico distrófico típicotextura argilosa.

Figura 41 – Curvas espectrais Neossolos Regolíticos – RR representativos da MBRJ

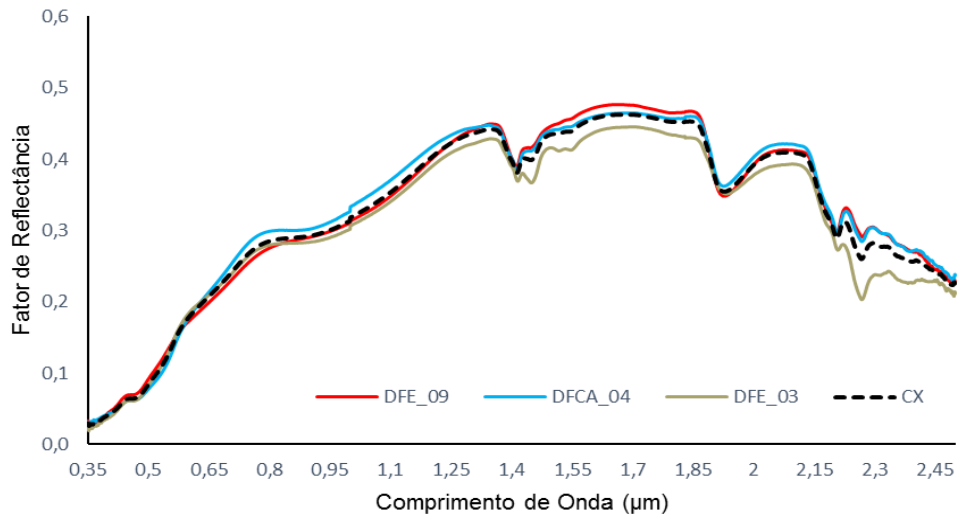


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Linha pontilhada representa o espectro médio de seu agrupamento.

A classe dos Cambissolos Háplicos, da mesma maneira, foi representada por um único agrupamento espectral a partir de três amostras representativas da classe, que foi classificado como Cambissolos Háplicos tb distróficos textura argilosa – CX (Figura 42).

Figura 42 – Curvas espectrais Cambissolos Háplicos – CX representativos da MBRJ

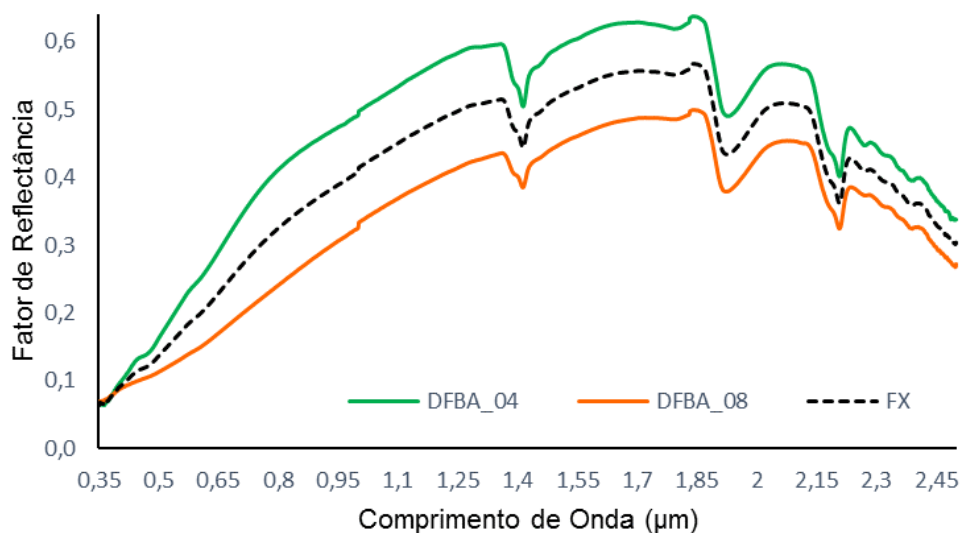


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observação: a Linha pontilhada representa o espectro médio de seu agrupamento.

Um agrupamento foi definido a partir das curvas espectrais de duas curvas de solo Plintossolo Háplico, representado como Pintossolo Háplico distrófico típico, aqui denominado FX (Figura 43).

Figura 43 – Curvas espectrais Cambissolos Háplicos – CX representativos da MBRJ

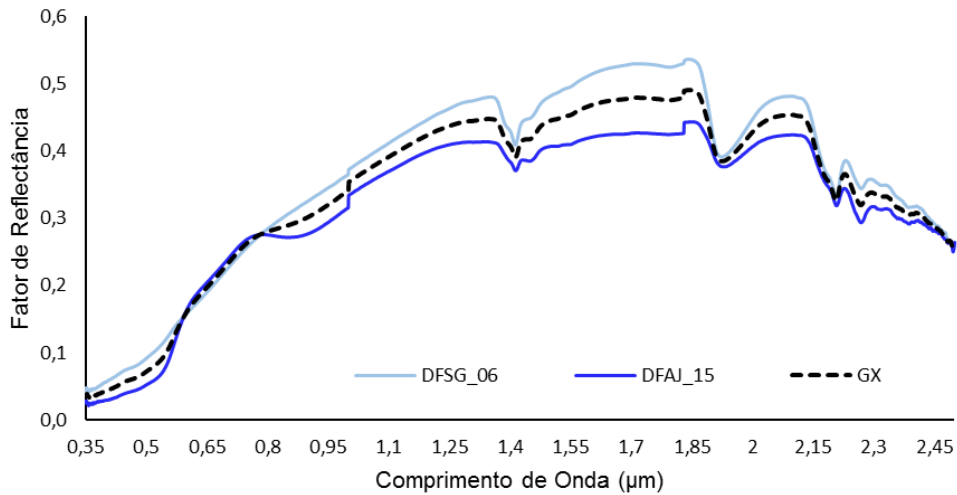


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Linha pontilhada representa o espectro médio de seu agrupamento.

Os Gleissolos Háplicos obtiveram, também, uma classe espectral dentre suas duas amostras, o que gerou um espectro médio que representa os Gleissolos Háplicos tb distrófico típico (GX) (Figura 44).

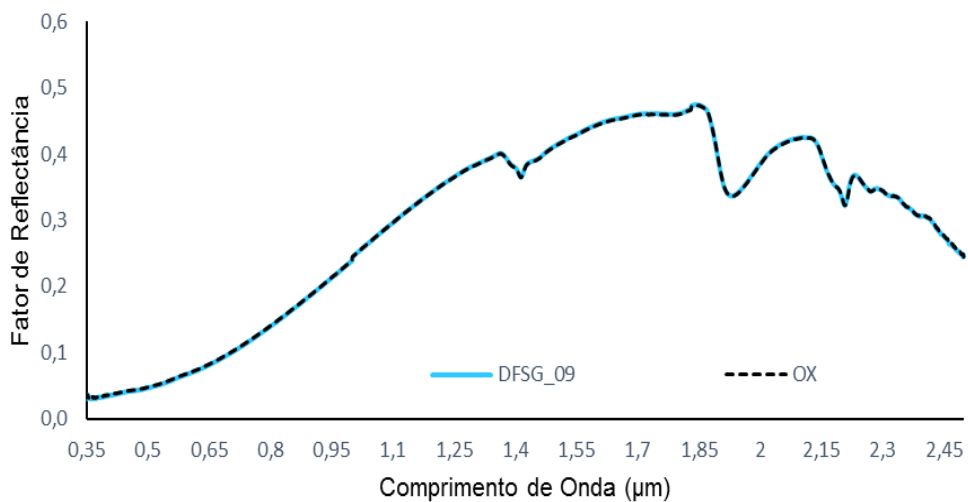
Figura 44 – Curvas espectrais Gleissolos Háplicos – GX representativos da MBRJ



Fonte: Elaborado pelo autor.
A Linha pontilhada representa o espectro médio de seu agrupamento.

Apenas uma amostra da classe dos Organossolos Háplicos foi representada. Dessa forma, sua própria curva espectral foi responsável por gerar a referência para o Organossolo Háplico Hêmico típico (OX) (Figura 45).

Figura 45 – Curva espectral do Organossolos Háplico – OX representativo da MBRJ



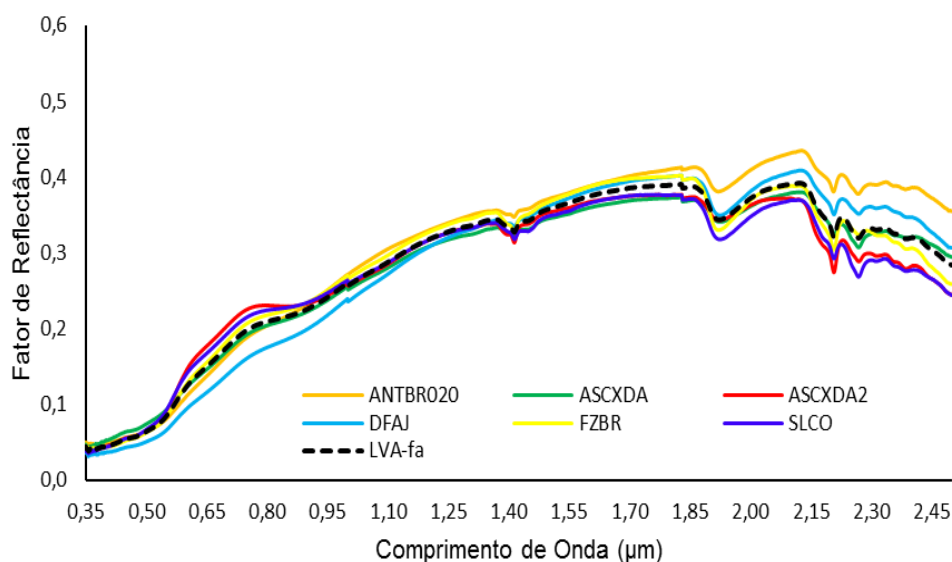
Fonte: Elaborado pelo autor.
A Linha pontilhada representa o espectro médio de seu agrupamento.

III.2.2.4. Curvas espectrais dos solos à Noroeste da MBRE

Para complementar e constituir a biblioteca spectral de solos da MBRE, foram acrescentadas 8 amostras de classes de solos coletadas e avaliadas na porção noroeste da MBRE.

Dentre as assinaturas espectrais dos solos obtidos na porção Noroeste da MBRE, os Latossolos Vermelho-Amarelos contribuíram com 6 amostras, que geraram um grupo cujo espectro médio representou a classe Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico com textura franco-arenosa (LVA-fa) (Figura 46).

Figura 46 – Curvas espectrais dos Latossolos Vermelho-Amarelos LVA-fa representativos da porção Noroeste da MBRE

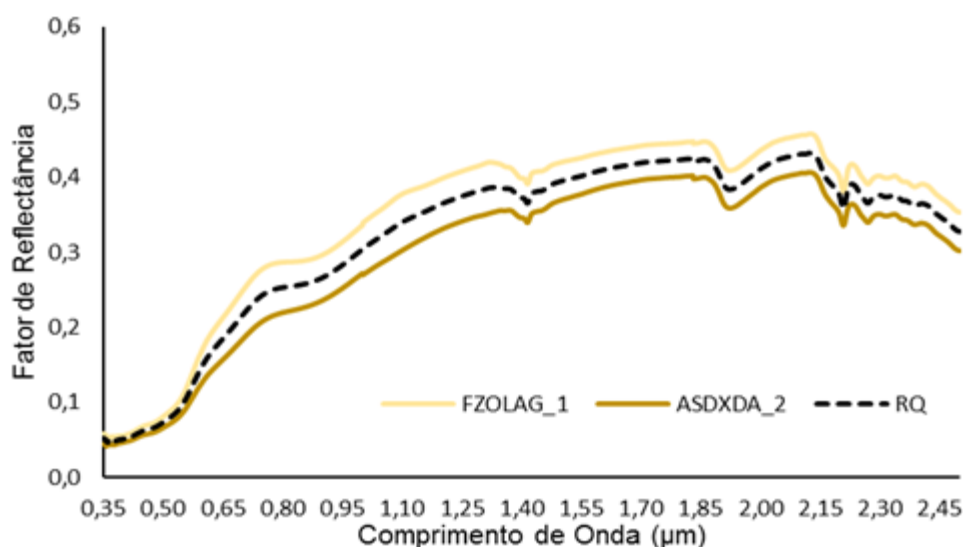


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Linha pontilhada representa o espectro médio de seu agrupamento.

A classe Neossolo Quartzarênico contou com duas curvas espectrais cuja média de reflectâncias estão em 0,35 a 2,5 µm, representando a classe Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQ) (Figura 47).

Figura 47 – Curvas espectrais dos Neossolo Quartzarênico – RQ representativos da porção Noroeste da MBRE



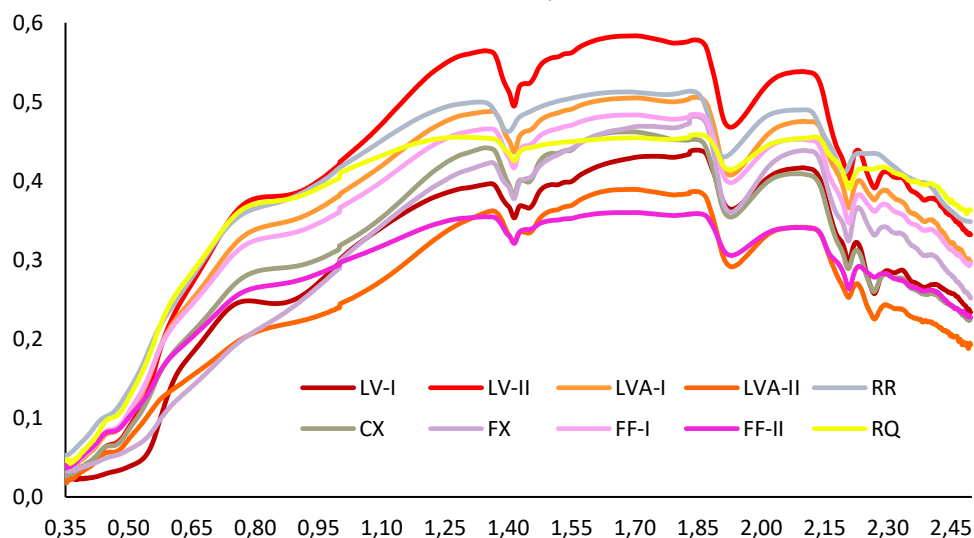
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Linha pontilhada representa o espectro médio de seu agrupamento.

III.3 Biblioteca espectral dos solos representativos da microbacia do Ribeirão Extrema

Os espectros médios obtidos a partir dos agrupamentos das classes de solos da MBRJ, similares aos da MBRE, à exceção do GX e OX, suprimidos pela baixa área de ocorrência, unidos às assinaturas espectrais dos Neossolos Quartzarênicos RQ e de Latossolos Vermelho-Amarelos, predominantemente franco-arenosa LVA-fa de ocorrência mais expressiva na microbacia estudada constituíram a biblioteca espectral (BE) dos solos da MBRE, representando a diversidade pedológica da MBRE. A figura 48 ilustra os espectros de referência utilizados nesta BE, com 10 espectros médios considerados representativos da variabilidade e distribuição dos solos da microbacia estudada obtidos pelas leituras das amostras de solos por meio do sensor hiperespectral terrestre Fieldspec Pro®.

Figura 48 – Biblioteca espectral dos solos estudados da microbacia do Ribeirão Extrema, DF



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Belinaso *et al.* (2010).
Obtida por meio do sensor laboratorial *FieldSpec® Pro*, na faixa de 0,35 a 2,5 μ m.

Os espectros médios obtidos pelas respostas espectrais variadas das classes representativas MBRE, utilizadas na elaboração da biblioteca espectral da MBRE, foram organizados segundo seu albedo, de maneira que representaram a variação textural das classes de solos, obtendo-se os agrupamentos (Tabela 19).

Tabela 19 – Principais atributos responsáveis pelo agrupamento de classes de solos

| Espectro | Textura |
|--|-----------------------|
| LVd -LATOSSOLO VERMELHO | Ditrófico típico |
| LV-I | Argilosa |
| LV-II | Muito argilosa |
| LVA _d – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO | Ditrófico típico |
| LVA-I | Argilosa |
| FF _c – PLINTOSSOLO PÉTRICO | Concrecionário típico |
| FF-I | Argilosa |
| FF-II | Muito argilosa |
| FX – PLINTOSSOLO HÁPLICO | Distrófico típico |
| FX | Argilosa |
| RR – NEOSSOLO REGOLÍTICO | Distrófico típico |
| RR | Argilosa |
| CX _{bd} – CAMBISSOLO HÁPLICO tb distrófico típico | |
| CX | Argilosa |
| LVA _d – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO | Distrófico típico |
| LVA-fa | Franco-arenosa |
| RQ _o – NEOSSOLO QUARTIZARÊNICO | Órtico típico |
| RQ | Arenosa |

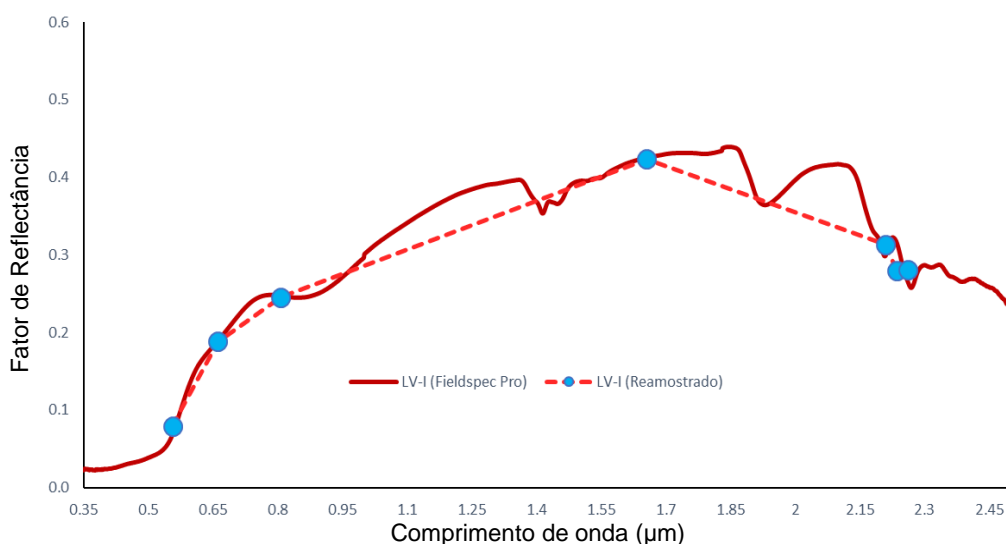
Fonte: Elaborado pelo autor

III.3.1. Compatibilização dos dados espectrorradiométricos com dados orbitais ASTER

Para que as curvas espectrais obtidas por Espectrorradiometria terrestre (*FieldSpec® Pro*) pudessem ser correlacionados com dados orbitais do sensor ASTER, foram simulados os intervalos de bandas do sensor ASTER na região do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (exceto banda 9) (SOUSA JÚNIOR *et al.*, 2008; GENÚ; DEMATTÊ, 2012; GENÚ *et al.*, 2013). Assim, os dados espectrais dos solos estudados obtidos por meio de sensoriamento próximo em ambiente de laboratório (Figura 48 – p. 172) puderam ser reamostrados nos comprimentos de onda correspondentes às oito primeiras bandas sensor ASTER (Figura 49), de forma que apresentaram o mesmo padrão de reflectância dos dados produzidos pelo próprio sensor orbital.

Esta técnica foi responsável por uma discretização do detalhamento das curvas proporcionado pelas 2.150 bandas espectrais do sensor *FieldSpec® Pro* resumindo-as para apenas 8, o que causou uma perda significativa de informações e, conseqüentemente, prejudicou sua resolução espectral. Entretanto, a curva manteve-se em seu curso, unida pelos interceptos da reflectância, com o comprimento de onda correspondente às bandas ASTER, de forma a ocupar os mesmos intervalos exibidos pelo sensor terrestre de alta resolução (Figura 49).

Figura 49 – Comparação das curvas derivadas do sensoriamento remoto terrestre (*Fieldspec Pro*) em relação à a mesma curva reamostrada para o sensor ASTER

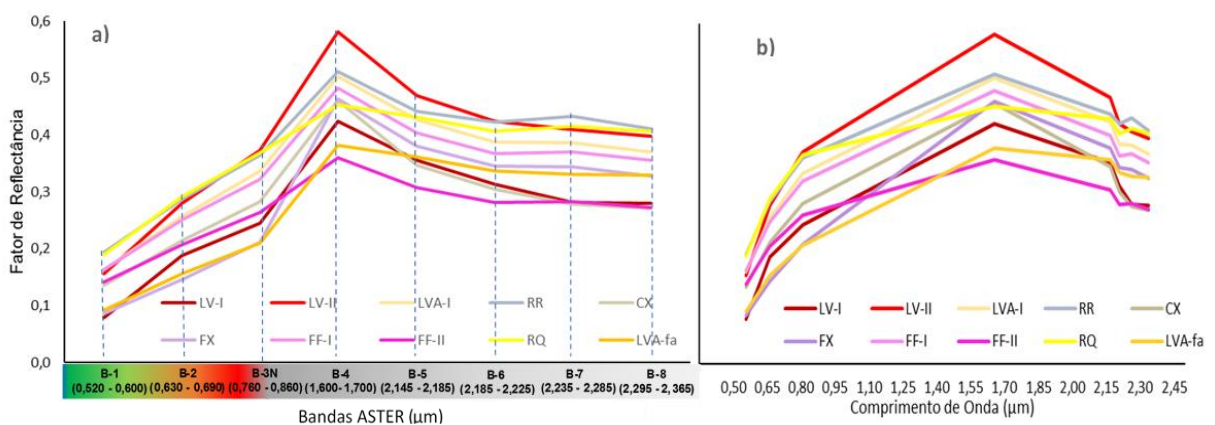


Fonte: Elaborado pelo autor.

Entre as curvas espectrais reamostradas nos comprimentos de onda correspondentes às oito primeiras bandas sensor ASTER, as que apresentaram menores fator de reflectância foram a curva representativa do LVA-I, seguida da curva do FF-I e do LV-I. As curvas espectrais que apresentaram maior fator de reflectância foram as do LV-II, seguidas pelo RR.

É possível observar que a banda B-1 (verde) e B-2 (vermelho) situadas na região do espectro visível, apresentaram elevadas absorções (baixas refletâncias). Segundo Galvão e Vitorello (1998), essa faixa reflete os óxidos de ferro (goethita e hematita) e o material orgânico. Por outro lado, uma menor absorção da REM resultou em um aumento significativo na intensidade da reflectância no comprimento de onda relacionado à banda do infravermelho próximo (B-4, 1,65 μm), acompanhadas pelas demais bandas do SWIR, com tendência ao decréscimo do fator de reflectância. Esse comportamento é descrito pela maioria dos estudos sobre constituintes dos solos, estando em acordo com os resultados obtidos por Sousa Junior *et al.* (2008) e Nawar *et al.* (2015). O comportamento do padrão espectral dos perfis de solos da biblioteca espectral obtida neste trabalho (Figura 50 a e b) está de acordo com o obtido por Belinaso *et al.* (2010), Genú e Demattê (2012) e Genú *et al.*, (2013).

Figura 50 – Biblioteca espectral dos solos estudados, com curvas espectrais reamostradas em: intervalos espectrais das bandas do sensor ASTER (μm) (a) e na faixa de comprimento de onda de 0,35 a 2,35 μm (b)

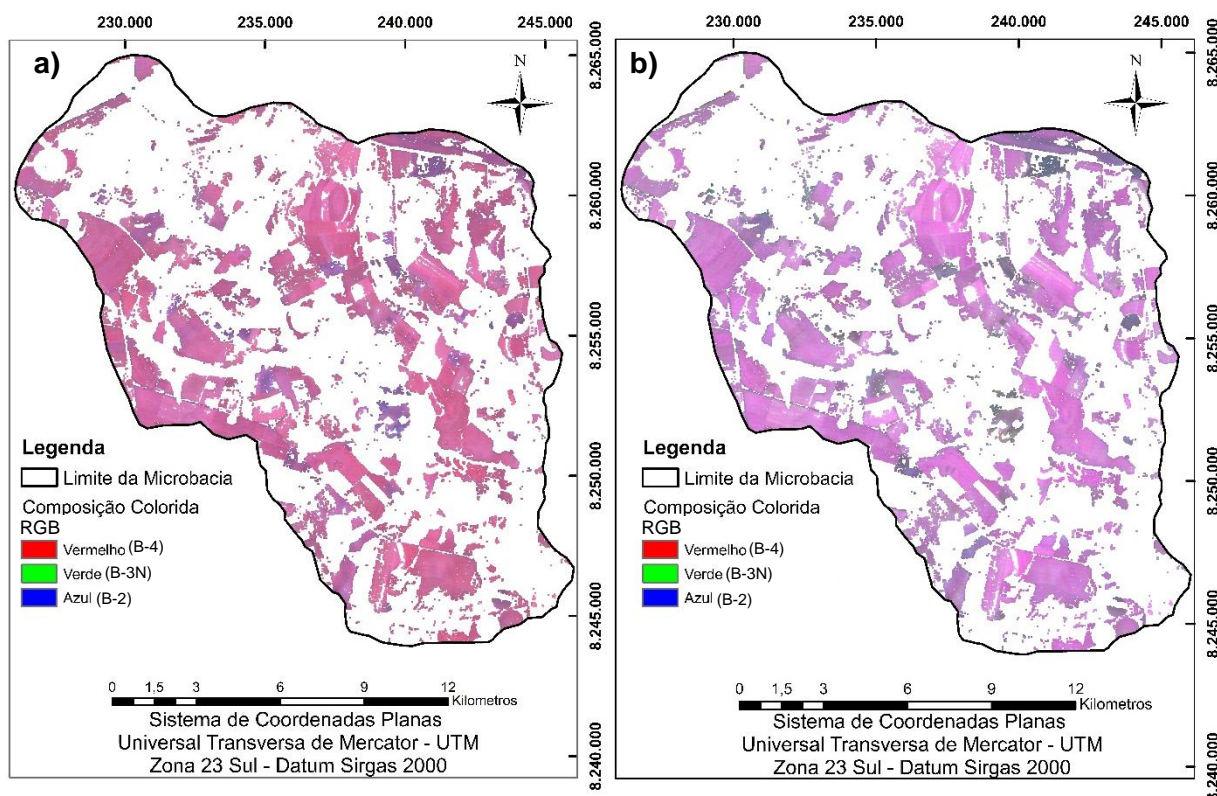


Fonte: Elaborado pelo autor.

III.4. Imagem composta de solos expostos

A Imagem Composta de Solos Expostos (IC), apresentada na Figura 51, aponta solos expostos em cores variando tonalidades de rosa a roxo em decorrência do efeito aditivo dos filtros vermelho e azul, resultante da reflectância dos solos nas composições das bandas B-4, B-3N e B-2 (Figura 41a) e B-6, B-3N e B-4 (Figura 41b) do sensor ASTER. Essas cores são típicas para exposição de solos nas combinações dessas faixas do espectro; estão, assim em acordo, com Gallo (2015) e Poppiel (2016).

Figura 51 – Imagem Composta de Solos Expostos da bacia do Ribeirão Extrema nas bandas nas composições coloridas 4R3G2B (a) e 6R3G4B (b)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as imagens estudadas da série histórica ASTER tiveram suas quantidades de pixels e suas respectivas áreas com solo exposto devidamente calculadas. Esses dados são apresentados na tabela 20. Com a técnica de sobreposição das imagens de solos expostos simples (IS) da série histórica, o percentual dessa feição foi ampliado. Na IC final, foram atingidos quase 40% da área

total da bacia, o que representa uma área de 10.168ha de pixels com maior probabilidade de representarem solos expostos.

Gallo (2015), em São Paulo, e Poppiel (2016), no DF, utilizaram-se de técnicas semelhantes de classificação supervisionada e espectral para individualizar os solos em imagens Landsat TM e OLI da série Landsat 5 e 8. Ambos obtiveram resultados expressivos, porém, para a geração do mosaico de solo exposto, recorreram de algoritmo desenvolvido no programa R (R PROJECT, 2008) para selecionar os pixels que melhor se ajustassem à IC. As áreas de solos expostos obtidas por esses autores alcançaram 53% (GALLO, 2015) e 74% (POPPIEL, 2016) nas IC das áreas analisadas. Nesta dissertação, devido ao pequeno número de imagens ASTER disponível, chegou-se a uma série histórica pouco significativa em termos de ocupação do solo no DF: a quantidade de solos expostos na IC foi inferior aos resultados alcançados por esses autores. Ademais, destaca-se a implementação de sistema de plantio direto SPD no DF, já consolidado desde a década de 1990 (SILVA et al, 2009), principalmente na porção leste do seu território, apesar de haver grandes períodos do ano em que as terras não são cultivadas – especialmente durante o período seco, quando os solos encontram-se cobertos por palhada.

Tabela 20 – Área composta por solo exposto em cada imagem ASTER da série histórica estudada da microbacia do Ribeirão Extrema, DF

| ASTER/TERRA | Solo exposto | | | |
|-----------------|--------------|-----------|-------|--------|
| | Pixels | Área (ha) | (%)* | (%)** |
| 24/10/2001 | 14.800 | 1.332 | 5,2% | 13,1% |
| 28/07/2004 | 27.600 | 2.484 | 9,7% | 24,4% |
| 20/09/2006 | 70.578 | 6.352 | 24,8% | 62,5% |
| Imagem Composta | 112.978 | 10.168 | 39,7% | 100,0% |

Fonte: elaborado pelo autor

* Porcentagem em função da área total da Bacia de 25.614 ha

** Porcentagem em função da área total de solos expostos de 10.168 ha

A metodologia de extração de feições de solo exposto das IS (Imagens Simples) da série histórica (2001, 2004 e 2009) foi responsável por suprimir 60,30% da área total da microbacia do Ribeirão Extrema. Essas áreas sem informação correspondem às áreas de Campo, Cerrado e Mata Galeria (áreas de preservação permanente ou pequenas faixas de área com vegetação nativa, como as reservas

legais de propriedades rurais), áreas cobertas por culturas perenes, cobertura vegetal em seus diversos estádios de vegetação, associada com maior ou menor exposição de solo ou, até mesmo, palhada e solos úmidos, além de pequenos reservatórios de água, construções rurais e rodovias asfaltadas. A contribuição de pixels das IS para o mosaico da IC bem como suas respectivas áreas (Tabela 20) com solos expostos variou de aproximadamente de 13,1% em 2001 para 24,4% em 2004 e 62,5% em 2006.

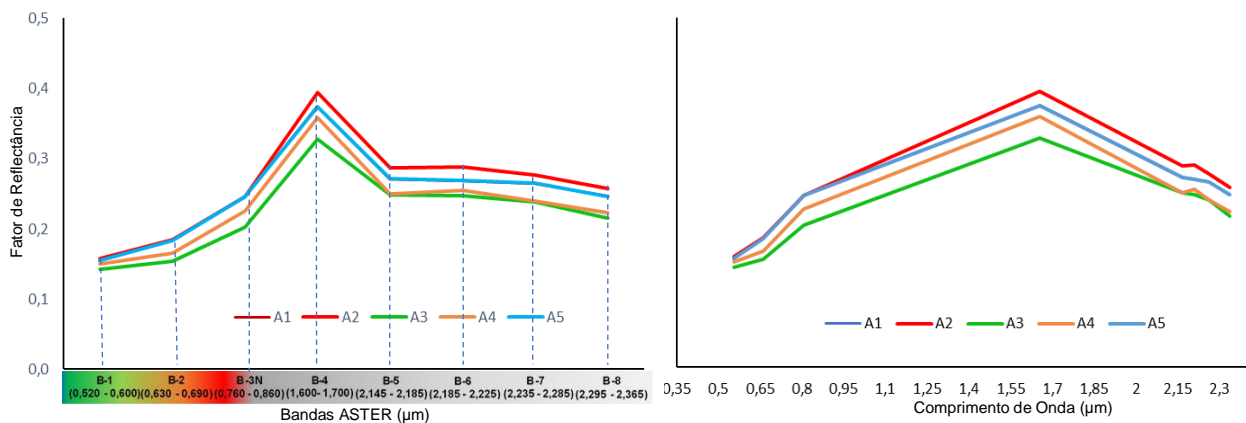
A fração argila reflete a herança do material de origem, de acordo com o grau de evolução dos solos e a intensidade do intemperismo (BELINASO *et al.*, 2010). A composição textural, assim como a constituição mineralógica de um determinado solo é imprescindível para avaliar o comportamento espectral dos solos (BEN DOR *et al.*, 2009). Solos originários de rochas vulcânicas, com elevados teores de ferro, apresentam baixa intensidade de reflectância (elevada absorção), enquanto solos oriundos de rochas sedimentares com teores médios de ferro possuem intensidades de reflectância intermediários. Já solos derivados de rochas sedimentares com baixos teores de ferro apresentam altos valores de intensidade de reflectância (baixa absorção) (BELLINASO *et al.*, 2010). Madeira Netto e Baptista (2000) relataram que, em solos tropicais, os minerais secundários de maior ocorrência nos Latossolos do DF correspondem à caulinita e a óxidos de ferro, como a hematita, goethita e Gibbsita.

A redução da intensidade de reflectância dos solos também é proporcionada, em parte, pela influência pela intensidade dos teores de MO (MENESES; ALMEIDA, 2012). Essa afirmação foi confirmada por Bellinaso *et al.* (2010), que demonstraram que a MO causa uma diminuição significativa no albedo das curvas espectrais dos solos, de maneira semelhante ao efeito dos teores mais elevados de óxidos de ferro. Para Genú e Demattê (2012), a diminuição da intensidade de reflectância dos solos ocorre principalmente na faixa de 0,4 a 2,5 μm , sob efeito de teores variados de MO que os solos contêm. Pelas composições coloridas da IC (Figura 51 a e b, p. 175) é possível identificar valores mais baixos no fator reflectância, que correspondem aos tons de rosa escuro e roxo escuro, e valores mais altos de reflectância, que se referem aos tons mais claros, ambos representados pela combinação do filtro vermelho, na banda B-3N e B-6, e do azul, na banda B-2.

A análise do padrão espectral dos solos da IC, a partir de pixels coletados em diferentes partes da imagem, demonstrou que mesmo sob do efeito *Cross-talk*, a

maior intensidade de reflectância encontra-se na região do infravermelho (1,65 μm), o que corresponde à banda B-4, seguida, em ordem decrescente, pelo albedo das bandas B-6 > B-5 > B-7 > B-8 > B-3N > B-2 > B-1 (Figura 52 a e b). Esses resultados estão dentro dos padrões observados nos comprimentos de onda; nesse sentido, são equivalentes aos dados Landsat analisados por Demattê (2002) e Gallo (2015) e Poppiel (2016) e a áreas de solos em imagens ASTER por Sousa Júnior *et al.* (2008), Genú *et al.* (2013), Nawar *et al.* (2015).

Figura 52 – Espectros coletados da Imagem Composta de solos expostos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF. a) Amostra por banda em imagens ASTER/TERRA, b) Amostras por comprimento de onda (μm)

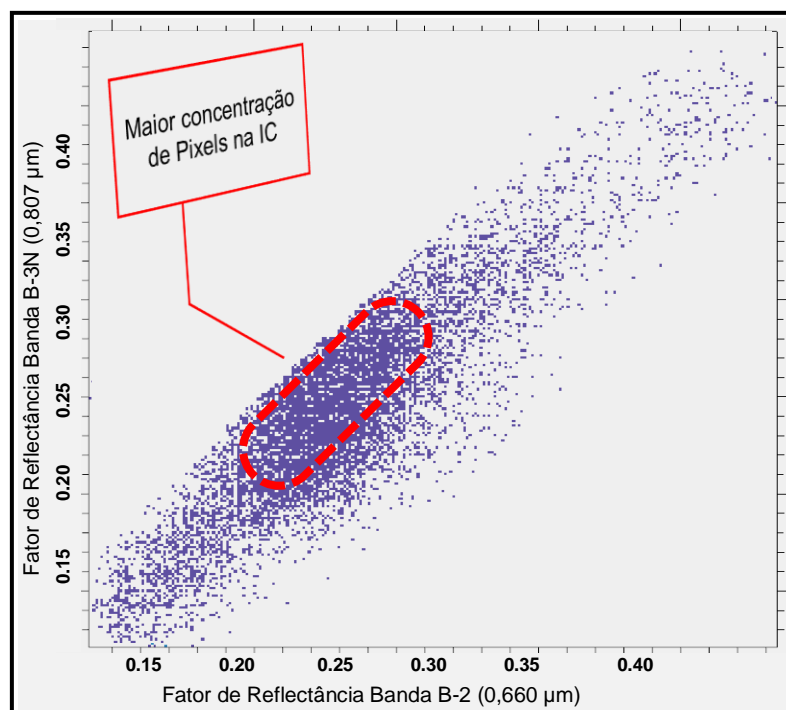


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na elaboração da linha do solo, os solos da IC foram analisados. As áreas com coloração em tonalidades rosa/roxo mais escuras (menores reflectâncias) ocupavam a parte inferior da diagonal próximos à origem dos eixos X (B-2-VIS) e Y (B-3N-NIR) do gráfico da linha do solo, o que indica solos com textura argilosa (Figura 53), e, à medida que diminui o conteúdo de argila e o teor de ferro, o posicionamento dos pontos tende a se deslocar para cima ao longo da linha diagonal (45°) (DEMATTÊ *et al.*, 2009). Ao avaliar a Figura 53, é possível observar que a disposição dos pixels dos solos expostos da IC em estudo se organizam próximos a linha de 45° no gráfico, confirmando que as curvas espectrais dos solos expostos apresentam reflectâncias semelhantes entre as bandas do vermelho (B-2) e do infravermelho próximo (B-3N).

Estes resultados estão de acordo com Nanni e Demattê (2006b), que geraram a linha do solo para diversas classes de solos com texturas variadas, por meio de sensor terrestre no qual simularam as bandas TM Landsat. Gallo (2015) gerou uma imagem multitemporal composta de imagens de satélite Landsat de solos expostos com o objetivo de mapear atributos da superfície dos solos e obteve resultados similares aos gerados neste trabalho para o comportamento da linha do solo. Ao utilizar a mesma metodologia, Poppiel (2016) também gerou uma imagem composta de uma série histórica para mapeamento espectral do solo de uma microbacia hidrográfica no leste do Distrito Federal.

Figura 53 – Linha do solo obtida da Imagem Composta de solos expostos da área de estudo, contrapondo valores de reflectância da banda B-2 (VIS) e da banda B-3N (NIR)

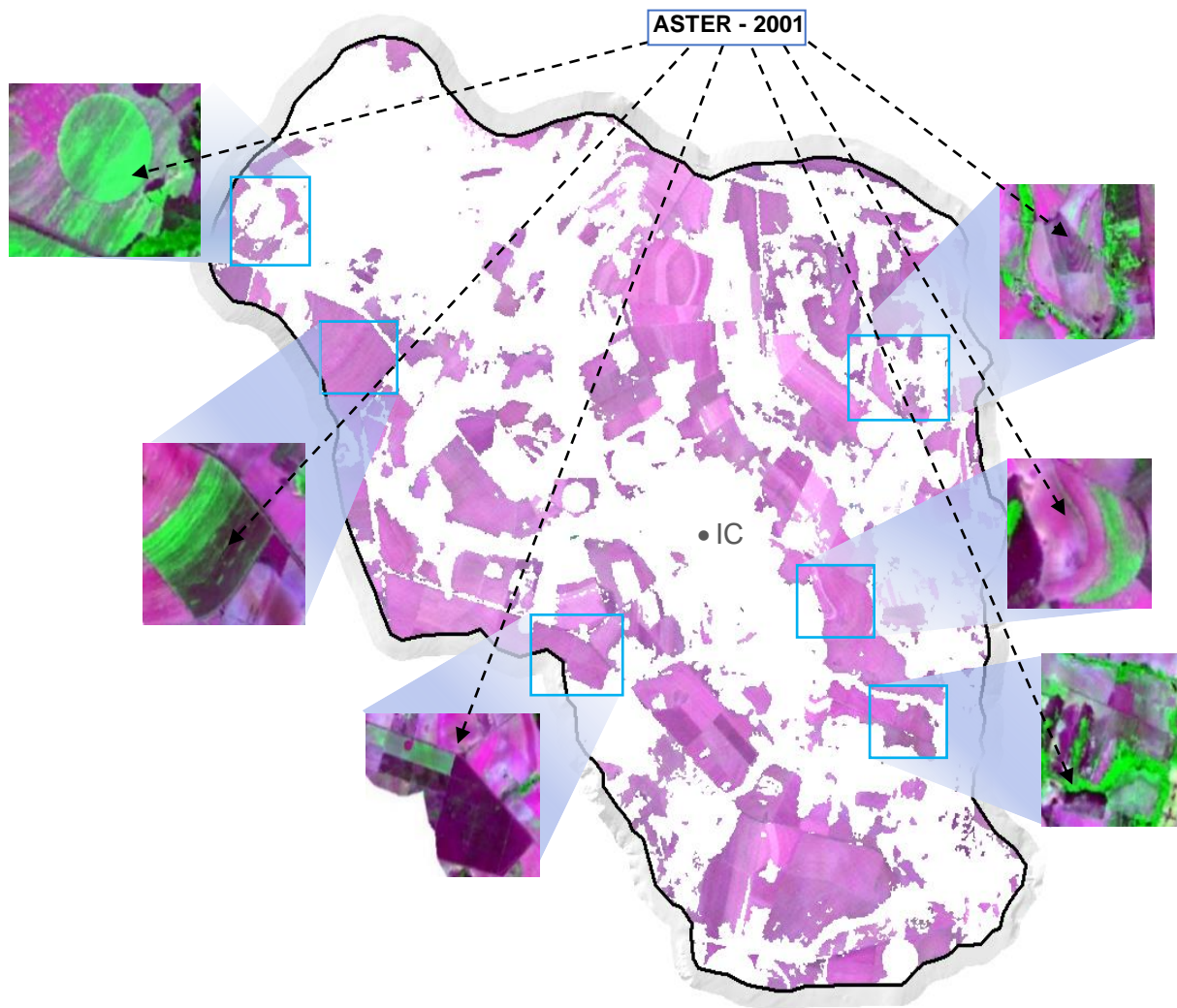


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Nanni e Demattê (2006)

A Figura 54 mostra a IC de solos expostos da microbacia do Ribeirão Extrema (DF), conjuntamente com porções das áreas ampliadas da imagem original ASTER – 2001, a qual foi a que menos contribuiu para a elaboração imagem composta, pois, à época de aquisição da imagem (24/10/2001), inicia-se o período de chuvas mais

frequentes (MALAQUIAS *et al.*, 2004), o que acarretou na exclusão de muitas áreas úmidas por conter uma maior quantidade de solos úmidos e vegetados.

Figura 54 – Imagem composta com solo exposto (IC) com fragmentos de áreas vegetadas em 2001 (ASTER – 2001) correspondentes a IC



Fonte: Elaborado pelo autor

As áreas da IC estão razoavelmente preenchidas por solos expostos. Os padrões de formato das áreas mostram que correspondem a áreas ocupadas e manejadas com o estabelecimento de culturas. Segundo Lago *et al.* (2012), que classificaram o uso e ocupação dos solos nesta microbacia, as atividades agrícolas de alta intensidade na microbacia do Ribeirão Extrema conferem áreas com padrões poligonais. Silva *et al.* (2009) relataram que a utilização do sistema de cultivo de

plântio direto (SPD), a partir dos anos 1990, foi um importante ganho conservacionista em relação ao sistema de cultivo convencional, que se baseia na baixa movimentação do solo, aliado à manutenção de resíduos das culturas sobre a superfície do solo (palhada). Ademais, são perceptíveis áreas circulares representadas pelos pivôs centrais que se encontram ocupados pela cultura estabelecida ou em pousio recoberto por palhada. Destaca-se que as áreas com cobertura de palhada foram removidas pela metodologia da geração da IC, o que diminui as áreas de ocupação de solos expostos.

A imagem de 2006 foi a que teve uma maior participação na composição da IC. A quantidade de solos expostos superou os 60%, o que revela que seu período de aquisição foi o mais adequado para este tipo de estudo. A ausência de nuvens, o solo sob pouca influência da umidade e menores áreas com cobertas de palhada formam fatores determinantes para a obtenção de maiores proporções de solos expostos em uma área.

III.5. Mapa digital de solos da microbacia do Ribeirão Extrema

III.5.1. Modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos *Endmembers* (MESMA)

Ao trabalhar com modelos de mistura espectral, é comum o uso do algoritmo SMA (*Spectral Mixture Analysis*), porém esse algoritmo analisa apenas um grupo de *endmembers* por vez, o que mapearia uma classe de solo agrupada por vez. O modelo MESMA (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis*) foi criado como alternativa para superar essa desvantagem, já que, segundo Roberts *et al.* (1998), esse algoritmo é capaz de considerar múltiplos *endmembers* na análise de mistura espectral, além de eleger o modelo mais adequado para cada pixel da imagem.

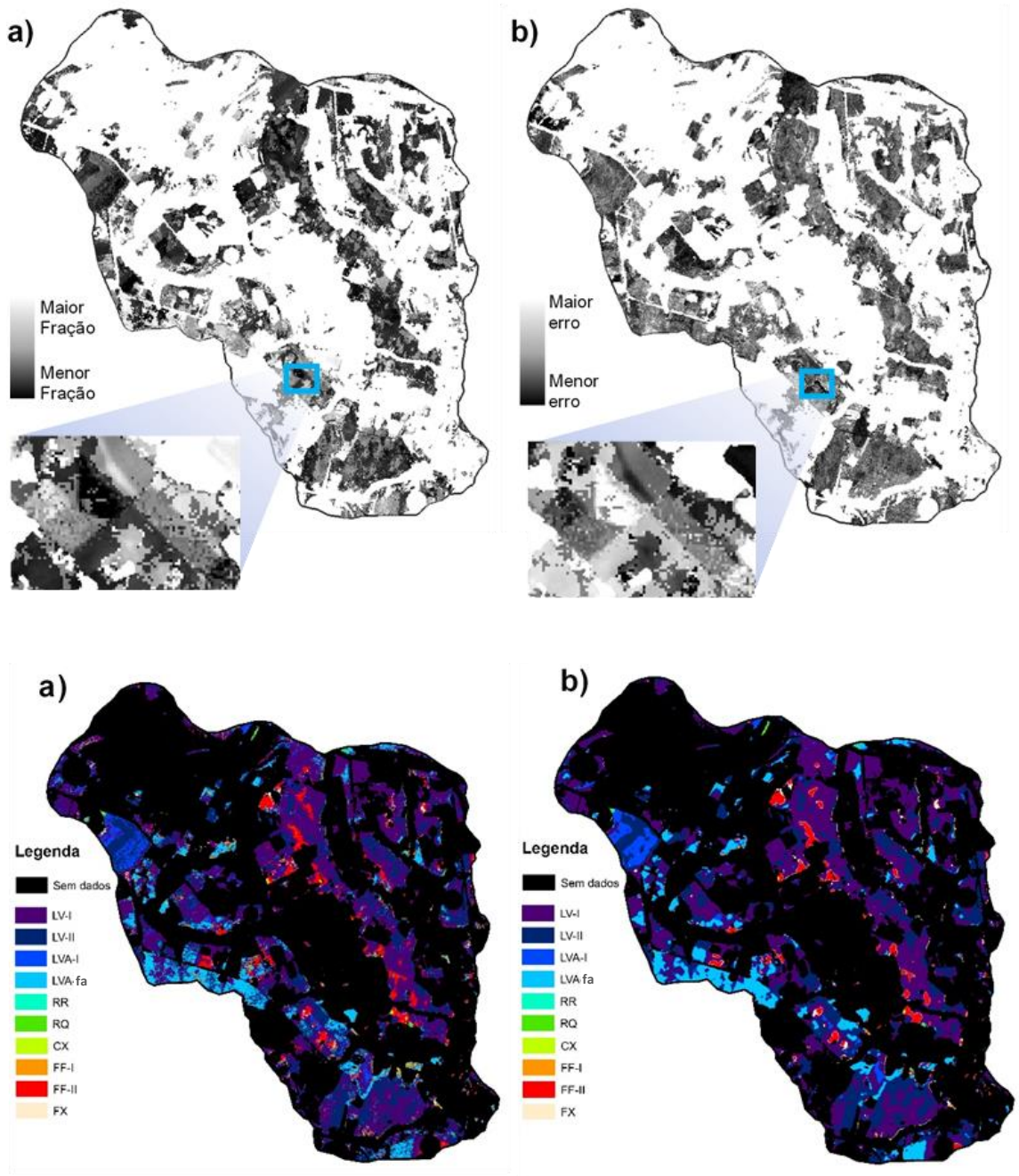
Para a execução do Modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos *Endmembers*, foram utilizadas a IC de solos expostos elaborada e a biblioteca espectral de solos da microbacia do Ribeirão Extrema, gerada pelo sensor terrestre *FieldSpec Pro*, devidamente reamostrada nos intervalos das bandas VNIR e SWIR do sensor ASTER/TERRA. Desse modo, o modelo de mistura espectral mais adequado (MESMA) foi processado pela combinação linear de 10 membros de referência

(*endmembers*), estabelecidos nas etapas anteriores, compilados na BE, para representar as classes de solo de ocorrência na bacia estudada (ROBERTS *et al.*, 2007).

No modelo MESMA, os *endmembers* foram automaticamente selecionados na IC, em função do menor erro médio quadrático (*Root Mean Square Error - RMSE*) para cada pixel em relação à curva espectral do pixel da IC (CARVALHO, *et al.*, 2003). Geraram-se como produtos uma imagem fração para cada *endmember* desmisturados na IC, em tonalidades de cinza, em que a tonalidade mais clara representa maior probabilidade de ocorrência do *endmember* (Figura 55a), e uma imagem contendo o RMSE (erro), também em tonalidades de cinza, em que as tonalidades mais claras representam a maior probabilidade de erro, pelo modelo MESMA (Figura 55b), além de uma imagem dos modelos de mistura, que indica o *endmember* de maior abundância em cada pixel determinado com o menor erro médio quadrático (Figura 55c). Na imagem que contém os modelos de mistura, as cores são atribuídas pelo próprio algoritmo MESMA no aplicativo VIPER *tools* e representam o *endmember* de maior abundância, que significa uma classe de solo e sua distribuição na bacia estudada (ROBERTS *et al.*, 2007). Posteriormente, aplicou-se o filtro de mediana 5X5, que aglutinou ou eliminou os pixels isolados, melhorando a qualidade visual da imagem de modelos de mistura. Essa imagem representa o mapa de distribuição de classes de solos da microbacia do Ribeirão Extrema, tal como conduzido no trabalho de Meneses e Santa Rosa (2012). Assim, como ilustra a Figura 55 “d”, os ruídos foram reduzidos e áreas mais homogêneas foram destacadas para representar a distribuição espacial das classes de solo.

Os 10 *endmembers* representam o intervalo de fração produzido pelo MESMA para as sete principais classes de solos, sendo três delas individualizadas em dois agrupamentos, totalizando dez classes de solo de ocorrência na área deste estudo (Figura 55 d). A imagem fração mostrou que o MESMA modelou a maior parte dos pixels da IC de solos expostos, com os *endmembers* de representatividades superiores a 40% (maior fração). Dessa maneira, a análise dos dados das frações dos pixels modelados mostrou uma variação entre 50% e 80% na classe LV, entre 30% e 100% na classe LVA, entre 40% e 60% na classe RR, entre 40% e 60% na Classe RQ, entre 50% e 60% na classe CX, entre 40% e 70% na classe FX e maior que 80% a 100% na classe FF, valores considerados adequados segundo Roberts *et al.* (1998).

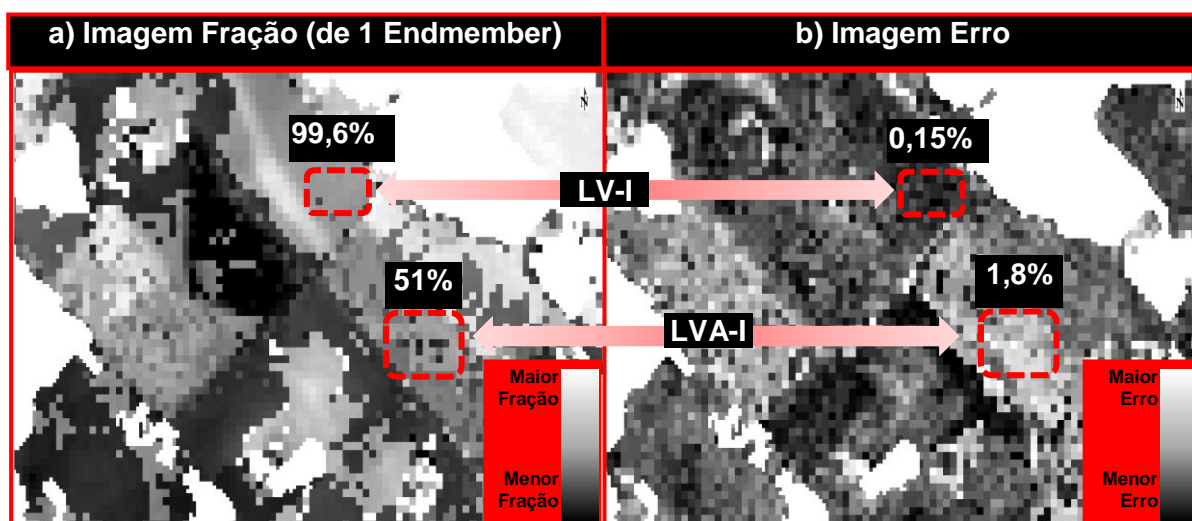
Figura 55 – Imagens obtidas mediante aplicação do modelo MESMA a partir da IC de solos expostos da Microbacia do Ribeirão Extrema e os *endmembers* representativos das classes de solo de ocorrência na bacia, extraídos da biblioteca espectral de solos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF. Imagem fração FF-II (a), imagem erro do modelo (b), imagem de modelos de mistura (c) e imagem suavizada com filtro de mediana de tamanho 5x5 (d)



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Roberts *et al.* (1998).

Na Figura 56a, os pixels com maiores proporções de *endmembers* modelados pelo MESMA na imagem fração (tons de cinza mais claros) comportam-se de maneira inversa na imagem erro (Figura 56b), que tem o brilho reduzido (tons de cinza mais escuros) à medida que apresentam menores valores de erro médio quadrático (Roberts *et al.*, 1998). O RMSE, ou erro médio quadrático do modelo MESMA, nesse trabalho foi de em torno de 1,02% para a área da bacia estudada, valor considerado baixo de acordo com Roberts *et al.* (1998), que estabelece um valor máximo aceitável de erro médio quadrático de até 2,5%.

Figura 56 – Valores da imagem de fração (a) e da imagem do erro médio quadrático (b)

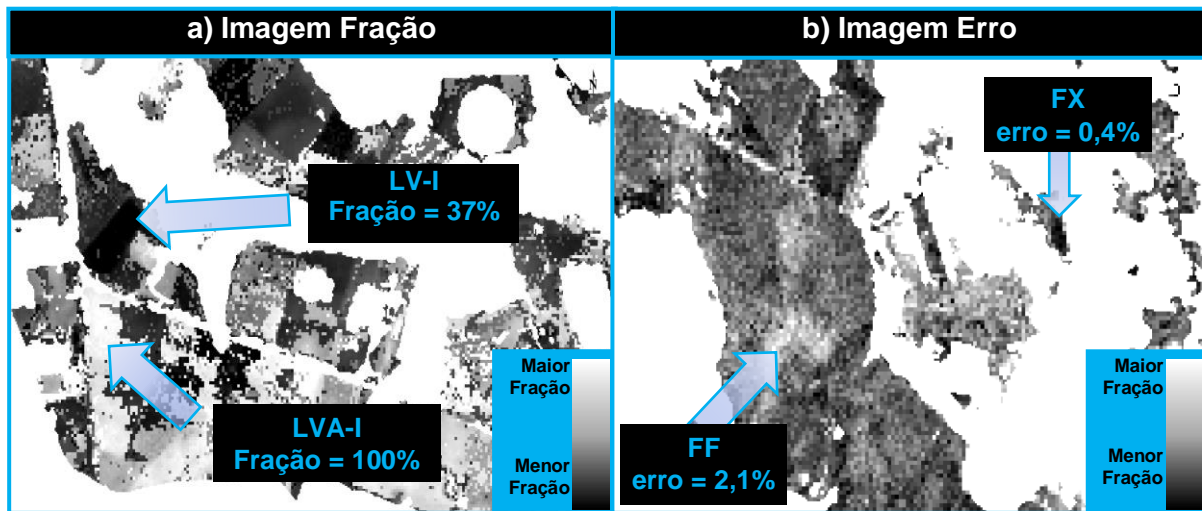


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Roberts *et al.* (1998).
 Onde: LV- I e LVA-I correspondem à fração e respectivos erros obtidos pela metodologia MESMA

Tonalidades de cinza mais claras na imagem fração correspondem às áreas de menor confusão entre os *endmembers*, com maior probabilidade de acerto de uma classe de solo específica (Figura 57a). Nesse sentido, a Figura 57a mostra a imagem fração em que a classe de solo LV-I foi a que apresentou menor valor, indicando maior mistura espectral com outras classes de solos. A classe LVA-I foi a que apresentou o maior valor na imagem fração (atingindo 100%), o que leva à constatação de que essa a melhor classe de solo representada pelo modelo. Em contrapartida, a imagem erro (Figura 57b) indicou que o maior valor de erros foi produzido pelo modelo MESMA ao modelar pixels de FF em relação ao FX (Figura 57b), o que pode ser atribuído à perda de detalhamento espectral das bandas de absorção características destas classes de

solo no processo de reamostragem para intervalos das bandas espectrais do sensor ASTER (DEMATTÊ, 2002).

Figura 57 – a) Imagem fração com pixels da classe LVA-I com os maiores valores fração e LV-I com menores. b) Imagem erro indicando pixels das classes FX e FF modelados com os maiores e menores valores de erro respectivamente

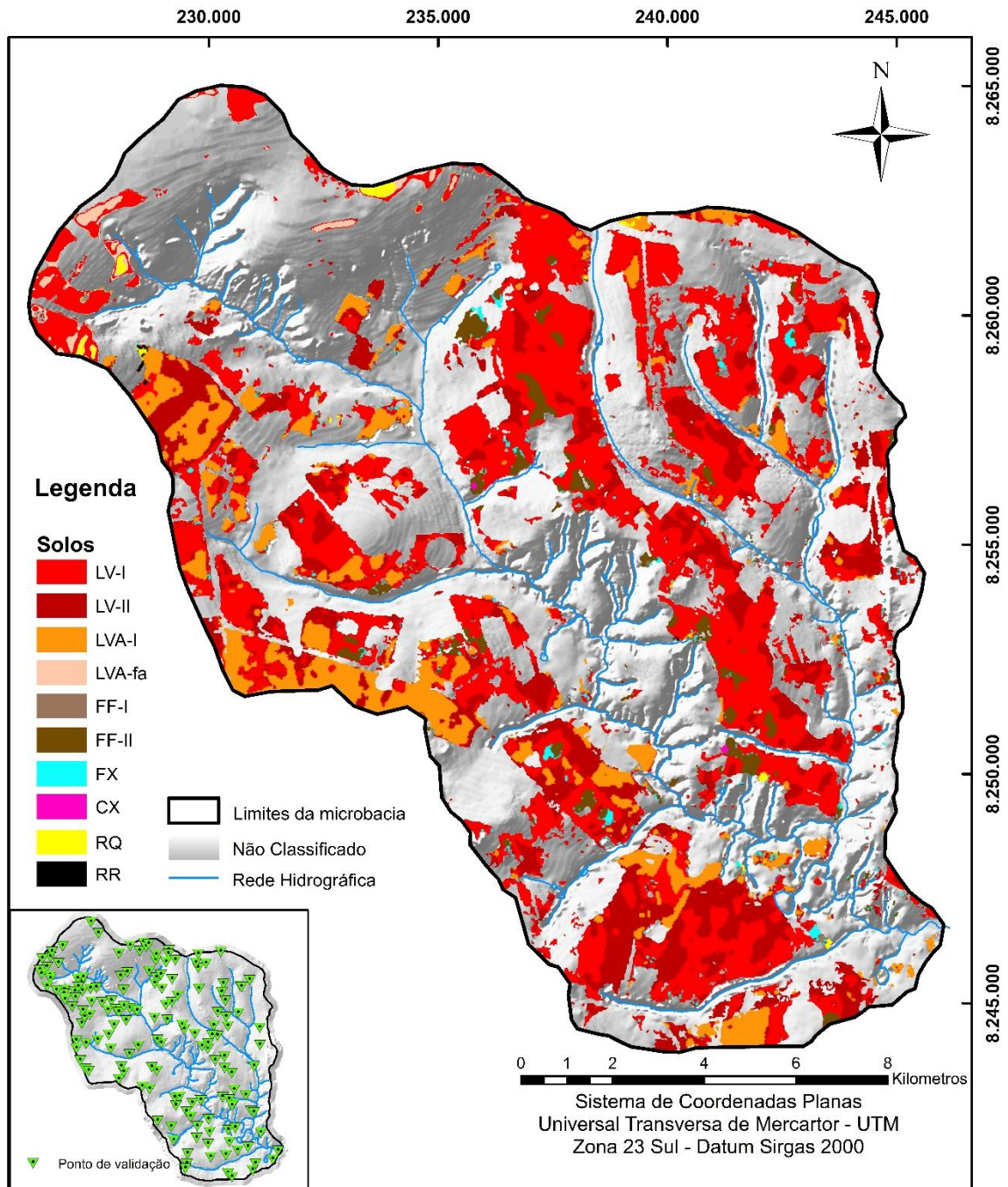


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Roberts *et al.* (1998).

A disposição conjunta dos modelos – mais adequados – alcançados pelo MESMA a partir dos *endmembers* selecionados, proporcionou a individualização das classes de solos que compuseram o mapa digital espectral de solos da microbacia do Ribeirão Extrema (DF). O mapa final, exibido na figura 58, expõe a distribuição espacial das sete classes de solos estudadas, não obstante constituída por 10 unidades de mapeamento simples. Este mapa de solos foi obtido com base na imagem de modelos de mistura suavizada pelo filtro de mediana com tamanho 5X5 (Figura 50d, p. 183). As áreas vazias no mapa correspondem à vegetação, água e palhada retiradas por máscaras no processo de obtenção das imagens de solo exposto (FONGARO, 2015; GALLO, 2015; POPPIEL, 2016).

As classes de solos contidas no mapa digital de solos da Bacia do Ribeirão Extrema foram classificadas até o 4º nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2014) como mostra a Figura 58.

Figura 58 – Mapa digital espectral de solos expostos da Microbacia do Ribeirão Extrema, DF



Fonte: Elaborado pelo autor.

Desse modo, para melhor interpretação do mapeamento digital realizado, as unidades de mapeamento representam os 10 *endmembers* utilizados, que correspondem às classes de solos classificadas no 4º nível categórico do SiBCS (Embrapa, 2014) e a algumas dessas classes agrupadas. O atributo responsável

pelos agrupamentos foi a textura dos solos, o que permitiu classificação no 5º nível categórico do SiBCS (Embrapa, 2014). O mapa gerado apresenta-se compartimentado em classes de solos de ocorrência na microbacia do Ribeirão Extrema, cujas respectivas áreas foram calculadas e dispostas na Tabela 21.

Tabela 21 – Área das classes de solos de ocorrência no o mapa digital da microbacia do Ribeirão Extrema DF

| UM* | Classificação (SiBCS) (Embrapa, 2014) | Área | | Área total mapeada por classe de solo | Área total de solos mapeada na MBRE | ÁreaTotal MBRE ⁽²⁾ |
|--------|--|-----------|------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | | ha | % ⁽¹⁾ | | | |
| LV-I | Latossolo Vermelho Distrófico típico textura muito argilosa | 5.208,38 | 51,22 | 7.845,73 | | |
| LV-II | Latossolo Vermelho distrófico típico textura argilosa | 2.637,35 | 25,94 | | | |
| LVA-I | Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico textura muito argilosa | 1.131,22 | 11,13 | 1.503,94 | | |
| LVA-fa | Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico com textura franco-arenosa | 372,72 | 3,66 | | | |
| FF-I | Plintossolo Pétrico concrecionários distrófico típico textura muito argilosa | 360,07 | 3,52 | 544,89 | 10.168,00 | 25.614,00 |
| FF-II | Plintossolo Pétrico concrecionários distrófico típico textura argilosa | 184,73 | 1,82 | | | |
| RR | Neossolo Regolítico distrófico textura argilosa | 100,09 | 1,00 | 100,04 | | |
| CX | Cambissolo Háplico tb distrófico textura argilosa | 62,83 | 0,62 | 62,83 | | |
| RQ | Neossolo Quartzarênico Órtico típico distrófico | 58,77 | 0,58 | 58,77 | | |
| FX | Pintossolo Háplico distrófico típico textura Argilosa | 51,34 | 0,50 | 51,34 | | |
| | Área de Solos Não Expostos | 15.446,00 | - | 15.446 | 15.446,00 | |
| | TOTAL | 25.614,00 | 100% | 25.614,00 | 25.614,00 | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

* Unidade de Mapeamento; ⁽¹⁾ Percentual calculado em função da área total de solos expostos mapeados; ⁽²⁾ Valor correspondente ao total da área da Bacia do Ribeirão Extrema, DF.

Os dados apresentados na tabela anterior (Tabela 21) revelam que, na área de estudo, predominam os Latossolos Vermelhos. Esses solos ocupam uma área total de 7.846 ha. Em segundo lugar, tem-se os Latossolos Vermelhos-Amarelos, que recobrem uma área de 1.604 ha. Estas áreas obtidas de LV e LVA estão de acordo com o levantamento de solos do DF realizado pela Embrapa (1978) na escala de 1:100.000, que determinou uma área de 77% da área da microbacia constituída por LV e 5%, de LVA. Motta *et al.* (2002), Barbosa *et al.* (2009), Campos *et al.* (2010) e Lacerda e Barbosa (2012) relatam que, no DF, os LV estão distribuídos por áreas de

relevo geralmente plano a suave ondulado com hipsometria mais elevadas, usualmente sobre litologias de origem pelítica do Grupo Paranoá. Por outro lado, os LVA ocupam áreas de declividades ligeiramente mais acentuadas (2–5%) em relação aos LV, que, de acordo com SEMARH (2012), correspondem às unidades geomorfológicas Plano elevado – PE e Plano Intermediário PI. Essa associação de ocorrência dos Latossolos Vermelho-Amarelos de textura predominantemente franco arenosa - LVA-fa em relação às feições do relevo e litologia foram, também, verificadas neste trabalho na porção Noroeste da MBRE.

Em menor participação, mas não menos importantes, as demais classes de solos mapeadas neste trabalho contaram com áreas de: 545 ha para os Plintossolos Pétricos, 30 ha para os Neossolos Regolíticos, 44 ha para os Cambissolos Háplicos e 51 ha de Plintossolos Háplicos. A baixa frequência de ocorrências dessas classes de solos no mapeamento realizado pode ser explicada pelo fato de que elas se desenvolvem em áreas mais restritas na microbacia, com declividades mais acentuadas, que configuram terras não agricultáveis, em que predominam áreas de preservação ambiental e reserva legal, vegetadas permanentemente, não contempladas neste trabalho.

No Levantamento de Reconhecimento dos Solos do DF, realizado pela Embrapa (1978), a classe CX ocupa as áreas de transição geomorfológica de relevo ondulado a montanhoso, áreas que não foram contempladas neste estudo, já que estão permanentemente sob alguma cobertura vegetal. Por outro lado, no mapeamento da Embrapa (1978), não constam ocorrências de FF e RR, que foram devidamente identificadas nas atividades de campo desta dissertação. Nessas condições de relevo, os RR associados aos FX apresentam maior expressão de desenvolvimento em relação aos CX, representando solos de presença rara e esparsa na microbacia estudada. Possivelmente, em função desses solos se desenvolverem em variações de declividades do terreno semelhantes, no Levantamento de Reconhecimento dos Solos do DF, realizado pela Embrapa (1978) essas áreas foram contempladas por somente Cambissolos, em função da escala de mapeamento do levantamento em questão.

No MDS gerado, são perceptíveis a ocorrência FX nos morrotes ao longo da bacia. Além disso, como essa classe ocorre principalmente nestes pequenos morros, nota-se a sua diminuição espacial em direção à jusante da microbacia, evidenciando

a atuação de processos erosivos e pedogenéticos em direção à bacia do Rio Preto. Para Novaes Pinto (1994), Barbosa *et al.* (2009) e Lacerda e Barbosa, (2012), esse fenômeno denota indícios da evolução geomorfológica da área a partir da superfície geomorfológica de Chapadas Elevadas, preservadas à montante da microbacia do Ribeirão Extrema, particularmente pela ocorrência de quartzitos da Unidade MNPPq3 do Grupo Paranoá e do desenvolvimento de petroplintitas em função da variação do lençol freático, correlacionada com a evolução geomorfológica da região. Dessa forma, o padrão de distribuição dos morrotes de Plintossolos Pétricos permite interpretá-los como residuais da Superfície Geomorfológica Chapadas Elevadas (NOVAES PINTO, 1994; LACERDA; BARBOSA, 2012).

Sob áreas planas, por vezes associados a materiais de origem metapelítica do Grupo Bambuí, os CX se encontram distribuídos na MBRE associados aos morrotes constituídos por FX. Nessas condições de relevo, esses solos, localizados sob os Plintossolos Pétricos relictuais, sofrem pouca influência dos processos pedogenéticos, mostrando a preservação do material originário em relação aos processos pedo-evolutivos regionais (LACERDA; BARBOSA, 2012).

Os Neossolos Regolíticos apresentam uma distribuição peculiar na MBRE, em função do encaixamento das drenagens dessa microbacia, uma vez que a declividade do terreno se acentua de forma abrupta nas encostas das drenagens, onde se formam os RR, em consonância com relatos de Motta *et al.* (2002). Já os Neossolos Quartzarênicos – associados à Unidade MNPPq3 do Grupo Paranoá – e os Latossolos Vermelho-Amarelos de textura predominante franco arenosa – relacionados às Unidades Metarritímiticas e Quartzíticas do Grupo Paranoá – foram identificados na porção noroeste da MBRE e estão apresentados no mapa digital da MBRE gerado em pequenas quantidades proporcionais à área de ocorrência desses solos na microbacia estudada.

A contabilização de todas as classes de solos expostos mapeadas representou 39,7% da área total da MBRE, correspondendo à cerca de 10.168 ha (Tabela 22). Essa área foi considerada satisfatória em função da metodologia adotada de mapeamento de solos expostos, de acordo com Fiorio *et al.* (2010), Genú *et al.* (2013) e Rizzo *et al.* (2016).

A aplicação do algoritmo MESMA, com a finalidade de individualizar áreas de ocorrência de classes de solos distintas a partir de dados espectrais das mesmas,

mostrou-se uma técnica eficiente no mapeamento digital de solos; porém foi desfavorecida neste trabalho em função da metodologia adotada na utilização de imagens orbitais multiespectrais do sensor ASTER em uma série histórica de pequena extensão, devido ao curto intervalo de tempo de imageamento deste sensor (Fiorio *et al.*, 2010). Palacios-Orueta *et al.* (1998) empregaram o modelo MESMA em imagens do sensor AVIRIS e concluíram que este algoritmo foi capaz de discriminar os conteúdos matéria orgânica de solos de uma região na Califórnia (EUA), com um alto grau de precisão. Nesse contexto, Genú *et al.* (2013), utilizando-se de imagens ASTER e espectrorradiometria, realizaram o mapeamento digital dos atributos do solo em Rafard (SP), por meio da análise da mistura espectral, e consideraram o MESMA uma técnica eficaz para a realização de mapeamento digital de atributos do solo, tais como a textura, matéria orgânica, ferro total e CTC. Os autores concluíram que a metodologia de identificação e de quantificação de atributos mediante a aplicação do modelo MESMA possui alto potencial para mapeamento digital de solos, se equiparados estatisticamente a métodos difundidos atualmente, como o método de Krigagem.

A avaliação do mapeamento digital de solos (MDS) gerado na microbacia do Ribeirão Extrema foi realizada mediante a análise da matriz de erros, com 161 pontos de validação (Figura 58), em que se confrontou a verdade de campo e o mapa digital de solos gerado. O índice *Kappa*, utilizado para verificação do grau de exatidão do mapa, foi calculado com base na matriz de erros, alcançando valor de 0,74 ou 74% (Tabela 22). Por intermédio desse valor, a acurácia do mapeamento obtido neste trabalho foi considerada muito boa, pois, de acordo com a classificação proposta por Landis e Koch (1977), a escala varia de valores menores que zero (considerada péssima) a um (considerada excelente). Ten Caten *et al.* (2012) relatam que, na literatura internacional, como em Hengl e Rossiter (2003), alcançou-se cerca de 0,58 para regiões montanhosas e 0,39 para regiões planas. Scull *et al.* (2003) chegou índices kappa que alcançaram 0,44 para terrenos montanhosos e 0,52 para terrenos aplainados.

A matriz de erros (Tabela 22), também foram determinadas a acurácia do produtor e a acurácia do usuário para as classes de solos mapeadas. Assim, ao observar, na tabela 23, a acurácia do produtor (AP), pode-se perceber que as classes FF-I (100%), CX (100%), seguidas por LV-I (85%), alcançaram os maiores

percentuais. Nas duas primeiras classes de solos, o número de pontos de validação foi de apenas 1, o que promoveu o valor de AP de 100%. O LV-I foi a classe de solo que mais obteve acertos entre a verdade de campo e o MDS (41 acertos), favorecendo valor de AP em 85%. Estes altos valores de AP indicam uma alta probabilidade de as classes terem sido corretamente classificadas (Congalton e Green, 2010).

Segundo Lilesand *et al.* (2007), a probabilidade de um ponto classificado representar a realidade no campo corresponde a acurácia do usuário (AU). Baseado nessa premissa, no mapeamento feito por esta dissertação, de acordo com os dados da tabela 23, as classes de solos que menos corresponderam à verdade em campo foram as classes FF-I e FF-II (21 e 25%). As informações espectrais dos Pintossolos Pétricos concrecionários, extraídas da TFSA, são muito similares às dos Latossolos Vermelho-Amarelos, causando uma maior confusão nos dois modelos visto que a TFSA dos FFc corresponde à sua matriz latossólica.

Os cálculos dos erros de omissão (EO) e comissão (EC) foram obtidos a partir dos dados da matriz de confusão. Congalton e Mead (1986) ressaltam que quanto menores os percentuais de EO, menor a probabilidade de os pontos de validação não terem sido incluídos em suas classes correspondentes. Desse modo, constatou-se que a maioria das classes de solos apresentaram valores satisfatórios de EO, variando de 0 para o RR a 50% para o 27% para o LVA-I, excetuando os altos valores dos Plintossolos, resultados decorrentes da confusão, descrita acima sobre esses solos, principalmente com o LVA. A quantidade de amostras incluídas erroneamente em uma classe caracteriza erros de comissão (EC) (CONGALTON; MEAD, 1986). De maneira geral, os valores de erros de comissão foram abaixo da média, excluindo as duas classes de solos que apresentaram valores mínimos de EC (0), CX e FF-I, justificado pelo baixo número de pontos de validação para estas classes, tal como descrito e discutido para a AP.

Como descreveu Carvalho *et al.* (2003), a metodologia de classificação espectral com base no emprego do algoritmo MESMA mostrou-se eficiente, pois apresentou alta capacidade de identificar a classe de solo mais adequada para cada pixel na imagem composta de solos expostos da área estudada com o menor valor de erro. Isso explica os valores de acurácia satisfatórios do mapeamento digital de solos da microbacia do Ribeirão Extrema (DF) gerado por esta técnica.

Tabela 22 – Matriz de erros entre a verdade de campo e o mapeamento digital de solos da Microbacia do Ribeirão Extrema, DF, obtido pela metodologia MESMA

| Classe de Solo | Mapa Digital de Solos | | | | | | | | | | Total | AU (%) | EO (%) | EC (%) |
|----------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|--------|--------|--------|
| | LV-I | LV-II | LVA-fa | LVA-I | FF-I | FF-II | FX | RR | RQ | CX | | | | |
| LV-I | 41 | | 7 | | | 1 | | | | | 49 | 84 | 16 | 14 |
| LV-II | 2 | 16 | | | | | | | | | 18 | 89 | 11 | 16 |
| LVA-fa | 1 | 1 | 18 | | | | 1 | | 1 | | 22 | 73 | 27 | 40 |
| LVA-I | 3 | 2 | 1 | 26 | | | | | | | 32 | 81 | 19 | 33 |
| FF-I | | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | | | 4 | 25 | 75 | 0 |
| FF-II | | | 2 | 9 | | 3 | | | | | 14 | 21 | 79 | 40 |
| FX | | | 1 | 1 | | 1 | 4 | 1 | | | 8 | 50 | 50 | 43 |
| RR | | | | | | | | 2 | | | 2 | 100 | 0 | 33 |
| RQ | 1 | | | 1 | | | 1 | | | 7 | 10 | 70 | 30 | 12 |
| CX | | | | 1 | | | | | | | 1 | 50 | 50 | 0 |
| Total | 48 | 19 | 30 | 39 | 1 | 5 | 7 | 3 | 8 | 1 | 161 | | | |
| AP (%) | 85 | 84 | 60 | 67 | 100 | 60 | 57 | 67 | 87 | 100 | | | | 119 |

Kappa = 0.738262

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Congalton e Green (2010).

AU: Acurácia do Usuário, AP: Acurácia do Produtor, EO: Erro de Omissão, EC: Erro de Comissão.

Diversos estudos acerca de mapeamentos digitais de solos fundamentados em outras técnicas de MDS mostraram variações nos valores do índice *Kappa* obtidos. Sano *et al.* (2007) realizou o mapeamento visual da cobertura vegetal do Bioma Cerrado, alcançando um valor de índice *Kappa* de 0,68, com base imagens do satélite Landsat ETM+. Ao recorrerem a técnicas de regressões logísticas múltiplas, Figueiredo *et al.* (2008) obtiveram valor do índice *Kappa* de 38% no MDS no Planalto Médio do Rio Grande do Sul em regiões montanhosas. Crivelenti *et al.* (2009), por sua vez, utilizando árvores de decisão no mapeamento digital de solos da folha topográfica de Dois Córregos (SP), chegaram a um índice *Kappa* de 43%.

Chagas *et al.* (2010) obtiveram um índice *Kappa* de 74% ao empregar redes neurais artificiais no MDS em uma bacia hidrográfica no noroeste do estado do Rio de Janeiro. A Análise de Componentes Principais (ACP) da regressão logística múltipla multinomial (RLMM) realizada por Ten Caten *et al.* (2011), para mapeamento de classes de solos na microrregião de Santa Maria (RS), resultou em valores de capa *Kappa* de 37,3% e 48,5%. Por meio do uso de geoestatística para mapeamento digital de solos dos tabuleiros costeiros no litoral norte do estado do Ceará, Valladares (2012) verificou um índice *Kappa* de 41%.

Esses estudos concordam com um levantamento dos valores de índices *Kappa* de trabalhos com MDS no Brasil realizado por Ten Caten *et al.* (2012), que estimaram valores médios do valor *Kappa* oscilando em torno de 48%. Contudo,

estudos mais recentes revelam que as técnicas de MDS têm sido aprimoradas, o que tem levado a um aumento da acurácia dos mapeamentos gerados. Cita-se, nesse sentido, o trabalho de Arruda *et al.* (2013), que observaram valores de índice *Kappa* de 74,5%, utilizando redes neurais artificiais em uma área localizada no município de Barra Bonita (SP).

Ademais, o mapa digital de solos gerado representou de maneira satisfatória a realidade das relações pedogeomorfológicas da MBRE observadas em campanhas de campo e em ambiente de escritório. Devido ao seu maior detalhamento, o mapeamento digital de solos da microbacia do Ribeirão Extrema (DF) mostrou-se mais realista quanto à distribuição das classes de solos na paisagem da microbacia estudada, se comparado aos levantamentos disponíveis (Figura 54).

III.6. CONCLUSÕES

1. O mapeamento digital e espectral dos solos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF, a partir de imagens multitemporais do sensor ASTER e biblioteca espectral representativa da ocorrência das classes de solos foi executado de maneira satisfatória, o que permite a sua utilização e extrapolação de biblioteca espectral de solos elaborada em outras áreas desde que apresentem relações pedomorfológicas e distribuição de solos similares.
2. A avaliação em campo das microbacias do Ribeirão Jardim e do Ribeirão Extrema, permitiu considerar as relações pedomorfológicas similares, viabilizando a utilização da biblioteca espectral de solos disponível da microbacia do Ribeirão Jardim. A associação das informações desta biblioteca espectral aos dados espectrais das classes de solos distintos de ocorrência na microbacia do Ribeirão Extrema, gerou a biblioteca espectral de solos representativa da distribuição dos solos de ocorrência na microbacia estudada.
3. A imagem de solos expostos da microbacia do Ribeirão Extrema apresentou 39,7% de solos expostos com relação a área total da microbacia estudada, foi considerada representativa da distribuição dos solos, considerando a realização de série histórica de pequena extensão em imagens multiespectrais do sensor ASTER, que apresentou curto intervalo temporal de imageamento.

4. O algoritmo MESMA utilizado no mapeamento digital espectral das classes de solos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF, apresentou-se eficiente, mostrando-se como uma técnica de MDS de alto potencial.
5. Validou-se o mapeamento digital de solos gerado da microbacia do Ribeirão Extrema, DF, por meio do índice Kappa, que apresentou valor de 74%, considerado de boa performance para mapeamentos digitais.
6. A utilização de bibliotecas espectrais de solos em áreas pedomorfológicamente semelhantes mostrou-se eficiente, permitindo sua extrapolação em atividades de mapeamento digital de solos.
7. A metodologia utilizada no mapeamento digital de solos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF, pode ser usada para áreas maiores e outras regiões do DF, com características fisiográficas e geológicas semelhantes.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, M.; HOOK, S.; RAMACHANDRAN, B. Aster user handbook: version 2. California: jpl - Jet Propulsion Laboratory, 2007.

ADLER-GOLDEN, S.; BERK, A.; BERNSTEIN, L. S.; RICHTSMIEIER, S.; ACHARYA, P. K.; MATTHEW, M. W.; ANDERSON, G. P.; ALLRED, C. L.; JEONG, L. S.; CHETWYND, J. H. FLAASH, a MODTRAN4 atmospheric correction package for hyperspectral data retrievals and simulations. In: GREEN, R. O. (Org.). **Summaries of the Seventh JPL Airborne Earth Science Workshop**. 1. ed. California: NASA, 1998. p. 9–14.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo, SP: Edgard Bluncher Ltda, 1984. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=uPZeAAAAMAAJ>>. Acesso em 20 de nov. de 2015.

ARRUDA, G. P.; DEMATTÊ, J. A. M.; CHAGAS, C. S. Mapeamento Digital de Solos por Redes Neurais Artificiais com base na relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 327-338, 2013.

ASD INC - ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES INC. **FieldSpec Pro User's Guide**. Boulder, CO, USA: ASD INC, 2002. Disponível em: <<http://support.asdi.com/Document/FileGet.aspx?f=600000.PDF>>. Acesso em 12 de julho de 2016.

ASD INC - ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES INC. **RS3™ User Manual**. Boulder, CO, USA: ASD Inc, 2008a. Disponível em: <<http://support.asdi.com/Document/Viewer.aspx?id=46>>. Acesso em 29 de julho de 2016.

ASD INC - ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES INC. **ViewSpec Pro™ User Manual**. Boulder, CO, USA: ASD INC, 2008b. Disponível em: <<http://geoinfo.amu.edu.pl/geoinf/m/spektr/viewspecpro.pdf>>. Acesso em 29 de julho de 2016.

BARBOSA, I.O.; LACERDA, M.P.C. e BILICH, M.R. Soils distribution model based on relation between geology, geomorphology and pedology, at the High Plateau of Distrito Federal, Brazil. **R. Asoc. Geol. Argentina**, 66:569 - 575, 2010.

BARET, F.; JACQUEMOUD, S.; HANOCQ, J. F. The soil line concept in remote sensing. **Remote Sensing Reviews**, v. 7, p. 65–82, 1993.

BATISTA, M.; SANTOS, M. C. Morfologia e gênese de dois solos com plintita da região Meio Norte do Brasil. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 19, n. 2, p. 287–296, 1995.

BAUMGARDNER, M. F.; SILVA, L. F.; BIEHL, L. L.; STONER, E. R. Reflectance properties of soils. **Advances in agronomy**, v. 38, p. 1–44, 1985.

BELCHER, J. **O relatório técnico sobre a nova capital: relatório Belcher**. Brasília, DF: CODEPLAN, 1954.

BELLINASSO, H. **Biblioteca espectral de solos e sua aplicação na quantificação de atributos e classificação**. 2010. 264 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

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.; CHABRILLAT, S.; DEMATTÊ, J.A.M.; TAYLOR, G.R.; HILL, J.; WHITING, M.L.; SOMMER, S. Using Imaging Spectroscopy to study soil properties. **Remote Sens. Environ**, v. 113, p.38–55, 2009.

BIARD, F.; BARET, F. Crop residue estimation using multiband reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 530–536, 1997.

BORGES, M. E. S.; SOARES, F. S.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. Relação dos compartimentos geomorfológicos com o uso agrícola na bacia do rio Preto. **Espaço & Geografia**, v.10, n. 2, p. 453-476, 2007, ISSN: 1516-9375.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. PROJETO RADAMBRASIL. **Folha SD. 23** - Brasília: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, RJ: MME, 1982.

BRAUN, O. P. G. Contribuição à geomorfologia do Brasil central. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 32, n. 3, p. 3–39, 1971.

BRITES, R. S.; SOARES, V. P.; RIBEIRO, C. Verificação da exatidão em classificações de uma imagem orbital mediante a utilização de três índices. **Revista Árvore**, v. 20, p. 415–424, 1996.

BUOL, S. W.; SOUTHARD, R. J.; GRAHAM, R. C.; MCDANIEL, P. A. **Soil genesis and classification**. 6. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.

CAMPOS, J.E.G.; MONTEIRO, C.F.; RODRIGUES, L.N. Geologia e zoneamento hidrológico da bacia do Rio Preto. Documentos / Embrapa Cerrados. 172, 54 p, 2006. Disponível em: < <http://www.cpac.embrapa.br/download/1734/t> >. Acesso em 02 de maio de 2016.

CAMPOS, P. M.; LACERDA, M. P. C.; SILVA, C. L. DA; SÁ, M. A. C.; SOUSA, D. M. G. DE. Drenagem interna como fator de diferenciação de Latossolos do Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 3, p. 306–314, 2010.

CARNEIRO, P. J. R.; MALDANER, V. I.; ALVES, P. F.; DE QUEIRÓS, I. A.; MAURIZ, T. V.; PACHECO, R. F. Evolução do uso da água na bacia do rio Preto no Distrito Federal. **Espaço & Geografia**, v. 10, n. 2, p. 325–353, 2007.

CARVALHO, O. A. J.; CARVALHO, A. P. F.; MENESES, P. R.; GUIMARÃES, R. F.; MARTINS, É. S. Análise de Imagens Hiperespectrais pelo Método Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) em depósito supergênico de Níquel. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 1, p. 63–74, 2003.

CEZAR, E.; NANNI, M. R.; CHICATI, M. L.; OLIVEIRA, R. B.; DEMATTÊ, J. A. M. Discriminação entre solos formados em região transicional por meio de sua resposta espectral. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 3, p. 644–654, 2013.

CHAGAS, C. S.; FILHO, E. I. F.; ROCHA, M. F.; JÚNIOR, W. de C.; NETO, N. C. S. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 14, n.2, p.218–226. 2010.

CLINE, M. G. **Basic Principles Of Soil Classification**. Soil Science, v. 67, n. 2, p. 81–92, 1949.

CLINE, M. G.; BUOL, S. W. Soils of the Central Plateau of Brazil and extension of results of field research conducted near Planaltina, Federal District. **Agronomy Mimeo**, v. 73, n. 13, p. 43, 1973.

CODEPLAN - COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL. **Atlas do Distrito Federal**. Brasília, DF: CODEPLAN, v. 1. 1984.

CODEPLAN - COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL. **Cartas Planialtimétricas em Formato Vetorial, na escala 1:25.000 e 10.000, Sistema Cartográfico do Distrito Federal - SICAD**, com informações sobre sistema viário, hidrografia, hipsometria e áreas urbanas. Brasília, DF: CODEPLAN, 1991.

COHEN, J. A coefficient of agreement of nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37–46, 1960.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices**. New York: Taylor & Francis Group, v. 25, 2010. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1477-9730.2010.00574_2.x>. Acesso em 15 de set. de 2016.

CONGALTON, R. G.; MEAD, R. A. A review of three discrete multivariate analysis techniques used in assessing the accuracy of remotely sensed data from error matrices. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. GE-24, n. 1, p. 169–174, 1986.

COOLEY, T.; ANDERSON, G. P.; FELDE, G. W.; HOKE, M. L.; RATKOWSKI, A. J.; CHETWYND, J. H.; GARDNER, J. A.; ADLER-GOLDEN, S. M.; MATTHEW, M. W.; BERK, A.; BERNSTEIN, L. S.; ACHARYA, P. K.; MILLER, D.; LEWIS, P. FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS, 3, 2002, Toronto. **Proceedings...** Toronto, p. 1414–1418, 2002.

COSTA, H. C.; MARCUZZO, F.; FERREIRA, O. M.; ANDRADE, L. R. Espacialização e Sazonalidade da Precipitação Pluviométrica do Estado de Goiás e Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 1, p. 87–100, 2012.

CRIVELENTI, R.C.; COELHO, R. M.; ADAMI, S. F.; ROBSON, S.; OLIVEIRA, M. Mineração de dados para a inferência de relações solo-paisagem em mapeamentos digitais de solo. **Revista Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 12, p.1707-1715, 2009.

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

DAUGHTRY, C. S.T.; Serbin G.; Reeves. J. B.; Doraiswamy, P.I C.; e Hunt Jr. E. R. Spectral Reflectance of Wheat Residue during Decomposition and Remotely Sensed Estimates of Residue Cover. **Remote Sensing**, p. 416-431, 2010.

DEMATTE, J. A. M. Characterization and discrimination of soils by their reflected electromagnetic energy. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1445–1458, 2002.

DEMATTE, J. A. M.; ARAÚJO, S. R.; FIORIO, P. R.; FONGARO, C. T.; NANNI, M. R. Espectroscopia VIS-NIR-SWIR na avaliação de solos ao longo de uma toposequência em Piracicaba (SP). **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 4, p. 679–688, 2015.

DEMATTE, 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.

DEMATTE, 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**, v. 39, p. 1219–1229, 2004.

DEMATTE, J. A. M.; HUETE, A. R.; FERREIRA JÚNIOR, L. G.; NANNI, M. R.; ALVES, M. C.; FIORIO, P. R. Methodology for Bare Soil Detection and Discrimination by Landsat TM Image. **The Open Remote Sensing Journal**, v. 2, n. 1, p. 24–35, 2009.

DEMATTE, J. A. M.; NANNI, M. R. Weathering sequence of soils developed from basalt as evaluated by laboratory (IRIS), airborne (AVIRIS) and orbital (TM) sensors. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 23, p. 4715–4738, 1 jan. 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/0143116031000075116>>. Acesso em 29 de nov. de 2015.

DEMATTE, J. A. M.; NANNI, M. R.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. Spectral reflectance for the mineralogical evaluation of Brazilian low clay activity soils. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 20, p. 4537–4559, 2007.

DEMATTE, J. A. M.; TERRA, F. DA S. Spectral pedology: A new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations. **Geoderma**, v. 217–218, p. 190–200, abr. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670611300428X>>. Acesso em 12 de mar. de 2016.

DEMATTE, J. A. M.; TERRA, F. S. Comportamento espectral de perfis modais dos principais solos de Rafard, SP. Campinas, **Bragantia**, v. 69, n. 2, p.249-252, 2010.

DEMATTE, J. A. M.; TOLEDO, A. M. A.; SIMÕES, M. S. Metodologia para reconhecimento de três solos por sensores: laboratorial e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 877–889, 2004.

DUDDLEY, K. L.; DENNISON, P. E.; ROTH, K. L.; ROBERTS, D. A.; COATES, A. R. A multi-temporal spectral library approach for mapping vegetation species across spatial and temporal phenological gradients. **Remote Sensing of Environment**, v. 167, p. 121–134, 15 set. 2015.

DUDLEY, K. L.; DENNISON, P. E.; ROTH, K. L.; ROBERTS, D. A.; COATES, A. R. A multitemporal spectral library approach for mapping vegetation species across spatial

and temporal phenological gradients. **Remote Sensing of Environment**, v. 167, p. 121–134, 15 set. 2015.

ELSAID, M.; ABOELKHAIR, H.; DARDIER, A.; HERMAS, E.; MINORU, U. Processing of Multispectral ASTER Data for Mapping Alteration Minerals Zones: As an Aid for Uranium Exploration in Elmissikat-Eleridiya Granites, Central Eastern Desert, Egypt. **The Open Geology Journal**, 8, (Suppl 1: M5) 69-83. 2014.

EMATER [Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal]. **Relatórios e informações agropecuárias – Produção agropecuária 2015**. Seagri-DF. Disponível em: http://www.emater.df.gov.br/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=72&Itemid=55#. Acesso em: 25 fev. 2016.

EMBRAPA [Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária]. CENTRO NACIONAL DE PESQUISAS DE SOLOS. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPq, 1997.

EMBRAPA [Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária]. CENTRO NACIONAL DE PESQUISAS DE SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 4. ed. Brasília: Embrapa-CNPq, 2014.

EMBRAPA [Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária]. SERVIÇO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa-SNLCS, 1978.

ENVI [Environment for visualizing images]. **Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide**. [S.l.]: ITT Visual Information Solutions, 2009. v. 4.

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

ERSDAC - EARTH REMOTE SENSING DATA ANALYSIS CENTER. **CrossTalk correction programa user's guide**. Tokyo: ERSDAC, 2003. 21p. Disponível em: [http://www.gds.ASTER.ersdac.or.jp/gds_www2002/service_e/u.tools_e/cross/GUIDE D. PDF](http://www.gds.ASTER.ersdac.or.jp/gds_www2002/service_e/u.tools_e/cross/GUIDE_D.PDF). Acesso em: 02 ago. 2016.

ESRI. **ArcGIS Desktop**: Release 10.3. Redlands CA. CA: Environmental Systems Research Institute, 2014.

EXELIS – VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **Calibrating Images Tutorial**. Disponível em: <http://www.exelisvis.com/docs/calibratingimagestutorial.html>. Acesso em: 12 mar. 2015a.

EXELIS – VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **Classification Tutorial**. Disponível em: <http://www.exelisvis.com/docs/classificationtutorial.html>. Acesso em: 11 dez. 2015b.

EXELIS – VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **ENVI Tutorials**. Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/Tutorials.html>>. Acesso em: 5 mai. 2015c.

EXELIS - VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH)**. Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/FLAASH.html>>. Acesso em: 01 mar. 2015d.

EXELIS – VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **Linear Spectral Unmixing**. Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/LinearSpectralUnmixing.html>>. Acesso em: 16 nov. 2015e.

EXELIS – VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **Manage Raster Data**. Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/ManageRasterData.html#Masking>>. Acesso em: 11 nov. 2015f.

EXELIS – VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **SPEAR Vegetation Delineation**. Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/SPEARVegetationDelineation.html>>. Acesso em: 12 out. 2015g.

EXELIS – VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **Spectral Libraries**. Disponível em: <<https://www.exelisvis.com/docs/spectrallibraries.html#Spectral>>. Acesso em: 1 jan. 2015h.

FERREIRA, C. S. **Avaliação Temporal do Uso e Ocupação das Terras na Bacia do Rio São Bartolomeu, DF**. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - Universidade de Brasília, DF, 120 p. 2005.

FERREIRA, L. G.; YOSHIOKA, H.; HUETE, A.; SANO, E. E. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 534–550, 15 nov. 2003.

FIGUEIREDO, G. C.; VIEIRA, C. A. O. Estudo do comportamento dos índices de exatidão global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de imagens de sensoriamento remoto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis **Anais...** Florianópolis, p. 5755–5762, 2007.

FIGUEIREDO, S. R.; GIASSON, E.; TORNQUIST, C. G.; NASCIMENTO, P. C. Uso de regressões logísticas múltiplas para mapeamento digital de solos no Planalto Médio do RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2779–2785, 2008.

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

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

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

FONGARO, C. T. **Mapeamento granulométrico do solo via imagens de satélite e atributos de relevo**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. 106

FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. Viçosa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 467-474, 1996.

FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. Viçosa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 467-474, 1996.

FORTES, C.; DEMATTÊ, J. A. M.; GENÚ, A. M. Estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar por dados espectrais orbitais ETM+/LANDSAT 7. **Ambiência**, v. 5, n. 3, p. 489–504, 2009.

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**, v. 48, p. 1569–1582, 2013.

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**, v. 48, p. 1569–1582, 2013.

FREITAS-SILVA, F. H.; CAMPOS, J. E. G. Geologia do Distrito Federal. In: Instituto de Geociências da Universidade De Brasília. IEMA/SEMATEC/UNB (Org.). **Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal**. Brasília, DF: Universidade de Brasília. p. 45. 1998a

FREITAS-SILVA, F. H.; CAMPOS, J. E. G. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: Instituto de Geociências da Universidade De Brasília. IEMA/SEMATEC/UNB (Org.). **Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, v. 2. p. 66. 1998b.

GALLO, B. C. **Imagens multitemporais do Landsat TM como estratégia no apoio ao levantamento pedológico**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 78 p. 2015.

GARCÍA-HARO, F. J.; SOMMER, S.; KEMPER, T. A new tool for variable multiple endmember spectral mixture analysis (VMESMA). **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 10, p. 2135–2162, 1 maio 2005.

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

GENÚ, A. M.; ROBERTS, D. A.; DEMATTÊ, J. A. M. The use of multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) for the mapping of soil attributes using Aster imagery. **Acta Scientiarum. Agronomy**. v. 35, p. 377-386, 2013.

GOMES, D.; VICENTE, L. E.; CARVALHO, S.; VICTORIA, D.; ANDRADE, R. G.; AGNESE, M. L.; DA-SILVA, R. F. B. Avaliação comparativa de correção atmosférica de imagens Landsat utilizando MODTRAN e Dark Object Subtraction. In: Simpósio Internacional SELPER, 15, 2012, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 236-245, 2012.

HAUBROCK, S. N.; CHABRILLAT, S.; LEMMNITZ, C.; KAUFMANN, H. Surface soil moisture quantification models from reflectance data under field conditions. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 3–29, 2008.

HENGL, T.; ROSSITER, D. G. Supervised Landform Classification to Enhance and Replace Photo-Interpretation in Semi-Detailed Soil Survey. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 6, p. 1810, 2003.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Grografia do Brasil: Região Centro-Oeste**. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 1977.

IBGE [INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA]. **FAQ (Frequently Asked Questions - Perguntas Mais Frequentes)**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/faq.shtm>>. Acesso em: 19 abr. 2015.

IBGE [INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA]. **Mapa Índice Digital – MID: mapeamento geral do Brasil**. 4. ed. Rio de Janeiro: IBGE / DSG, 2011.

IBRAM [INSTITUTO BRASÍLIA AMBIENTAL]. **Bioma Cerrado**. Disponível em: <<http://www.ibram.df.gov.br/informacoes/meio-ambiente/bioma-cerrado.html>>. Acesso em: 21 ago. 2015.

INPE [INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS]. **Sensoriamento Remoto Orbital aplicado a estudos urbanos**. São José dos Campo, SP: INPE, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BEFCJH>>. Acesso em 11 de abr. de 2016.

IWASAKI, A.; TONOOKA, H. Validation of crosstalk correction algorithm for Aster/sawir. **IEEE transactions on geoscience and remote sensing**, v. 43, n. 12, p. 2747-2751, 2005.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campo, SP: Parêntese Editora, 2009.

JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V.; DUFT, D. G.; LAMPARELLI, R. A. C. Estimativa de áreas com culturas de verão no Paraná, por meio de imagens multitemporais EVI/Modis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1295–1306, 2012.

KÄMPF, N.; CURI, N. Conceito de solo e sua evolução histórica. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E.; TORRADO, P. V. (Org.). **Pedologia: Fundamentos**. 1. ed. Viçosa, MG: SBCS. p. 343. 2012.

KING, L. C. A geomorfologia do Brasil Central. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 18, n. 2, p. 147–265, 1956.

KÖPPEN, W. Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf (Classification of climates according to temperature, precipitation and seasonal cycle). **Petermanns geographische Mitteilungen**, v. 64, p. 193–203, 1918.

KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. W.; HEIDEBRECHT, K. B.; SHAPIRO, A. T.; BARLOON, P. J.; GOETZ, A. F. H. The Spectral Image Processing System (SIPS) - interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, v. 44, n. 2–3, p. 145–163, maio 1993.

LABSPHERE. **Spectralon® diffuse reflectance standards**. Disponível em: < <https://www.labsphere.com/labsphere-products-solutions/materials-coatings-2/coatings-materials/spectralon/> >. Acesso em: 11 jun. 2016.

LACERDA, M. P. C. e BARBOSA, I. O. Relações Pedomorfogeológicas e Distribuição de Pedoformas na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Distrito Federal. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 36, p. 709-721, 2012.

LAGO, W. N. M.; LACERDA, M. P. C.; NEUMANN, M. R. B. Indicadores de qualidade dos solos na microbacia do Ribeirão Extrema, Distrito Federal: parte II. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 7, p. 721–729, 2012.

LAMPARELLI, R. A. C.; NERY, L.; ROCHA, J. V. Utilização da técnica por componentes principais (ACP) e fator de iluminação, no mapeamento da cultura do café em relevo montanhoso. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 584–597, 2011.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159–174, 1977.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 6. ed. Madison, USA: John Wiley & Sons, , 621 p. 2007.

LIU, T.; YANG, X. Mapping vegetation in an urban area with stratified classification and multiple endmember spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 133, p. 251–264, 15 jun. 2013.

LOBELL, D. B.; ASNER, G. P. Moisture effects on soil reflectance. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 3, p. 722–727, 2002.

MADEIRA NETTO, J. S. Comportamento espectral dos solos. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Ed). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, 262p., cap. 4, p. 127-154, 2001.

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

MADEIRA NETTO, J.; BEDIDI, A.; CERVELLE, B.; POUGET, M.; FLAY, N. Spectral (MIR) determination of kaolinite and gibbsite contents in Lateritic soils. Paris, **C.R. Academy Science**, serie lia. p.119-128, 1995.

MALAQUIAS, J. V.; SILVA, F. A. M.; EVANGELISTA, B. A. E. **Normal climatológica de 1974 a 2003 da estação principal da Embrapa Cerrados**. (Documentos/Embrapa Cerrados) Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 98p, 2014.

MARTINS, E. S. Sistemas Pedológicos do Distrito Federal. In: **Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal**. vol. 1, Brasília: IEMA/SEMATEC/UnB, p.139-163, 1998.

MARTINS, E. S.; BAPTISTA, G. M. M. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In: IEMA/SEMATEC/UNB (Org.). **Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília**. 1. ed. Brasília, DF: IEMA/SEMATEC/UnB, p. 2–53. 1998.

MATHEWS, H. L.; CUNNINGHAM, R. L.; PETERSEN, G. W. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 37, n. 3, p. 421–424, 1973.

McBRATNEY, A.B.; MENDONÇA-SANTOS, M.L. e MINASNY, B. On digital soil mapping. Amsterdam, **Geoderma**, v. 117, p. 3-52, 2003.

MCKENZIE, N. J.; RYAN, P. J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, v. 89, n. 1–2, p. 67–94, abr. 1999.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPq / UnB, 276 p. 2012.

MENESES, P. R.; SANO, E. E. Classificação pixel a pixel de imagens. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: CNPq / UnB, p. 191–208. 2012.

MENESES, P. R.; SANTA ROSA, A. N. DE C. Filtragem. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: CNPq / UnB. p. 168–190. 2012.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 315 p. 2007.

MOTTA, P. E. F. DA; CARVALHO FILHO, A. DE; KER, J. C.; PEREIRA, N. R.; CARVALHO JUNIOR, W. DE; BLANCANEUX, P. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6, p. 869–878, 2002.

MULDER, V. L.; BRUIN, S.; SCHAEPMAN, M. E.; MAYR, T. R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping – A review. Amsterdam, **Geoderma**, v. 162, p. 1-19, 2011

NAGLER, P. L.; DAUGHTRY, C. S. T.; GOWARD, S. N. Plant litter and soil reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, n. 2, p. 207–215, 2000.

NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Comportamento da linha do solo obtida por espectrorradiometria laboratorial para diferentes classes de solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 30, n. 6, p. 1031–1038, 2006a.

NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Spectral Reflectance Methodology in Comparison to Traditional Soil Analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 393–407, mar. 2006b.

NASA JPL. ASTER: Change in Status Alert - January 12, 2009. Jet Propulsion Laboratory. **Instituto de Tecnologia da Califórnia**. EUA. 2009. Disponível em: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/swir-alert.asp>. Acesso em: 20 jul. 2016.

NASA LP DAAC. **ASTER Products Table**. USGS 2014. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/aster/aster_products_table. Acesso em: 29 jul. 2016.

NAWAR, S.; BUDDENBAUM, H.; HILL, J. Estimation of soil salinity using three quantitative methods based on visible and near-infrared reflectance spectroscopy: a case study from Egypt. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 7, p. 5127–5140, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12517-014-1580-y>>. Acesso em 02 de fev. de 2016.

NAZEER, M.; NICHOL, J. E.; YUNG, Y. K. Evaluation of atmospheric correction models and Landsat surface reflectance product in an urban coastal environment. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 16, p. 6271–6291, 18 ago. 2014.

NOVAES PINTO, M. Aplainamento nos trópicos: uma revisão conceitual. Rio Claro, **Geografia**, v. 13, n. 26, p. 119–129, 1988.

NOVAES PINTO, M. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: NOVAES PINTO, M. (Org.). **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas**. Brasília, DF: Universidade de Brasília/SEMATEC, 1994.

NOVAES PINTO, M. Superfícies de aplainamento do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 49, p. 9–27, 1987.

NOVAES PINTO, M.; CARNEIRO, P. J. R. **Análise preliminar das feições geomorfológicas do Distrito Federal**. 1984, São Paulo, SP: EDUSP, 1984.

NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo, SP: Blucher, 2010, 383 p.

PALUDO, A.; J. A. JOHANN; M. A. U. OPAZO; J. RICHETTI; W. R. BECKER. Uso de Sensoriamento Remoto no Mapeamento da Cobertura Florestal, Corpos Hídricos e Cidades para o Estado do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA, 43, 2014, Campo Grande, MS. **Anais...** Campo Grande, MS, p. 595-603, 2014.

PENTEADO, M. M. Tipos de concreções ferruginosas nos compartimentos geomorfológicos do Planalto de Brasília. **Notícia Geomorfológica**, v. 16, p. 39–53, 1976.

PEREIRA, T. T. C.; KER, J. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F. DE; NEVES, J. C. L.; ALMEIDA, C. C. Gênese de latossolos e cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas do grupo Bambuí - Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1283–1295, 2010.

PHILLIPS, T. L.; DAVIS, S. M.; LANDGREBE, D. A.; SWAIN, P. H.; HOFFER, R. M.; LINDENLAUB, J. C.; SILVA, L. F. **Remote sensing: The quantitative approach**. 1 ed. New York: McGraw-Hill International Book Co, 1978.

PHILPOT, W. Spectral reflectance of wetted soils. Proceedings of ASD and IEEE GRS; Art, **Science and Applications of Reflectance Spectroscopy Symposium**. Vol II: 11 p. 2010.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2012. 127 p.

POPPIEL, R. R. **Mapeamento Pedológico por meio de série histórica Landsat-5 TM e Biblioteca Espectral na Bacia do Rio Jardim (DF)**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2016, 158 p. Dissertação de Mestrado.

QUINTANO, C.; FERNÁNDEZ-MANSO, A.; ROBERTS, D. A. Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) to map burn severity levels from Landsat images in Mediterranean countries. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 76–88, set. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425713001466>>. Acesso em: jun. 2016.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Viena, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2015, v. 55.

REATTO, A.; MARTINS, E. DE S.; FARIAS, M. F. R.; SILVA, A. V.; CARVALHO, O. A. J.; OLIVEIRA, R. C. J.; RODRIGUES, T. E.; SANTOS, P. L.; VALENTE, M. A. **Mapa pedológico digital - SIG atualizado do Distrito Federal escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.

RESENDE, M.; CURI, N.; CORREA, G. F.; REZENDE, S. B. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Lavras: UFLA, 2007.

ROBERTS, D. A.; GARDNER, M.; CHURCH, R.; USTIN, S.; SCHEER, G.; GREEN, R. O. Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, n. 3, p. 267–279, 1998.

ROBERTS, D. A.; HALLIGAN, K.; DENNISON, P. **VIPER Tools User Manual**. Santa Barbara: University of California, 2007. 91 p. Disponível em: <<http://www.vipertools.org/>>. Acesso em: jul. 2016.

RODOLFO JUNIOR, F.; ARAÚJO, L. G.; SOUZA, R. Q.; SILVA BATISTA, F. P.; OLIVEIRA, D. N. S.; LACERDA, M. P. C. Relações solo-paisagem em topossequências na Fazenda Água Limpa, Distrito Federal. **Nativa**, v. 3, n. 1, p. 27–35, 2015.

RODRIGUES, T. E.; KLAMT, E. Mineralogia e gênese de uma sequência de solos do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, n. 2, p. 132–139, 1978.

ROUSE, J. W.; R. H. HAAS; J. A. SCHELL; D. W. DEERING. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS Symposium, 3, 1973, Washington, DC, USA, **Proceedings...** Washington, DC, USA, p. 309–317, 1973.

SANO, E. E.; ROSA, R.; LUÍS, J.; BRITO, S.; FERREIRA, G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 153–156, 2008.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. Viçosa, MG: SBCS / Embrapa-CNPS, 102p., 2015.

SATO, M. V. **Primeira aproximação da biblioteca espectral de solos do Brasil: caracterização de espectros de solos e quantificação de atributos**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. 102 p.

SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A. **Geologia do Brasil**. Brasília, DF: DNPM, 1984, 45 p.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing**. 3. ed. San Francisco, CA: Academic Press, 2007, 560 p.

SCHWEIK, C. M.; GREEN, G. M. The Use of Spectral Mixture Analysis to Study Human Incentives, Actions, and Environmental Outcomes. **Social Science Computer Review**, v. 17, n. 1, p. 40–63, 1999.

SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O. A.; MCARTHUR, D. Predictive soil mapping: a review. **Progress in Physical Geography**, v. 27, n. 2, p. 171–197, 2003.

SEMARH. SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HIDRICOS. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (ZEE-DF)** - Subproduto 3.1. Brasília, DF: SEMARH, 2012. 172 p.

SERBIN, G.; Hunt, E.R., Jr.; Daughtry, C.S.T.; Doraiswamy, P.C. An improved ASTER index for remote sensing of crop residue. *Remote Sens.* 2009, 1, 971-991.

SILVA, A. A.; GALON, L.; FERREIRA, F. A.; TIRONI, S. P.; FERREIRA, E. A.; SILVA, A. F. DA; ASPIAZÚ, I.; AGNES, E. L. Sistema de plantio direto na palhada e seu impacto na agricultura brasileira. **Revista Ceres**, v. 56, n. 4, p. 496–506, 2009.

SOUSA JUNIOR, J. G. A.; DEMATTÊ, J. A. M. Modelo Digital de Elevação na caracterização de solos desenvolvidos e basalto e material arenítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.32, p. 449-456, 2008.

SOUSA JUNIOR, J.G.; DEMATTÊ, J.A.M.; GENÚ, A.M. Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.727-738, 2008.

STONER, E.; DERKSEN, I.; MACEDO, J. Discriminação espectral de Latossolos do Planalto Central brasileiro. Brasília, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.26, p.1599-1606, 1991.

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

STRECK, N. A.; RUNDQUIST, D.; CONNOT, J. Estimating residual wheat dry matter from remote sensing measurements. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 68, n. 11, p. 1193–1201, 2002.

TEIXEIRA, A.; MATIAS, L.; NOAL, R.; MORETTI, E. Qual a melhor definição de SIG. Curitiba, **Fator GIS**, n.11, p.20-24, out./nov./dez, 1995.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S D.; MENDONÇA-SANTOS, M. DE L.; GIASSON, E. Mapeamento digital de classes de solos: características da abordagem brasileira. Santa Maria, **Ciência Rural**, v.42, n.11, p.1989-1997, nov. 2012.

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, 2011a.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F.de A.; MENDONÇA SANTOS, M. de L. Extrapolação das relações solo-paisagem a partir de uma área de referência. Santa Maria, **Ciência Rural**, v.41, n.5, p.812-816, mai. 2011b.

TERRACAP – AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO DISTRITO FEDERAL. **Ortofotos de reconhecimento do Distrito Federal, na escala 1:5.000**. Brasília, DF: TERRACAP, 2013.

TRENTIN, R.; M. LOHMANN; F. DEPPE; J. GRASSI. Mascaras de cultivo de cana-de-açúcar das safras 2008, 2009 e 2010 no estado do Paraná. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba, PR. **Anais...** Curitiba, PR, p. 607–614, 2011.

USGS - United States Geological Survey. **Download GLOVIS**. 2015. Disponível em:< http://glovis.usgs.gov/distribution/download_notices.shtml>. Acesso em: 05 abr. 2016.

VIEIRA, V. A. S.; MELLO, C. R.; LIMA, J. M. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma microbacia hidrográfica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 5, p. 1477–1485, 2007.

YOSHIOKA, H.; MIURA, T.; DEMATTÊ, J. A. M.; BATCHILY, K.; HUETE, A. R. Soil Line Influences on Two-Band Vegetation Indices and Vegetation Isolines: A Numerical Study. **Remote Sensing**, v. 2, p. 545–561, 2010.