

**ANÁLISE MINERAL ATRAVÉS DA ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA:
ANÁLISE DOS MINERAIS DE TITÂNIO PARA REGIÃO DO RETIRO, SÃO JOSÉ
DO NORTE, RS**

André Bilibio Westphalen

Porto Alegre - RS

Outubro de 2018

**ANÁLISE MINERAL ATRAVÉS DA ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA:
ANÁLISE DOS MINERAIS DE TITÂNIO PARA REGIÃO DO RETIRO, SÃO JOSÉ
DO NORTE, RS**

André Bilibio Westphalen

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Sensoriamento Remoto pelo Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade federal do Rio Grande do Sul (PPGSR-UFRGS).

ORIENTADOR:

Profa. Dra. Dejanira Luderitz Saldanha

COMISSÃO ORIENTADORA:

Prof. Dr. Lauro Júlio Calliari
Prof. Dr. Miguel Da Guia Albuquerque
Prof. Dr. Laurindo Antônio Guasselli

Porto Alegre - RS

Outubro de 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Westphalen, André Bilibio

Análise mineral através da espectroscopia de reflectância: Análise dos minerais de Titânio para região do Retiro, São José do Norte, RS / André Bilibio Westphalen. -- 2018.

145 f.

Orientadora: Dejanira Luderitz Saldanha.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Minerais de Titânio. 2. Espectroscopia. 3. Análise geoquímica. I. Saldanha, Dejanira Luderitz, orient. II. Título.



UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

TESE

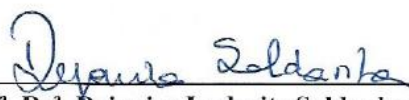
Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOUTOR EM SENSORIMENTO REMOTO


Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR)
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPRSM)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Porto Alegre, RS, Brasil.

Aprovada em: 9/10/2018
Pela Banca Examinadora:


Homologada em: / /
Por:




Prof. Dr.ª Dejanira Luderitz Saldanha
Orientadora



Prof. Dr. Miguel da Guia Albuquerque
(Instituto Federal do Rio Grande do Sul - IFRS)



Prof. Dr. Lauro Júlio Calliari
(Universidade Federal do Rio Grande - FURG)



Prof. Dr. Jorge Ricardo Ducati
(Docente do PPGSR/UFRGS)



Prof. Dr.ª Tatiana Silva da Silva
Coordenadora do Programa de
Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto

PPGSR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM SENSORIAMENTO REMOTO

Av. Bento Gonçalves, 9.500 - Campus do Vale
Bairro Agronomia - CEP 91501-970 - Porto Alegre -RS
Telefones: (51) 3308-6221 e (51) 3308-7479
<http://www.ppgsr.ufrgs.br>
Endereço eletrônico: ppgsr@ufrgs.br

“A grande conquista é o resultado de pequenas vitórias que passam despercebidas.” (Paulo Coelho)

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por me guiar até aqui e fazer com que esta etapa da minha vida se concretizasse.

Agradecer a Professora Dr^a Dejanira Luderitz Saldanha pela orientação, pelo acolhimento e carinho que sempre demonstrou por mim, bem como ter demonstrado total confiança no meu trabalho.

Agradecer a minha esposa Liliane por estar sempre ao meu lado, não somente na realização deste trabalho, mas em todos os momentos da minha vida, TE AMO....

Agradecer ao meu filho Luís Fernando pela ajuda nos trabalhos de campo, no companheirismo nas horas ruins e boas deste trabalho, pois tudo o que faço na minha vida é pensando em ti.

Agradecer a minha vizinha Zulmira Fava, por ter me ajudado no início dos meus estudos, pessoa que sempre acreditou na minha capacidade.

Agradeço a toda minha família, que sempre me desejaram o melhor.

Ao Jean Espinoza, irmão que Deus me deu, pela ajuda em todos os momentos deste doutorado, uma pessoa que não existe no dicionário uma palavra que possa definir o tamanho profissional e amigo que é.

Agradecer aos meus colegas do IFRS, em especial ao Deivid, Jefferson, Miguel e João, que foram incansáveis nas saídas de campo para coletas de dados e também nas sugestões da escrita da tese.

Agradecer a ajuda do professor Dr^o. Ducati pela ajuda nas análises no laboratório de espectroscopia do PPGSR.

Agradecer ao Professor Dr^o Lauro Júlio Calliari pela ajuda e orientação nas coletas de campo, bem como na utilização do laboratório da FURG.

Agradecer ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS Campus Rio Grande pelo uso dos laboratórios, pelo apoio e o pelo afastamento concedido nos 4 anos de meu doutoramento, demonstrando a valorização dos servidores que procuram por qualificação.

Enfim, a todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram neste trabalho, meu muito obrigado.

RESUMO

WESTPHALEN, André Bilibio. **Análise mineral através da espectroscopia de reflectância: Análise dos minerais de Titânio para região do Retiro, São José do Norte, RS** . n° pág: 145p.. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, 2018.

Esse trabalho discute a identificação e quantificação de minerais do Titânio (Ti) presente na localidade do Retiro, São José do Norte, localizada na faixa litorânea do Estado do Rio Grande do Sul, através da classificação de imagens orbitais do sensor HYPERION e, fazendo uma comparação da análise espectroscópica (*espectroradiômetro*) e análise geoquímica desses minerais. Como contribuição, este estudo demonstra a possibilidade de construção de mapeamentos minerais através da metodologia empregada, permitindo mensurar a presença e a extensão da distribuição espacial dos mesmos. A metodologia utilizada nessa pesquisa se consistiu em: (1) Análise geoquímica da concentração dos minerais de interesse nas amostras coletadas, (2) seleção das assinaturas espectrais de interesse à partir de uma biblioteca espectral desses minerais, (3) determinação das feições espectrais características para os minerais de interesse, (4) obtenção e pré-processamento de dados espectrais e geoquímicos para área de estudo; (5) comparação dos dados geoquímicos e espectrais, (6) confecção de um mapa 3D indicando a presença mineral representada em escala de concentração de minerais de titânio para a área analisada, ao longo dos perfis verticais escavados. A partir dessa metodologia foram produzidas imagens 3D indicando a presença mineral representada em escala de concentração com os resultados obtidos em campo e com a utilização do *espectroradiômetro*. Os resultados demonstram uma coincidência entre os níveis de concentração nas análises geoquímica e espectral com um coeficiente de determinação médio de aproximadamente 87% ($R^2 \cong 0,87$), mostrando a importância do uso de dados de sensoriamento remoto como ferramenta de apoio a mineração bem como ao mapeamento de recursos minerais em áreas extensas e descobertas de vegetação como a faixa litorânea gaúcha.

Palavras-chave: Minerais de Titânio, Espectroscopia, Análise geoquímica.

ABSTRACT

WESTPHALEN, André Bilibio. **Analysis through reflectance spectroscopy: Analysis of titanium minerals for the region of Retiro, São José do Norte, RS.** n° pág: 145p. Thesis (Phd of Remote Sensing). Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, 2018.

This work discusses the identification and quantification of Titanium (Ti) minerals present in the Retiro region, São José do Norte, located in the coastal strip of the State of Rio Grande do Sul, through the classification of orbital images of the HYPERION sensor and making a comparison of the spectroscopic analysis (spectroradiometer) and geochemical analysis of these minerals. As a contribution, this study demonstrates the possibility of constructing mineral mappings using the methodology applied, allowing measuring the presence and the extent of the spatial distribution of the same. The methodology used in this research consisted of: (1) Geochemical concentration analysis in the minerals of interest for the samples collected, (2) selection of spectral signatures of interest from spectral libraries, (3) determination of spectral characteristic features for the minerals of interest, (4) acquisition and pre-processing of spectral and geochemical data for the study area; (5) comparison the geochemical and spectral data, (6) elaboration of a 3D map indicating the mineral presence represented by a concentration scale of titanium minerals for the analyzed area, along the vertical profiles collected. From this methodology were produced 3D images indicating the mineral presence represented in scale of concentration with the results obtained in the field and with the use of the spectroradiometer. The results showed a coincidence between geochemical concentration levels and spectral analyzes with an average determination coefficient of approximately 87% ($R^2 = 0.87$), showing the importance of the use of remote sensing data as a tool to support mining as well such as the mapping of mineral resources in extensive areas and discoveries of vegetation such as the coastal strip of Rio Grande do Sul.

Key-words: Titanium Minerals, Spectroscopy, Geochemical analysis

SUMÁRIO

RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE QUADROS.....	xvii
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xviii
LISTA DE APÊNDICES.....	xix
1. INTRODUÇÃO.....	20
1.2. ÁREA DE ESTUDO.....	22
2. OBJETIVOS.....	25
2.1. OBJETIVO GERAL.....	25
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
3. HIPÓTESE.....	26
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	26
4.1. Conceituação básica das radiações eletromagnéticas aplicadas ao sensoriamento remoto.....	26
4.2. Sensoriamento remoto voltado à geologia.....	28
4.2.1. Sensor ASTER.....	28
4.2.2. Sensor AVIRIS (<i>Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer</i>).....	30
4.2.3. Sensor <i>HYPERION</i>	33
4.3. A espectroscopia como suporte para análise mineral.....	34
4.3.1. Espectroscopia de reflectância.....	35
4.3.2. Espectrometria no Infravermelho.....	36
4.3.3. Processos eletrônicos.....	37

4.3.4. Efeito do campo cristalino.....	39
4.3.5. Transferência de carga.....	40
4.3.6. Bandas de condução e Valência.....	40
4.4. O Titânio.....	41
4.4.1. Geologia do Titânio.....	43
4.4.2. Minerais do Titânio.....	44
4.5. Transformações ortogonais e funções-base aplicadas a decomposição espectral.....	46
4.6. Modelos digitais de terreno.....	47
4.6.1. Levantamento topográfico por <i>DRONE</i>	49
4.7. GPS-RTK para determinação de pontos de controle topográfico.....	51
4.8. Testes estatísticos e de acurácia.....	52
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	54
5.1. MATERIAL UTILIZADO.....	54
5.2. MÉTODOS.....	55
5.2.1. Amostras minerais de campo – testemunhos de solo.....	57
5.2.2 Assinaturas espectrais de minerais – bibliotecas espectrais.....	61
5.2.3. Análise geoquímica das amostras de Minerais de titânio.....	62
5.2.4. Criação e implementação do modelo de decomposição da assinatura das amostras em seus constituintes a partir de funções-base.....	64
5.2.5. Comparação dos resultados do modelo com os valores medidos em laboratório.....	70
5.2.6. Utilização do modelo para estimação dos constituintes químicos de uma área piloto a partir de uma imagem hiperespectral.....	71
5.2.7. Levantamento de dados topográficos com uso de <i>DRONE</i>	77
5.2.8. Interpolação espacial em 3D dos dados de composição química-mineral.....	80
5.2.9. Determinação da acurácia do modelo gerado e de suas aplicações.....	82
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83

6.1. Biblioteca espectral das amostras compostas por solo e minerais pesados.....	83
6.3. Decomposição espectral via funções-base.....	85
6.4. Análise da presença de minerais pesados.....	87
6.4.1. Análise por Geoquímica.....	87
6.4.2. Análise por Espectroscopia.....	93
6.5. Modelo digital de elevação gerado com aerolevantamento por Drone.....	100
6.6. Mapeamento 3D da distribuição dos minerais de titânio.....	102
6.7. Mapeamento da distribuição espacial dos minerais de titânio usando uma imagem hiperespectral <i>HYPERION</i>	106
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
7.1. Conclusões.....	110
7.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	111
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
9. Apêndices.....	119
9.1. Espectros originais.....	119
9.2. Testemunhos de sola das perfurações realizadas.....	130
9.3. Dados da decomposição dos espectros e estimativa mineral via espectroscopia.....	139
9.4. Rotinas MATLAB desenvolvidas.....	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo.	23
Figura 2: Componentes do sistema ASTER.....	29
Figura 3: Sensor AVIRIS	32
Figura 4: Sensor HYPERION	33
Figura 5: Diagrama dos níveis da molécula de água. As feições de absorção representam transições do estado fundamental zero para o primeiro estado excitado.	38
Figura 6: ilustração da diferença entre MDS e MDT	48
Figura 7: Primeiro passo seguido na metodologia do trabalho	56
Figura 8: Segundo passo seguido na metodologia	57
Figura 9: Perfuração dos testemunhos com o auxílio do percussor.....	58
Figura 10: Identificação e acondicionamento das amostras	59
Figura 11: Imagem do corte dos canos.....	60
Figura 12: Imagem do testemunho cortado longitudinal.....	60
Figura 13: Imagem da separação das alíquotas de 10 cm do testemunho	60
Figura 14: Ilustração do Field Spec 3.....	61
Figura 15: Análise de decantação de minerais pesados por bromofórmio.	63
Figura 16: (A) Espectros originais para o ponto de coleta P29 (B) Espectros escritos via funções-base (C) Realce das bandas espectrais via Derivada Primeira e (D) sua decomposição-reconstrução a partir de seus constituintes espectrais adotados.	66
Figura 17: (A) Espectros originais para o ponto de coleta P16 (B) Espectros escritos via funções-base (C) Realce das bandas espectrais via Derivada Primeira e (D) sua decomposição-reconstrução a partir de seus constituintes espectrais adotados	67

Figura 18: (A) Espectros originais para o ponto de coleta P13 (B) Espectros escritos via funções-base (C) Realce das bandas espectrais via Derivada Primeira e (D) sua decomposição-reconstrução a partir de seus constituintes espectrais adotados	68
Figura 19: (A) Espectros originais para o ponto de coleta P09 (B) Espectros escritos via funções-base (C) Realce das bandas espectrais via Derivada Primeira e (D) sua decomposição-reconstrução a partir de seus constituintes espectrais adotados.	69
Figura 20: Fluxograma da sequência de processos para a aplicação da DCDP.	75
Figura 21: Comparação entre um espectro de refletância (A - Rutilo - USGS) e sua derivada-primeira (B - Obtida via emprego da DCDP).	76
Figura 22: Imagem dos pontos de controle(alvos)	78
Figura 23: Demonstração dos <i>Tie Points</i>	80
Figura 24: Demonstração da <i>Dense Cloud</i>	80
Figura 25: Grid de ponto de coleta das amostras de solo para fins de modelagem 3D	81
Figura 26: Espectros obtidos em laboratório da amostra P09	83
Figura 27: Espectros obtidos em laboratório da amostra P13	84
Figura 28: Espectros obtidos em laboratório da amostra P16	84
Figura 29: Espectros obtidos em laboratório da amostra P29	84
Figura 30: Exemplo de decomposição espectral..	86
Figura 31: Regressão linear entre os dados de geoquímica de laboratório e Análise espectral proposta	87
Figura 32: Percentual de minerais pesados em 10cm na análise geoquímica	88
Figura 33: Percentual de minerais pesados em 20cm na análise geoquímica	88
Figura 34: Percentual de minerais pesados em 30cm na análise geoquímica	89
Figura 35: Percentual de minerais pesados em 40cm na análise geoquímica	89
Figura 36: Percentual de minerais pesados em 50cm na análise geoquímica	90

Figura 37: Percentual de minerais pesados em 60cm na análise geoquímica	90
Figura 38: Percentual de minerais pesados em 70cm na análise geoquímica	91
Figura 39: Percentual de minerais pesados em 80cm na análise geoquímica	91
Figura 40: Percentual de minerais pesados em 90cm na análise geoquímica	91
Figura 41: Percentual de minerais pesados em 100 cm na análise geoquímica	92
Figura 42: Pontos exemplo usados para a reconstrução dos espectros a partir das assinaturas espectrais de referência.....	93
Figura 43: Passos de decomposição dos espectros adotado no trabalho.....	94
Figura 44: Percentual de minerais pesados em 10cm por espectroscopia.....	95
Figura 45: Percentual de minerais pesados em 20cm por espectroscopia.....	95
Figura 46: Percentual de minerais pesados em 30cm por espectroscopia.....	96
Figura 47: Percentual de minerais pesados em 40cm por espectroscopia.....	96
Figura 48: Percentual de minerais pesados em 50cm por espectroscopia.....	97
Figura 49: Percentual de minerais pesados em 60cm por espectroscopia.....	97
Figura 50: Percentual de minerais pesados em 70cm por espectroscopia.....	98
Figura 51: Percentual de minerais pesados em 80cm por espectroscopia.....	98
Figura 52: Percentual de minerais pesados em 90cm por espectroscopia.....	99
Figura 53: Percentual de minerais pesados em 100cm por espectroscopia.....	99
Figura 54: Modelo digital de superfície produzido pelo aerolevanteamento por DRONE.....	101
Figura 55: Imagem da representação 3D do mapeamento mineral para os dados de análise geoquímica.....	102
Figura 56: Visada 3D do mapeamento mineral para os dados de análise geoquímica.....	103

Figura 57: Imagem da representação 3D do mapeamento mineral para os dados de análise por espectroscopia.....	103
Figura 58: Visada da representação 3D do mapeamento mineral para os dados de análise por espectroscopia.....	104
Figura 59: Perfis longitudinais para comparação das variações de concentração mineral ao longo da média vertical dos pontos de coleta	105
Figura 60: Variação das concentrações ao longo dos perfis expostos na Figura 59.	105
Figura 61: Gráfico de regressão linear entre os valores estimados via imagem e aqueles descritos na literatura.	107
Figura 62: (A) Imagem HYPERION com composição colorida (cor verdadeira) – R/G/B-B31/B21/B11; (B - C) Espectros dos minerais de titânio obtidos via biblioteca espectral da USGS; e, (D) Imagem HYPERION classificada do mapeamento de titânio – apenas com as áreas de titânio acima do background.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo dos valores percentuais de concentração de minerais pesados obtidos via análise geoquímica	92
Tabela 2: Resumo dos valores percentuais de concentração de minerais pesados obtidos via espectroscopia	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Material utilizado na execução do trabalho.....	54
Quadro 2: especificações do Field Spec 3.....	62
Quadro 3: Informações sobre o sensor HYPERION. Fonte: adaptado de USGS(2016).....	72

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Energia de um fóton	38
Equação 2: sobreposição linear de espectros	46
Equação 3: Sistema de combinação linear dos espectros	64
Equação 4: decomposição espectral	71

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 1: Espectros originais	119
Apêndice 2: Testemunhos de solo.....	130
Apêndice 3: Análise comparativa das estimativas de presença mineral via geoquímica de laboratório e espectroscopia	139
Apêndice 4: Códigos desenvolvidos	142

1. INTRODUÇÃO

A busca por recursos minerais, os quais são essenciais para o desenvolvimento estratégico de um país, tem sido incentivada em especial naqueles em desenvolvimento. Tal incentivo tem contribuído para a exploração dos recursos nacionais dentro da perspectiva de que a produção mineral aumenta a segurança de abastecimento para o setor industrial de um país (HUMPHREYS, 1983). Dentro dessa perspectiva, o Ministério de Minas e Energia (MME) do Brasil tem trabalhado em novas estratégias que envolvem a cadeia produtiva, buscando um aproveitamento racional dos recursos minerais distribuídos pelo território.

As ocorrências e/ ou depósitos de recursos minerais no Brasil, em especial os de minério zircônio, os quais estão associados aos minerais pesados de titânio como a ilmenita (FeTiO_3) e o rutilo (TiO_2), e em termos primários, a depósitos de segregação magmática relacionados a rochas intrusivas alcalinas e a metamorfismo de contato (DNPM, 2014). Em termos secundários, os depósitos de minerais pesados de titânio são do tipo *placer*, que constituem de depósito de minério superficial contendo minerais resistatos e pesados, concentrados mecanicamente, geralmente dentro de cascalhos, em pontos de maior energia de correntes fluviais, marinhas ou de ação das ondas.e estão associados a cordões litorâneos, depósitos marinhos, depósitos de aluviões e paleoaluviões (DNPM, 2014).

Em um cenário regional, nos últimos anos o município de São José do Norte, situado no sul do Rio Grande do Sul (RS), tem se destacado no cenário nacional pelas elevadas concentrações de ilmenita, rutilo e zircão. Segundo Calliari *et. al* (2005), a maior presença de minerais pesados encontra-se depositada ao longo do cordão de dunas e na zona praial. As elevadas concentrações desses minerais tem chamado a atenção de vários investidores os quais, tem buscado junto aos órgãos ambientais do estado do RS licença para exploração desses minerais. Algumas iniciativas de atividade de mineração foram iniciadas ao longo das décadas de 1980

e 1990. Contudo não se obteve sucesso, pois durante o processo de licenciamento ambiental foi observado que as zonas destinadas a mineração estavam inseridas em áreas de preservação permanente (APPs).

No ano de 2009, um novo projeto de exploração mineral foi iniciado no litoral gaúcho pela empresa de Mineração Rio Grande. Esse projeto de extração está focado em minerais de titânio, localizando-se em duas áreas do município de São José do Norte/RS, sendo uma das áreas localizada no distrito do Estreito e a outra no distrito do Bojuru.

A análise química de minerais é um passo fundamental para um entendimento geológico e para mensuração de jazidas. Dentre a variedade de métodos que podem ser utilizados para extrair as informações minerais dos espectros de reflectância são utilizados: razões de bandas (CROWLEY *et al.*, 1989); ajustes polinomiais (CUDAHY *et al.*, 2008); gaussianos (MUSTARD *et al.*, 2007); e métodos estatísticos supervisionados como análise de variáveis canônicas, mínimos quadrados (CLARK *et al.*, 1990), e mínimos quadrados parciais (HAALAND e THOMAS, 1988). Todos estes métodos citados não se baseiam em obter o coeficiente de absorção em um determinado comprimento de onda, mas em extrair informações a respeito de minerais específicos por meio da correlação dos dados espectrais com bibliotecas espectrais ou com dados independentes, como análises químicas.

Em termos de mapeamento das concentrações desses minerais no ambiente, o desenvolvimento de novas técnicas de monitoramento, a partir do uso de sensores remotos, tem auxiliado nos estudos mineralógicos e litológicos. Dentre os mais utilizados, o sensor multiespectral ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) tem se destacado. Os sensores multiespectrais são caracterizados pela existência de dezenas de bandas (SABINS, 1999) e, uma das vantagens do seu uso é a facilidade de identificação de minerais de assinatura hidrotermal (DRURY, 2001; MOON, 2006), como é o caso do zircão.

Outra forma de obtenção da presença mineral e química através de

assinaturas espectrais é por emprego de técnicas de espectroscopia de reflectância. Essa técnica, além de ser de baixo custo, é muito utilizada para a Identificação da mineralogia de depósitos minerais nas diferentes etapas da exploração mineral (HERRMANN *et al.*, 2001; DUCART *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2009; HARRADEN *et al.*, 2013). A análise espectral destes depósitos permite o melhor entendimento das zonas mineralizadas, auxiliando tanto no entendimento da distribuição espacial do minério, como dos contaminantes (DUCART *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2009). A quantificação pode ser feita por meio da correlação dos dados espectrais com bibliotecas espectrais, que apresentam espectros de amostras com composição mineralógica conhecida, ou por meio da correlação dos dados espectrais com dados multi-fonte, como dados geoquímicos e propriedades físicas da amostra da rocha (CLARK e ROUSH, 1984; CUDAHY *et al.*, 2008; HAEST *et al.*, 2012).

A partir do exposto, a presente proposta de tese buscou desenvolver metodologias que permite, a partir de uma assinatura espectral obtida para uma amostra, sua respectiva composição químico-mineral. Desta forma buscou-se determinar a presença de minerais de titânio e mensurar a presença de titânio nestes minerais através de técnicas de análise de espectroscopia.

1.2. ÁREA DE ESTUDO

A área selecionada para estudo (Fig. 1) compreende uma extensão aproximada de 95 km x 28 km, onde foi feito um recorte de 2 km x 2 km para obtenção dos dados de campo. Denominada localidade do Retiro, situa-se no primeiro distrito do município de São José do Norte, localizado no litoral sul do Rio Grande do Sul. Do ponto de vista geomorfológico, o município de São José do Norte é uma restinga, uma feição alongada no sentido Nordeste-Sudoeste, de natureza sedimentar, que por sua posição isola o corpo hídrico denominado Lagoa dos Patos.

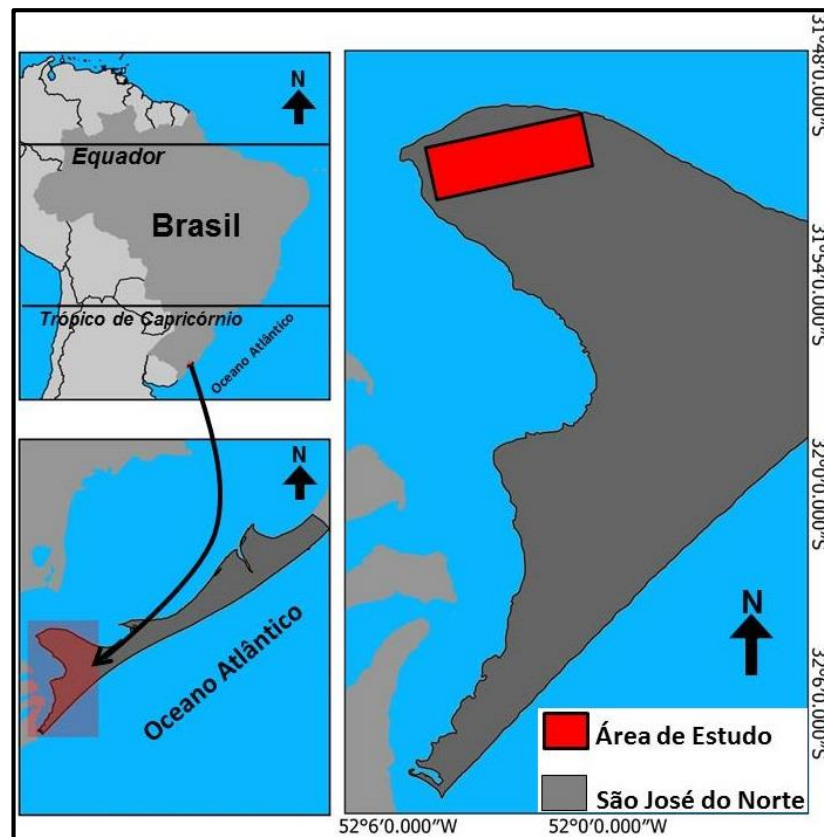


Figura 1: Localização da área de estudo.
 Fonte: Autor

Do ponto de vista geológico, a restinga faz parte da Bacia Sedimentar de Pelotas, cuja geomorfologia corresponde, segundo Villwock e Tomazelli (1995), ao compartimento das Terras Baixas da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Nesse contexto, o território do município de São José do Norte ocupa dois compartimentos denominados pelos autores como Barreira Complexa Múltipla, na metade da restinga voltada para o oceano Atlântico, e sistema lagunar Patos-Mirim, delimitado pela Lagoa dos Patos. Esses compartimentos são constituídos por feições como depressões alongadas, banhados e campos de dunas. O sistema Patos-Mirim, por sua vez, formado por falésias, pântanos e pontais arenosos (VILWOCK e TOMAZELLI, 1995).

A natureza sedimentar da área de estudo é fundamental para a compreensão da ocorrência dos depósitos minerais objetos deste trabalho. Conforme Villwock e Tomazelli (1995), o sistema lagunar Patos-Mirim é formado por um sistema denominado sistema laguna/barreira, cuja deposição remonta aos processos de elevação e regressão do nível do mar durante o período quaternário (aprox. 400 mil anos).

O sistema laguna/barreira é formado por quatro feições, resultantes de distintos episódios de transgressão-regressão marinhas. O sistema laguna/barreira I é o mais interiorizado, situado a noroeste da Planície Costeira (VILLWOCK e TOMAZELLI, 1995), bem como o sistema II, também não encontrados na restinga, fora portanto do escopo e da área de estudo. No município de São José do Norte podem ser encontrados os sistemas III e IV. A localidade do Retiro, área selecionada para o estudo, é composta pelo sistema laguna/barreira IV.

O sistema laguna/barreira IV é o mais recente, segundo os autores formado há cerca de 5 Ka atrás. As feições geomorfológicas desse sistema são cordões litorâneos, campos de dunas, banhados, e campos que transicionam entre dunas e banhados, onde estão instaladas atividades agrícolas, ocupação humana ou atividade silvicultural.

A composição sedimentar dos sistema laguna/barreira IV é quartzosa de granulação fina, tipicamente de origem praias e eólica, mas com presença de depósitos de minerais pesados (VILLWOCK *et al*, 1979, apud VILLWOCK e TOMAZELLI, 1995).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

A presente tese tem por objetivo produzir metodologias através de técnicas de espectroscopia e sensoriamento remoto que permitam mensurar a composição mineral em extratos de sondagens de 1 metro de profundidade e, a partir desses dados, decompor as assinaturas espectrais das amostras de solo em assinaturas espectrais de seus constituintes minerais e em seus constituintes químicos, apontando sua proporção na amostra.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Sondagem mineralógica de campo em uma área piloto, extraíndo um nº significativo de amostras de solo (>300) estratificadas em um perfil de 1m de profundidade;
- Levantamento espectroscópico de reflectância para as amostras de solo coletadas e elaboração de bibliotecas espectrais, determinadas através de valores característicos;
- Construção de Funções-base apropriadas para a determinação das assinaturas espectrais a partir de dados de espectroscopia (para minerais e constituintes químicos), que permitam uma interpretação automatizada das informações contidas nos espectros de reflectância;
- Teste da análise espectral proposta através do emprego de imagens orbitais hiperespectrais na identificação de características relevantes de minerais de titânio;
- Mapeamento de uma área piloto (área de estudo), descrevendo constituintes químicos e minerais a partir da metodologia proposta.

3. HIPÓTESE

Com base nos objetivos propostos, foram construídas duas hipóteses para nortear essa pesquisa: (1) a partir de espectros de reflectância de amostras de solo é possível a determinação semi-automática da constituição química e mineral presentes; e, (2) A distribuição espacial dos minerais de titânio ao longo da área de estudo seguem um padrão de estratificação vertical e longitudinal. Os objetivos de pesquisa desenvolvidos a partir da metodologia adotada nessa tese foram norteados no sentido de testar essas hipóteses, corroborando-as ou refutando-as a partir dos dados encontrados.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. Conceituação básica das radiações eletromagnéticas aplicadas ao sensoriamento remoto

As Radiações Eletromagnéticas (REMs) são um dos veículos do sensoriamento remoto (Jensen, 2009). As REMs possuem diferentes intervalos de comprimentos de onda (λ), que compõem o espectro eletromagnético. Tanto a irradiância (i.e., radiação eletromagnética que chega ao solo) quanto à radiância (i.e., radiação eletromagnética refletida pela superfície) sofrem atenuação dos constituintes da atmosfera, sendo importante que os dados sejam coletados em dias sem nuvens (Meneses, 2012).

Imagens de sensoriamento remoto são representações digitais de feições tridimensionais da superfície da Terra, a partir de um processo físico de medição da radiação eletromagnética refletida. Portanto, a radiação eletromagnética transporta de maneira analógica a informação até o sensor, que irá transformar essa informação analógica em digital (Jensen, 2009). A imagem digital é composta por uma grade de linhas e colunas, onde cada elemento é chamado de pixel, que correspondem aos valores digitais da radiação convertida pelo sensor em uma escala radiométrica específica. O Pixel representa a menor unidade de área que o sensor é capaz de identificar (Moreira, 2007).

Os sensores são projetados para detectar intervalos de comprimento de onda específicos, conhecidos como bandas espectrais. Por exemplo, o sensor OLI do satélite LANDSAT-8 possui oito bandas espectrais, com cada uma correspondendo a um intervalo de comprimentos de ondas. Como o sensor OLI foi projetado para coletar dados principalmente ambientais, possui suas bandas localizadas na faixa do visível (i.e., coastal, azul, verde e vermelho), infravermelho próximo e infravermelho médio, que são as regiões do espectro eletromagnético onde os alvos em cenas naturais apresentam seus maiores diferenciais de reflectância (Jensen, 2009).

A escala espaço-temporal dos processos que se deseja observar deve estar de acordo com as resoluções do sensor adotado. Para isso, é importante entender o que são as resoluções das imagens (espacial, espectral, radiométrica e temporal) e quais as resoluções de cada sensor se adequarão melhor aos objetivos do estudo (Jensen, 2009).

Dentre as resoluções adotadas para caracterizar os dados de sensoriamento remoto, a *Resolução Espectral* é a de maior interesse à geologia. Essa resolução está relacionada ao número de bandas que os sensores imageadores possuem, ou seja, sua capacidade de subdividir o espectro eletromagnético em diferentes faixas espectrais.

Os diferentes materiais que compõem a superfície da Terra possuem diferentes comprimentos de onda refletidos (reflectância), que são captadas por bandas específicas projetadas nos sensores. Portanto quanto maior o número de bandas situadas em diferentes regiões do espectro de ondas, melhor será a resolução espectral, ou capacidade de distinguir diferentes objetos (Meneses, 2012).

Cada objeto possui uma assinatura espectral, que são as intensidades de absorção dos diferentes comprimentos de onda da radiação eletromagnética, sendo possível constituirmos assinaturas espectrais de alvos específicos, desde tipos de vegetações, cultivos agrícolas, minerais e etc. Deste modo, as bandas espectrais dos sensores são projetadas nos comprimentos de onda em que o alvo de interesse melhor responde à REM (Meneses, 2012).

4.2. Sensoriamento remoto voltado à geologia

O Sensoriamento Remoto Geológico é definido como a técnica de análise de dados obtidos pelo sensoriamento remoto que monitora ou mensura as características físicas e ou químicas do ambiente geológico estático ou dinâmico. Teoricamente, os minerais têm suas assinaturas singulares no espectro da energia eletromagnética, os materiais presentes no planeta Terra podem ser identificados por suas reflectâncias nas várias bandas-chave de comprimento da onda da energia eletromagnética que são concentradas nas faixas de visível, infravermelho próximo, infravermelho termal e microondas. A geologia com o uso do sensoriamento remoto é a responsável pela exploração de recursos minerais e energéticos. A maioria dos estudos utiliza as fotografias aéreas e as imagens de alta resolução espacial para diagnosticar os padrões de formas lineares que são diretamente ligadas à geomorfologia e indiretamente ligadas às estruturas geológicas.

Inúmeras aplicações podem ser feitas com as informações adquiridas pela técnica de sensoriamento remoto, tais como: monitoramento, identificação e acompanhamento das áreas designadas aos depósitos de lixos líquidos e sólidos, lixos radiativos, aterros, mineração superficial, materiais de construção e posse de terra. A combinação certa da interpretação das imagens e dos dados coletados em campo permite que se alcance o objetivo em curto prazo e de forma mais econômica.

4.2.1. Sensor ASTER

O sensor ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (Figura 2) é um sensor orbital desenvolvido com fins de mapeamento geológico através de uma colaboração entre a Agência Espacial Americana (NASA) e a Agência Espacial Japonesa (JAXA). O ASTER possui uma resolução espacial e radiométrica elevada, cobertura espectral larga (visível através do infravermelho

térmico).

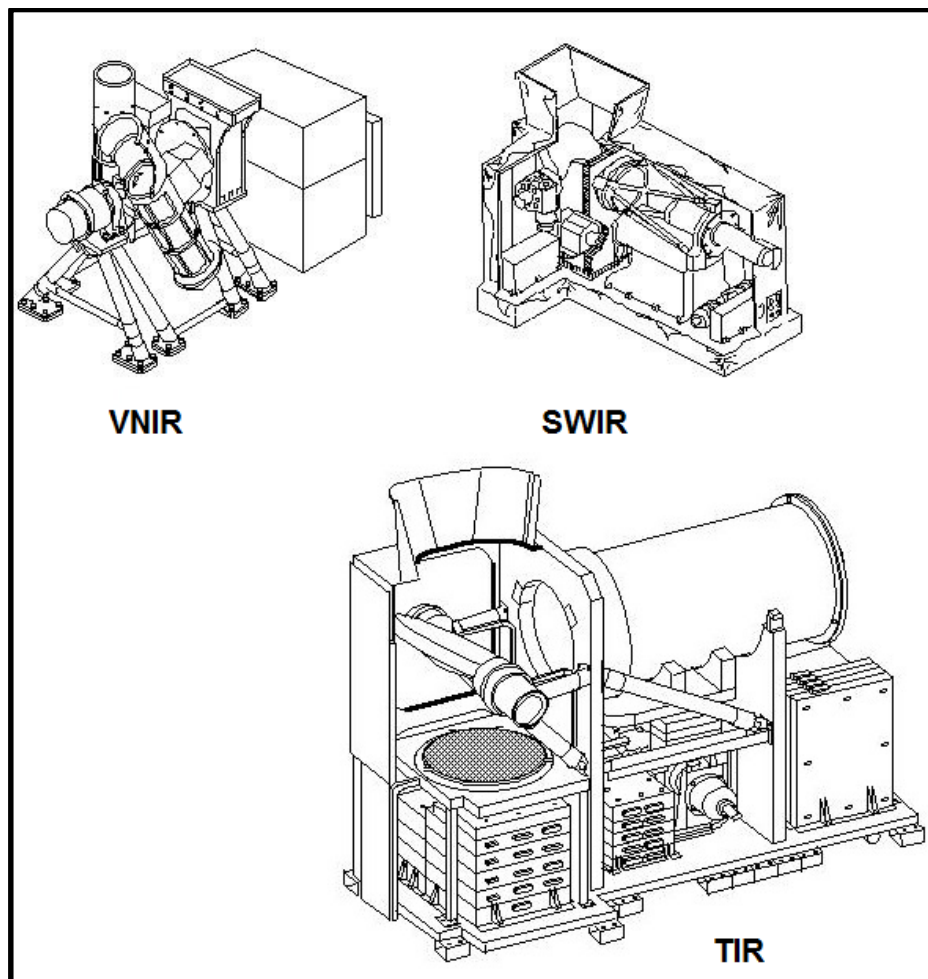


Figura 2: Componentes do sistema ASTER
Fonte: EOPORTAL.

Para permitir uma ampla cobertura, como de visível através da térmica regiões de infravermelho do espectro, ASTER é constituído por três subsistemas distintos: VNIR, SWIR e TIR. O subsistema VNIR tem uma resolução espacial de 15m. ele foi projetado para ser direcionável até 24 graus de modo que em qualquer lugar da terra, em caso de emergência, podem ser observadas dentro de 5 dias. O subsistema SWIR tem uma resolução espacial de 30m e opera em seis bandas no

infravermelho de ondas curtas (SWIR) porções do espectro, enquanto seu antecessor, JERS-1/OPS, operado em quatro. Dada esta capacidade, espera-se obter dados mais finos para rochas, minerais, plantas, etc.

O subsistema TIR tem uma resolução espacial de 90m e cinco bandas na faixa do infravermelho termal (TIR) espectral; operação multibanda do espaço é sem precedentes. Espera-se para obter a temperatura da superfície da terra e emissividade da superfície terrestre com uma precisão melhor que os scanners anteriores.

As principais características do ASTER são:

- Obter dados de imagem da superfície da Terra a partir do visível para região do infravermelho termal;
- Maior resolução geométrica e radiométrica para sensores ópticos foram alcançados para todas as bandas de frequência. Dados tridimensionais das imagens serão adquirida em órbitas única na região do infravermelho próximo;
- Tem funções mecânicas apontando para a obtenção de um ângulo de visão de imagem de + / -8,55 graus na direção cross-track para SWIR e TIR, e para a obtenção de + / -24 graus pista de cross para VNIR;
- Possui um refrigerador de alta confiabilidade com uma vida útil de projeto de 50.000 horas instalado no SWIR e TIR.

O foco principal desse sensor ASTER foi fomentar a pesquisa geológica através do sensoriamento remoto orbital. Estando ativo desde 2000, o ASTER permite o monitoramento geológico, focando na análise espectral de bandas do infravermelho próximo, médio e principalmente termal para diferenciação de minerais.

4.2.2. Sensor AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer)

O AVIRIS (Figura 3) é um sensor hiperespectral aerotransportado que pertence ao JPL (Jet Propulsion Laboratory). Foi utilizado no Brasil durante a missão

SCAR-B, compreendida entre o período de agosto a setembro de 1995.

Os objetivos da missão SCAR-B visavam o estudo das partículas suspensas no ar, chamados aerossóis. Foram utilizadas para isto, duas plataformas principais de observação: o ER-2, que é uma aeronave com capacidade de voar na baixa estratosfera, e o Convair C-131A, com capacidade de voar na troposfera (KIRCHHOFF, 1995). Segundo Vane *et al.* (1993) as principais vantagens da escolha destas plataformas devem-se às seguintes situações:

- (1) - São geralmente muito estáveis em vôo;
- (2) - Têm uma boa relação velocidade- altura; e
- (3) - Possuem uma ótima autonomia de vôo, capazes de voar até 2100 Km de sua base de apoio.

O AVIRIS é a segunda geração de espectrômetros imageadores desenvolvido pelo JPL para uso em sensoriamento remoto. Tem como finalidade a utilização em várias áreas científicas, tais como botânica, geologia, hidrologia, oceanografia e ciência atmosférica. Seu projeto e construção foram iniciados em 1984 e finalizados em junho de 1987. Após sua calibração em laboratório, seu vôo operacional ocorreu em 25 de junho de 1987 (VANE *et al.*, 1987).

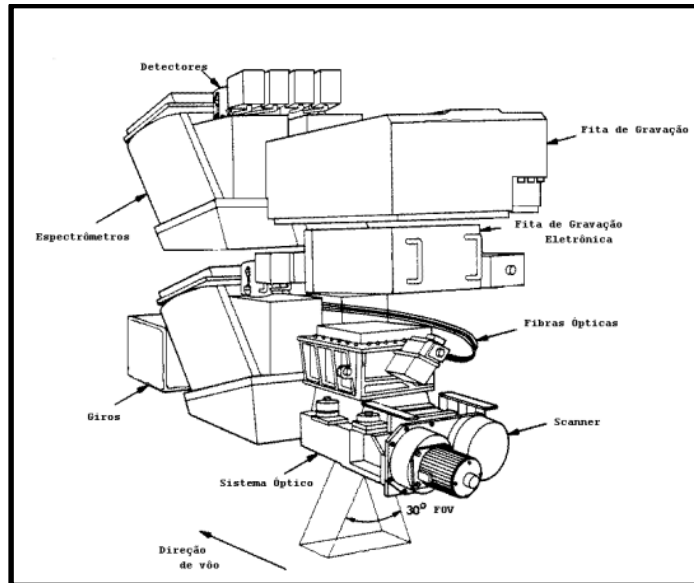


Figura 3: Sensor AVIRIS
 Fonte: Adaptada de Vane (1987), p.89.

Este sensor foi projetado para tirar vantagens no diagnóstico das feições da absorção tipicamente estreitas, que ocorrem nos materiais da superfície terrestre. É capaz de propiciar imagens em 224 bandas espectrais contíguas de 0,010mm de largura entre as regiões de 0,4mm e 2,45mm (WALLACE e ENMARCK, 1987).

O AVIRIS possui um campo de visada instantâneo de 1mrad e o ângulo de varredura de 30°. Isto implica em uma faixa de imageamento de 10,5Km, composta de “pixels” que subentendem uma resolução de 20 m no solo, obtidos a uma altitude de 20Km. A imagem no sistema é obtida a partir de espelhos de varredura, que definem uma linha de 614 “pixels” de largura perpendicular à direção de voo e pela direção da aeronave, que define a extensão da imagem.

De acordo com Johnson e Green (1995), uma equipe de campo é responsável pelo monitoramento dos instrumentos, onde são realizados diagnósticos de pré e pós-vôo.

Estes diagnósticos são enviados ao JPL para o processamento dos dados AVIRIS, onde são realizadas as tarefas de monitoramento do desempenho dos

instrumentos, arquivamento dos dados, calibração, tornando os dados disponíveis para o usuário.

4.2.3. Sensor HYPERION

O Sensor HYPERION (Figura 4) fornece dados hiperespectrais calibrados de alta qualidade para estudos terrestres. Possui um único telescópio e dois espectroradiômetros, um cobrindo todo o espectro do visível e infravermelho próximo e o outro cobrindo o infravermelho de ondas curtas. (FOLKMAN *et al.*, 2001; HAN *et al.*, 2002; PETROPOULOS *et al.*, 2012a).



Figura 4: Sensor HYPERION
Fonte: EOPORTAL.

O HYPERION é composto por três unidades básicas, que são o sistema de captura de dados, o controle eletrônico do sistema e o sistema de refrigeração criocooler. O telescópio tem um IFOV de 7,5km x 30m metros na direção de voo do sensor, sendo essa imagem direcionada aos dois espectroradiômetros do aparelho, ficando um responsável pelo intervalo de 400 a 1000nm e o outro de 900 a 2500nm.

A faixa compreendida entre 900 e 1000nm é sobreposta entre os sistemas permitindo a calibração entre os mesmos. O sensor captura 242 bandas contíguas cobrindo, cada uma, 10nm.

A faixa do espectro compreendida entre 356 e 2577nm é coberta, contudo somente 196 bandas são calibradas. Suas imagens possuem 7,5 km de comprimento perpendicular ao plano de voo e 42 km de comprimento como padrão, porém sob demanda, essa faixa pode atingir 185 km de extensão, na figura 7 tem-se a comparação da área de cobertura de diferentes sensores. Sua resolução radiométrica é de 12bits e a resolução espacial é de 30 m (FOLKMAN *et al.*, 2001; PEARLMAN *et al.*, 2001; BECK, R. 2003; GALVÃO *et al.*, 2009; PETROPOULOS *et al.*, 2012a; PETROPOULOS *et al.*, 2012b).

4.3. A espectroscopia como suporte para análise mineral

As curvas espectrais têm um papel importante na avaliação mineral, pois seu caráter está ligado à estrutura do átomo. Os átomos de qualquer elemento químico geram um espectro que não é semelhante a espectros de outros elementos: eles têm a capacidade de irradiar numa determinada faixa de comprimentos de onda. Portanto, é nisto que se baseia a análise espectral - é o método de definir a composição química da substância através do seu espectro.

Os minerais possuem, em sua composição, átomos e moléculas que determinam suas propriedades espectrais, que por sua vez definem seu comportamento ao longo do espectro eletromagnético. Em sensoriamento remoto, o intervalo do espectro mais usado vai de 400 a 2500 nanômetros, subdividindo em duas regiões: entre 400 e 1000 e entre 2000 e 2400 nanômetros.

Para uma análise espectral, devemos ter em mente 5 conceitos básicos:

- Espectroscopia de reflectância
- Processos eletrônicos
- Efeito do campo cristalino
- Transferência de carga
- Bandas de condução de valência

4.3.1. Espectroscopia de reflectância

A espectroscopia é o estudo da radiação electromagnética como função do comprimento de onda em que está sendo emitida, refletida ou espalhada por um gás, um líquido ou um sólido (CLARK,1999). Sendo assim, a espectroscopia de reflectância centra-se também na radiação refletida por diferentes minerais.

A radiação eletromagnética consiste de energia, e os elétrons na rocha podem absorver essa energia, mas somente em níveis de energia específica característica de um átomo ou molécula específica. Assim, os minerais são mais propensos a absorver radiação em certas energias, e tão somente em certos comprimentos de onda. Moléculas específicas constituintes dos minerais absorvem comprimentos de onda característicos, permitindo identificá-los através de seus espectros, assim como as pessoas podem ser identificados através de suas impressões digitais.

Energia que não é absorvida é refletida, esta energia refletida é o que é medido com o aparelho. Pode-se facilmente determinar a quantidade de absorção inspecionando depressões no espectro de reflectância. A energia refletida por uma rocha pode ser fragmentada em determinados comprimentos de ondas a fim de identificação e caracterização. As faixas específicas de absorção de um dado alvo ou rocha determinam a forma como este interage com a radiação eletromagnética, determinando seu comportamento espectral.

O espectro gerado pode ser analisado usando um espectrômetro, que pode coletar dados sobre a radiação em distintas faixas de comprimento de onda, sendo as faixas mais utilizadas no SR geológico, VNIR (Visível e infravermelho próximo), SWIR (Infravermelho médio) e TIR (infravermelho termal) com destaque para as duas últimas faixas citadas. Os minerais, por conta de sua composição química, possuem comprimentos de onda específicos de absorção. Estes pontos são as "bandas de absorção", que são característicos de certos íons, moléculas, e minerais. Ao comparar a posição e profundidade das bandas de absorção de um material desconhecido para as bandas de absorção dos minerais conhecidos, podemos determinar o conteúdo mineral do material. A aplicação desta ideia sobre dados orbitais nas faixas do infravermelho próximo, médio e termal permite a identificação mineralógica e química a partir de dados orbitais de SR. Intimamente, as faixas características de absorção estão ligadas a processos eletrônicos e de transição iônica nas composições minerais, o que resulta em faixas de absorção únicas conhecidas como feições de assinatura espectral.

4.3.2. Espectrometria no Infravermelho

Os compostos orgânicos absorvem radiações na região do infravermelho do espectro. A radiação infravermelha, a partir de uma determinada faixa espectral, não tem energia suficiente para excitar os elétrons e provocar transições eletrônicas, mas ela faz com que os átomos ou grupos de átomos vibrem com maior rapidez e com maior amplitude em torno das ligações covalentes que os unem. Estas vibrações são quantizadas e, quando ocorrem, os compostos absorvem energia em certas regiões do espectro.

Nas vibrações, as ligações covalentes comportam-se como se fossem pequenas molas unindo os átomos. Quando os átomos vibram, só podem oscilar com certas frequências, e as ligações sofrem várias deformações. Quando a ligação absorve energia, ela sofre alterações e, ao retornar ao estado original, libera essa

energia, que então é detectada pelo espectrômetro.

Segundo este modelo, as moléculas podem vibrar de muitos modos, conhecidos como harmônicos. Dois átomos unidos por uma ligação covalente podem efetuar vibrações de estiramento dessa ligação, como se fosse uma mola que estica e retorna ao tamanho original. Três átomos também podem efetuar diferentes vibrações de estiramento e alteração dos ângulos de ligação, em vários planos do espaço. No entanto, as vibrações de estiramento são as mais importantes para a ocorrência de bandas de absorção.

As informações espectrais que são detectadas resultam de absorções devidas a processos de transições eletrônicas de alguns poucos íons constituintes e de processos vibracionais, envolvendo um número limitado de moléculas. Estes íons ou moléculas possuem diferentes arranjos de níveis de energia conforme estejam presentes nas diferentes estruturas cristalina e isso é a razão de originarem muitos espectros de formas ou aparências distintas. Disso resulta que cada tipo de mineral ou rocha exibe um padrão de comportamento de reflectância que lhe é característico.

4.3.3. Processos eletrônicos

Nas medidas espectroradiométricas, as interações microscópicas são responsáveis por determinadas feições de absorção espectral da radiação cujas características dependem do tipo de estrutura interna dos constituintes, dos tamanhos de seus raios iônicos, das forças de ligação e da disposição orbital de seus elétrons (ATKINS, 2003). Eventualmente pode acontecer do último ou penúltimo orbital eletrônico de um átomo não serem totalmente preenchidos, ficando assim elétrons desemparelhados (i.e., em desequilíbrio). São estes elétrons desemparelhados que pode mover-se de um orbital para outro de mais energia, caracterizando uma energia de transição. Esta energia é dada pela frequência da

radiação produzida pelo que conhecemos como equação de Planck (Eq. 1),

$$E = h.f$$

Equação 1: Energia de um fóton

Como cada frequência corresponde a um dado comprimento de onda, cada transição eletrônica produzirá uma radiação com um certo comprimento de onda, variando do visível ao infravermelho próximo (380 a 1100 nm).

Segundo ATKINS (2003), essas transições eletrônicas e moleculares ocorrem quando a radiação incidente é absorvida, excitando um processo interno no átomo ou molécula. A energia associada com a transição é a diferença entre a energia do estado final excitado e a energia do estado inicial (estado estacionário), como mostra a imagem abaixo.

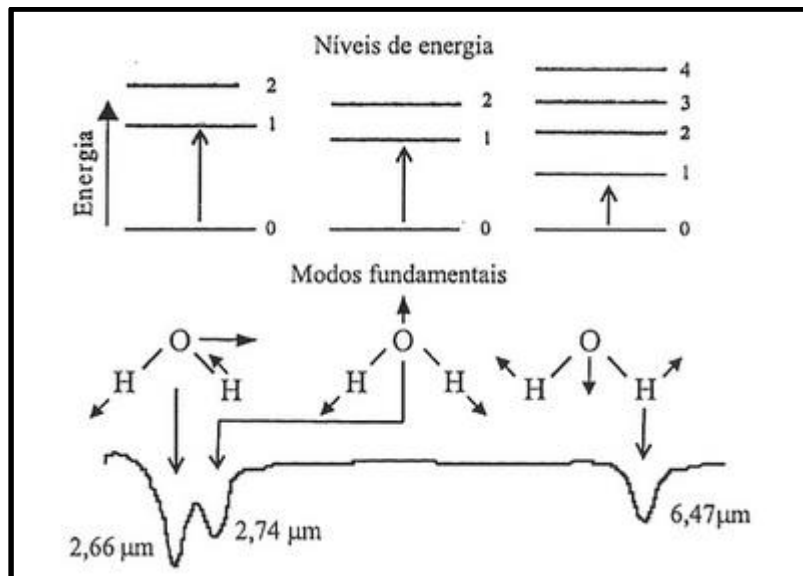


Figura 5: Diagrama dos níveis da molécula de água. As feições de absorção representam transições do estado fundamental zero para o primeiro estado excitado.

Fonte: www.ige.unicamp.br/espectrobauxita/espectroscopia.html. Acesso em 29/10/2015

As transições eletrônicas são as responsáveis por todas as feições de absorção espectral existentes no intervalo do visível ao infravermelho próximo, ou seja, de 380 a 1100 nm. Os metais de transição tais como Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, apresentam a característica de possuem elétrons desemparelhados e por isso exibe, com facilidade, feições de absorção devido às transições eletrônicas.

No que tange a composição química das argilas, o ferro (Fe) é um elemento químico de relevância. Este elemento, sendo um metal de transição exibe feições de absorção formadas por transições eletrônicas. Estas feições podem ser utilizadas como identificadores para as argilas, exibindo a presença do ferro.

4.3.4. Efeito do campo cristalino

A Teoria do Campo Cristalino afirma que a interação entre o íon central e os ligantes de um complexo é puramente eletrostática, ou seja, atração/repulsão entre cargas (LEE, 1999). Quando se aproximam os ligantes e o íon metálico, serão os orbitais *d* do íon metálico que irão sofrer as influências dos ligantes. Desta forma, os orbitais *d* do metal estão, a princípio, em um mesmo nível de energia, mas com a aproximação dos ligantes, os orbitais *d* do íon metálico livre, deixarão o estado de mesma energia e passarão a ocupar estados diferenciados de excitação. Assim alguns se tornarão mais eletricamente valentes, enquanto que outros, menos.

Os átomos de metais de transição tais como Sc, Ti, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn e especialmente o Fe, quando presentes em um composto, sofrem efeitos de forças de atração/repulsão eletrostática dos seus ligantes que se dispõem ao seu redor. Assim, sendo constituintes ou mesmo impurezas, de acordo com esta teoria, os cinco orbitais de valência *d* dos metais de transição sofrem uma repulsão eletrostática à medida que os ligantes negativos se aproximam do íon central positivo. A variação de energia envolvida neste processo, correspondente a um

comprimento de onda. Este comprimento de onda corresponderá a uma banda de absorção que será analisada para a identificação e estudo do material.

4.3.5. Transferência de carga

O processo de transferência de carga envolve a movimentação de elétrons dentro da matéria, algo que ocorre frequentemente ao longo de uma molécula ou através de um sólido. A energia absorvida pode causar a transferência ou a migração de uma carga elétrica entre íons vizinhos ou mesmo entre um íon e seus ligantes.

O fato é que sempre as feições espectrais resultantes deste processo são muito mais intensas que as devidas aos efeitos do campo cristalino. Os dois principais tipos deste processo são: Transferência de carga entre um ânion e um cátion (o exemplo mais importante é o Fe-O – oxidação ferrosa); e Transferência de carga intervalência (também conhecida como transferência de carga entre metais).

4.3.6. Bandas de condução e Valência

Alguns minerais apresentam dois níveis de energia nos quais os elétrons podem residir: um nível mais alto de energia chamado de "banda de condução" em que os elétrons movem-se livremente ao longo dos átomos existentes nos sólidos; e uma região de energia mais baixa denominada de "banda de valência" em que os elétrons estão aprisionados em átomos individuais.

Entre estas duas bandas encontra-se uma zona de energia onde os elétrons não podem se mover, denominada "banda proibida ou intervalo proibido" que, em geral, é pequena. As feições de absorção devidas às transições eletrônicas das bandas de valência e condução ocorrem quando a energia do intervalo proibido é

inferior à energia da radiação incidente. A cor amarela do enxofre é devido ao intervalo proibido e minerais contendo enxofre em sua composição mostram, nos menores comprimentos de onda, intensas absorções de banda de condução, tal como ocorre com o cinábrio (HgS).

Para realizar a análise quantitativa da mineralogia de uma amostra por meio da espectroradiometria de reflectância, algumas considerações devem ser adotadas:

- 1- A energia eletromagnética medida percorreu o mesmo caminho óptico durante sua trajetória, da fonte luminosa para a amostra e da amostra para o sensor (CLARK e ROUSH, 1984);
- 2- A intensidade de absorção de um determinado mineral, relativa ao background (normalmente considerada como o valor típico encontrado no espectro), é função do coeficiente de absorção do mineral e de sua abundância. Quando o mineral é identificado, a abundância do mineral pode ser determinada pela intensidade de absorção do feixe radiante (HUNT e ASHLEY, 1979; CLARK e ROUSH, 1984);
- 3- A composição química de um determinado mineral determina o comprimento de onda de sua feição de absorção diagnóstica (HUNT e SALISBURY, 1971; CLARK *et al.*, 1990; CUDAHY e RAMANAIDOU, 1997);
- 4- O espalhamento (orientação do cristal, tamanho/distribuição/orientação das partículas) pode ser considerado isotrópico (ADAMS e FILICE, 1967; CLARK e ROUSH, 1984; MORRIS *et al.*, 1985).

4.4. O Titânio

O titânio foi descoberto, em 1791, por William Gregor ao realizar experiências de tratamento da ilmenita com ácido sulfúrico e ácido clorídrico concentrado. O nome titânio tem origem na palavra grega titanes, que na mitologia grega é um dos filhos de Urano (Céu) e Gaia (Terra).

O metal titânio é pouco reativo em temperatura ambiente, mas, quando aquecido, forma compostos estáveis, duros e refratários. O titânio é resistente à maioria dos ácidos orgânicos, aos ácidos clorídricos e sulfúricos diluídos, a gases e soluções contendo cloro. A forma do titânio (IV) representa o seu estado de oxidação mais estável.

Devido a propriedades excepcionais, densidade de 4,5 g/cm³; elevada tenacidade; elevado ponto de fusão (16700 °C); grande resistência à corrosão (equivalente à da platina); elevada resistência mecânica (comparável a do aço); estabilidade térmica; grande capacidade de dispersão e elevada brancura, o titânio é utilizado em uma diversidade de aplicações industriais, desde a fabricação de turbinas para aviões supersônicos até próteses dentárias, sendo especialmente indicado para usos em materiais que se mostrem resistentes a situações adversas, como tubulações em água do mar (KANE, 1987) e em diversos artefatos da indústria aeroespacial. Por essas e outras razões, o titânio é considerado um metal de importância estratégica.

Apesar da tenacidade característica do titânio, a presença de impurezas não metálicas, como H, C, N ou O, o tornam quebradiço, mesmo quando as contaminações ocorrem em pequenas quantidades. Na crosta terrestre é o nono elemento mais abundante, ocorrendo na natureza na forma de combinações químicas, geralmente, com oxigênio e ferro. Os principais minerais economicamente importantes são: ilmenita, rutilo, anatásio e leucoxênio.

A produção de titânio é obtida com base em depósitos primários ou secundários. Nos depósitos do primeiro tipo, o rutilo raramente é encontrado em concentrações economicamente aproveitáveis. Nesses depósitos, os minerais de titânio ocorrem associados a minerais de ferro. Por sua vez, os depósitos secundários ocorrem em forma de placers, localizados nas áreas de praias, ou próximas às mesmas. Nesses placers, conhecidos simplesmente como areia de praia, o quartzo é o mineral predominante. A areia pode conter, simultaneamente, os minerais ilmenita e rutilo, além de outros minerais de interesse econômico como

zirconita e monazita. Em ambos os tipos de depósitos, a ilmenita é sempre mais comum do que o rutilo, sendo as reservas conhecidas de ilmenita em todo o mundo muito maiores que as de rutilo.

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro (DNPM, 2014), a produção mundial de concentrado de titânio (TiO_2) em 2013 foi de 7,6 Mt, um aumento de 4,5% em relação a 2012. Cerca de 88% da produção mundial de titânio é obtida da ilmenita, mineral de titânio de ocorrência mais comum, enquanto que o restante vem do rutilo, mineral com maior teor, porém mais escasso. As reservas na forma de ilmenita e rutilo totalizam aproximadamente 715 Mt, sendo que quase dois terços estão localizados na: China (28,0%), Austrália (25,7%) e Índia (12,9%). As reservas lavráveis brasileiras de ilmenita e rutilo totalizam 2,6 Mt e representam menos de 0,4% das reservas mundiais. Os maiores produtores mundiais de titânio (soma da produção de ilmenita e rutilo) são: Austrália (18,3%), África do Sul (16,1%), China (12,5%) e Canadá (10,1%). O Brasil é o maior produtor da América Latina, com 1,1% da produção mundial de titânio em 2013.

4.4.1. Geologia do Titânio

A produção mundial de titânio é obtida de dois tipos de depósitos: primário e secundário. Nos depósitos primários, o titânio ocorre na forma de ilmenita (e menos freqüentemente na forma de rutilo), formando camadas e massas lenticulares, como mineral acessório em rochas ígneas e metamórficas. Já nos depósitos secundários de areia de praia, o teor em TiO_2 apresenta-se mais elevado.

A maioria dos depósitos comercialmente importantes está associada a rochas básicas como gabro, diorito e anortositos, podendo ser dos tipos: ilmenita-magnetita, ilmenita-hematita ou ilmenita-rutilo. O depósito de ilmenita resulta de um processo geológico conhecido como segregação magmática. Nos depósitos primários, geralmente, a ilmenita ocorre associada a minerais, como magnetita, rutilo, quartzo,

zirconita, albita, biotita e fluorapatita.

A maior contribuição à produção mundial de titânio provém dos placeres (depósitos secundários, conhecidos como areia de praia), onde ocorre a ilmenita e o rutilo. Nessas ocorrências, a ilmenita apresenta variados graus de alteração, resultante de um processo de oxidação, que favorece a lixiviação preferencial do ferro. Como consequência, observa-se o surgimento de espécies minerais com maior teor de TiO_2 (rutilo, anatásio e leucoxênio).

As concentrações de minerais pesados desenvolvidas em praias costeiras e nas areias das dunas fornecem a maioria da ilmenita, leucoxênio e rutilo, usados pela indústria. Estes depósitos de placeres têm se formado em ambientes de praias modernas ou são depósitos de praias levantadas, formadas durante o Pleistoceno.

Nos placeres, a ilmenita e o rutilo ocorrem, geralmente, associados a outros minerais pesados como zirconita e minerais de terras raras (especialmente, xenotima e monazita), além de magnetita, granada, silimanita e cromita. Os placeres areiais são constituídas, basicamente, por areia de quartzo.

4.4.2. Minerais do Titânio

Os minerais que apresentam maior interesse econômico são: ilmenita, leucoxênio, rutilo, anatásio, brookita, perovskita e titanita. A ilmenita ($FeTiO_3$) é um mineral de titânio abundante de ocorrência comum. Apresenta-se na cor preta decorrente da presença de ferro, cristaliza no sistema hexagonal, romboédrico. Teoricamente possui 53% de TiO_2 e 47% de FeO ; pode conter pequenas quantidades de magnésio e manganês e, em muitos casos, até 6% em peso de Fe_2O_3 . É um mineral opaco, brilho submetálico, dureza entre 5,0 e 6,0 na escala de Mohs; possui massa específica entre 4,10 e 4,80 g/cm^3 , pode ser magnética sem aquecimento.

O leucoxênio é geralmente reconhecido como rutilo ou anatásio em granulometria muito fina, ou mistura dos dois com material amorfo. É um produto de alteração, contendo geralmente acima de 60% de TiO_2 . Ocorre com titanita, ilmenita, perovskita ou outros minerais de titânio.

O rutilo (TiO_2) é um mineral escasso, apresenta-se nas cores vermelha e castanho avermelhado a preta, cristaliza-se no sistema tetragonal, tem brilho adamantino a submetálico, dureza 6,0 a 6,5 na escala de Mohs; massa específica 4,18 g/cm^3 a 4,25 g/cm^3 . É um mineral subtranslúcido, podendo ser transparente, composto quase que essencialmente de TiO_2 , podendo conter até 10% de impurezas.

O anatásio (TiO_2) era um mineral conhecido, até pouco tempo, apenas no meio acadêmico. Essa situação mudou com a descoberta de importantes ocorrências no Brasil. O anatásio, também conhecido como octaedrita, é um produto de alteração do rutilo e da brookita. Cristaliza-se no sistema tetragonal, apresenta-se na coloração castanha no estado natural, contém de 98,4% a 99,8% de TiO_2 . A massa específica do anatásio é de 3,9 g/cm^3 , sua dureza varia de 5,5 a 6,0 na escala de Mohs; tem brilho adamantino.

A brookita (TiO_2) é um mineral constituído de óxido de titânio, sendo idêntico ao rutilo e anatásio em termos de sua composição química, porém cristaliza no sistema ortorrômbico.

A perovskita (CaTiO_3) é um mineral isométrico, encontrado usualmente nas rochas metamórficas. Apresenta-se nas cores; preta, vermelha ou amarela, contém de 38% a 58% de TiO_2 , massa específica 4,01 g/cm^3 , cristaliza-se no sistema ortorrômbico ou monoclinico, mas pode ocorrer no sistema pseudo- isométrico.

A titanita (CaTiSiO_5), titanite, esfeno ou esfena é um mineral nesossilicato de titânio e cálcio. Traços de impurezas de ferro e alumínio estão invariavelmente presentes. Também é comum apresentar metais do grupo das terras raras incluindo cério e ítrio.

4.5. Transformações ortogonais e funções-base aplicadas a decomposição espectral

Considerando que um espectro de um mineral (ou outro alvo complexo qualquer) é formado por uma sobreposição de espectros simples decorrelacionados e independentes, podemos escrever o espectro de um dado mineral como uma soma das respostas espectrais de cada um dos espectros individuais que se sobrepõe e o erro associado pela parcela indeterminada (Eq. 2):

$$E_{min} = \sum A_1 \cdot E_1 + A_2 \cdot E_2 + \dots + A_n \cdot E_n + \varepsilon$$

Equação 2: sobreposição linear de espectros

Dessa forma, é possível transpor um espectro complexo para um espaço independente onde a partir de um espectro complexo determinamos seus componentes (autofunções E_1, E_2, \dots, E_n) e o peso de cada um desses componentes (autovalores A_1, A_2, \dots, A_n). O principal objetivo dessa transformação de espaço é reduzir a dimensionalidade de um conjunto de dados que consiste em um grande número de variáveis inter-relacionadas, mantendo ao máximo as variações apresentadas no conjunto de dados (JOLLIFFE, 2002; MILMANN, 1999).

Dessa forma, podemos criar um conjunto de autofunções (e.g., espectros dos componentes químicos) a partir de um espectro original (e.g., espectro de um mineral de interesse) e determinar a contribuição desses componentes para a assinatura espectral percebida (pesos ou autovalores). Para tal, organizamos os dados em uma matriz e desejamos representar cada conjunto de medições usando componentes. Tal análise, definida como análise por componentes principais – PCA (JOLLIFFE, 2002; MILMANN, 1999), identifica os chamados modos, sendo definidos como os autovetores.

Um exemplo da aplicação dessa abordagem está presente em Toker e Garrat (1977) e Grupta (1991) que mostram que a refletância de componentes minerais pode ser decomposta em seus formadores a partir da técnica PCA, sendo possível decompor esse espectro original em espectros de interesse.

A decomposição espectral via análise de componentes principais (PCA) é uma técnica robusta e largamente aplicada para a análise de espectros, permitindo que se compreenda espectros complexos a partir da extração de seus componentes (mais simples).

4.6. Modelos digitais de terreno

O termo Modelo Digital de Elevação - MDE se refere a qualquer tipo de reconstrução computacional de uma determinada superfície através de métodos topográficos (Jensen, 2009). De acordo com Pike *et al.* (2009), um MDE é basicamente um arquivo digital de dados espaciais que associa um valor vertical (z) a uma referência de altitude (h). O MDE pode arranjar um conjunto de dados topográficos através de uma matriz, resultando em uma superfície contínua ou como uma série de pontos em uma malha vetorial regular (LONGLEY *et al.*, 2015). Em ambos os casos, são atribuídos valores de elevação a cada unidade de armazenamento, representada por pixels ou pontos dependendo da natureza dos dados.

Levantamentos discretos, através de equipamentos topográficos tradicionais ou com o emprego de receptores GNSS, podem ainda ser empregados na geração de superfícies topográficas contínuas através da interpolação de amostras (VALERIANO, 2008). As coordenadas coletadas são então reamostradas como superfícies contínuas empregando métodos determinísticos ou probabilísticos (YAMAMOTO e LANDIM, 2013). Já os levantamentos via detecção de luz e distância apresentam outra alternativa na elaboração de MDE. A varredura de superfície

LiDAR tem como base a emissão de pulsos de luz laser em altíssima velocidade (JENSEN, 2009). A tecnologia LiDAR aerotransportada gera uma malha amostral onde os valores de altura são obtidos por um sistema distanciômetro que utiliza, inclusive, informações da plataforma de voo, além de apoio de solo georreferenciado para controle da qualidade geométrica dos produtos.

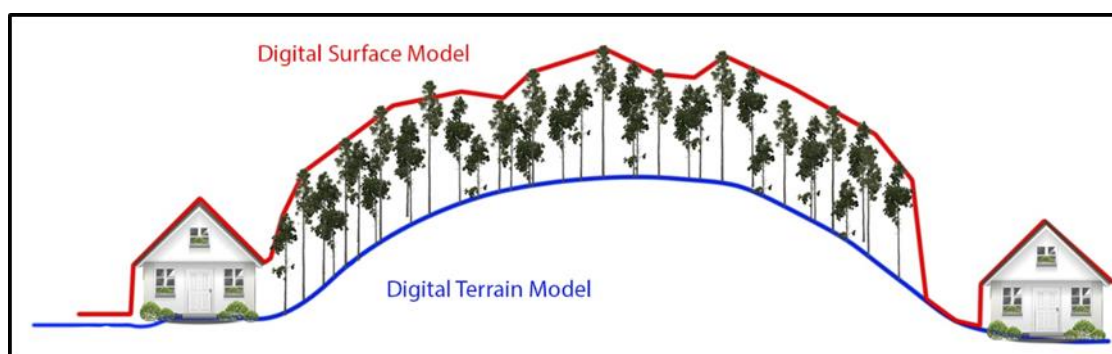


Figura 6: ilustração da diferença entre MDS e MDT

Fonte : <https://3.bp.blogspot.com/DSMDTM.jpg>

Nesse sentido, é importante ressaltar que devido às diferentes formas de obtenção dos dados, a referência dos valores verticais pode resultar em MDE com características diferenciadas. Conforme Jensen (2009) Modelos Digitais de Superfície - MDS é o termo que se aplica aos modelos de elevação que incluem, por exemplo, o topo de edifícios e árvores. Caso essas feições sejam removidas através de edição manual ou automatizada (com a aplicação de filtros e rotinas específicas), o termo apropriado ao se referir a tais produtos é Modelo Digital de Terreno - MDT. Em outras palavras, a referência vertical de um determinado DEM será o resultado da forma de aquisição e/ou dos processos executados sobre as amostras (fig. 6).

4.6.1. Levantamento topográfico por *DRONE*

Um DRONE, Veículo Aéreo Não Tripulado ou Sistema VANT se constitui por um conjunto configurável de ferramentas envolvendo uma aeronave remotamente pilotada, uma ou mais estações de controle em solo, todos os *links* de comando da plataforma de voo e dos sensores acoplados a bordo, além de qualquer elemento extra que garanta segurança e precisão às operações voo (MUNARETTO, 2017). Muitas das técnicas fotogramétricas tradicionais são empregadas na aquisição e processamento de imagens oriundas da tecnologia VANT, permitindo assim a obtenção de dados para alvos localizados sobre a superfície.

Os princípios quantitativos da aerofotogrametria consistem na aquisição de um conjunto de fotografias aéreas perpendiculares a superfície, com visada vertical de inclinação não superior a $\pm 3^\circ$, obtidas em posições ligeiramente diferentes (JENSEN, 2009). Para tanto, duas ferramentas são essenciais: a plataforma de voo ou aeronave; e sensores de imageamento multiespectrais na forma de câmeras digitais de pequeno ou médio formato. Ainda segundo Jensen (2009), o registro do nível de brilho ou contador digital para câmeras de pequeno ou médio formato podem variar de 8-bit, com valores entre 0 a 255, ou 12-bit, com valores entre 0 a 4095. Os valores digitais na forma de contador podem ser armazenados e lidos por computadores, otimizando o processamento das imagens. Durante a exposição, as câmeras digitais registram três versões da cena na memória de acesso rápido (RAM) sob a forma de bandas: vermelha, verde, azul. Durante a visualização dos dados, através da teoria aditiva de cores, é possível, por exemplo, sobrepor tais bandas para formar a composição *cor-verdadeira* ou RGB.

Ainda no tocante ao registro das imagens, fatores como a sobreposição das fotos (percentual de recobrimento frontal e lateral), campo de visada, distância focal e eixo óptico do sensor, se somam a geometria de coleta de voo, como característica de arfagem, rolagem e guinada da plataforma de voo. Todos esses

elementos são devidamente registrado por um computador de bordo a partir dos dados da unidade de medição inercial - IMU, um ou mais receptores GNSS, além de outros sensores, como aqueles que informam as condições barométricas durante o voo, auxiliando assim o registro da altura da plataforma (MUNARETTO, 2017). O trajeto desenvolvido pela plataforma, que cobre o recorte amostral, é o plano de voo. Em cada linha de voo são capturadas uma série de imagens que são devidamente armazenadas em um cartão de memória instalado na própria aeronave ou na câmera a bordo.

De posse dos dados, as imagens são tratadas através de *softwares* específicos para a geração de uma malha de pontos tridimensionais ou nuvem de pontos densa - *dense cloud*, devidamente georreferenciadas e ajustadas a uma referência vertical (JENSEN, 2009). O *input* primário para a reconstrução da superfície são as fotografias (*footprints*), mas as informações do plano (altura de voo, sobreposição, localização dos pontos de amostragem ou *way points*) podem ser ajustadas aos registros da execução de voo auxiliando no processo de alinhamento do mosaico de imagens (processo conhecido como *geotagging*).

Tal alinhamento normalmente utiliza métodos aerofotogramétricos computacionais conhecidos como *Structure from Motion*, que obtém informações geométricas tridimensionais de alvos através de imagens bi-dimensionais (VIDEIRA, 2016). Conforme Tomás *et al.* (2016) o método *SfM* utiliza pressupostos tradicionais da estereoscopia, como a sobreposição de imagens de visadas levemente distintas para estabelecer a localização tridimensional de alvos. Entretanto, tal método resolve as equações de colinearidade através de um grande volume de pontos comuns nas imagens digitais, obtidas através do recobrimento das mesmas e identificados durante a fase de correlação automática.

4.7. GPS-RTK para determinação de pontos de controle topográfico

O GPS é um sistema de radio-navegação baseado em sinais de rádio emitidos e recebidos de satélites. Como exemplos de sistemas temos o GNSS (americano), o Galileu (União europeia), o Baidu (chinês) e o Glonass (Russo).

O GPS-GNSS foi desenvolvido pelo departamento de defesa dos Estados Unidos – DoD (*department of Defense*), visando a ser o principal sistema de navegação das forças armadas norte-americanas. Ele é um sistema de abrangência global, que facilita todas as atividades que necessitam de posicionamento. Ele permite que o usuário, em qualquer local da superfície terrestre, ou próximo a esta, tenha a sua disposição no mínimo quatro satélites para serem rastreados, sendo que esse número de satélites, permite que se realize o posicionamento em tempo real (MONICO, 2008).

O DGPS teve seu desenvolvimento em razão da necessidade de reduzir os efeitos da disponibilidade seletiva imposta ao GPS n modo absoluto (SPS). Tal técnica não só melhora a acurácia, mas também a integridade do GPS, isto é, a probabilidade de que a posição informada atenda às especificações estabelecidas. Atualmente pode ser empregado em várias atividades.

Segundo Monico (2008), esse sistema envolve o uso de um receptor estacionário em uma estação com coordenadas conhecidas, rastreando todos os satélites visíveis. O processamento dos dados nessa estação (posicionamento por ponto) permite que se calculem as correções posicionais, bem como as pseudodistâncias (distância estimada). As correções Δ das coordenadas X, Y e Z são possíveis de serem determinadas, pois as coordenadas da estação base são conhecidas. Trata-se das correções no domínio das posições. As correções das pseudodistâncias são baseadas nas diferenças entre as pseudodistâncias observadas e as calculadas a partir das coordenadas dos satélites e da estação-

base.

Uma das formas de aplicação do DGPS é o RTK (*Real Time Kinematic*), essa nomenclatura não é usada de forma geral. O método aparece muitas vezes com a denominação de DGPS Preciso (KRUEGER; SEEBER; SOARES, 1997). Esse método de posicionamento é utilizado desde 1985, sendo um dos mais avançados no momento. Neste método é necessário que a coleta dos dados na estação de referência sejam transmitidos para uma estação móvel, necessitando para isso de um *link* de rádio ou algum outro tipo de comunicação. O receptor da estação móvel deve dispor de um software apropriado para realização do processamento dos dados em tempo real, com solução quase instantânea do vetor de ambiguidades.

4.8. Testes estatísticos e de acurácia

Como forma de avaliar estaticamente a consistência de um conjunto de dados obtidos por diferentes métodos de aquisição, pode-se executar testes estatísticos de regressão linear (simples ou múltipla) e testes de acurácia (*Kappa* ou *Tau*), por exemplo (REIS, 1994). Com isso, se busca estabelecer a confiabilidade dos dados e a consistência dos métodos de aquisição.

Dentre trais métodos, a regressão linear considera a relação da resposta às variáveis como uma função linear de seus parâmetros (REIS, 1994). Para tal análise, se emprega o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), que consiste em um método matemático para produzir uma função linear de relação entre duas variáveis (i.e., equação da reta) que mais se aproxime do conjunto de pontos, minimizando o erro das estimativas (SPIEGEL, 2012). O MMQ é um estimador que minimiza a soma dos quadrados dos resíduos da regressão (i.e., minimiza os erros), de forma a maximizar o grau de ajuste do modelo aos dados observados. Um requisito para o método dos mínimos quadrados é que o fator imprevisível (erro) seja distribuído aleatoriamente (randômico) e essa distribuição seja normal (SPIEGEL, 2012).

Segundo Spiegel (2012), outra forma de avaliar a consistência de um conjunto de dados se dá pela comparação entre dados amostrados e um conjunto auxiliar de dados de referência (i.e., pontos de controle ou dados de teste). Para tal teste, onde se busca inferir a acurácia do conjunto de dados, pode-se adotar o cálculo dos índices *Kappa* ou *Tau*.

Esses índices de indicação de acurácia são extraídos da matriz de confusão, sendo que estes podem ser indicadores de concordância entre valores individuais (pontos de controle). Congalton (1991) relata que o uso do coeficiente Kappa (K) é útil na avaliação comparativa de dados por considerar toda a matriz de confusão, inclusive os elementos de fora da diagonal principal, os quais representam equívocos de inferência. Já o índice Tau baseia-se na probabilidade *a priori*, permitindo, assim, a obtenção do valor da concordância esperada, mesmo antes de efetuar a checagem dos resultados da estimativa (REDMOND, 1995).

O uso conjunto das estimativas do coeficiente de determinação via regressão linear (R^2), dos índices *Kappa* e *Tau* permitem uma análise acerca do desempenho dos métodos de estimativa das presenças minerais de interesse, por exemplo.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. MATERIAL UTILIZADO

Para a realização dessa pesquisa, foram utilizadas bases cartográficas, imagens orbitais, levantamentos fotogramétricos com Drone, sondagens de solo, levantamento topográfico GNSS-RTK. Os dados produzidos foram tratados e analisados utilizando os softwares ARCGIS®, MATLAB® e AgisoftPhotoScan®. A descrição dos materiais empregados está presente no Quadro 1.

Quadro 1: Material utilizado na execução do trabalho.

Material	Fonte	Descrição
Bases cartográficas locais em formato vetorial	IBGE	Arquivos vetoriais em formato <i>shape</i> para localização e referência da área de estudo
Imagem hiperespectral HYPERION	USGS	Imagem hiperespectral do sensor HYPERION com 242 bandas espectrais (de 355,59 nm à 2577,08 nm) de 01/12/2015
Percussor manual para sondagem rasa	FURG	Equipamento para perfuração de solo a pequena profundidade
Canos de acrílico	FURG	Canos de 1,5 metros para coleta dos testemunhos
Serra circular elétrica	FURG	Corte longitudinal dos testemunhos
GNSS-RTK GS 15	IFRS	Determinação exata dos pontos de coleta
GPS de mão	IFRS	Auxílio na localização dos pontos de coleta
Vidrarias de laboratório, estufa, balança analítica	IFRS/FURG	Análise geoquímica
Lonas 1X1 metro	IFRS	Alvos para identificação dos pontos de controle
Phantom 3 Pro	FURG	DRONE utilizado para levantamento topográfico
<i>Spectroradiômetro field Spec 3</i>	UFRGS	Análise espectroscópica

5.2. MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, se utilizou dados orbitais do sensor HYPERION obtidos para dezembro de 2015, observando as seguintes técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) a partir de duas etapas distintas:

- (1) - Aplicação da espectroscopia de reflectância com (a) determinação das bibliotecas espectrais com o uso do espectro-radiômetro Fieldspec_4®, cobrindo o intervalo de 350 a 2500 nm para amostras coletadas ao longo da área de estudo em um perfil de 1 metro de profundidade e em intervalos de 10 cm; (b) análise das feições espectrais obtidas para os espectros analisados através do uso da técnica de comparação por derivadas (CURRAN *et al* 1994); (c) decomposição dos espectros originais em espectros sintéticos com o uso da correlação linear múltipla a fim de determinar a composição mineral e química presente nas amostras (LAUKAMP *et al.*, 2012). (d) análise geoquímica das amostras e correlação linear presente entre a análise espectral e os dados geoquímicos e, (e) inferência estatística da acurácia da espectroscopia de reflectância no intervalo de 350 a 2500 nm na identificação de minerais de Titânio.

- (2) - Classificação de dados para representação espacial: (a) uso de técnicas geoestatísticas de interpolação 3D para reconstituição do pacote mineral ao longo da área de estudo; (b) cálculo do volume e da distribuição dos distintos minerais ao longo da camada superficial do solo. (c) utilização de dados orbitais do sensor HYPERION e das assinaturas espectrais construídas para aplicação da técnica de classificação de imagens por ângulo espectral (*Spectral Angle Mapper* - SAM) como forma de construção de mapas temáticos da distribuição mineral ao longo do área de estudo. (d) comparação estatística entre os dados de classificação obtidos via imagens

orbitais do sensor HYPERION com dados de campo para fins de validação das técnicas empregadas.

O desenvolvimento desta tese avança ao propor a avaliação do desempenho da espectroscopia de reflectância para os intervalos do ultravioleta (UV), visível (Vis), infravermelho próximo e infravermelho médio como forma de análise indireta de minerais. Com isso, o trabalho propôs o mapeamento 3D da distribuição mineral para um perfil de 1 metro de profundidade, permitindo estimar o volume mineral presente bem como sua forma de distribuição.

Com a construção desta pesquisa buscou-se desenvolver de técnicas que permitam o suporte a exploração geológica a baixo custo a partir de dados de espectroscopia de reflectância e imageamento orbital hiperespectral. Desta forma, contribuir no sentido de produzir mapeamentos minerais preliminares de áreas extensas e regiões de solo exposto.

Os dados espectrais obtidos para amostras de campo, serão tratados nos softwares *Matlab®*, *ArcGIS®* e *ENVI®*, e técnicas de análises de espectroscopia a serem desenvolvidas. Os passos metodológicos seguidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho estão descritos pelos fluxogramas metodológicos a seguir (Figuras 7 e 8).

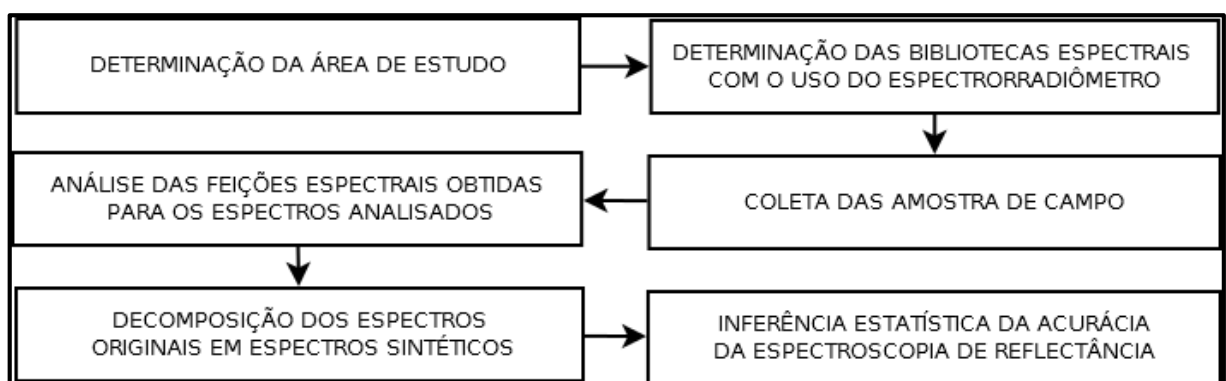


Figura 7: Primeiro passo seguido na metodologia do trabalho

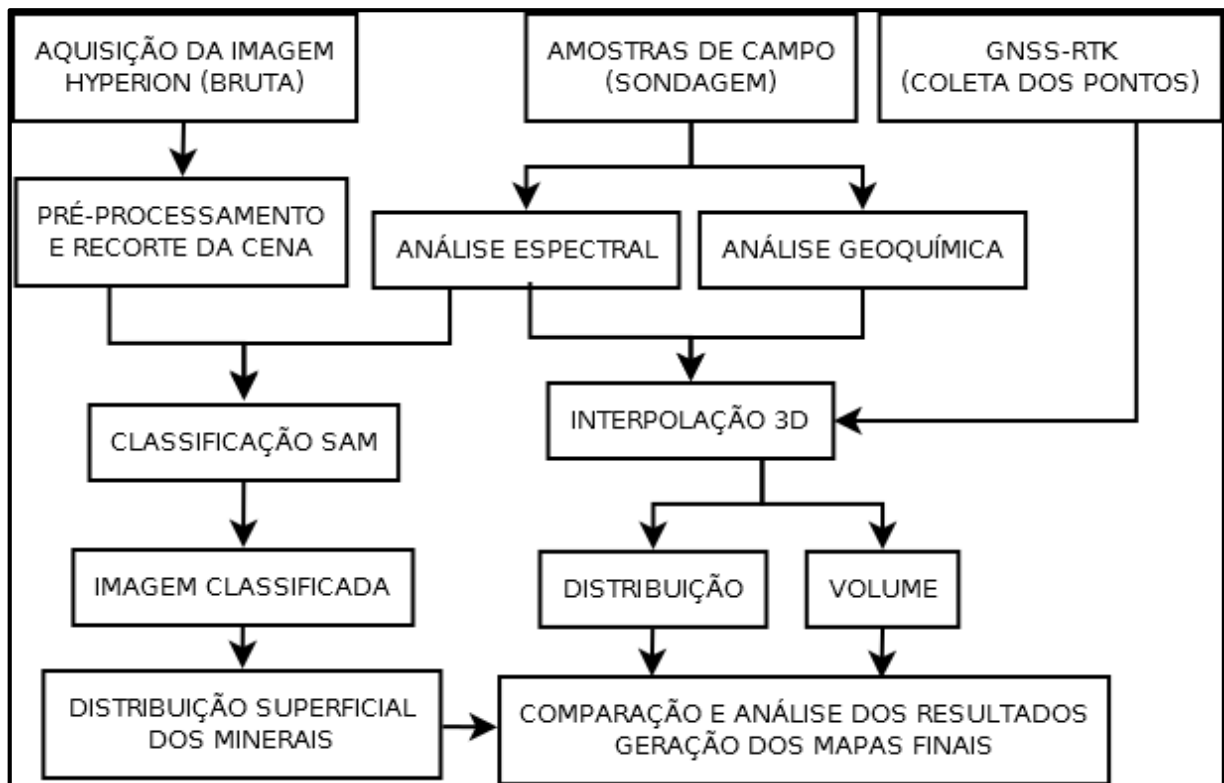


Figura 8: Segundo passo seguido na metodologia

5.2.1. Amostras minerais de campo – testemunhos de solo

O desenvolvimento das análises teve como princípio o reconhecimento da área de estudo, onde foi realizado uma caminhada pelo local, visto que o mesmo tem difícil acesso por veículos motorizados. O local é caracterizado por restingas, onde esses terrenos são de formação recente, isto é, formados por sedimentos retirados do continente e sedimentos de origem marinha. Isso significa dizer que esse cordão arenoso, localizado paralelamente à costa teve formação geológica posterior à do continente.

Do ponto de vista estrutural, as restingas litorâneas são definidas a partir das grandes acumulações sedimentares de origem recente: marinha e continental.

Situada na Planície Costeira, a restinga encontra-se dois metros acima do nível do mar. O relevo é plano e aparecem as dunas muito comuns, na paisagem local. A vegetação é modesta do tipo rasteira com árvores esparsas, com grande quantidade de eucalipto. Existem lavouras de cebola em grande parte da área. Os arroios e pequenos córregos também fazem parte da paisagem local e adquirem maior volume de água durante a estação chuvosa. Devido à baixa altitude do relevo, a restinga apresenta ainda sangas, banhados. As rochas são sedimentares: areia e argila. Este reconhecimento da área teve como objetivo o planejamento das coletas das amostras.

Após a visita da área de estudo foi feita a construção de uma malha de pontos equidistantes com separação de 300 metros, onde distribuiu-se pontos de coleta, sendo que seria feita a coleta de 36 pontos, com profundidade de 1 metro cada, em uma área de 1Km x 3km . Estas coletas foram realizadas através de canos de acrílico com ajuda de percursor (Figura 9), numa distancia de 300 metros de cada ponto.



Figura 9: Perfuração dos testemunhos com o auxílio do percursor

As coletas foram realizadas com o auxílio do GNSS/ RTK, onde as mesmas já estavam georreferenciadas. Cada ponto de coleta era identificado com sua latitude, longitude e altitude com numeração correspondente. As amostras eram retiradas já acondicionadas nos canos com suas extremidades devidamente fechadas e identificadas, conforme a Figura 10.



Figura 10: Identificação e acondicionamento das amostras

Após as coletas em campo as amostras foram levadas para o laboratório de oceanografia geológica (LOG) da FURG, onde as mesmas foram separadas e acondicionadas em pequenas quantidades nas frações de 10cm de profundidade em cada ponto, totalizando em 10 amostras por testemunho, num total de 320 amostras.

Os canos foram cortados longitudinalmente com o auxílio de uma serra circular elétrica para preservar a amostra e ter um melhor acesso para a coleta das alíquotas de 10cm, conforme as Figuras 11 ,12 e 13.



Figura 11: Imagem do corte dos canos

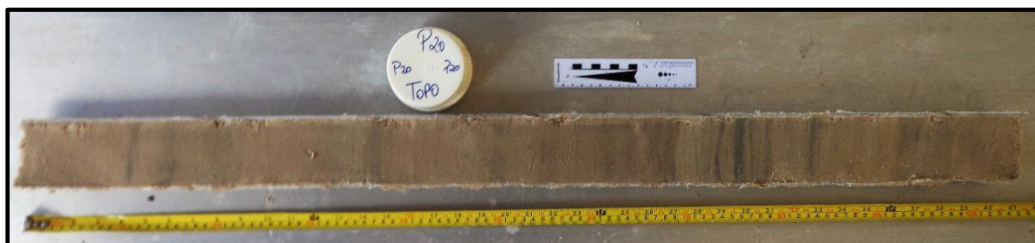


Figura 12: Imagem do testemunho cortado longitudinal



Figura 13: Imagem da separação das alíquotas de 10 cm do testemunho

Após a separação das amostras em alíquotas de 10 cm de profundidade as mesmas foram acondicionadas e devidamente identificadas em sacos plásticos para posterior processamento em laboratório

5.2.2 Assinaturas espectrais de minerais – bibliotecas espectrais

As assinaturas espectrais minerais constituem uma representação do comportamento espectral dos minerais ao longo do espectro eletromagnético. Uma assinatura espectral demonstra como um certo alvo reflete ou absorve um feixe de radiação. A assinatura espectral de um mineral será determinada pela constituição química do alvo por sua formação molecular.

A aglomeração de um conjunto de assinaturas espectrais de interesse é denominada como biblioteca espectral. Estas bibliotecas espectrais assumem a finalidade específica de constituir padrões de comparação e referência para alvos de interesse, permitindo utilizar a espectroscopia de reflectância para identificação dos alvos cujas assinaturas espectrais formaram a biblioteca. Neste trabalho, foram empregadas assinaturas espectrais obtidas em laboratório com o espectroradiômetro *Field Spec 3* (Fig 14), cuja as características estão no Quadro 2, a partir de amostras de referência. Estas assinaturas constituem um conjunto de curvas espectrais de referência determinantes para a identificação dos minerais e elementos químicos de referência.



Figura 14: Ilustração do Field Spec 3

Quadro 2: especificações do *Field Spec 3*.

Faixa espectral	350-2500 nm
Resolução espectral	3nm a 700 nm e 10 nm a 1400/2100 nm
Intervalo de Amostragem	1,4 nm a 350-1050 nm 2 nm a 1000-2500 nm
Tempo de digitalização	100 milissegundos
Detectores	Um conjunto de fotodíodos (Si) de 512 elementos, 350-1000 nm Dois fotodíodos separados do índice InGaAs , refrigerados por TE, com índice de 1000-2500 nm
Entrada	Fibra ótica de 1,5 m (campo de visão de 25°)
Ruído Equivalente ao Ruído (NEdL)	UV / VNIR $1,1 \times 10^{-9} \text{ W / cm}^2 \text{ / nm / sr}$ a 700 nm NIR $2,4 \times 10^{-9} \text{ W / cm}^2 \text{ / nm / sr}$ a 1400 nm NIR $4,7 \times 10^{-9} \text{ W / cm}^2 \text{ / nm / sr}$ a 2100 nm
Peso	5,2 kg
Calibrações	Comprimento de onda, refletância, brilho , irradiância

5.2.3. Análise geoquímica das amostras de Minerais de titânio

Os métodos de investigação geoquímica do ambiente superficial são úteis a diversas áreas do conhecimento e da atividade econômica. Se baseiam na determinação de teores de elementos químicos presentes em amostras de solos e rochas. O conhecimento da distribuição destes elementos químicos e a delimitação de regiões onde haja abundância ou escassez dos mesmos, podem ser utilizados como rastreadores ou indicadores de jazidas minerais. O método mais utilizado para análise de titânio em amostras sólidas é a separação em meio denso, onde baseia-se na diferença de densidade existente entre os minerais presentes na amostra. A separação pode ser estática ou dinâmica.

É um processo aplicado na separação de minerais segundo suas massas específicas mediante a utilização de líquido orgânico estável de densidade pré-

determinada (no caso de minerais de titânio usa-se o Bromofórmio). O meio denso utilizado deve apresentar uma densidade intermediária entre as das espécies minerais a separar, de maneira que os minerais com densidade inferior flutuem e aqueles com densidade superior afundem (decantação).

Este processo foi realizado no laboratório de análises químicas do IFRS – Campus Rio Grande, onde foi utilizado funis de separação em suportes próprios para a análise com bromofórmio. A técnica de separação é feita pela diferença de densidade da areia, do mineral pesado e o solvente (bromofórmio), sendo que este é o intermediário (figura 15). Em cada amostra foi feita a pesagem em balança analítica da amostra bruta e depois feito a separação em um ambiente fechado (capela), pois o solvente é volátil e provoca risco a saúde se inalado.



Figura 15: Análise de decantação de minerais pesados por bromofórmio.

Após a separação total, o mineral é filtrado e lavado com água destilada, seca-se o mesmo em estufa a 50° C durante 5 horas, e após a secagem, é feita a pesagem para obtenção do percentual do mesmo na amostra analisada.

5.2.4. Criação e implementação do modelo de decomposição da assinatura das amostras em seus constituintes a partir de funções-base

Para o desenvolvimento do modelo de decomposição das assinaturas espectrais foi implementado a análise matemática de decomposição linear, onde a partir de assinaturas espectrais já conhecidas (i.e., curvas de materiais de referência - Funções base: Ilmenita, Rutilo e Areia de Sílica) foram criadas assinaturas espectrais sintéticas resultado da sobreposição das assinaturas base. Com isso, cada espectro a ser analisado constituiu uma combinação linear entre os espectros da Ilmenita, Rutilo, Areia de Sílica e uma parcela indeterminada. A importância ou peso de cada um desses espectros para a estimativa do espectro testado constituiu o conjunto de autovalores de cada uma das assinaturas de referência, permitindo estimar as quantidades de cada um dos materiais de referência presentes na amostra.

Matematicamente, o modelo pode ser descrito pela Equação 3:

$$\mathbf{E}_E = \mathbf{E}_r \cdot \mathbf{A}_v + \varepsilon$$

Equação 3: Sistema de combinação linear dos espectros.

Onde, \mathbf{E}_E indica a matriz que representa o espectro estimado para a amostra via composição das funções-base, \mathbf{E}_r representa a matriz dos espectros de

referência, \mathbf{Av} a matriz dos coeficientes de peso de cada um desses componentes (autovalores) e ε indica o erro (parcela indeterminada) do modelo. As Figuras 16, 17, 18 e 19 exibem como exemplo os espectros originais (A) e escritos via funções-base (B) para os pontos de coleta P29, P16, P13 e P09, respectivamente. As Figuras (16, 17, 18 e 19) exibem também o realce das bandas espectrais (C) e sua decomposição-reconstrução a partir de seus constituintes espectrais adotados (D). Os pontos de coleta P29, P16, P13 e P09 foram selecionados para exibição por constituírem os principais padrões de concentração percentual de minerais pesados ao longo da área de estudo, como representado pela Figura 43.

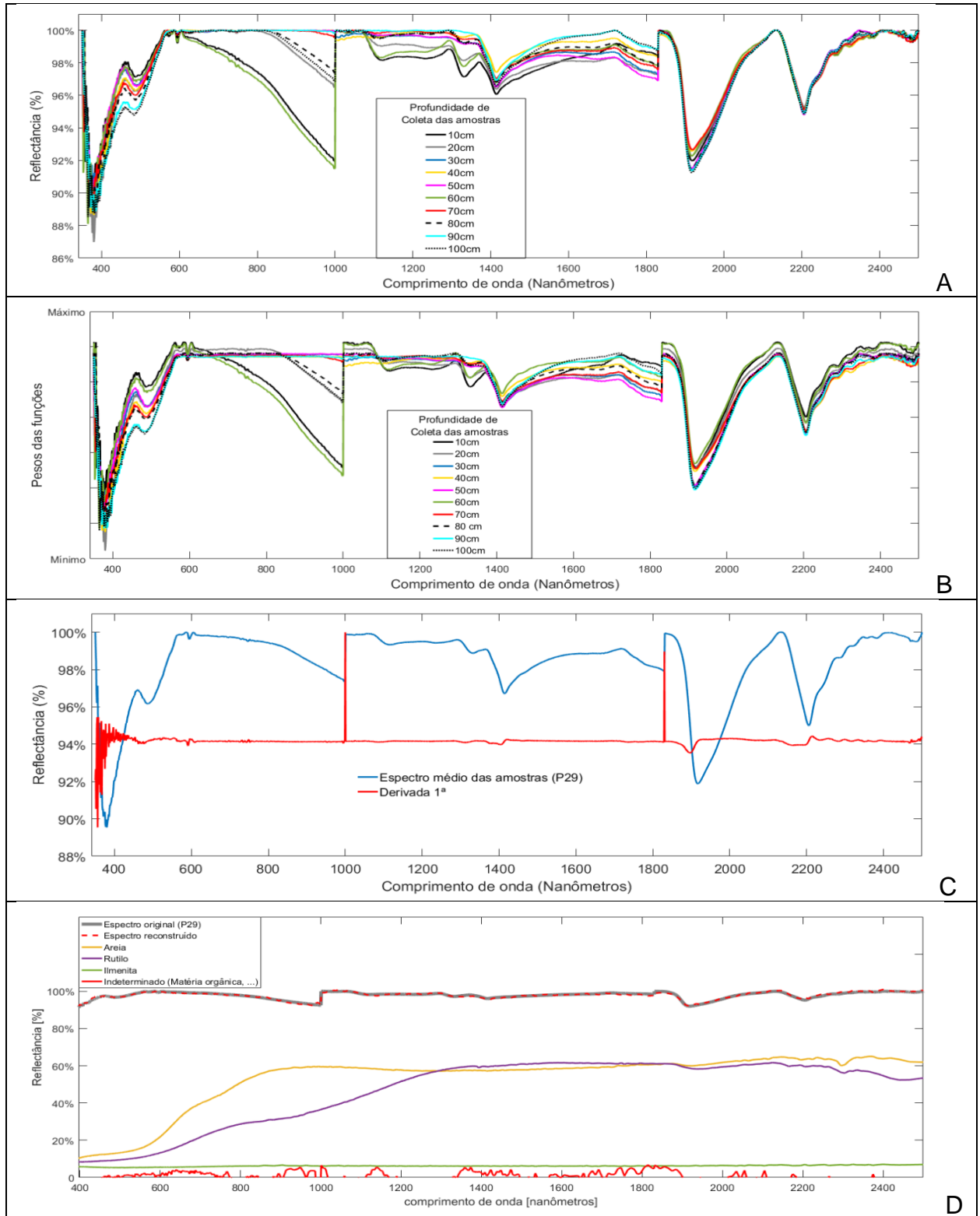


Figura 16: (A) Espectros originais para o ponto de coleta P29 (B) Espectros escritos via funções-base (C) Realce das bandas espectrais via Derivada Primeira e (D) sua decomposição-reconstrução a partir de seus constituintes espectrais adotados.

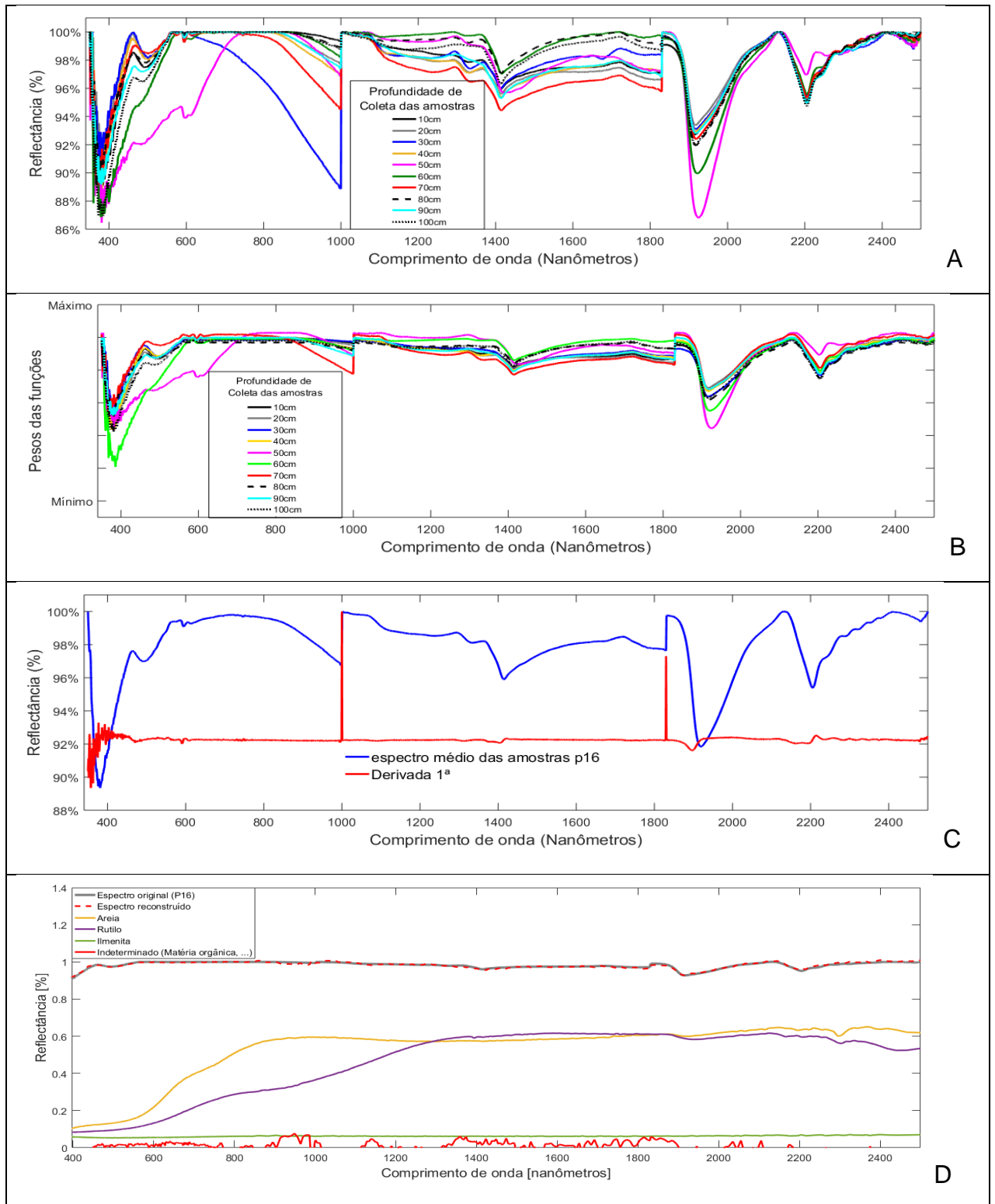


Figura 17: (A) Espectros originais para o ponto de coleta P16 (B) Espectros escritos via funções-base (C) Realce das bandas espectrais via Derivada Primeira e (D) sua decomposição-reconstrução a partir de seus constituintes espectrais adotados

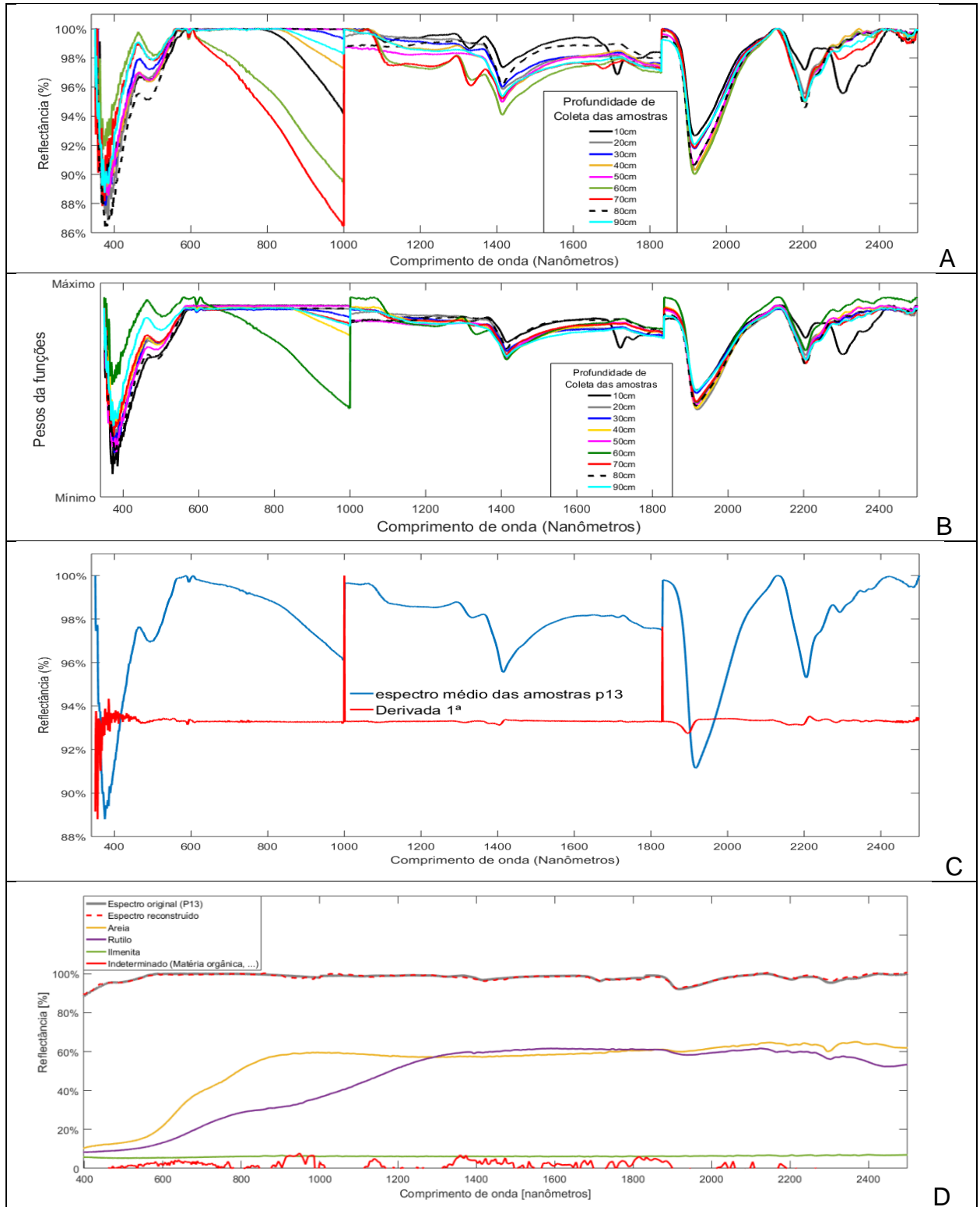


Figura 18: (A) Espectros originais para o ponto de coleta P13 (B) Espectros escritos via funções-base (C) Realce das bandas espectrais via Derivada Primeira e (D) sua decomposição-reconstrução a partir de seus constituintes espectrais adotados

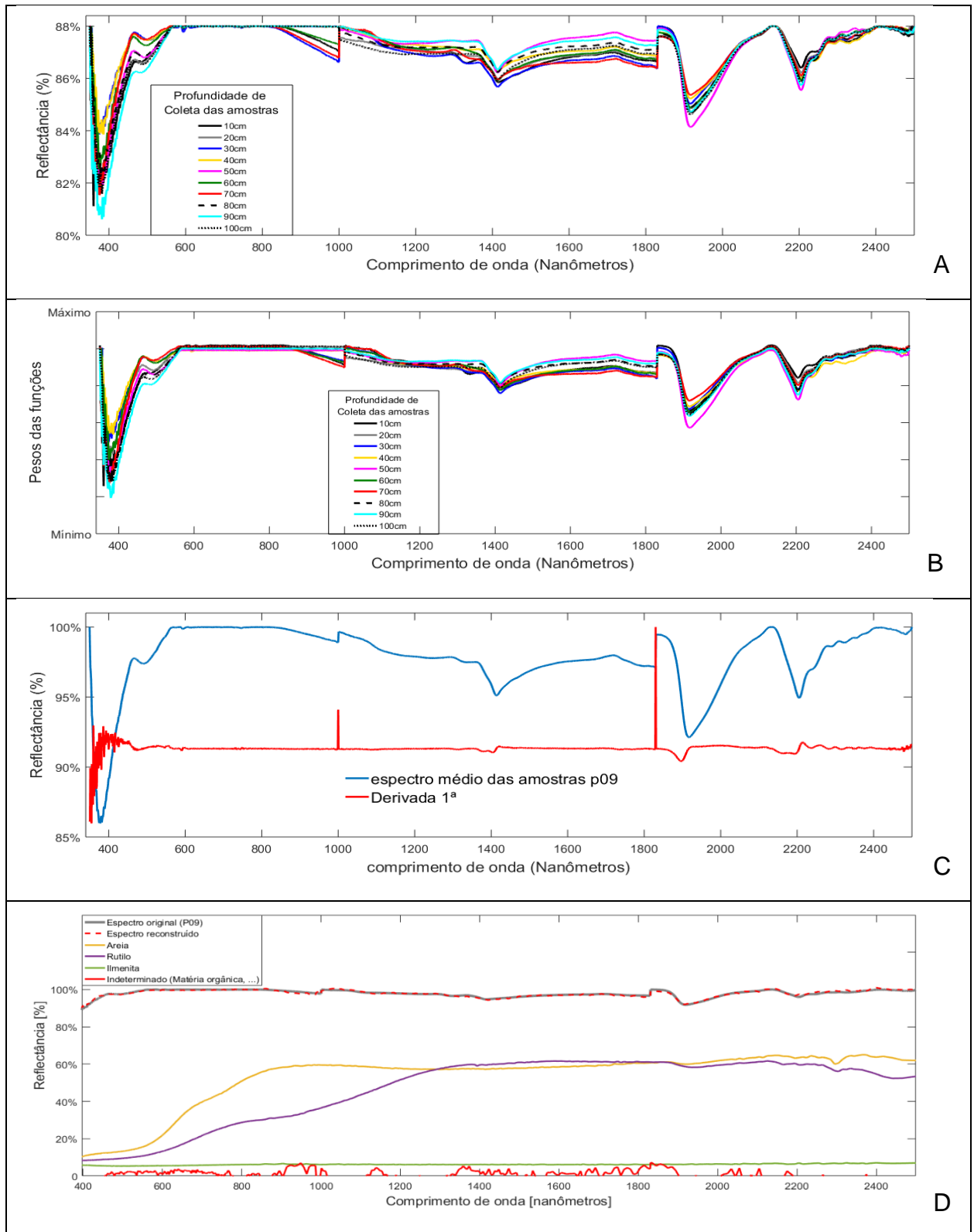


Figura 19: (A) Espectros originais para o ponto de coleta P09 (B) Espectros escritos via funções-base (C) Realce das bandas espectrais via Derivada Primeira e (D) sua decomposição-reconstrução a partir de seus constituintes espectrais adotados.

Com isso, a partir de um conjunto de espectros de referência que compõe uma biblioteca espectral de interesse, foi possível determinar a composição de uma amostra, tendo para tanto realizado a comparação do espectro dessa amostra com os espectros de referência via combinação linear como o exposto. A exemplo, considerando as Figuras 16-D, 17-D, 18-D e 19-D, a soma das curvas espectrais da Ilmenita, do Rutilo, da Areia (Sílica) e da parcela indeterminada resultaram no espectro modelado de cada ponto, sendo esse bastante próximo ao espectro original ($R^2 > 98\%$).

A decomposição linear dos espectros permitiu que a partir dos espectros das amostras de solo obtidas via sondagem rasa fosse possível realizar a inferência da composição mineralógica de tais amostras. Comparativamente, foi obtido uma coincidência média de aproximadamente 87% entre a análise geoquímica e a análise por espectroscopia, baseada na decomposição linear dos espectros.

5.2.5. Comparação dos resultados do modelo com os valores medidos em laboratório

Para comparação entre os resultados do modelo e aqueles obtidos pelas amostras em laboratório, foi empregado o método de regressão linear, implementado através do método dos mínimos quadrados (MMQ). Tal método permitirá a comparação estatística e a combinação linear entre as assinaturas espectrais dos elementos químicos individuais a fim de formar sinteticamente as assinaturas medidas.

O emprego do método dos mínimos quadrados será realizado pelo cruzamento de um conjunto de vetores de assinaturas espectrais de elementos químicos, de minerais e de amostras de solo. O MMQ determinará a capacidade de o modelo proposto representar a assinatura de uma dada amostra, determinando o coeficiente de determinação R^2 que representa a correlação linear entre o modelo e

o espectro de referência.

Através da combinação linear entre distintas assinaturas espectrais será determinado o conjunto de coeficientes que representam o percentual de importância de cada elemento químico na formação do espectro do mineral. A partir do MMQ será gerado o modelo de combinação linear com a seguinte forma:

$$E_{Tm} = A \cdot E_1 + B \cdot E_2 + \dots + Z \cdot E_n$$

Equação 4: decomposição espectral

Onde :

- E_{Tm} : Espectro total modelado para o mineral;
- A, B, Z : coeficiente percentual de importância do elemento químico (função-base) na formação do espectro modelado.
- E_1 , E_2 , E_n : Espectros dos elementos químicos que formam os espectros de interesse.

5.2.6. Utilização do modelo para estimação dos constituintes químicos de uma área piloto a partir de uma imagem hiperespectral

O processo de aquisição de imagens em centenas de bandas espectrais, de forma a possibilitar que de cada um dos pixels das mesmas seja possível derivar uma curva de reflectância espectral completa, recebe o nome de sensoriamento remoto hiperespectral (*Hyperspectral Remote Sensing*) (JENSEN, 2009). Estes espectros extraídos podem ser comparados diretamente com espectros medidos no campo ou em laboratório através de técnicas de comparação multidimensional.

Como técnicas mais consolidadas para a interpretação e classificação de dados hiperespectrais podemos citar a análise por componentes principais, a

classificação por angulação entre espectros, SAM – *Spectral Angle Mapper* e a técnica de comparação por derivadas de espectros (ESPINOZA, 2009; CURRAN, 1994). Aspectos de terreno como cobertura vegetal e umidade podem alterar drasticamente o desempenho destes métodos, o que leva a uma melhor aplicação em áreas descobertas como desertos e zonas praias.

Sequencialmente, foram selecionadas as assinaturas espectrais de interesse a partir de uma biblioteca espectral de minerais (i.e., biblioteca espectral de minerais do serviço geológico americano -USGS), formando um conjunto de espectros de interesse. Com os espectros selecionados, foi executada a determinação das feições características, gerando arquivos de *endmembers*.

Paralelamente, foi realizada a obtenção e o pré-processamento de uma imagem hiperespectral do sensor HYPERION, do dia 01/12/2015 para área de estudo. As características desta cena estão presentes no Quadro 3.

Quadro 3: Informações sobre o sensor HYPERION. Fonte: adaptado de USGS(2016)

Órbita	Intervalo Espectral	Resolução Espectral
705km/heliossíncrona	400-2500 nm	10 nm
Tamanho da cena	Resolução Espacial	Quantização
Aproximadamente 28x95 km	Pixel=30x30m	12 bits
Intervalos Espectrais	Nº de bandas espectrais	Custo
Visível, infravermelho próximo e infravermelho médio	242	R\$ 0,00

Essa imagem cobre as porções espectrais do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio (Quadro 3). Via de regra, minerais apresentam feições espectrais junto a região espectral do infravermelho termal. No entanto, os minerais de óxido de titânio, interesse dessa pesquisa, apresentam feições espectrais junto as regiões espectrais do infravermelho próximo e infravermelho médio, o que torna

viável o uso de dados do sensor *HYPERION*.

Como sequência metodológica, seguiu-se a redução da dimensionalidade espectral da cena analisada a fim de evitar redundância e excesso de processamento computacional. Com isso, a comparação entre os dados de referência e aqueles presentes em cada pixel da cena foi facilitada, evitando o retrabalho estatístico e inferências espúrias.

Com os *endmembers* selecionados, que são os arquivos de feições espectrais de uma amostra de referência, e a resposta espectral presente em cada pixel da imagem, executou-se um conjunto de técnicas conhecidas como análise de espectros através da Decomposição de Curvas por meio da Derivada Primeira (DCDP). De forma geral, esta técnica de classificação hiperespectral se baseia na análise da similaridade entre os espectros de um conjunto de materiais de referência e as curvas espectrais correspondentes a cada pixel da imagem. Em linhas gerais, metodologia de classificação utilizada foi proposta por Curran (1994) e implementada em trabalhos por Boardman *et al.* (1995), Kruse *et al.* (1996) e Espinoza (2006) e aqui aplicada através dos seguintes passos:

1º) Pré-processamento, dado pela calibração radiométrica e correção atmosférica, com a transformação dos valores pictóricos para fator de refletância bidirecional através do aplicativo *FLAASH* do software *ENVI*®;

2º) Redução da dimensionalidade dos dados *HYPERION* por meio da técnica de componentes principais (PCA) através do software *Matlab*®;

3º) Seleção e caracterização espectral dos minerais de interesse com o objetivo de criar uma biblioteca espectral de referência e dados de campo obtidos na literatura descrevendo a concentração mineral de interesse (concentração de titânio);

4º) mapeamento espacial pela técnica *DCDP* e estimativa da presença para os minerais de interesse, representada em escala de concentração.

Os dados *HYPERION* foram obtidos a partir do repositório público de dados do serviço geológico americano (USGS), denominado *EarthExplorer*. Os dados foram obtidos em contadores digitais (CDs), contendo um conjunto de informações auxiliares presentes em um arquivo de metadados, o que permitiu a transformação desses dados para radiância espectral (calibração dos dados).

A coluna atmosférica que separa o sensor orbital do alvo provoca uma série de processos de interação com o fluxo radiante (i.e., absorção e espalhamento da radiação), ocasionando distorção nos dados coletados pelo sensor orbital (JENSEN, 2009). Para a correção atmosférica dos dados do sensor *HYPERION* foi utilizado o aplicativo *FLAASH* presente junto ao software *ENVI®*. Este aplicativo oferece uma série de estratégias para a correção atmosférica de imagens orbitais, considerando as condições atmosféricas locais através de dados auxiliares obtidos pelo sensor orbital *MODIS*.

Após a correção atmosférica, os dados foram representados em fator de refletância bidirecional, necessário para comparação entre as imagens e os espectros de referência. Assim, para cada pixel da imagem, foi obtido um conjunto de 242 valores de refletância bidirecional (ρ), representando a porção percentual de radiação refletida pela área do pixel em um dado intervalo de comprimentos de onda ($\Delta\lambda$).

Com os dados-imagem representados em refletância bidirecional, foi empregada a técnica de comparação de espectros conhecida como técnica de Decomposição de Curvas por meio da Derivada Primeira (DCDP). A DCDP descreve as curvas a partir de suas declividades, o que representa o delineamento da forma da curva, sendo indiferente a seu valor absoluto. A aplicação da DCDP seguiu os passos sequenciais descritos no fluxograma da Figura 20.

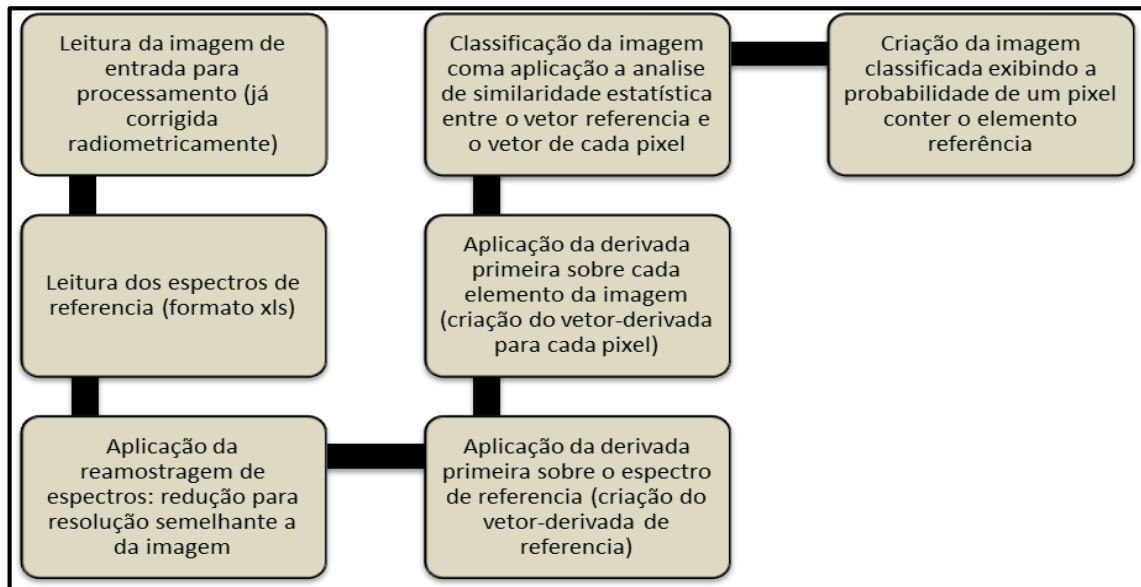


Figura 20: Fluxograma da sequência de processos para a aplicação da DCDP.

A imagem processada constitui de uma cena, compreendendo a localidade do Retiro no município de São José do Norte/RS e suas adjacências, perfazendo a área constituinte da descrição trazida por Correa *et al.* (2006) e Dillenburg *et al.* (2004) como áreas com presença de minerais pesados, com a predominância de óxidos de titânio em suas camadas superficiais.

A DCDP traz como vantagem o fato de evitar erros de escala entre os espectros comparados por conta de distintas condições de iluminação. Isto ocorre porque ao efetuar o cálculo das derivadas, a técnica compara os espectros através dos sinais das derivadas e não através de seus valores, o que significa comparar a forma dos espectros ao invés de comparar seus valores diretamente. Isso elimina erros devido as diferenças de iluminação e coberturas atmosféricas entre os espectros de referência e a imagem.

Para áreas de uma curva com característica crescente, obtém-se a derivada-primeira positiva, enquanto para regiões espectrais com características a alta absorção (refletância decrescente), obtém-se a derivada-primeira negativa (Fig. 21). Assim, definiu-se o formato e a coincidência das curvas espectrais a partir da comparação dos sinais das derivadas da curva de referência e da curva espectral

pictórica de cada elemento da imagem.

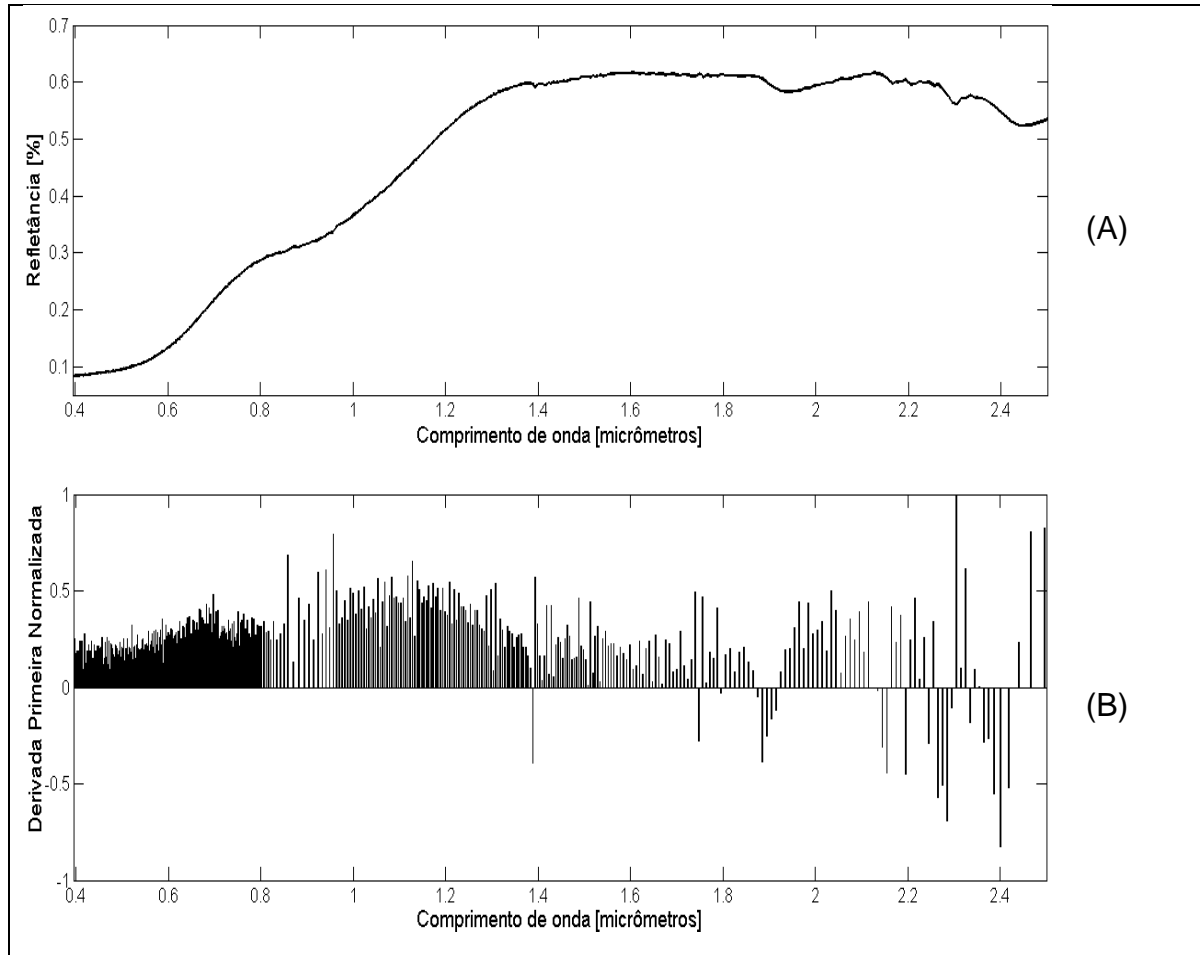


Figura 21: Comparação entre um espectro de refletância (A - Rutilo - USGS) e sua derivada-primeira (B - Obtida via emprego da DCDP).

Como forma de determinar o desempenho das técnicas empregadas, foi realizado o cruzamento estatístico entre os dados de distribuição e presença mineral descrito na literatura. Esses dados de referência foram adquiridos a partir de mapeamentos descritos ao longo da área de estudo por Corrêa *et al.* (2006) e Dilembur *et al.* (2004).

O cruzamento estatístico consistiu na comparação entre os valores estimados a partir do processamento descrito sobre a imagem orbital do sensor HYPERION e

dados os dados de referência, categorizando ambos em um contínuo linear de alta e baixa concentração do mineral.

Foram extraídos 50 pontos de referência, permitindo uma espacialização da variabilidade natural da distribuição mineral local, servindo de referência para a validação da técnica de mapeamento mineral via dados orbitais aqui proposta. Com isso, foram calculados uma imagem-erro, o índice *Kappa* (κ) e o coeficiente de determinação por regressão linear simples obtido por comparação entre os dados estimados via imagem e aqueles de referência.

5.2.7. Levantamento de dados topográficos com uso de DRONE

Para o mapeamento topográfico foi utilizado um veículo aéreo não tripulado da marca DJI Phantom 3 Pro de propriedade da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, equipamento que pesa 1280 gramas, que o constitui como uma aeronave de pequeno porte, composta por uma plataforma de voo do tipo multirotor (quadricoptero), e uma estação de controle acoplada a um smartphone. O Phantom 3 Pro é equipado com um sensor multiespectral (câmera digital de pequeno porte) de 1/ 2,3" CMOS de resolução 12,4 M pixel. A plataforma de voo é alimentada por uma bateria de Li-Po com autonomia de aproximadamente 20 minutos. Além de uma unidade de processamento interno, uma unidade de medição inercial e sistema de navegação GPS, o equipamento conta com um sensor barométrico para registro da altitude. Os dados (imagens/fotografias e registros de voo) são armazenados em um cartão micro SD instalado no casco da plataforma de voo.

Os planos de voo foram construídos através do *software DroneDeploy*, onde foram elaborados 4 planos de voo com os seguintes parâmetros:

- altura de vôo: 200 metros
- área mapeada por bloco: 84 hectares

- Número de imagens por bloco: 133 imagens
- Recobrimento lateral: 65%
- Recobrimento frontal: 75%
- Resolução em metros/pixel : 0,086 metros.
- Duração média de voo por bloco: 14 minutos e 46 segundos
- Número de linhas por bloco: 10 linhas

Somando os quatro blocos de voo, foi coberta uma área de 336 hectares composta por 532 imagens capturadas em 40 linhas de voo totalizando aproximadamente uma hora de levantamento.

Para o devido georreferenciamento de alta precisão foi empregado o uso de pontos de controle em solo (Figura 22). Foram distribuídos 34 alvos ao longo do recorte de estudo, levando em conta a área, a morfologia e o acesso para distribuição dos mesmos.



Figura 22: Imagem dos pontos de controle(alvos)

A coleta das coordenadas X , Y e Z de referência foi realizada com o equipamento GNSS da marca *Leica* GS 15, com base instalada sobre marco com coordenadas conhecidas (RN) localizada no canteiro da Rodovia Governador Mário Covas na cidade de São José do Norte (saída da BR 101).

Nos parâmetros de configuração do equipamento foi utilizado o sistema de coordenadas WGS 84 zona 22S, sendo o limite de PDOP ≤ 4 (padrão geodésico). Posteriormente os valores verticais de referência elipsoidal (h) foram ajustados para valores ortométricos (H) através do modelo de ondulação MAPGEO2015.

O tratamento dos dados se deu através do *software Agisoft Photoscan (ver fotos)*, onde foram inseridas as imagens. Do total coletado foram alinhadas 501 fotos obtendo-se uma nuvem tridimensional vetorial (nuvem densa de pontos, *Dense Cloud*) com um valor superior a 26×10^6 . Tal nuvem foi devidamente ajustada pelos pontos de controle em solo (*Tie Points*), conforme figura 23 abaixo, resultando em uma precisão para o modelo de 0,30 metros. O modelo digital de elevação obtido a partir da nuvem, possui resolução espacial de 0,34 metros, mas para fins de processamento foi reamostrado para o valor de 1 metro de resolução, com cotas entre 1,22 metros e 18,78 metros (Figura 24)

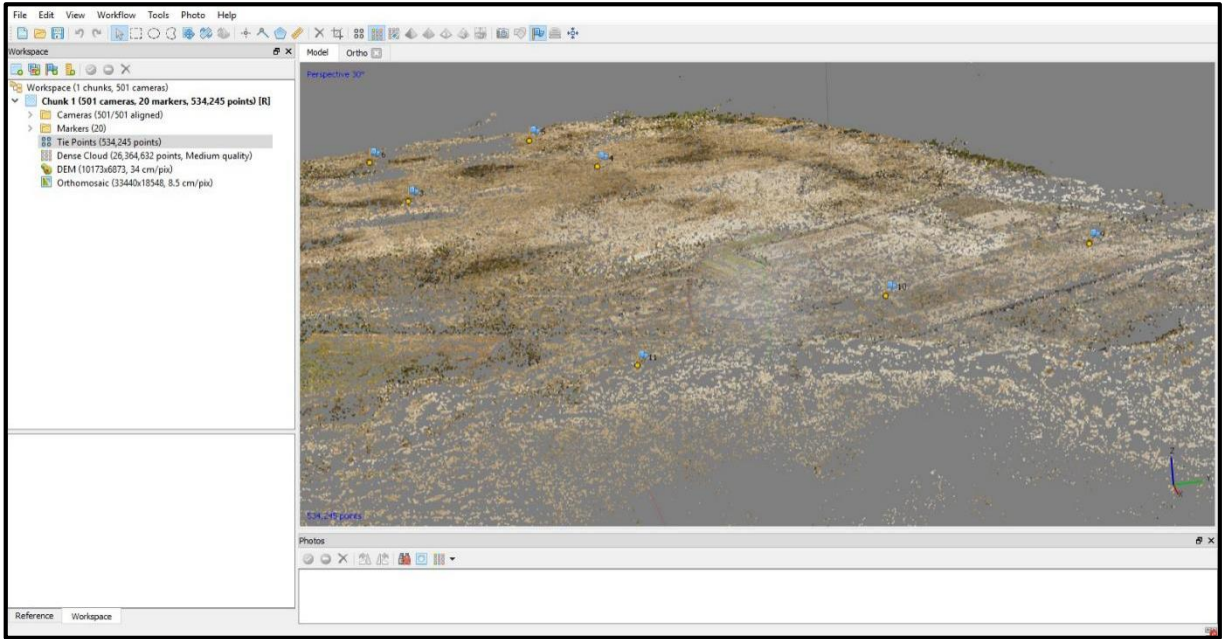


Figura 23: Demonstração dos *Tie Points*

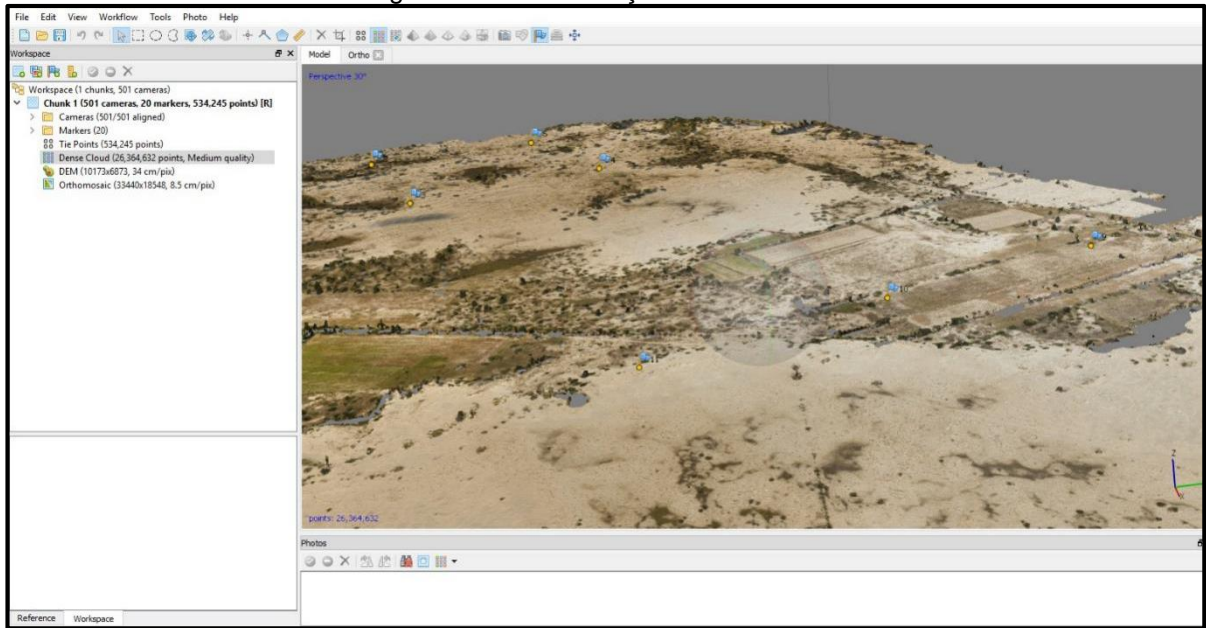


Figura 24: Demonstração da *Dense Cloud*

5.2.8. Interpolação espacial em 3D dos dados de composição química-mineral

Para representação em três dimensões da distribuição de minerais pesados

ao longo das camadas de solo da área de estudo, foi estabelecido um *Grid de Coordenadas* com Latitude (x), Longitude (Y) e profundidade da camada (h), ajustada a topografia do terreno através do Modelo Digital de Terreno (MDT) produzido para o local, gerando a altura real da camada de solo em questão (z) (Fig. 25).

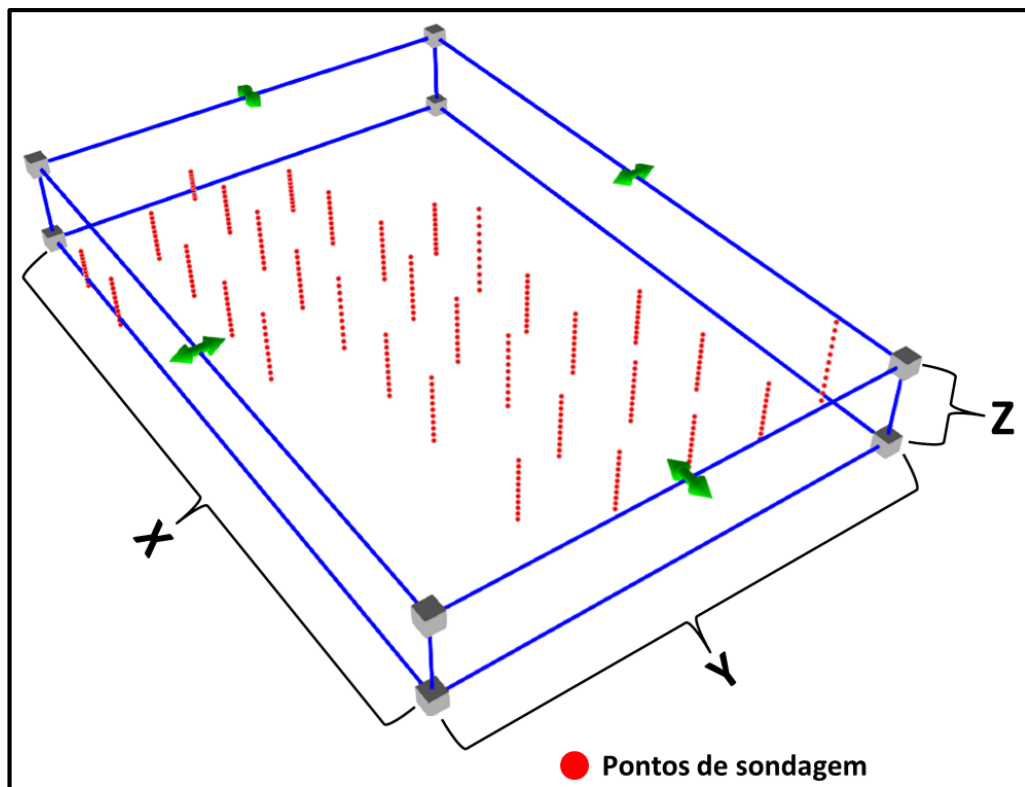


Figura 25: Grid de ponto de coleta das amostras de solo para fins de modelagem 3D

Esse arquivo e pontos com três dimensões espaciais foi interpolado, com a atribuição dos valores de estimativa da presença mineral, obtidos via análise geoquímica de laboratório e via espectroscopia por comparação matemática de espectros (Referência Vs. Amostra de interesse). Isso permitiu gerar imagens contínuas das camadas de solo. Para tal foi adotado o método de interpolação IDW (aplicação de pesos pelo inverso da distância).

Com isso, para cada análise mineral adotada (via geoquímica de laboratório e

via espectroscopia), foi produzido um cudo de dados representando o percentual mineral distribuído ao longo das camadas de solo para a área de interesse. Isso possibilitou extrair o volume e a massa de minerais pesados presentes, permitindo uma melhor estimativa das reservas mapeadas.

5.2.9. Determinação da acurácia do modelo gerado e de suas aplicações

A análise de acurácia será determinada como forma de representar a confiança estatística do modelo proposto, bem como constituirá uma forma de validação do uso de imagens hiperespectrais para determinação indireta da composição química de minerais. Para tanto, foi utilizado o estimador de acurácia *índice kappa* (κ) que determina o índice de acertos de um processo de rotulação e ou classificação de amostras.

A partir da coleta de amostra de campo, devidamente analisadas geoquimicamente e através da metodologia de análise química por espectroscopia proposta, será estabelecido um *índice kappa* com a finalidade de determinar a capacidade de descrição correta do modelo. Desta forma, a acurácia do modelo será descrita de maneira a representar a capacidade de análise permitida a partir dos espectros de reflectância obtidos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

6.1. Biblioteca espectral das amostras compostas por solo e minerais pesados

A análises espectrais foram realizadas no Laboratório de Espectroscopia do Programa de Pós Graduação em sensoriamento Remoto da UFRGS. As amostras estavam devidamente isentas de umidade e acondicionadas em copos de isopor sem contato com o meio externo. Os espectros de referência foram obtidos a partir das amostras de campo através da análise por espectrorradiômetro, utilizando a pistola *contact probe Hi-intensity*, onde cada amostra teve um máximo de 10 espectros (Figuras 26, 27, 28 e 29).

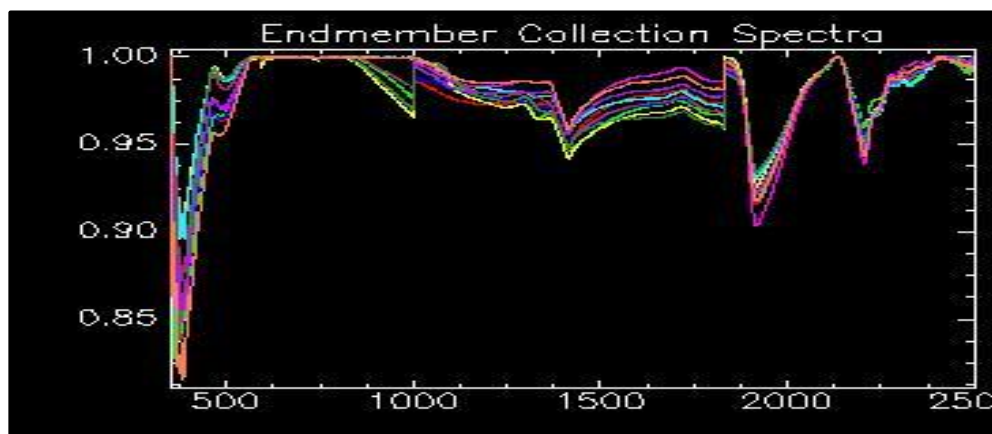


Figura 26: Espectros obtidos em laboratório da amostra P09

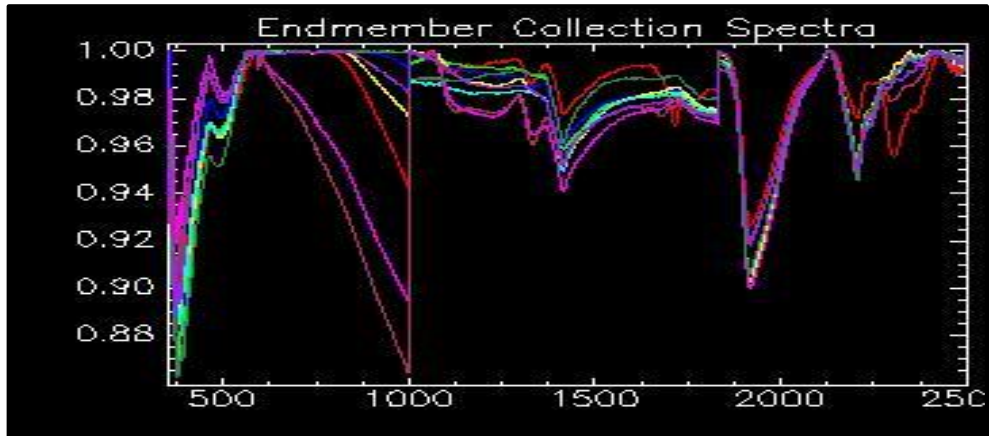


Figura 27: Espectros obtidos em laboratório da amostra P13

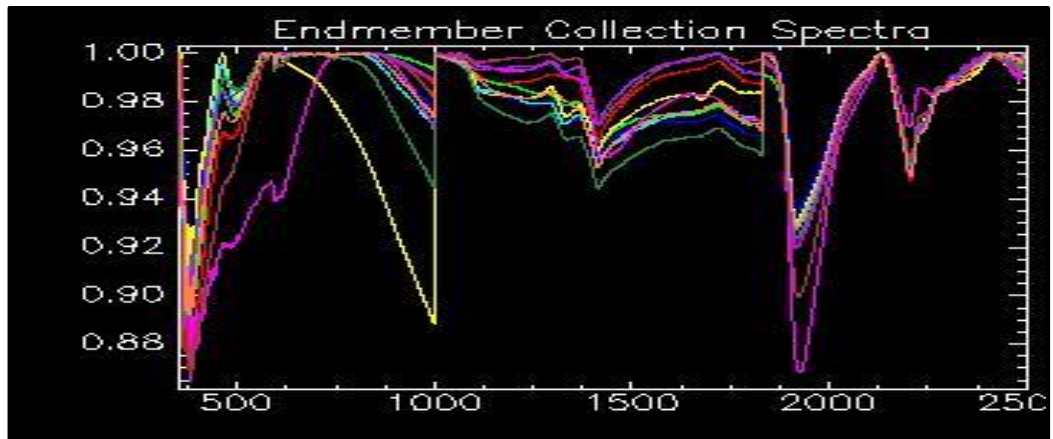


Figura 28: Espectros obtidos em laboratório da amostra P16

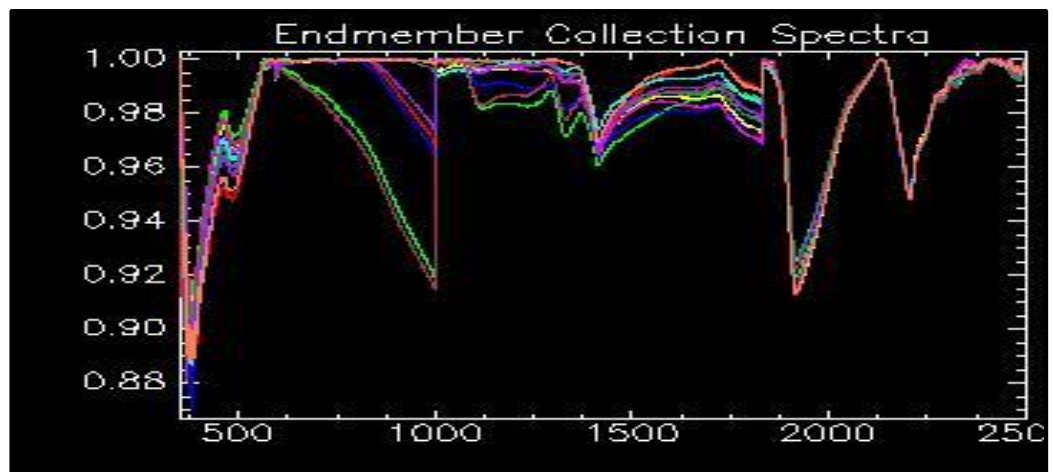


Figura 29: Espectros obtidos em laboratório da amostra P29

Os espectros demonstrados das amostras *p09*, *p13*, *p16* e *p29* foram escolhidos devido a diferença de concentrações de minerais pesados presentes nas mesmas. Os espectros originais das demais amostras estão representadas no Apêndice 9.1.

6.3. Decomposição espectral via funções-base

..

A decomposição espectral via funções-base consistiu em extrair, via decomposição matemática baseada no cálculo das autofunções que formam os espectros de interesse, os principais componentes que formam esses espectros. A exemplo, na Figura 30 são exibidas as decomposições dos espectros referentes ao ponto de coleta N° 09, sendo o maior valor concentração mineral entre todos os pontos amostrados (média de 10,51%).

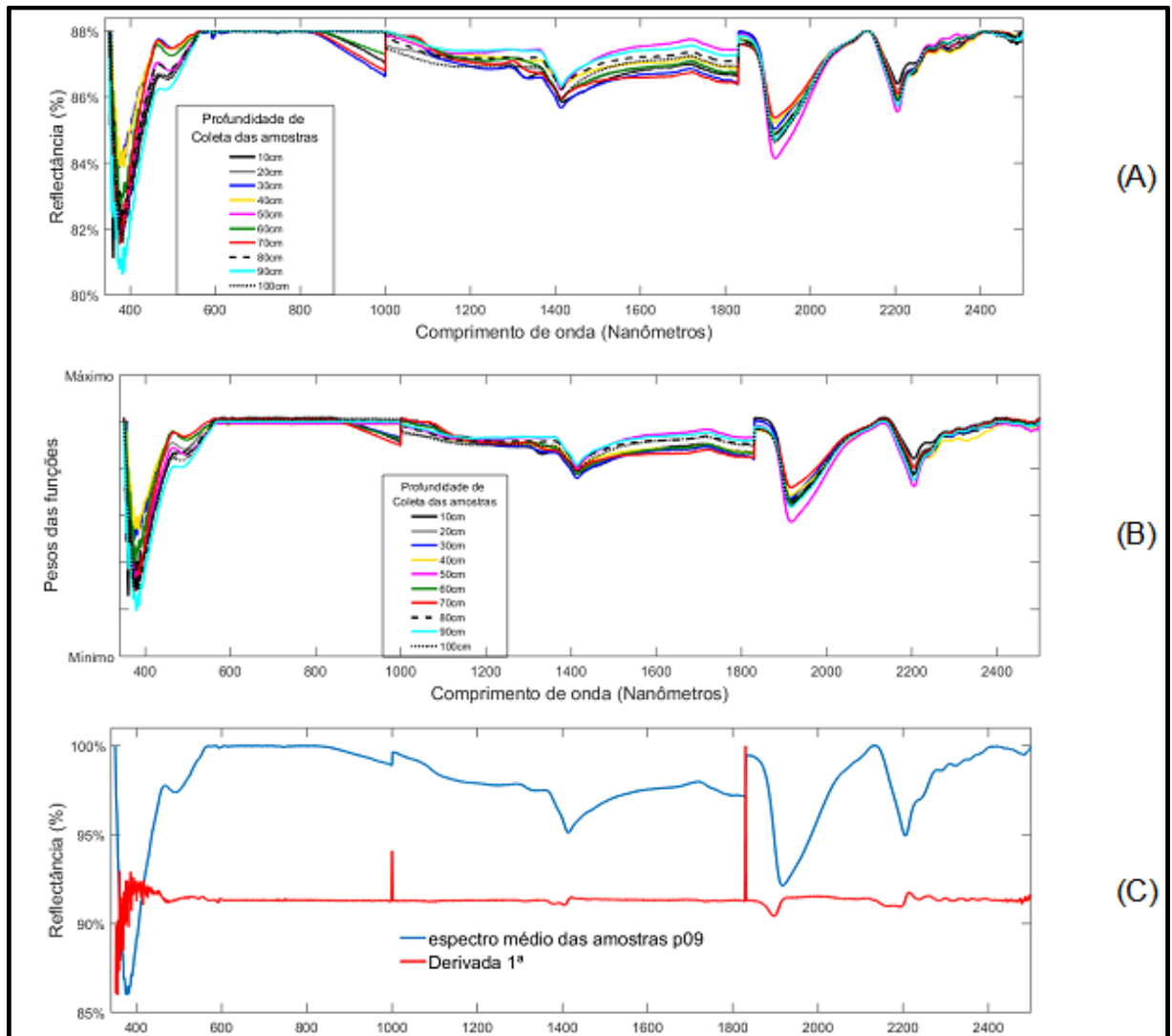


Figura 30: Exemplo de decomposição espectral. (A) Espectros originais com a extração do contínuo, (B) Espectros reconstruídos com 5 funções-base: (1) Rutilo, (2) Ilmenita, (3) Areia de sílica, (4) Matéria orgânica, (5) indeterminado e (C) Derivada primeira dos espectros originais, aplicada para realce das bandas espectrais.

Essa mesma análise foi aplicada a cada um dos espectros gerados, sendo que a comparação entre as funções-base referentes à Ilmenita (2ª autofunção) e ao Rutilo (3ª autofunção) permitiu a inferência da quantidade relativa de mineral pesado presente nas amostras. Para tal, se analisou a intensidade das curvas espectrais dos minerais de interesse em comparação as autofunções descritas, sendo essas normalizadas a partir de duas amostras de referência geradas em laboratório: (2) amostra 100% mineral pesado e (2) amostra 100% areia de sílica proveniente do terreno local.

Com isso, se inferiu a cada amostra, a partir de seu comportamento espectral, a quantidade de mineral pesado presente. Esses dados foram comparados aos dados já obtidos via análise geoquímica por regressão linear (Fig. 31)

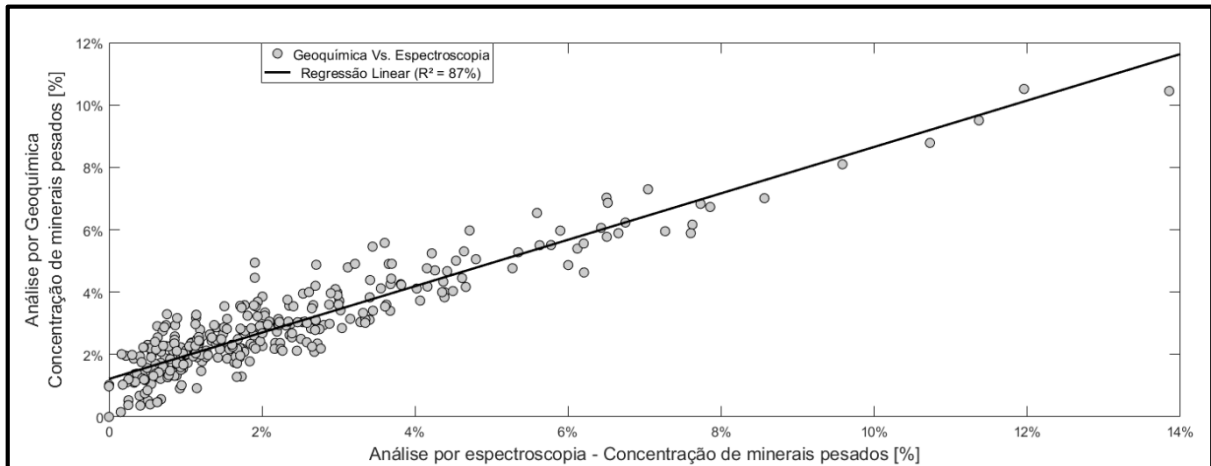


Figura 31: Regressão linear entre os dados de geoquímica de laboratório e Análise espectral proposta

Para tal, foram obtidos coeficientes de determinação entre 81% e 92%, com média de 87%. Isso mostra a possibilidade do uso da espectroscopia de reflectância como ferramenta para a inferência da presença de minerais pesados, além de permitir a aplicação dessas técnicas sobre dados-imagem hiperespectrais, a exemplo dados HYPERION, o que permite um mapeamento desses alvos a baixo custo, desde que os mesmos estejam à superfície.

6.4. Análise da presença de minerais pesados

6.4.1. Análise por Geoquímica

Após a análise em laboratório utilizando o processo de decantação por Bromofórmio, foi realizado o tratamento dos dados e a confecção das tabelas com

os percentuais de cada ponto de coleta e cada profundidade de 10cm, conforme as figuras 32 a 41.

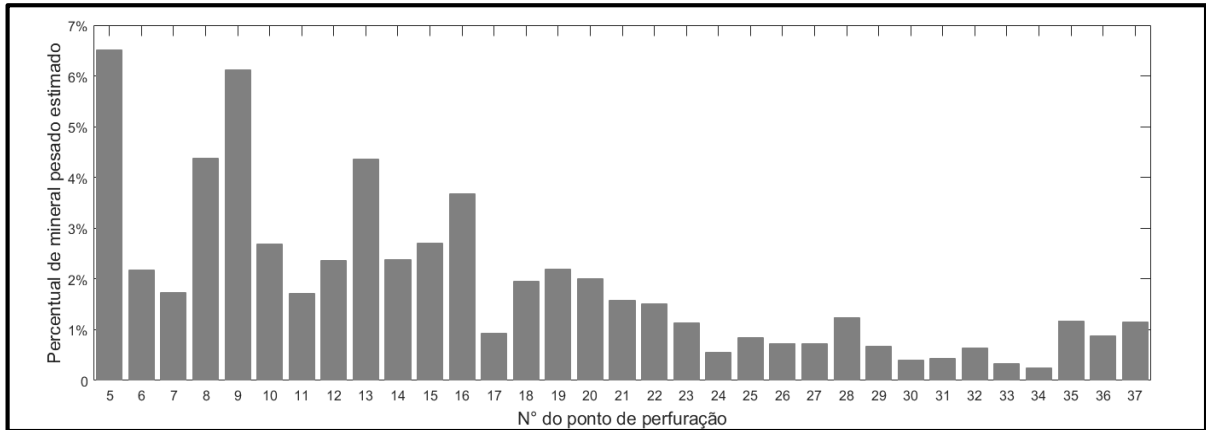


Figura 32: Percentual de minerais pesados em 10cm na análise geoquímica

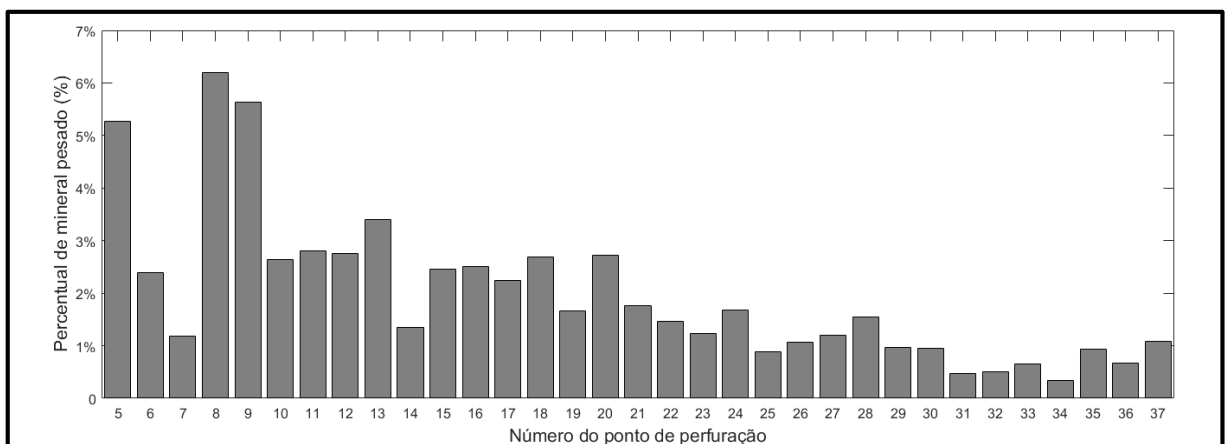


Figura 33: Percentual de minerais pesados em 20cm na análise geoquímica

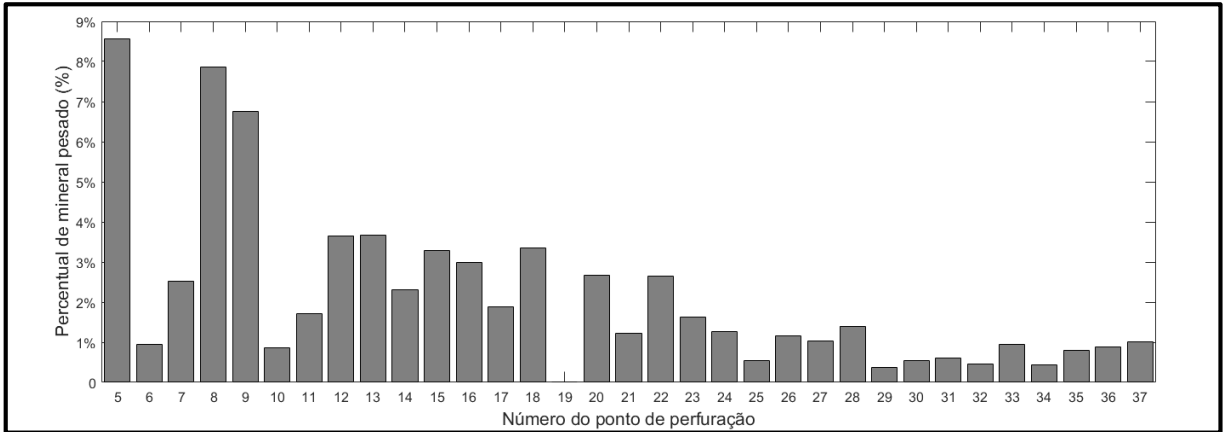


Figura 34: Percentual de minerais pesados em 30cm na análise geoquímica

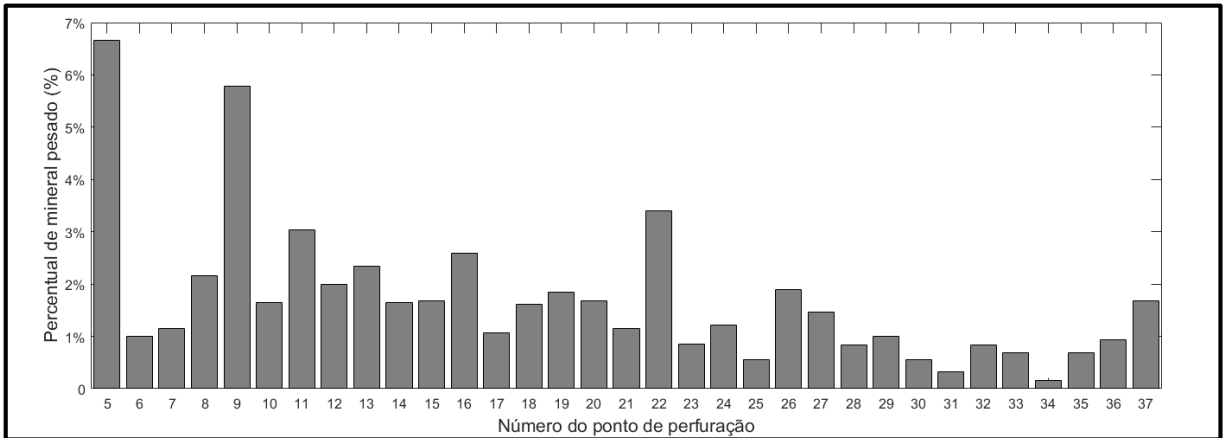


Figura 35: Percentual de minerais pesados em 40cm na análise geoquímica

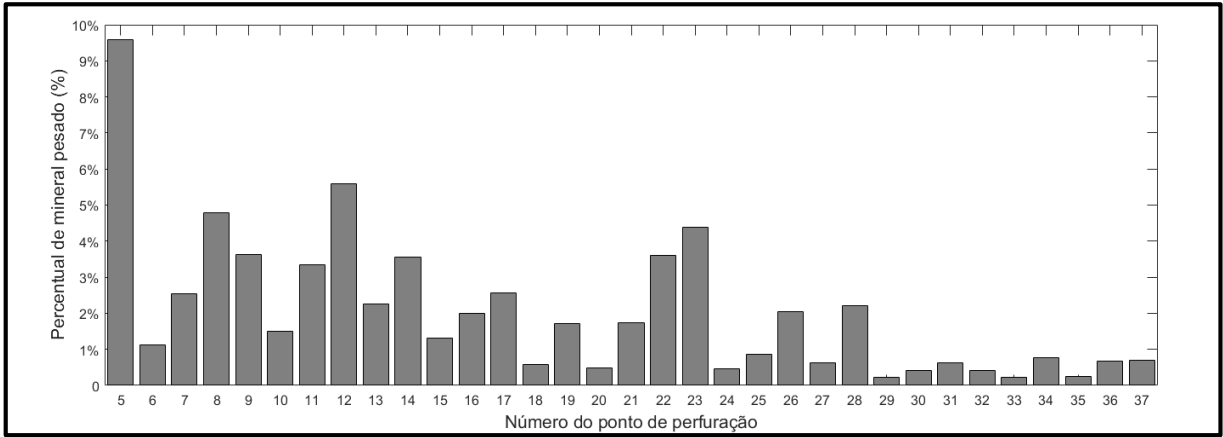


Figura 36: Percentual de minerais pesados em 50cm na análise geoquímica

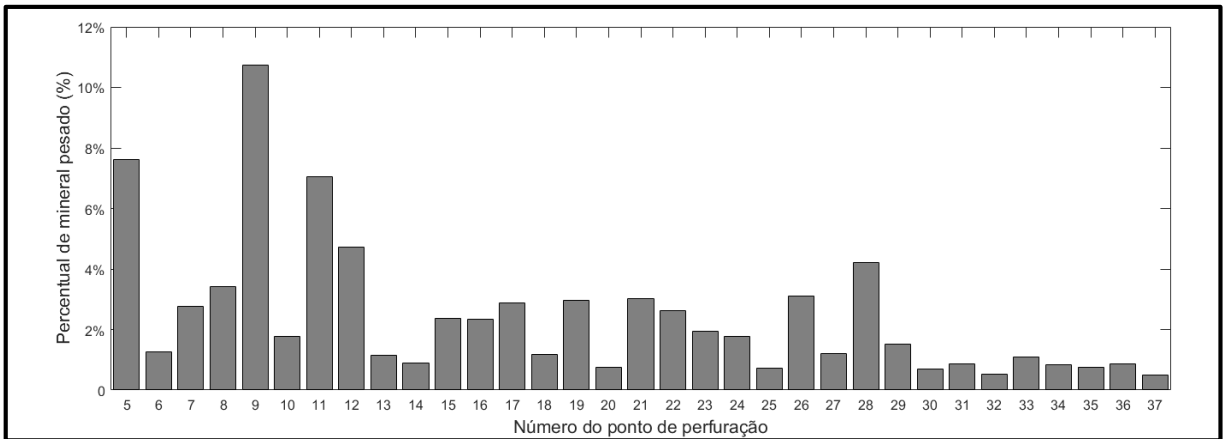


Figura 37: Percentual de minerais pesados em 60cm na análise geoquímica

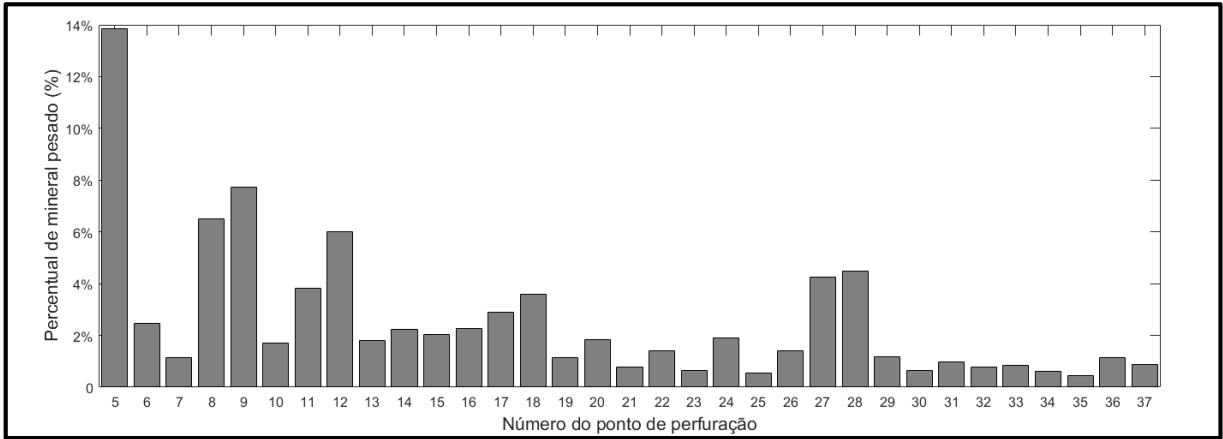


Figura 38: Percentual de minerais pesados em 70cm na análise geoquímica

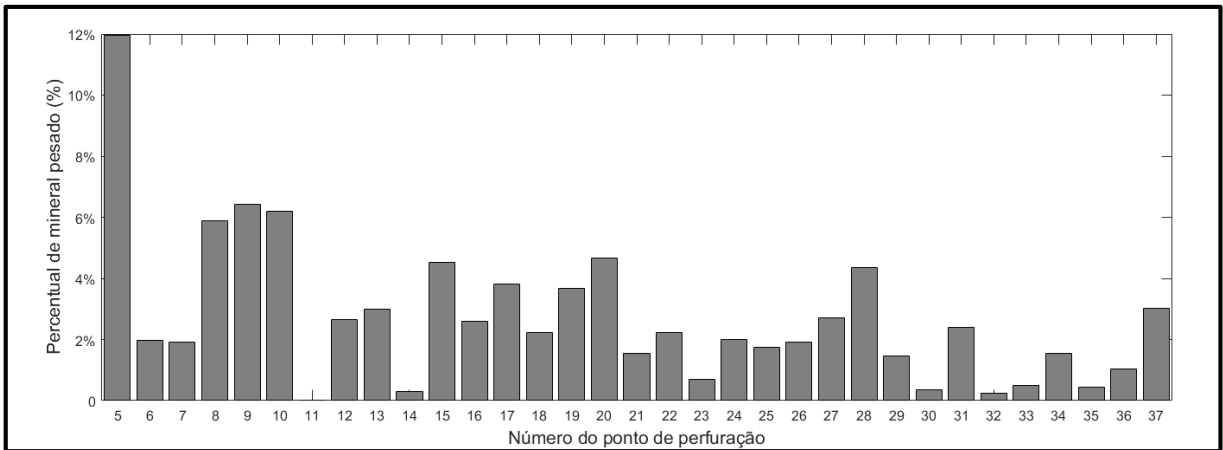


Figura 39: Percentual de minerais pesados em 80cm na análise geoquímica

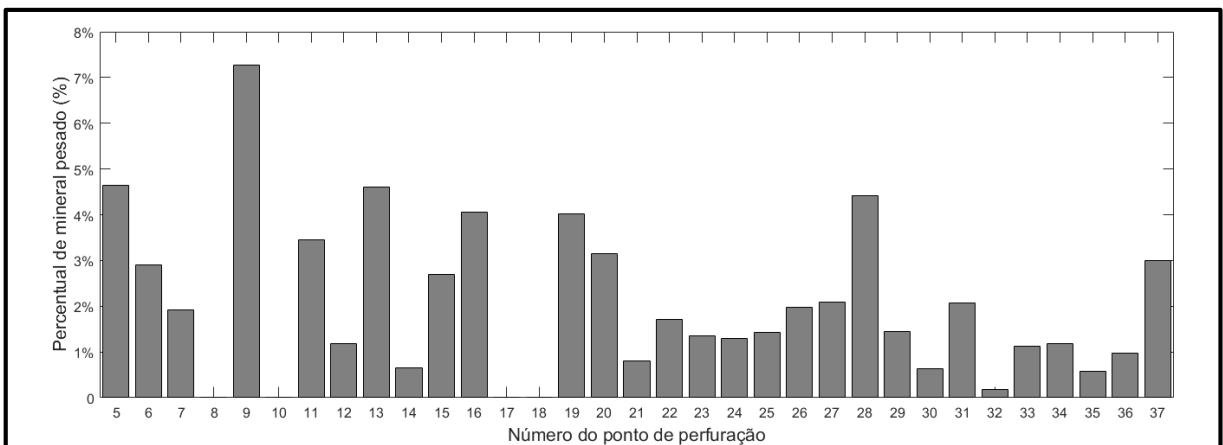


Figura 40: Percentual de minerais pesados em 90cm na análise geoquímica

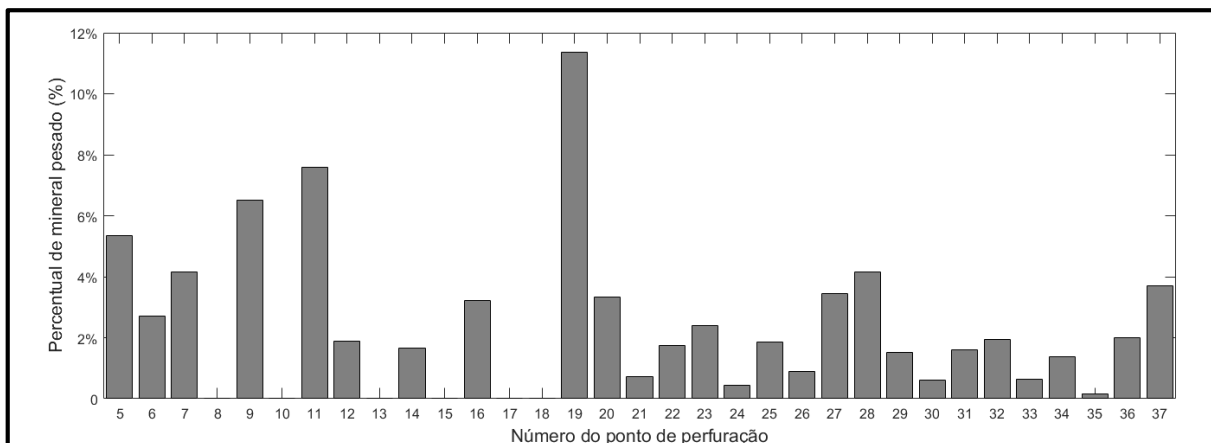


Figura 41: Percentual de minerais pesados em 100cm na análise geoquímica

Depois de determinado cada ponto de coleta com a quantidade de minerais pesados, utilizou-se os dados para demonstrar na tabela 1 com o resumo dos valores percentuais dos minerais pesados via análise geoquímica.

Tabela 1: Resumo dos valores percentuais de concentração de minerais pesados obtidos via análise geoquímica

Profundidade	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
10cm	6,505%	0,254%	1,882%	1,572%
20cm	6,203%	0,335%	1,978%	1,448%
30cm	8,564%	0,001%	2,121%	2,084%
40cm	6,656%	0,154%	1,701%	1,386%
50cm	9,584%	0,221%	2,023%	1,991%
60cm	10,727%	0,505%	2,427%	2,280%
70cm	13,853%	0,455%	2,543%	2,731%
80cm	11,957%	0,000%	2,728%	2,395%
90cm	7,267%	0,000%	2,024%	1,702%
100cm	11,367%	0,000%	2,333%	2,517%

Através da determinação geoquímica dos minerais de interesse, realizada para cada ponto de coleta, descrito pelos gráficos de percentual de minerais pesados (Figuras 32 a 41), resumidas na Tabela 1. Foram encontrados os maiores valores de concentração percentual para as cotas mais profundas, explicado pelo fato da maior densidade relativa destes minerais em relação aos demais constituintes do solo local.

6.4.2. Análise por Espectroscopia

As análises dos pontos de coleta através da espectroscopia demonstrou uma diferença nas concentrações de minerais pesados nos perfis ao longo da área de estudo. Os pontos marcados na imagem da Figura 42 demonstram o aumento das concentrações de na direção sudoeste- nordeste, sendo que o ponto P09 tem a maior concentração e o ponto P29 a menor.

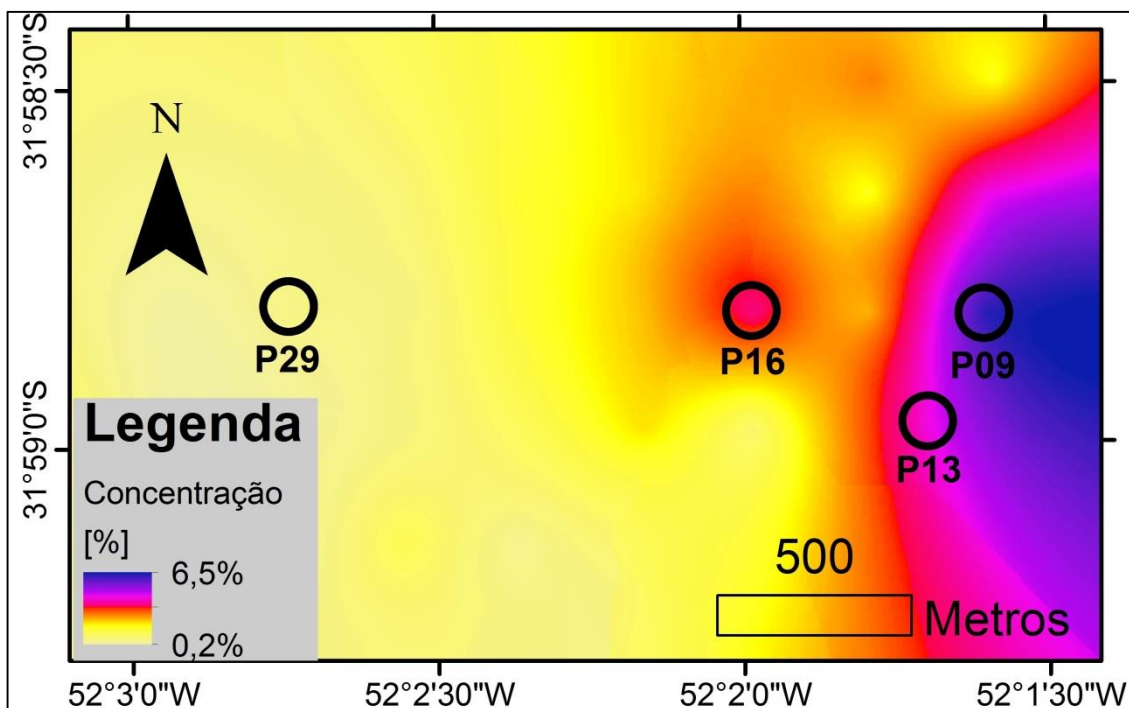


Figura 42: Pontos exemplo usados para a reconstrução dos espectros a partir das assinaturas espectrais de referência.

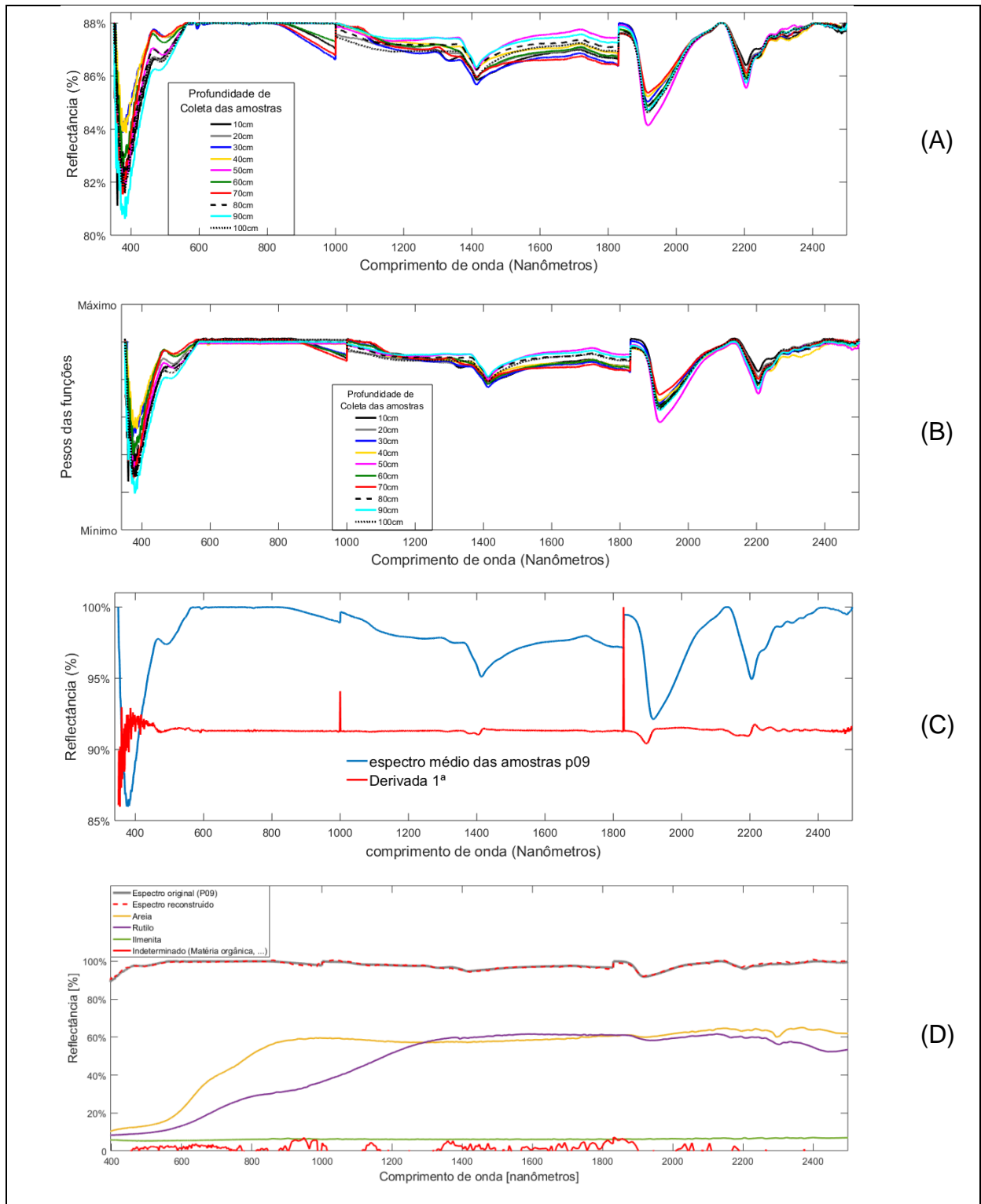


Figura 43: Passos de decomposição dos espectros adotado no trabalho. Exemplo para o ponto P09: (A) Espectros originais, (B) funções-base extraídas, (C) Derivada primeira e, (D) Espectro reconstruído a partir das assinaturas espectrais da Ilmenita, Rutílio e Areia para 10 cm de profundidade.

As bandas de condução dos óxidos de ferro e de titânio que se estendem através do espectro. O agente provocador das absorções em **1393** e **1668 nm** é a transferência de cargas $Fe^{2+} \Rightarrow O$; $Ti^{4+} \Rightarrow O$ e $Fe^{2+} \Rightarrow Ti^{4+}$ e às transições intra-iônicas Fe^{2+} .

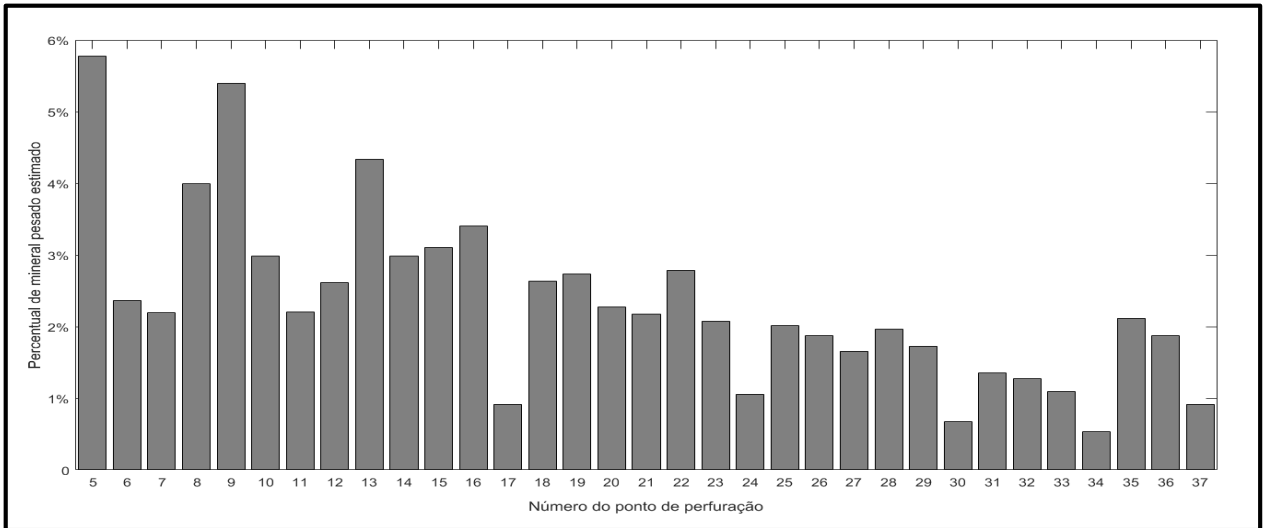


Figura 44: Percentual de minerais pesados em 10cm por espectroscopia

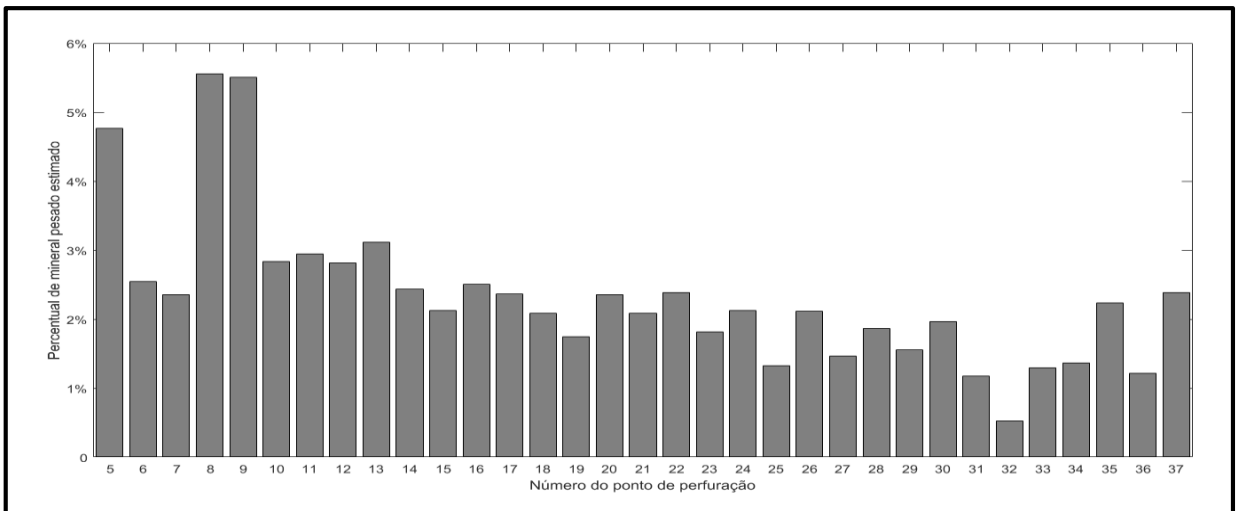


Figura 45: Percentual de minerais pesados em 20cm por espectroscopia

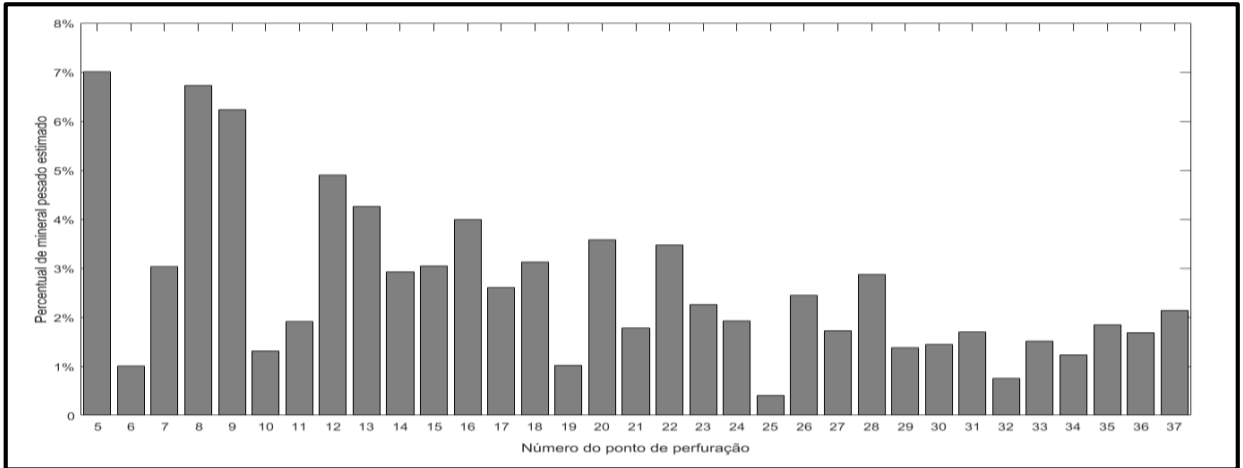


Figura 46: Percentual de minerais pesados em 30cm por espectroscopia

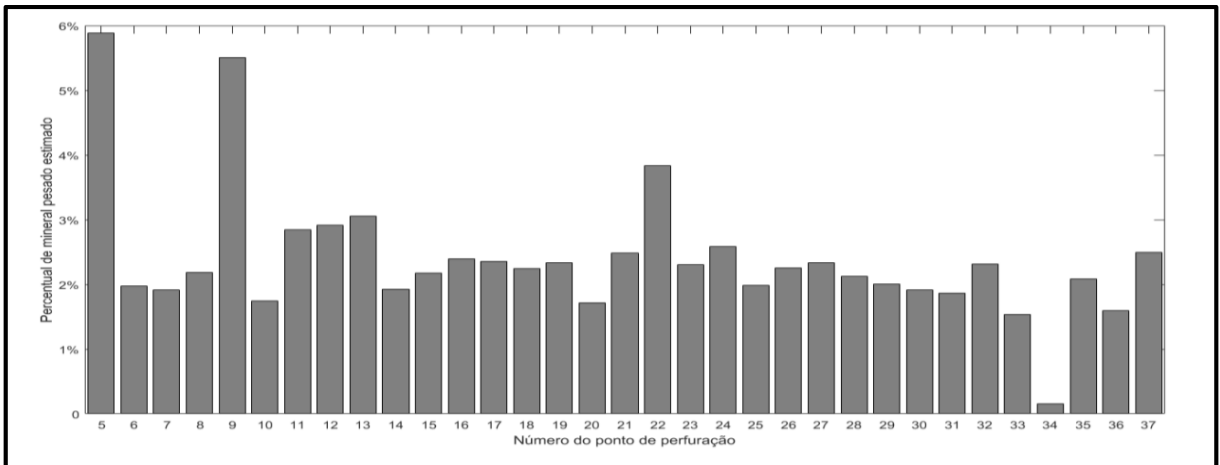


Figura 47: Percentual de minerais pesados em 40cm por espectroscopia

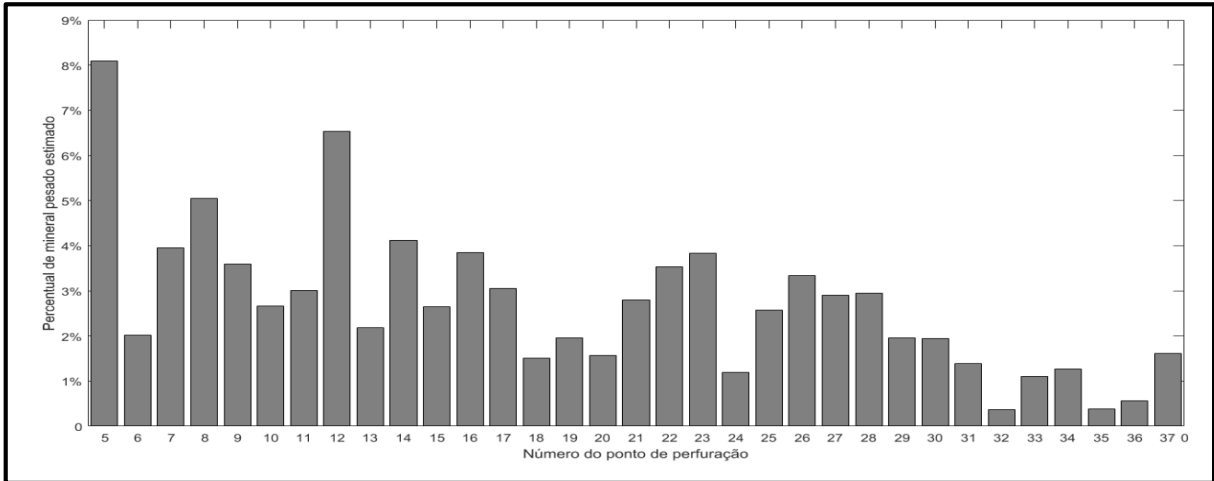


Figura 48: Percentual de minerais pesados em 50cm por espectroscopia

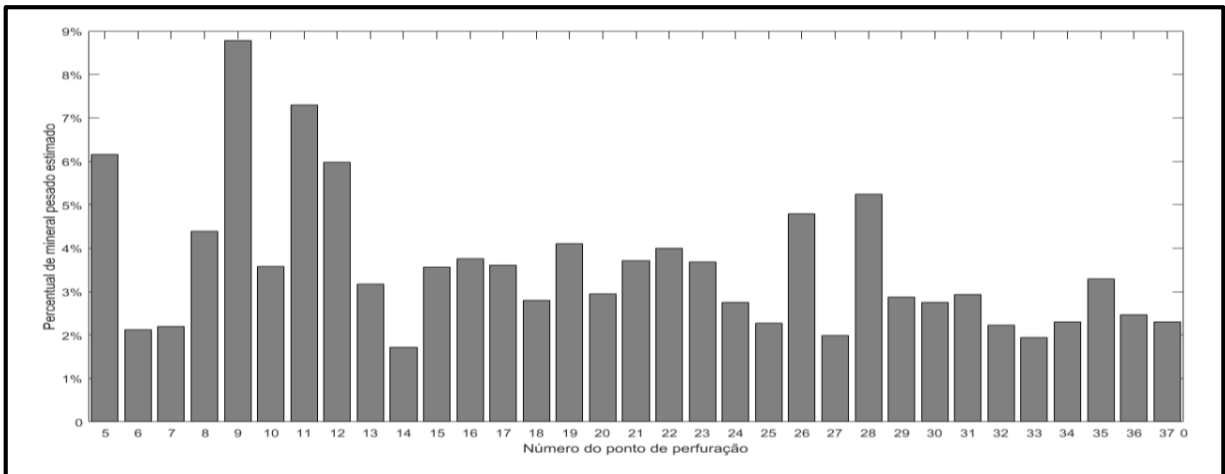


Figura 49: Percentual de minerais pesados em 60cm por espectroscopia

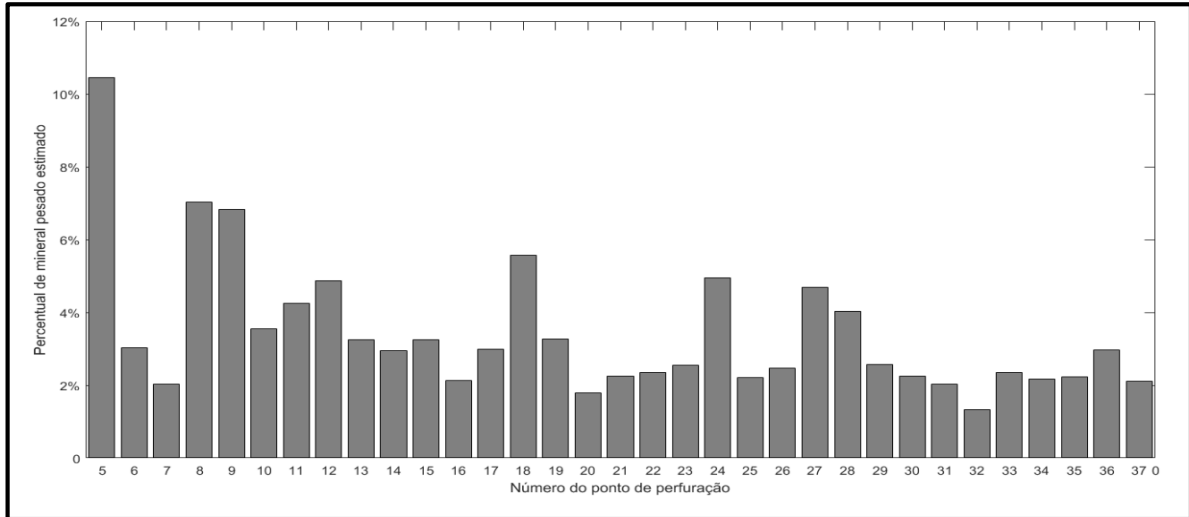


Figura 50: Percentual de minerais pesados em 70cm por espectroscopia

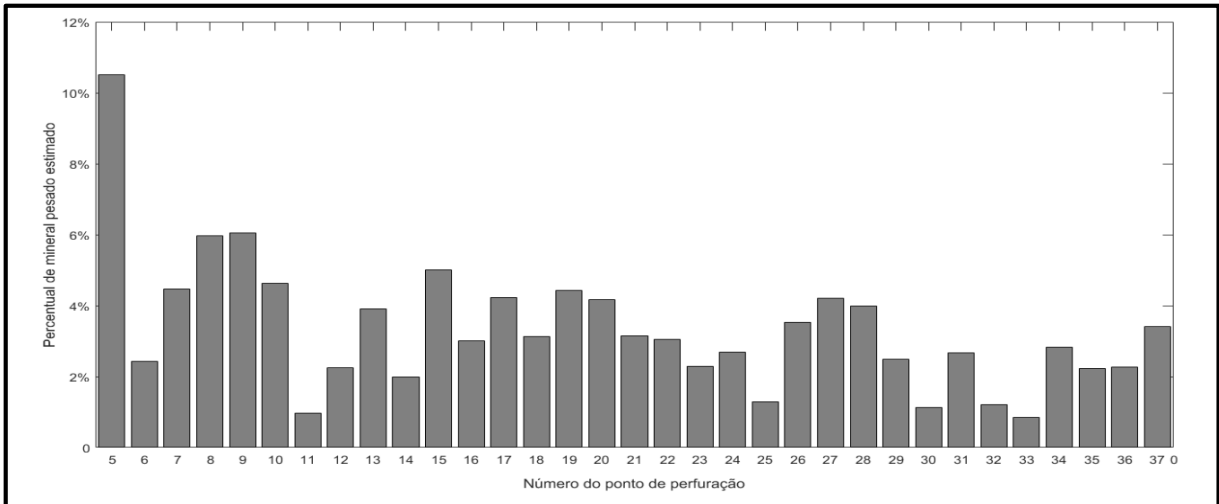


Figura 51: Percentual de minerais pesados em 80cm por espectroscopia

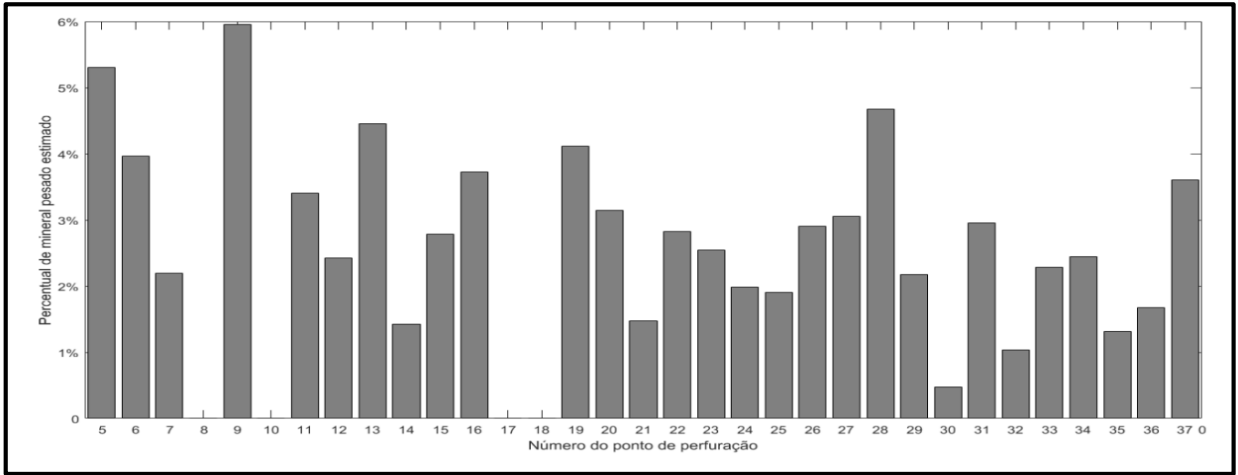


Figura 52: Percentual de minerais pesados em 90cm por espectroscopia

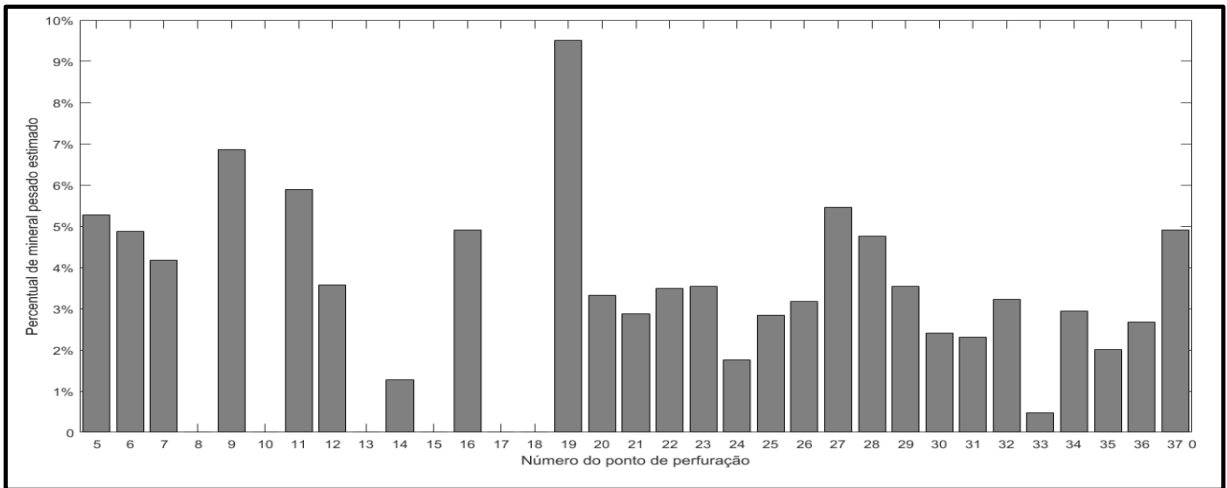


Figura 53: Percentual de minerais pesados em 100cm por espectroscopia

Tabela 2: Resumo dos valores percentuais de concentração de minerais pesados obtidos via espectroscopia

Profundidade	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
10cm	5,77%	0,53%	2,34%	1,22%
20cm	5,56%	0,52%	2,33%	1,11%
30cm	7,01%	0,40%	2,65%	1,66%
40cm	5,89%	0,15%	2,40%	1,03%
50cm	8,10%	0,36%	2,71%	1,66%
60cm	8,78%	1,72%	3,57%	1,61%
70cm	10,45%	1,33%	3,42%	1,88%
80cm	10,51%	0,85%	3,35%	1,86%
90cm	5,95%	0,00%	2,49%	1,52%
100cm	9,50%	0,00%	3,09%	2,24%

Após a determinação de cada ponto de coleta com a quantidade de minerais de interesse, utilizou-se os dados representados pelos gráficos de percentual de minerais pesados (Figuras 43 a 53), resumidas na Tabela 2, trazendo os valores percentuais dos mesmos via análise por espectroscopia. Foram encontrados os maiores valores de concentração percentual para as cotas mais profundas, explicado pelo fato da maior densidade relativa destes minerais em relação aos demais constituintes do solo local.

6.5. Modelo digital de elevação gerado com aerolevanteamento por Drone

A partir do aerolevanteamento por DRONE com sensor óptico na faixa do visível foram coletadas aproximadamente 532 imagens com recobrimento lateral e longitudinal. Dessas imagens, via aerotriangulação através do algoritmo *SFM*, o mais indicado para esse tipo de levantamento (TOMÁS *et al*, 2016) foi produzido um modelo digital de elevação do tipo Modelo Digital de Superfície (DSM), Figura 54.

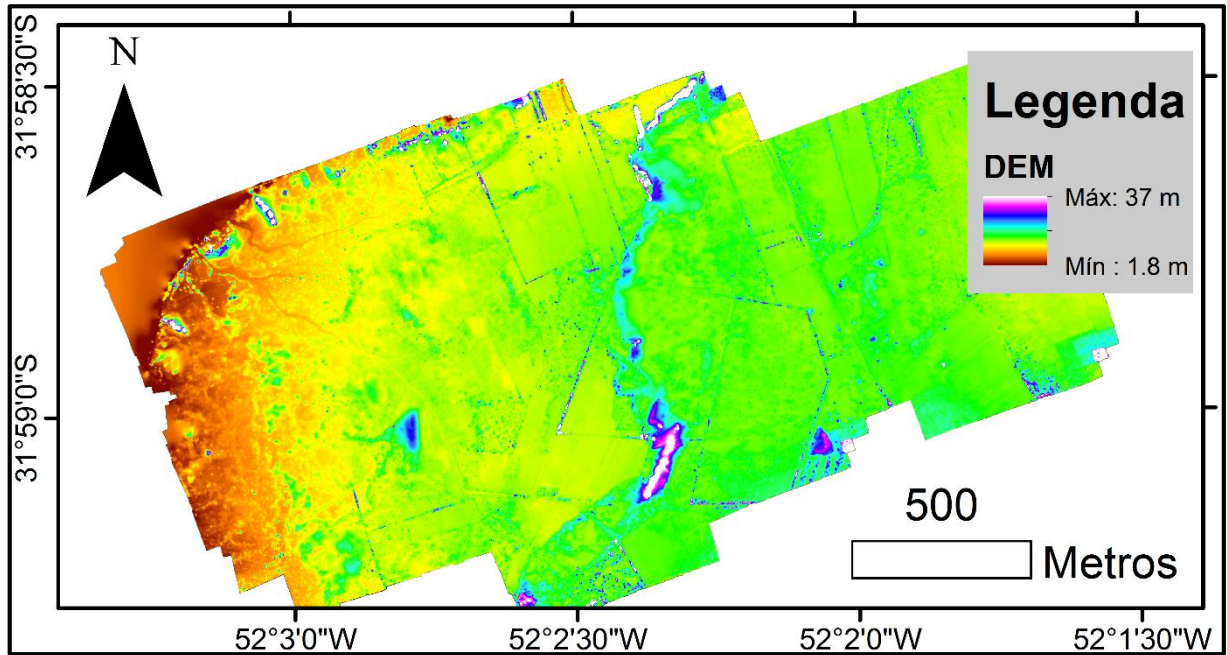


Figura 54: Modelo digital de superfície produzido pelo aerolevanteamento por DRONE

Esse modelo, de forma bruta, traz os valores de elevação de superfície, posteriormente utilizados para extração dos valores de elevação do Terreno, convertendo os valores de DSM em DTM (TOMÁS *et al.*, 2016). Com uso dos dados de ondulação geoidal local obtidos via MAPGEO (IBGE, 2018), os valores de elevação do terreno foram convertidos em valores de altura ortométrica, permitindo a correta referência vertical para os dados de sondagem rasa de solo realizada.

6.6. Mapeamento 3D da distribuição dos minerais de titânio

Para o mapeamento em três dimensões da distribuição espacial dos minerais de interesse, se utilizou o software ArcScene® do sistema ArcGis®. Para tal, a cada valor de concentração mineral estimado, seja por análise geoquímica ou por espectroscopia, foi atribuído uma cota de profundidade relativa ao terreno (Fig 25). Desses pontos de concentração mineral, devidamente cotados, se aplicou o interpolador espacial IDW (LONGLEY *et al.*, 2013), gerando camadas de distribuição mineral. Essas camadas sobrepostas, ao serem empilhadas, originaram um cubo de dados em três dimensões, tanto para a análise por geoquímica (Figuras 55 e 56) quanto para a análise por espectroscopia (Figuras 57e 58).

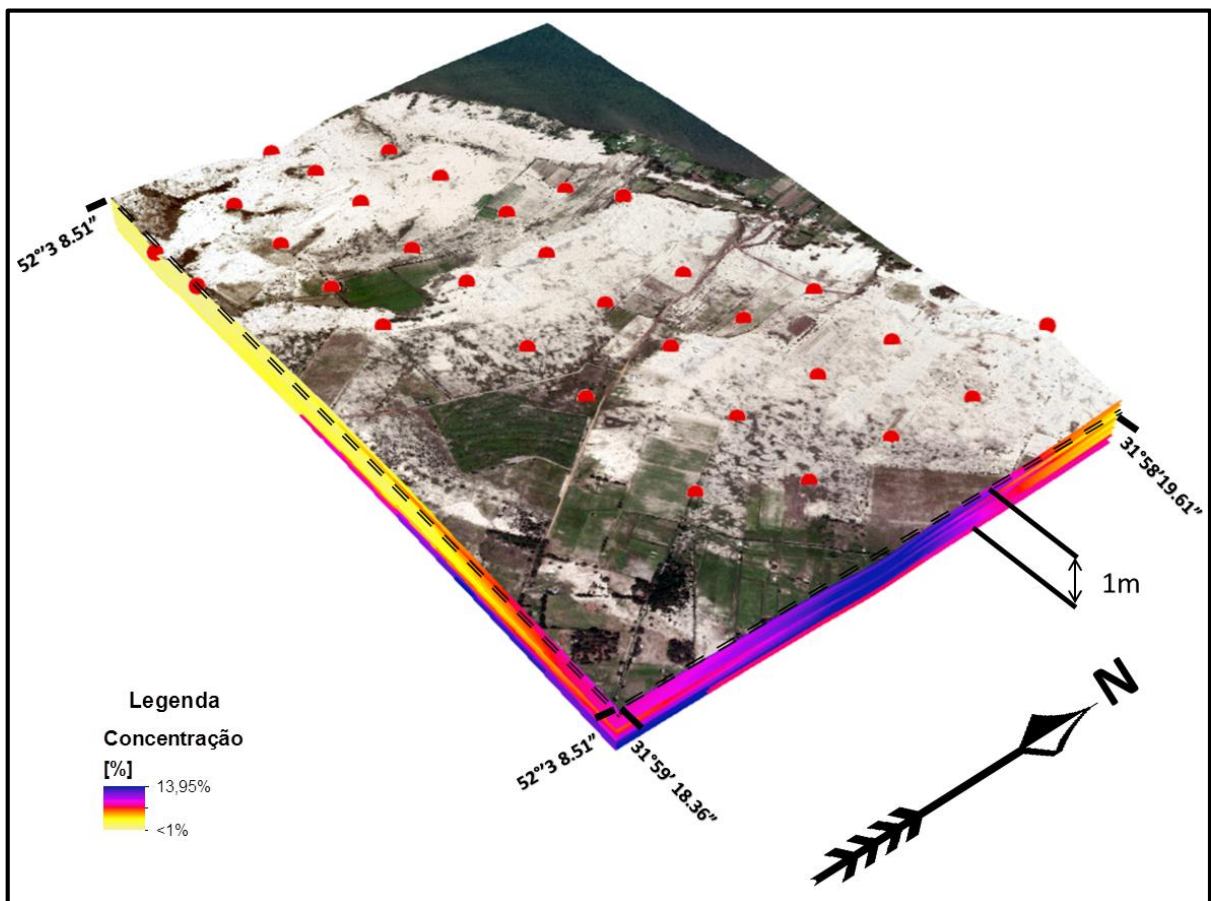


Figura 55: Imagem da representação 3D do mapeamento mineral para os dados de análise geoquímica

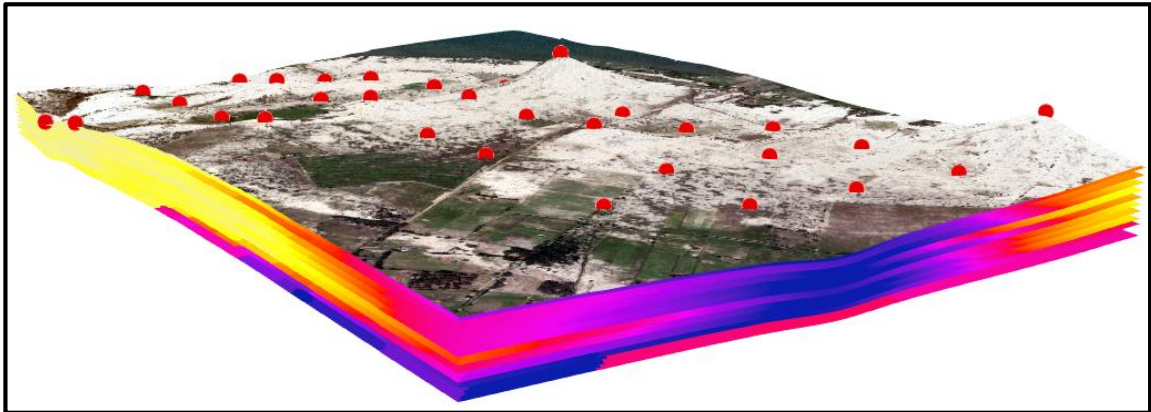


Figura 56: Visada 3D do mapeamento mineral para os dados de análise gequímica

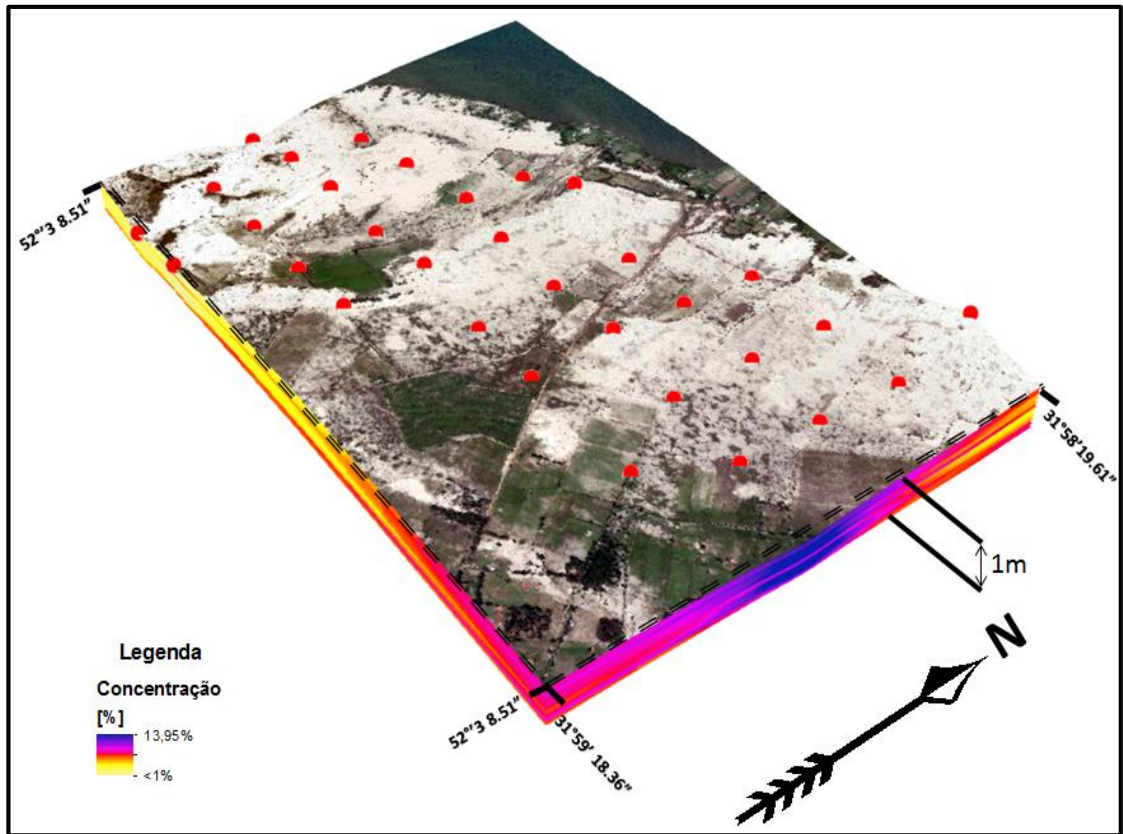


Figura 57: Imagem da representação 3D do mapeamento mineral para os dados de análise por espectroscopia

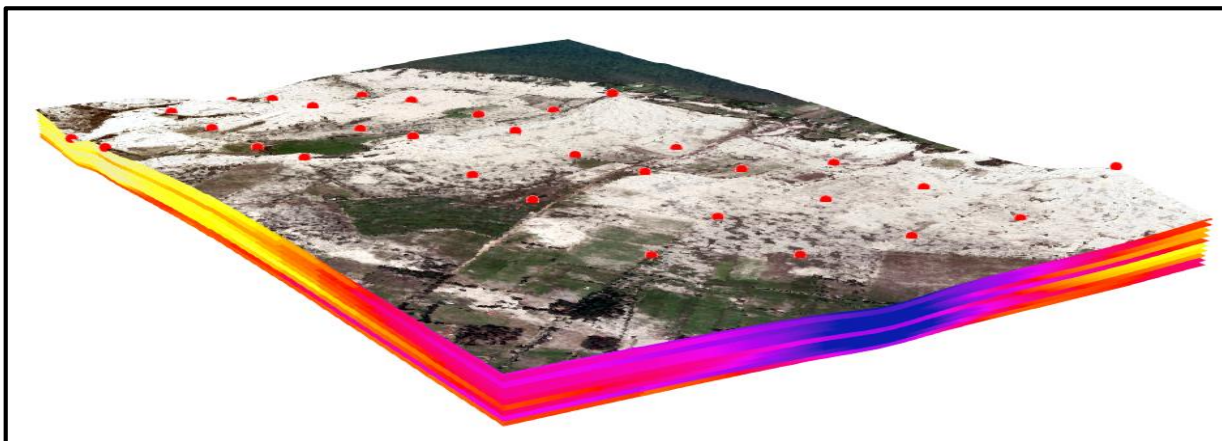


Figura 58: Visada da representação 3D do mapeamento mineral para os dados de análise por espectroscopia

Esses mapeamentos *3D* permitem que se obtenha um levantamento da distribuição volumétrica dos minerais ao longo das camadas de solo local. A profundidade do levantamento, aqui limitada a 1 metro (Figuras 55 e 57), pode ser estendida para profundidades maiores desde que se realizem sondagens mais profundas. Ao longo das representações 3D se observou uma maior concentração mineral para as camadas mais profundas, algo que justifica devido a maior densidade desse material frente aos demais componentes do solo local.

Outra observação extraída dos modelos 3D compostos para as concentrações minerais foi a relação desses com a latitude local, estando esses mais concentrados na porção Nordeste da área de estudo. Para tal constatação, se construíram 3 perfis longitudinais de solo com orientação Nordeste-Sudeste (Fig. 59).

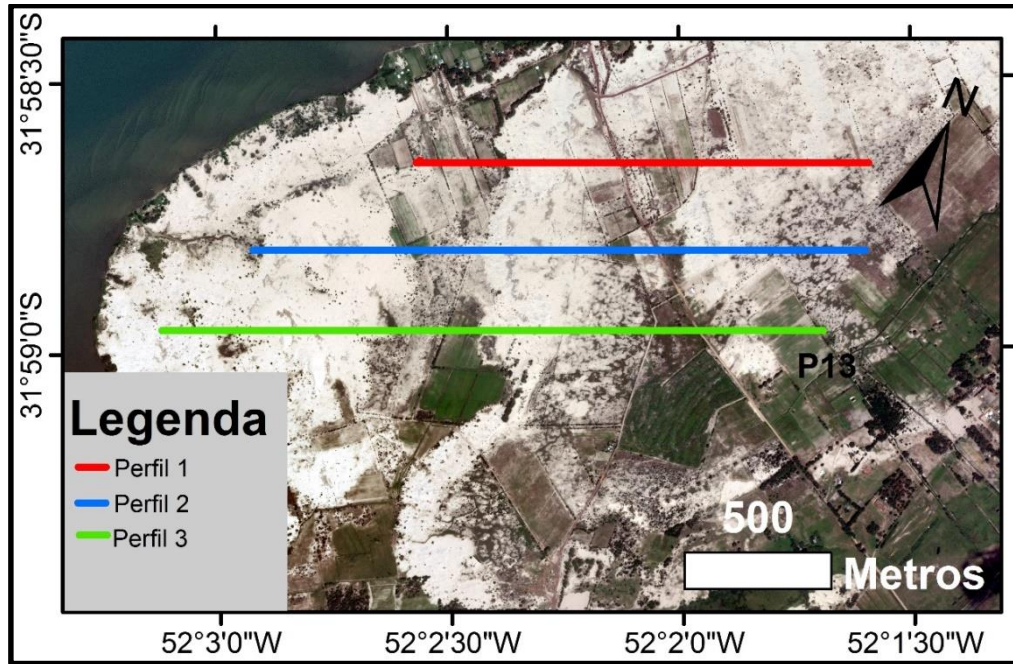


Figura 59: Perfis longitudinais para comparação das variações de concentração mineral ao longo da média vertical dos pontos de coleta

Sobre esses perfis, foram extraídos os valores correspondentes às concentrações minerais médias para todas as camadas de solo estimadas tanto por análise geoquímica quanto para análise por espectroscopia, gerando um gráfico de variação da concentração mineral para cada um dos perfis (Figura 60).

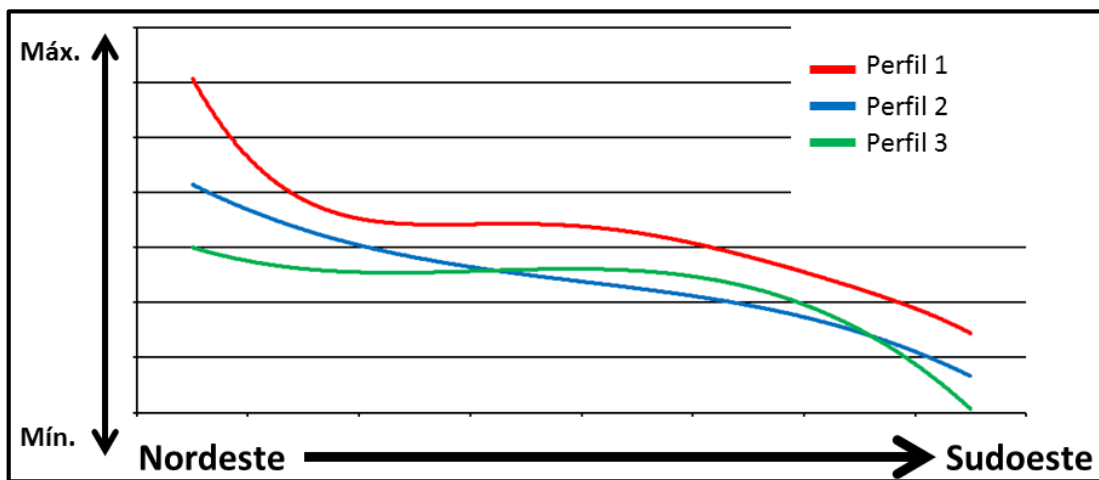


Figura 60: Variação das concentrações ao longo dos perfis expostos na Figura 59.

Em análise ao gráfico e a imagem de posicionamento dos perfis, se observa uma tendência de orientação na concentração mineral de Nordeste para Sudeste, seguindo a direção dos ventos locais. Isso se dá, principalmente, pelo transporte eólico e a separação por densidade desses minerais em relação aos demais constituintes do solo local (CALLIARI et. al, 2005). Também se percebe uma redução das concentrações em afastamento a linha d'água da Lagoa dos Patos. Isso está relacionado a um aumento das cotas do terreno, uma vez que as maiores concentrações estão posicionadas, segundo os dados, em cotas mais profundas.

6.7. Mapeamento da distribuição espacial dos minerais de titânio usando uma imagem hiperespectral HYPERION

Os resultados obtidos da análise espectral permitiram a identificação da presença de minerais de óxido de titânio ao longo da área de estudo a partir de técnicas de comparação de espectros. Uma análise comparativa entre os espectros reamostrados para a resolução espectral do HYPERION após a seleção de bandas por análise por componentes principais (PCA) mostra que a coincidência entre os espectros associados a cada pixel das imagens e os espectros de laboratório possuem alta correlação para áreas descritas como áreas de alta densidade de titânio ($R^2 = 91,36\%$).

Os dados de espectroscopia de reflectância em conjunto com a espacialização das concentrações minerais propostas por Corrêa *et al.* (2006) e Dilembur *et al.* (2004) constituíram arquivos de verdade de campo utilizados posteriormente para validar os resultados obtidos com a classificação espectral. A comparação entre o mapeamento de titânio (Fig. 62 - D) obtido pela técnica DCDP e a descrição da presença e concentração mineral para o titânio descritas por Corrêa *et al.* (2006) e Dillenburg *et al.* (2004), exibiu forte correlação, com um índice de acurácia *kappa* (*k*) de 96% e um coeficiente de determinação estatística R^2 de

aproximadamente 87% (Fig. 61).

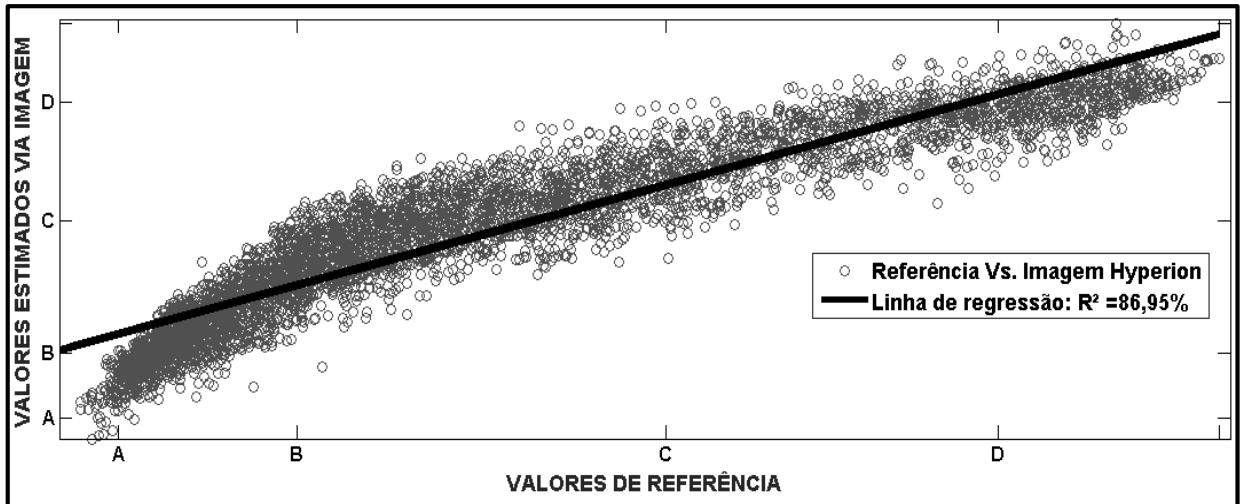


Figura 61: Gráfico de regressão linear entre os valores estimados via imagem e aqueles descritos na literatura, onde (A) indica concentração não detectável dos minerais de interesse, (B) baixa concentração, (C) média concentração e (D) alta concentração.

O mapeamento mineral de minerais pesados, em especial os óxidos de titânio com dados *HYPERION* mostram-se satisfatórios com relação à identificação geral das concentrações observadas em campo, ficando exposta a limitação da prospecção em áreas vegetadas e/ou cobertas por água (áreas não classificadas).

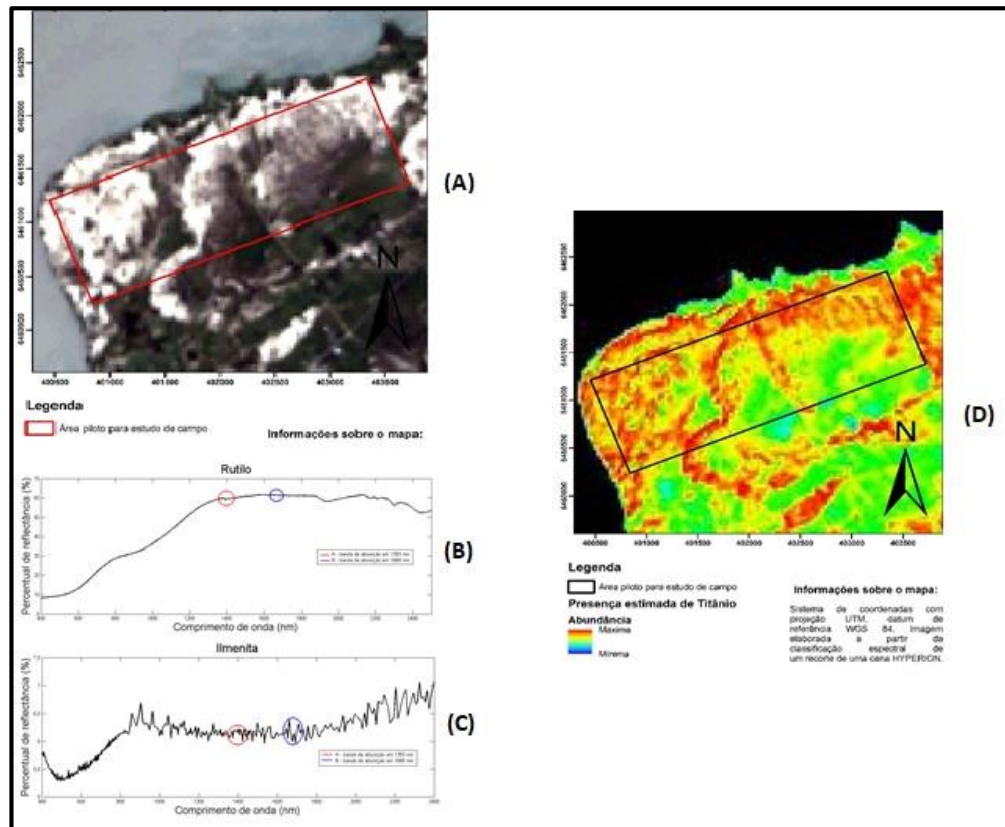


Figura 62: (A) Imagem HYPERION com composição colorida (cor verdadeira) – R/G/B-B31/B21/B11; (B - C) Espectros dos minerais de titânio obtidos via biblioteca espectral da USGS; e, (D) Imagem HYPERION classificada do mapeamento de titânio – apenas com as áreas de titânio acima do background.

As zonas de maior coincidência entre o vetor referência e o vetor de cada pixel representam-se como áreas de maior coincidência estatística, exibindo maior valores para o índice R^2 . A exemplo, zonas com coincidência entre as inflexões das derivadas do vetor de referência e o vetor de um pixel acima de 90% determina este pixel como um elemento com 90% ou mais de probabilidade de pertencer a classe correspondente a o vetor de referência.

A Ilmenita é um mineral tipicamente opaco, praticamente sem eventos ou feições espectrais no visível, no infravermelho próximo e no infravermelho médio, causados por bandas de condução dos óxidos de ferro e de titânio que se estendem através do espectro. A opacidade deste mineral é atribuída por *Strens e Wood* (1979) pelas transferências de carga entre íons (Fe^{2+} , Fe^{3+} , O^{2-} e Ti^{4+}).

O agente provocador das absorções em 1393 e 1668 nm é a transferência de cargas $Fe^{2+} \Rightarrow O$; $Ti^{+4} \Rightarrow O$ e $Fe^{2+} \Rightarrow Ti^{+4}$ e às transições intra-iônicas Fe^{2+} . Por conta dessa característica, as feições espectrais desses minerais foram evidenciadas pelas bandas espectrais do sensor *HYPERION* nº 125 e compreendidas entre o nº 151 e 153, o que tornou possível diferenciar a presença desses minerais entre a cobertura analisada.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a finalização deste trabalho pode-se evidenciar a importância do sensoriamento remoto no que diz respeito a prospecção mineral em áreas de grande extensão, constituindo uma ferramenta dinâmica e de baixo custo para primeira investigação a cerca de um certo interesse geológico. A relação direta entre a análise espectral e a análise geoquímica de amostras de solo na determinação de seus constituintes minerais constituiu uma forte evidência da aplicabilidade da espectroscopia frente as técnicas tradicionais de análise mineral, visto que os resultados de inferência mostraram-se muito próximos em termos de quantificação dos mesmos.

7.1. Conclusões

As metodologias de sensoriamento remoto empregadas neste estudo, através de técnicas de espectroscopia, permitiram quantificar a composição mineral em uma sondagem mineralógica de campo da área de estudo, com um número significativo de amostras de solo (>300) num perfil de 1m de profundidade. Isso permitiu a reconstituição em três dimensões da distribuição mineralógica ao longo do perfil do solo. A metodologia proposta pode ser estendida para toda uma coluna de interesse, bastando estender a profundidade dos perfis escavados. Com isso, é possível estimar o volume mineral disponível, bem como melhor entender os padrões de deposição. A decomposição das assinaturas espectrais das amostras de solo em assinaturas espectrais de seus constituintes minerais, determinou seu percentual em cada ponto de coleta com um valor muito próximo dos valores encontrados nas análises geoquímicas.

A decomposição dos espectros das amostras de interesse com o uso de funções-base, definidas a partir de constituintes de referência, aqui adotados como Ilmenita, Rutílo e Areia (sílica) permitiu estimar a quantidade destes constituintes presentes na amostra de solo analisada, formando uma alternativa a análise geoquímica por fracionamento de densidade (decantação), que embora seja um método robusto, é demasiadamente moroso e envolve altos custos por conta do

reagentes utilizado (Bromofórmio).

Quanto ao emprego das imagens hiperespectrais para a identificação da distribuição espacial de minerais, os resultados encontrados no trabalho apontam o uso concomitante de imagens HYPERION e da técnica DCDP como uma forma robusta de mapeamento mineral em áreas com cobertura exposta, livre de vegetação, apresentando valores expressivos com acertos próximos de 90% para área analisada. Considerando as características dos minerais de interesse deste trabalho, fica evidente a possibilidade da caracterização espectral das mesmas e o posterior emprego dessa caracterização para classificação de imagens orbitais HYPERION como forma de apoio ao trabalho geológico de campo. Resultados diferenciados devem ser esperados quando consideramos a dinâmica da refletância de áreas com cobertura vegetal pronunciada, devido a influência da vegetação e problemas como o sombreamento diferenciado em função da variação do ângulo de incidência solar, como por exemplo, a determinação do grau de pureza dos pixels classificados na imagem, tentando evitar conflitos de classificação como a sobreposição de sombras e os falso-positivos na classificação.

7.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão de seguimento do trabalho, sugere-se a extensão da análise para as amostras já coletadas com a adição da assinatura espectral de referência da matéria orgânica presente no solo local e demais constituintes de interesse, uma vez que isso reduzira as confusões de inferência nas quantificações minerais apresentadas, outra solução seria a incineração(queima) da matéria orgânica, com isso eliminando da análise espectral. Complementarmente, sugere-se também a adição de análises microscópicas por microscopia eletrônica de varredura, permitindo uma análise direta dos minerais presentes, bem como uma melhor categorização dos mesmos.

Outro ponto a ser abordado em uma extensão a esse trabalho é a aplicação

da técnica apresentada para outras cenas HYPERION para a área de interesse, permitindo quantificar o padrão de movimentação e deposição superficial dos minerais analisados, bem como aplicar a técnica para outras áreas onde se tenham dados orbitais dessa natureza a disposição.

Além do estudo de minerais de Titânio, as técnicas abordadas permitem o estudo investigativo de outros materiais como turfas, ferro, entre outros. Isso constitui o potencial de aplicação da metodologia apresentada para outros estudos de interesse que venham a surgir.

O uso de sondagens de solo, associadas a análise por espectroscopia de reflexão como o apresentado nesse trabalho permite que se reconstrua tridimensionalmente uma área de solo de interesse. Assim, é possível a aplicação dessas técnicas como forma de inferência do volume mineral bem como da estratigrafia tridimensional de compostos de interesse para fins de extração e estudo dos padrões deposicionais presentes.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, J.B.; FILICE, A.L.. Spectral reflectance 0.4 to 2.0 microns of silicate rock powders. **Journal of Geophysical Research**, v.72, 1967. p.5705–5715.

ATKINS, P.; JONES L. **Princípios de química**. Porto Alegre: Bookman, 2003. 914 p.

BALTAR, C.A.M. e CUNHA, A. S. F..Aproveitamento de Finos de Ilmenita por Flotação com Succinamato. In.: Anais do **XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**. Florianópolis: MENEZES, C.T.B.; ROCHA, M.R.; LEAL FILHO, L.S.; ESCOBAR, A.T. (Editores), 2004. p.51-58.

CALLIARI, L.J.; PEREIRA, P.S.; OLIVEIRA, A.O.; FIGUEIREDO, S.A.. Variabilidade das dunas frontais no litoral norte e médio do Rio Grande do Sul, Brasil.**Gravel**. v.3, 2005. p. 15-30

CLARK, R. N. **Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy**. In: RENCZ, A.N.. Remote Sensing for the Earth Sciences. New York: ASPRS and John Wiley, 1999. p 3 - 58.

CLARK, R.N.; KING, T.V.V.; KLEJWA, M.; SWAYZE, G.A.; VERGO, N.. High Spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, 1990. p.12653–12680.

CORRÊA, I.C.S.. **Analyse morphostructurale et evolution paleogeographique de la plateforme continentale atlantique sud-bresilienne (Rio Grande do Sul-Brésil)**. Tese de Doutorado. Université de Bordeaux I. Talence-França, 1990. 314p.

CORRÊA, I.C.S.; ZOUAIN, R.N.A.; WESCHENFELDER, J.; TOMAZELLI, L.J.. Heavy minerals from south Brazilian continental shelf to North Argentina: distribution and provenance. In: **Congreso Latinoamericano de Sedimentologia**. San Carlos de Bariloche, Rio Negro-Argentina. *Resúmenes...*, 2006. p.79.

CUDAHY, T.; JONES, M.; THOMAS, M.; LAUKAMP, C.; CACCETTA, M.;

HEWSON, R.; RODGER, A.; VERRALL, M.. **Next generation mineral mapping: Queensland Airborne HyMap and Satellite ASTER surveys 2006–2008**. Perth: Publicly Available Report P2007/364, CSIRO Exploration and Mining, 2008.152 p.

CUDAHY, T.; RAMANAIDOU, E.R.. Measurement of the hematite: goethite ratio using field visible and Near-infrared reflectance spectrometry in channel iron deposits, Western Australia. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 44,1997. p. 411–420.

CURRAN, P.J. **Imaging spectrometry - its present and future role in ENVI@ronmentalresarch**. In: HILL, J.; MEGIER, J.(ed.) **Imaging spectrometry - a tool for ENVI@ronmental observations**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. **Remote Sensing of Environment**, v.39, 1994. p. 153-166.

DILLENBURG, S.R.; TOMAZELLI, L.J.; BARBOZA, E.G.. Barrier evolution and placer formation at Bujuru southern Brazil. **Mar. Geol.**, v.203, 2004. p.43-56.

DNPM. Zircônio - Sumário Mineral. **Departamento Nacional de Produção Mineral**. v. 34, 2014. 152 p.

DRURY, S. A.. **Image interpretation in geology**. 3. ed. Inglaterra: Blackwell Science, 2001. 209 p.

DUCART, D. F. **Alteração hidrotermal do prospecto aurífero Cerro La Mina, Los Menucos, Patagônia, Argentina: geologia, sensoriamento remoto e isótopos estáveis**. Tese de doutorado do programa de pós-graduação em Geociências. Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2006.173 f.

ELLIS, B.A.. Light Metals. Titanium. **Mining Annual Review**, v. 7, 1987. p. 47-48.

ESPINOZA, J.M.A. **Caracterização espectral das rochas constituintes dos rejeitos de garimpo de pedra ametista - região de Ametista do Sul, Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado no programa de Pós-Graduação em sensoriamento remoto, UFRGS, Porto Alegre. 2006.126 f.

FROES, R. H. Titanium - products and application. **Journal of Metals**. March, 1997, p.12-14.

GUPTA P., **Remote Sensing Geology**. New York: Springer-Verlag, 1991

HAALAND, D.; THOMAS, E. Partial least-squares methods for spectral analyses. 1. Relation to other quantitative calibration methods and the extraction of qualitative information. **Anal. Chem.** 1988; V. 60. p.1193–1202.

HAEST, M.; CUDAHY, T.. Quantitative mineralogy from infrared Spectroscopic data. Validation of mineral abundance and composition algorithms at the rock lea channel iron deposit in Western. **Economic Geology**, v.107, 2012. p. 209-228.

HARRADEN, C. L.; MCNULTY, B. A.; GREGORY, M. J.; LANG, J. R.. Shortwave Infrared Spectral Analysis of Hydrothermal Alteration Associated with the Pebble Porphyry Copper-Gold-Molybdenum Deposit, Iliamna, Alaska. **Economic Geology**, v.108, 2013. p.483- 494.

HERRMANN, W.; BLAKE, M.; DOYLE, M.; HUSTON, D.; KAMPRAD, J.; MERRY, N.; PONTUAL, S.. Short wavelength infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with base metal sulfide deposits at Rosebery And Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. **Economic Geology and The Bulletin of the Society of Economic Geologists**, v. 96, 2001, p.939-955.

HUMPHREYS, D. The value of mineral resources. **Resources Policy**, v. 8, 1983. p.117-124.

HUNT, G.R., SALISBURY, J.W., LEHNOFF, C.J.. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and oxyhydroxides. **Modern Geology**, v. 2, 1971. p. 195–205.

HUNT, G.R.; ASHLEY, R.P.. Spectra of altered rocks in the visible and Near-infrared: **Economic Geology**, v. 74, 1979. p. 1613–1629.

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis**, 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2002.

KLEIN A.H.F.; GRIEP G.H.; CALLIARI L.J.; VILLWOCK J.A.. **Ocorrências de Concreções Fosfáticas no Terraço do Rio Grande**. In: Congresso Brasileiro de Geologia. Camboriú, SC. v.37., 1992. p. 202-203.

KRUEGER, C. P; SEEBER, G.; SOARES, C. R. **Aplicações do DGPS Preciso em Tempo Real no Âmbito Marinho**. In: Anais do IXX Congresso Brasileiro de Cartografia. Rio de Janeiro, 1997.

LAUKAMP, C.; TERMIN, K. A.; PEJCIC, B.; HAEST, M.; CUDAHY, T. Vibrational spectroscopy of calcic amphiboles – applications for exploration and mining. **Eur. J. Mineral**, v. 24, 2012. p. 863–878.

LEE, J. D. **Química Inorgânica não tão concisa**. 5ª ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1999. 544p.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3ª.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 540 p.

MILMAN, A. S. **Mathematical Principles of Remote Sensing: Making Inferences From Noisy Data**. Chelsea, MI: Sleeping Bear, 1999.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo – Editora Unesp, 2008.

MOON, C. J. **Introduction to mineral exploration**. 2 ed. Oxford: Blackwell Publishing. 2006. 481p.

MORRIS, R.V.; LAUER, H.V.; LAWSON, C.A.; GIBSON, E.K.; NACE, G.A.; STEWART, C.. Spectral and other physicochemical properties of submicron powders of hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), Magnetite (Fe_3O_4), Goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) and lepidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$): **Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets**, v.90, 1985. p.3126–3144.

MUNARETTO, L. **Vants e drones: a aeronáutica ao alcance de todos**. 2ed. São Paulo: EI, 2017

MUNARO, P.. **Geologia e mineralogia dos depósitos de minerais pesados de Bojurú**. Dissertação de Mestrado da Pós-Graduação em Geociências, UFRGS, Porto Alegre.1994. 90f.

MUSTARD, J. F.; KANNER, L. C.; GENDRIN, A.. Assessing the limits of the Modified Gaussian Model for remote spectroscopic studies of pyroxenes on Mars. **Icarus**. v.187, 2007. p. 442–456

NADLER, B.; COIFMAN, R. R.. Partial least squares, Beer's law and the net analyte signal: statistical modeling and analysis. **J. Chemometrics**. v. 19, 2005. p.45–54

SHIRIVER, D. F.; ATKINS, P. W..**Química Inorgânica**, 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

SILVA, S. M. P.. **Espectroscopia de imageamento e gamaespectrometria aérea e terrestre de pegmatitos e granitos da porção sul da Província Pegmatítica Da Borborema (PPB), nordeste do Brasil**. Tese de doutorado do programa de pós-graduação em Geociências, Universidade Estadual de Campinas,Campinas-SP, 2009. 173f.

SPIEGEL, M.R., **Estatística e Probabilidade**. Rio de Janeiro: Editora McGraw-Hill do Brasil. 780p., 2012.

STRENS, R.G.J.; Wood, B.J.. Diffuse Reflectance spectra and optical properties of some iron and titanium oxides and oxyhydroxides. **Min. Mag.**, v. 43, 1979. p. 347-354.

TOMÁS, R.; MIGUEL CANO, A. R.; ABELLÁN, A.; JORDÁ, L. Estructure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos. **Anais do 10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica** : A Coruña, 2016. 8 p.

TOMAZELLI, L. J. Minerais pesados da plataforma continental do Rio Grande do Sul. **Acta Geológica Leopoldensia**-UNISINOS, São Leopoldo-RS, Brasil, v. 2, 1978. p.103-159.

TOMAZELLI, L.J.; VILLWOCK, J.A..Quaternary geological evolution of Rio Grande do Sul Coastal Plain, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. V.68, 1996. p.373-382.

VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 73-104.

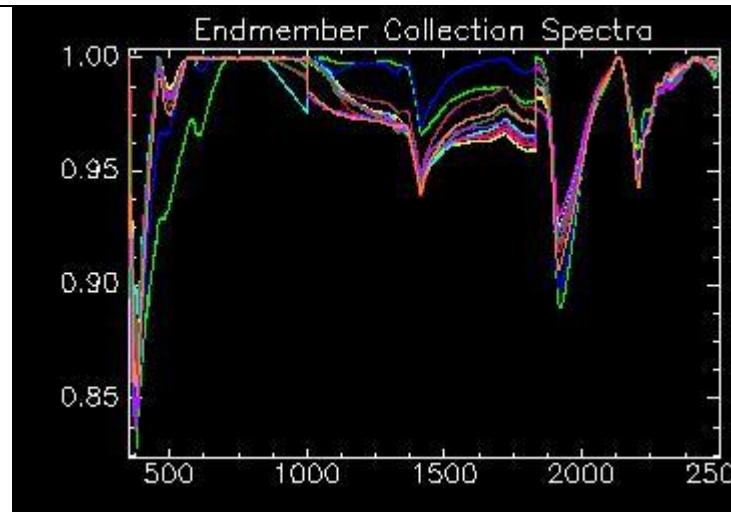
VELHO, J.; GOMES, C. ROMARIZ, C.. **Minerais Industriais**. Universidade de Aveiros, 1998. 591p.

VIDEIRA, B.M.S. **Verificação da Aplicabilidade da Técnica Structure From Motion na Modelação 3D de Componentes Mecânicos**. Dissertação em Engenharia Mecânica. Universidade Nova de Lisboa, 2016. 194 f

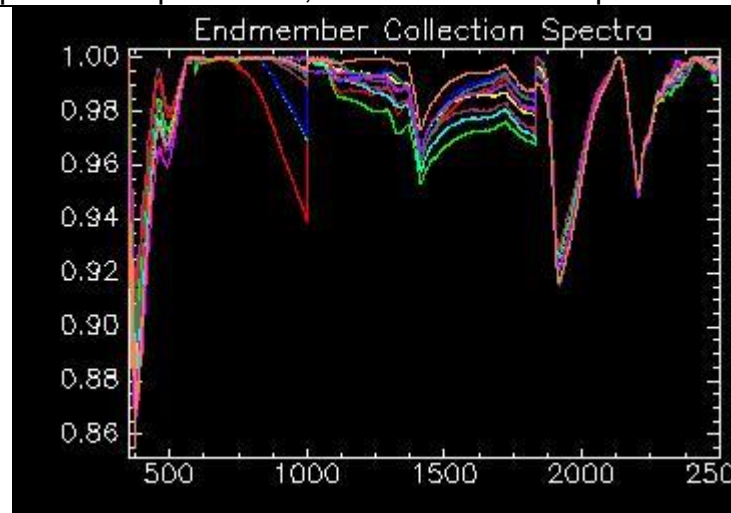
9. Apêndices

9.1. Espectros originais

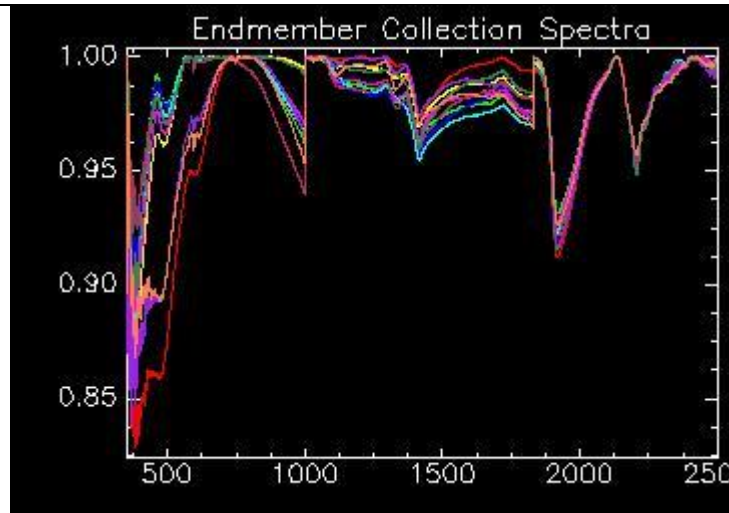
Apêndice 1: Espectros originais



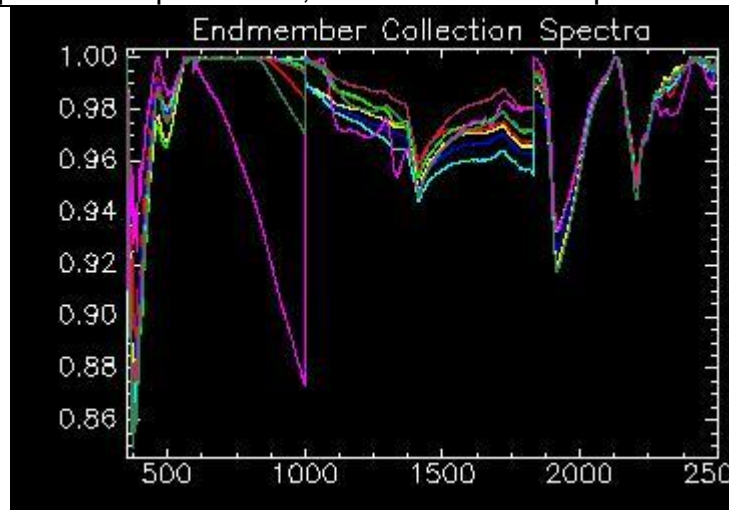
Espectros do ponto P05, de 10 a 100 cm de profundidade



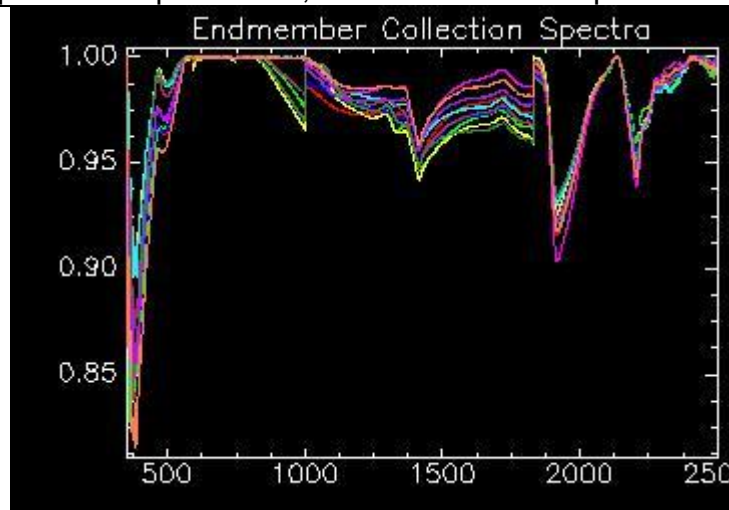
Espectros do ponto P06, de 10 a 100 cm de profundidade



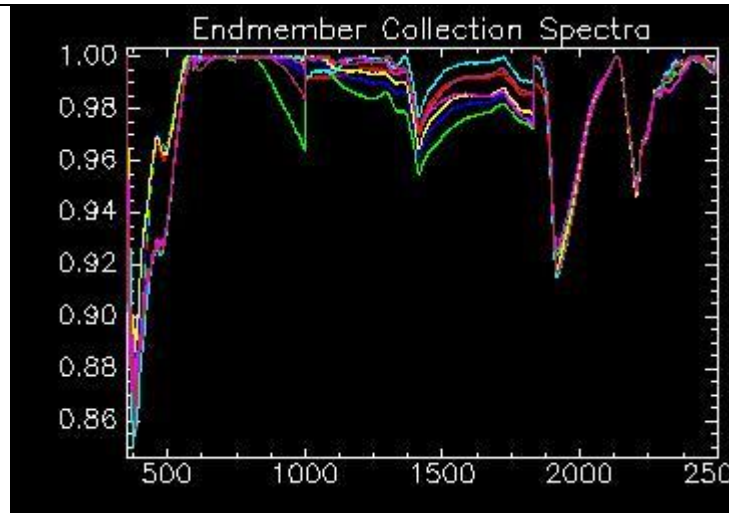
Espectros do ponto P07, de 10 a 100 cm de profundidade



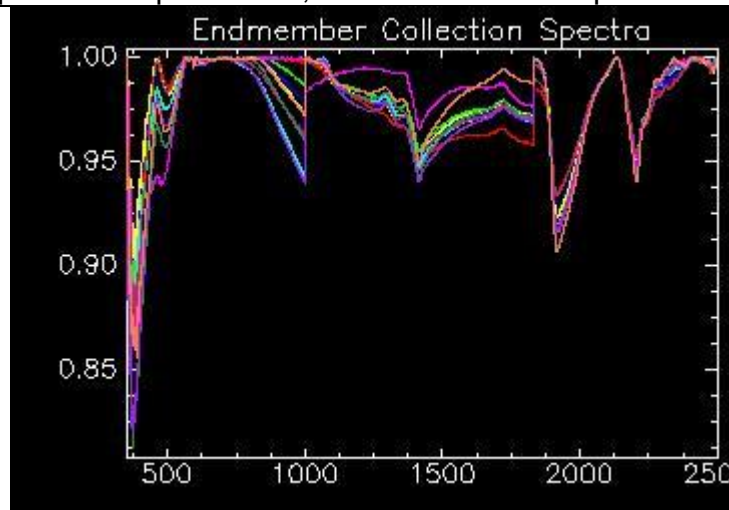
Espectros do ponto P08, de 10 a 100 cm de profundidade



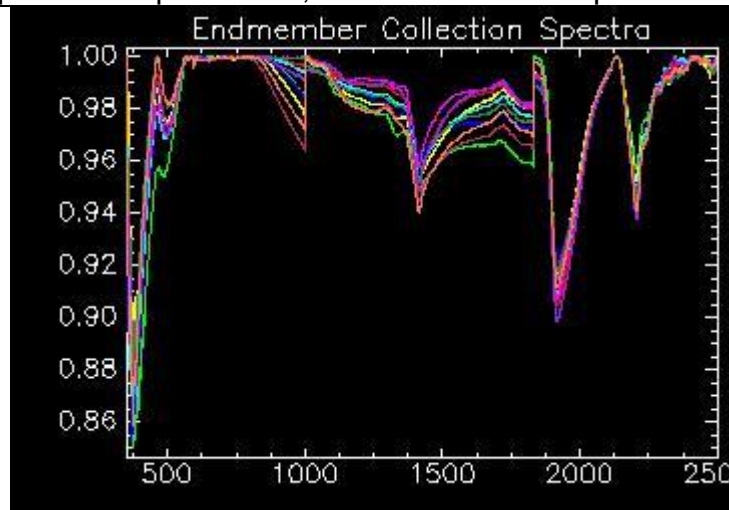
Espectros do ponto P09, de 10 a 100 cm de profundidade



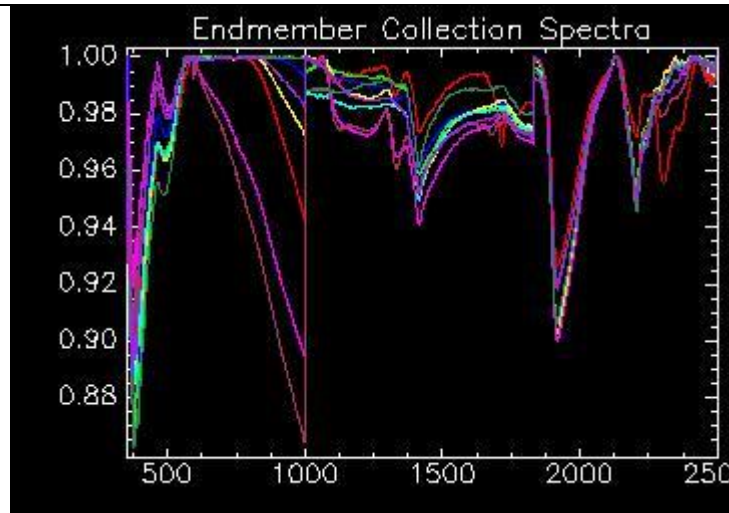
Espectros do ponto P10, de 10 a 100 cm de profundidade



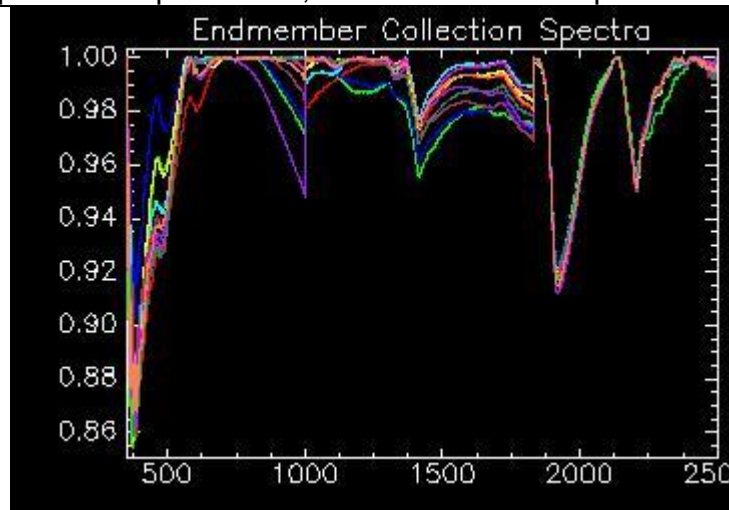
Espectros do ponto P11, de 10 a 100 cm de profundidade



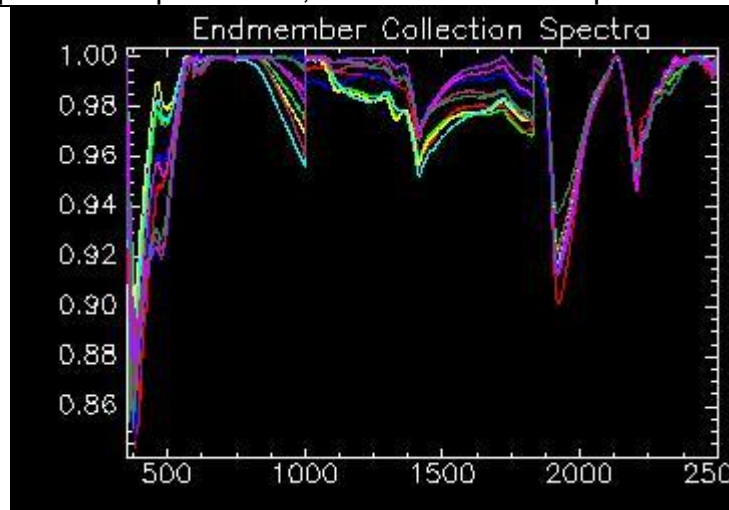
Espectros do ponto P12, de 10 a 100 cm de profundidade



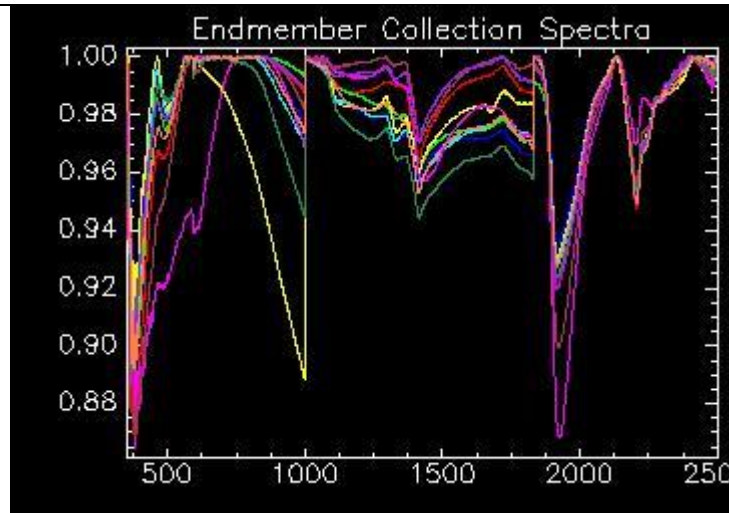
Espectros do ponto P13, de 10 a 100 cm de profundidade



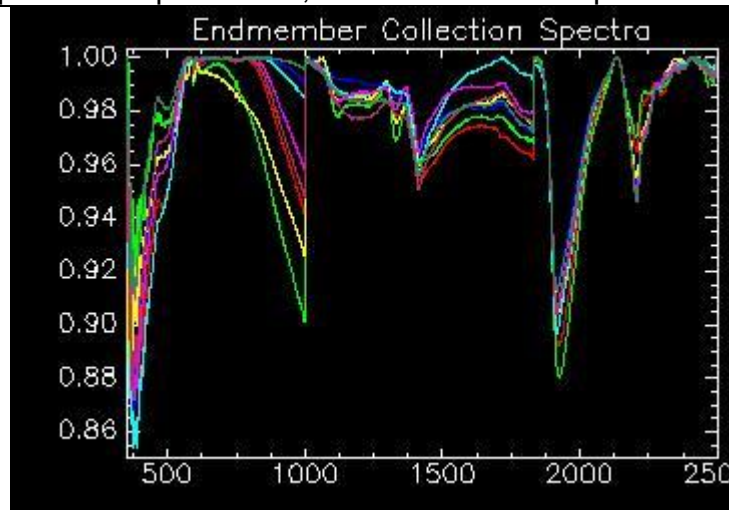
Espectros do ponto P14, de 10 a 100 cm de profundidade



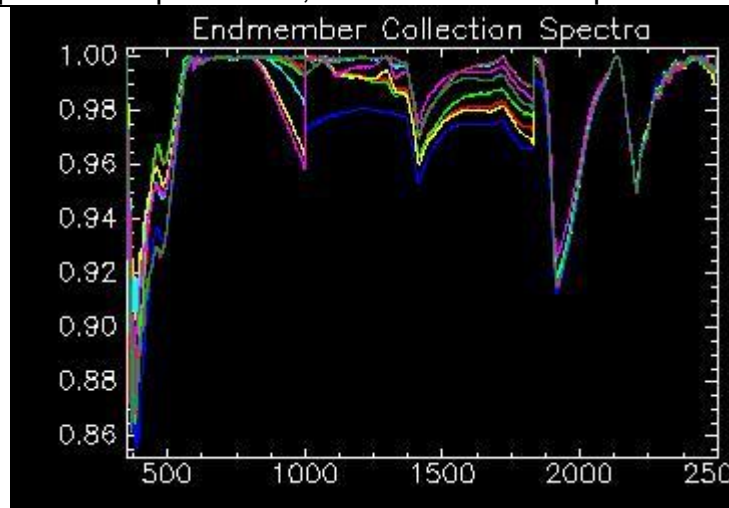
Espectros do ponto P15, de 10 a 100 cm de profundidade



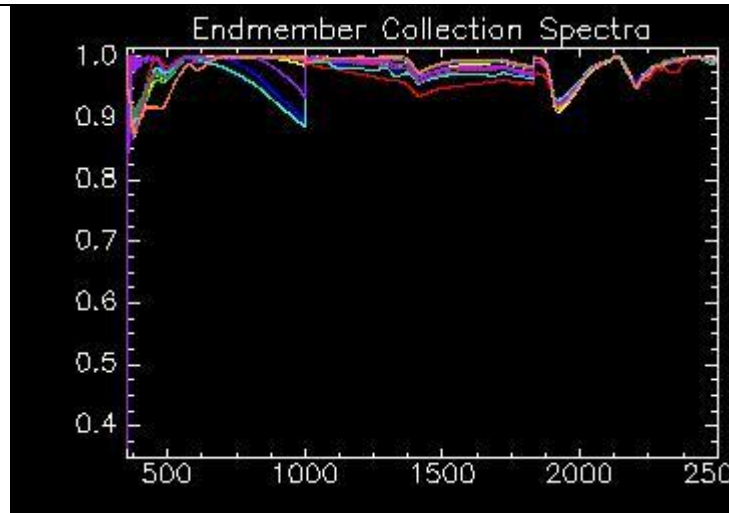
Espectros do ponto P16, de 10 a 100 cm de profundidade



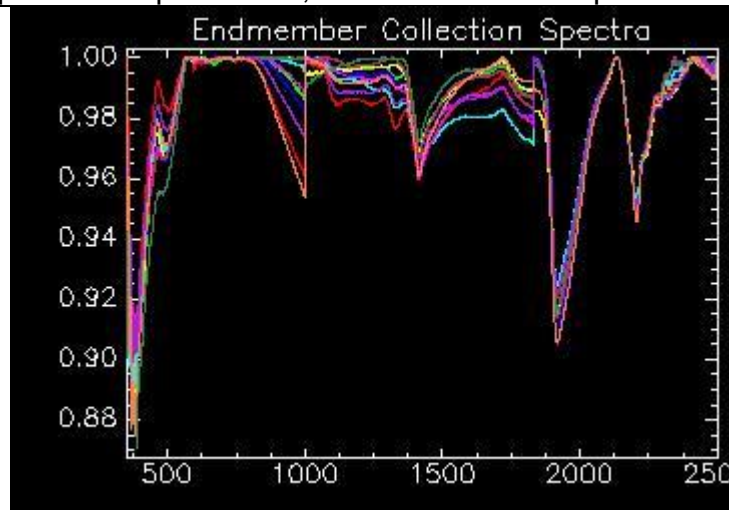
Espectros do ponto P17, de 10 a 100 cm de profundidade



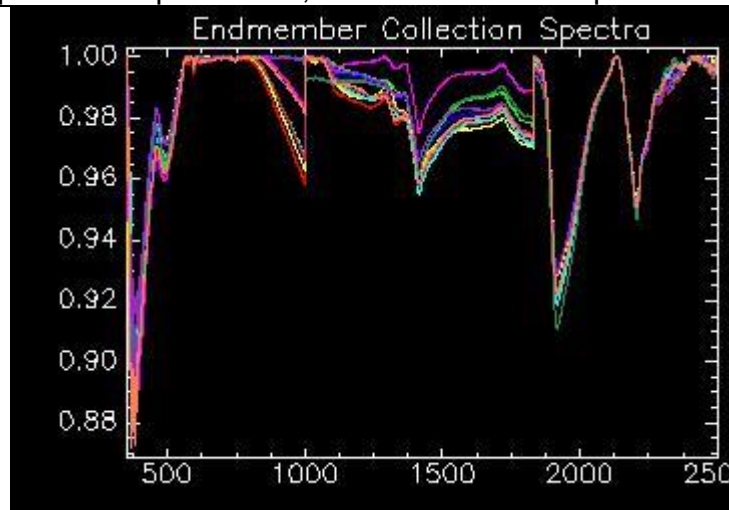
Espectros do ponto P18, de 10 a 100 cm de profundidade



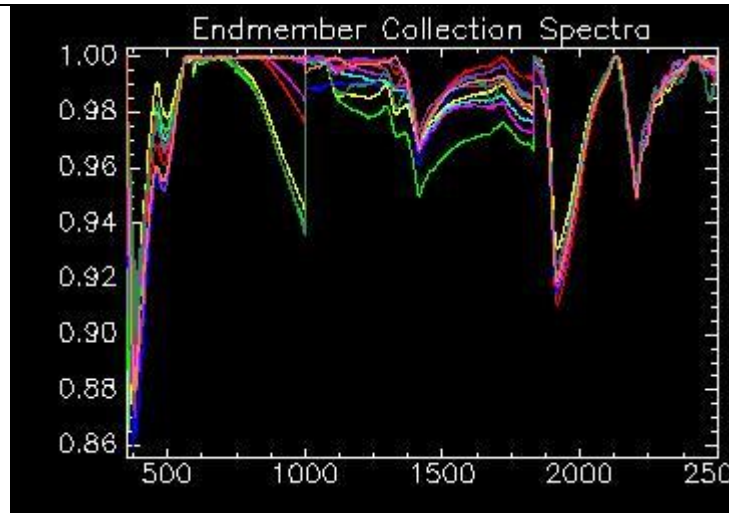
Espectros do ponto P19, de 10 a 100 cm de profundidade



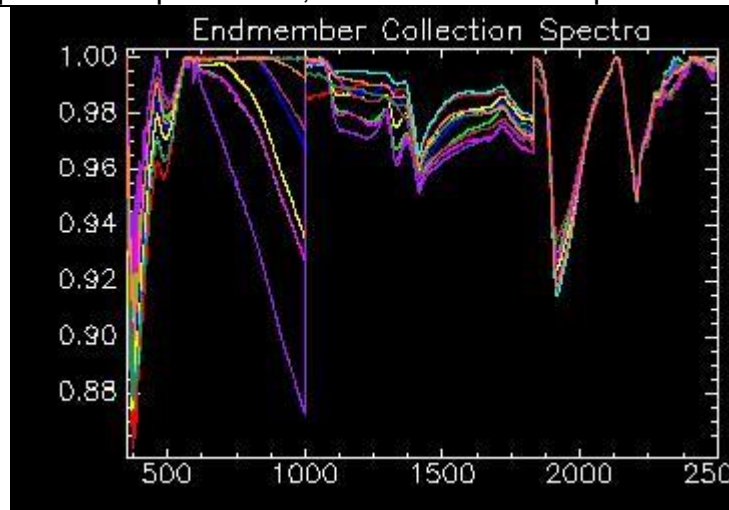
Espectros do ponto P20, de 10 a 100 cm de profundidade



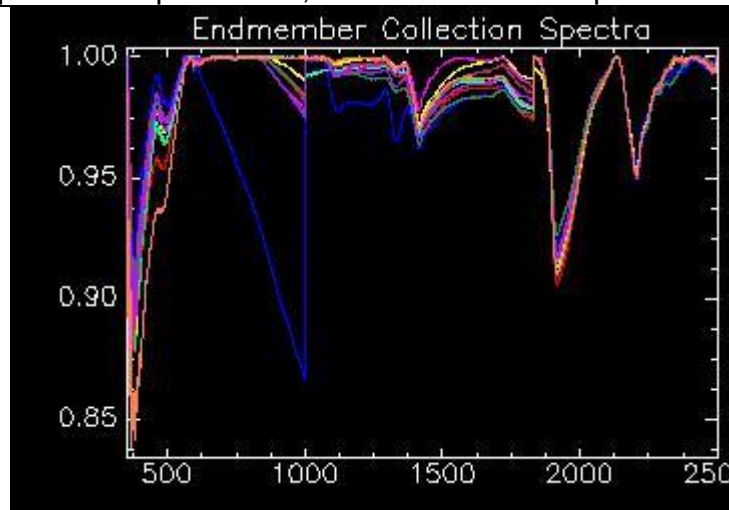
Espectros do ponto P21, de 10 a 100 cm de profundidade



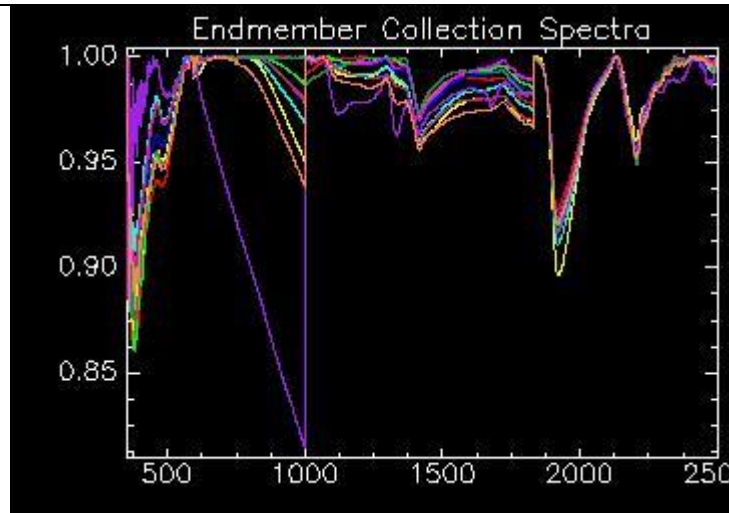
Espectros do ponto P22, de 10 a 100 cm de profundidade



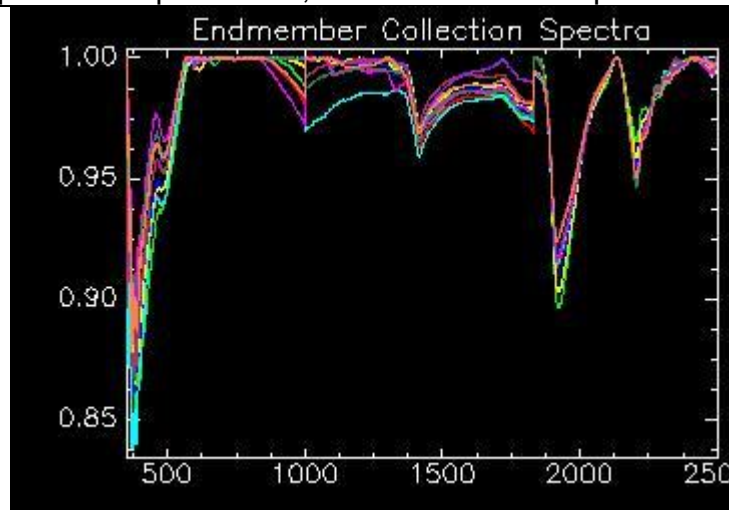
Espectros do ponto P23, de 10 a 100 cm de profundidade



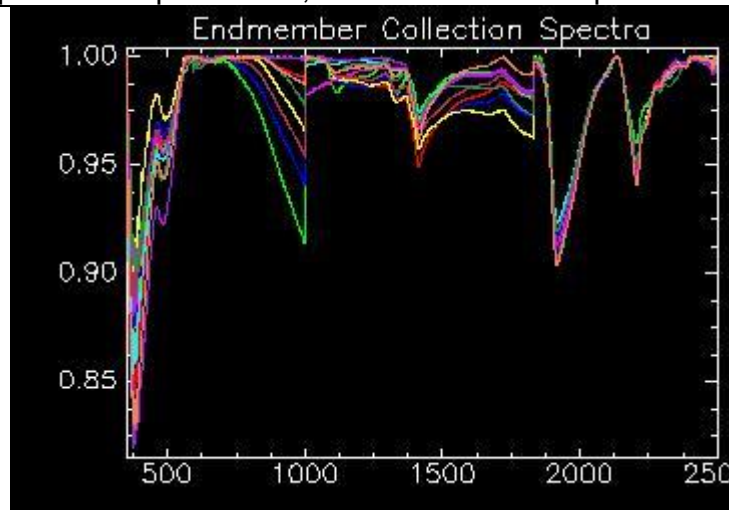
Espectros do ponto P24, de 10 a 100 cm de profundidade



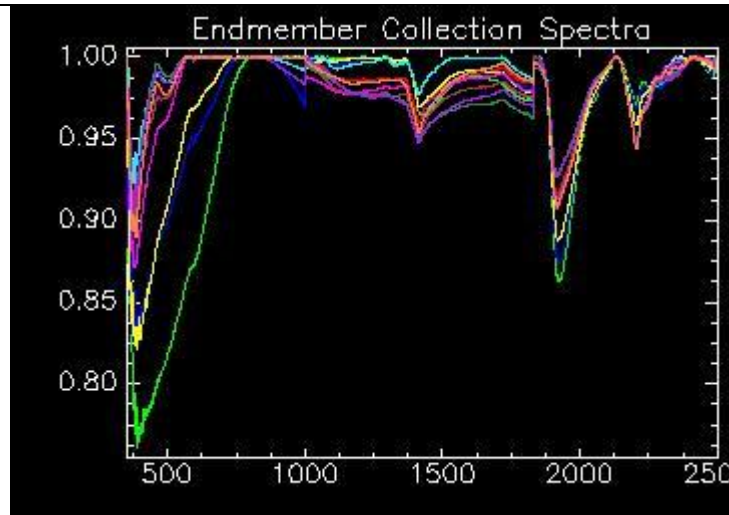
Espectros do ponto P25, de 10 a 100 cm de profundidade



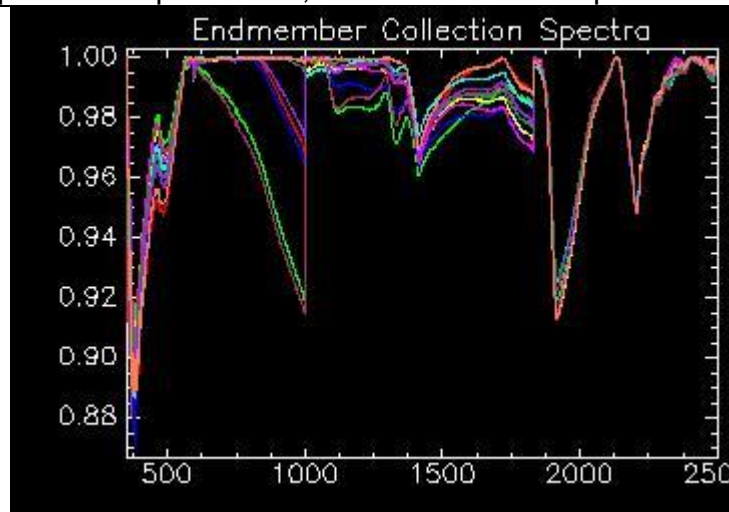
Espectros do ponto P26, de 10 a 100 cm de profundidade



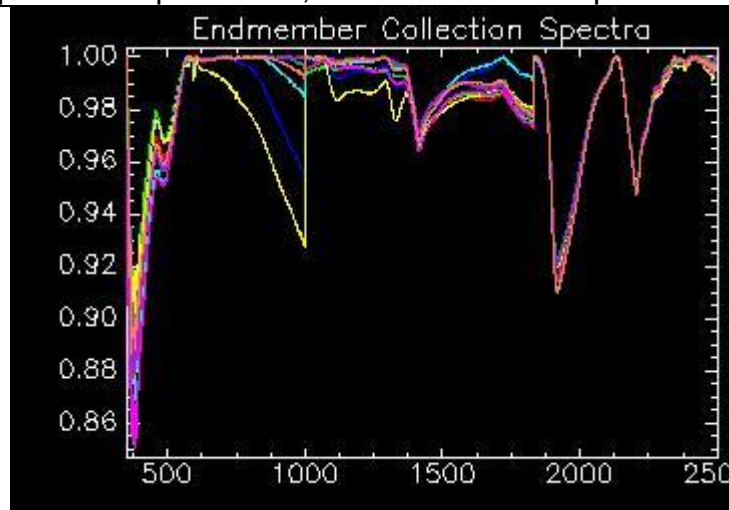
Espectros do ponto P27, de 10 a 100 cm de profundidade



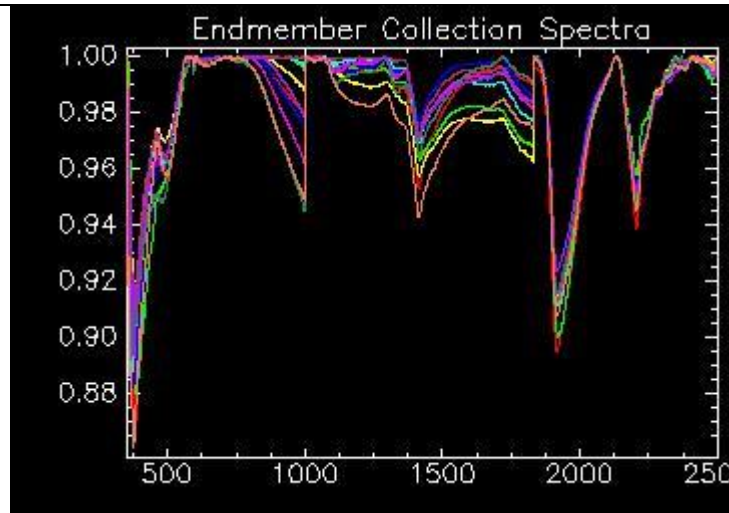
Espectros do ponto P28, de 10 a 100 cm de profundidade



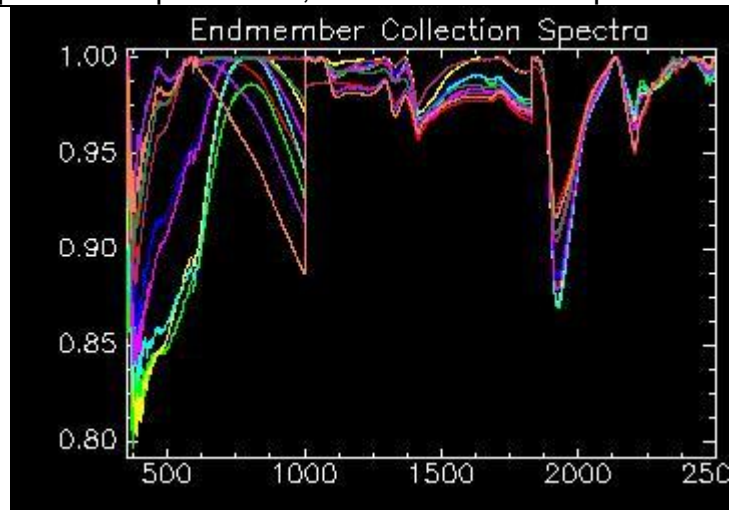
Espectros do ponto P29, de 10 a 100 cm de profundidade



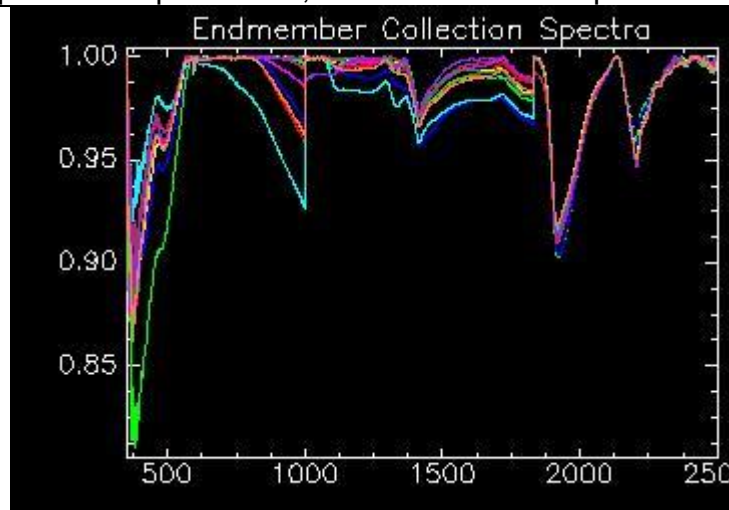
Espectros do ponto P30, de 10 a 100 cm de profundidade



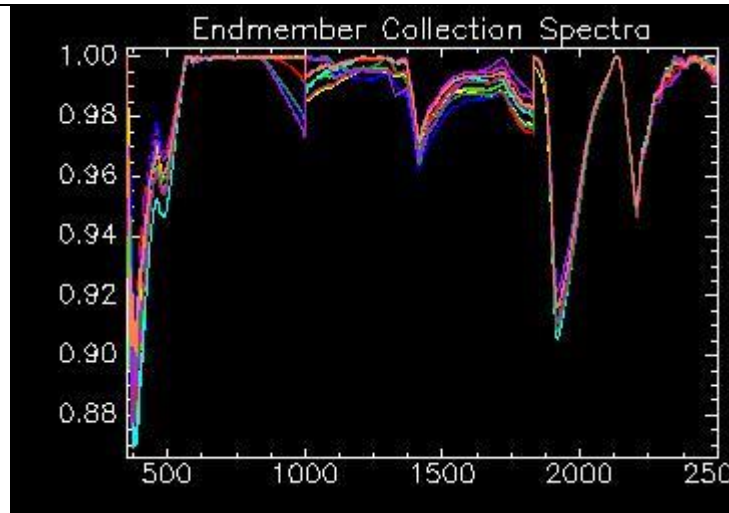
Espectros do ponto P31, de 10 a 100 cm de profundidade



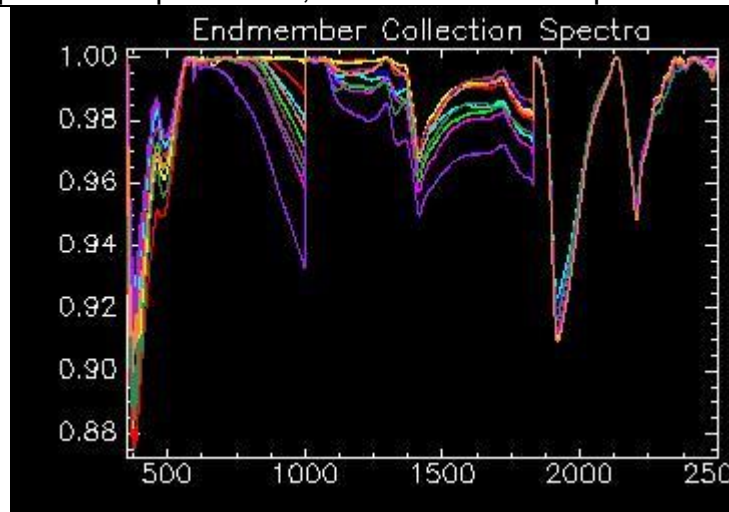
Espectros do ponto P32, de 10 a 100 cm de profundidade



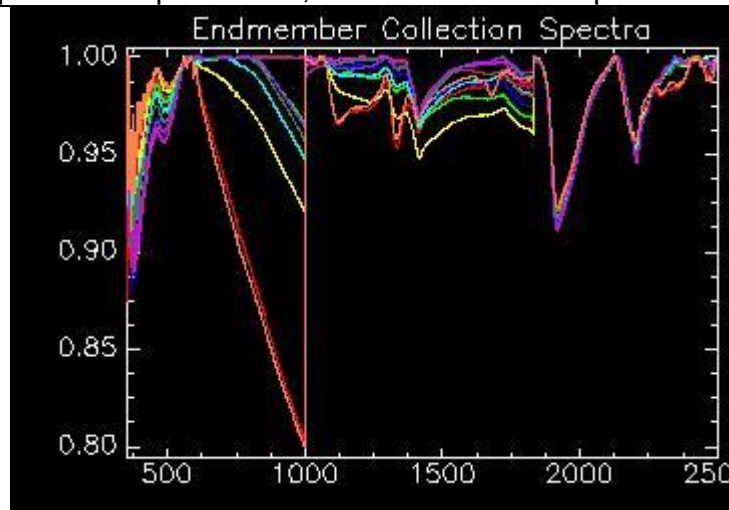
Espectros do ponto P33, de 10 a 100 cm de profundidade



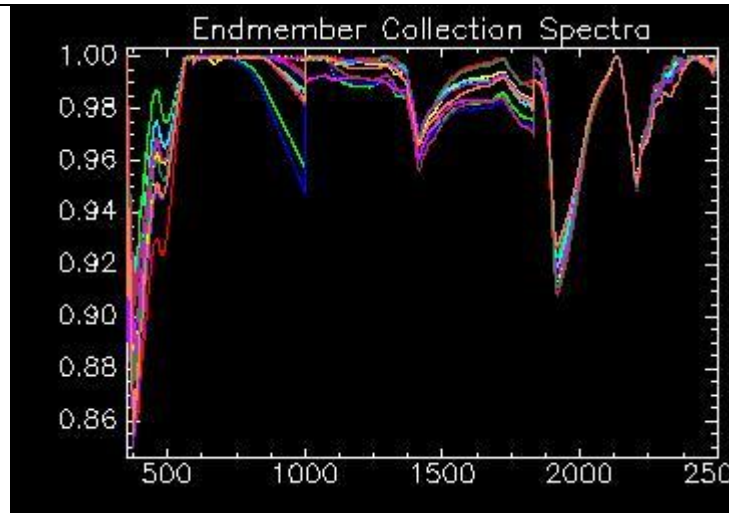
Espectros do ponto P34, de 10 a 100 cm de profundidade



Espectros do ponto P35, de 10 a 100 cm de profundidade



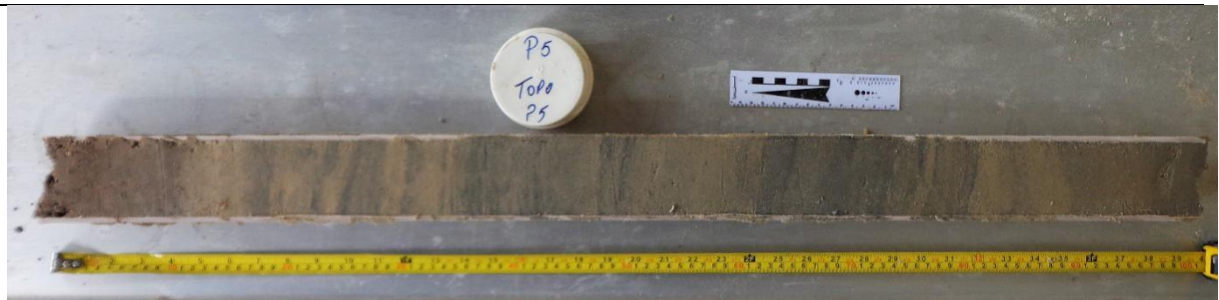
Espectros do ponto P36, de 10 a 100 cm de profundidade



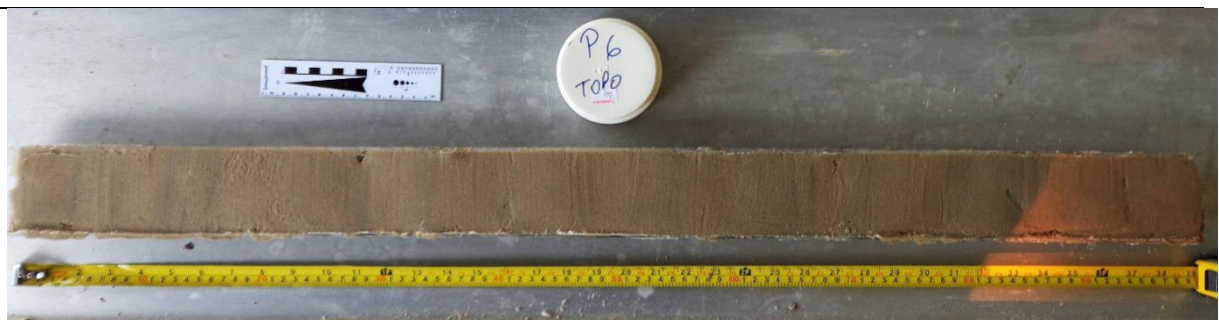
Espectros do ponto P37, de 10 a 100 cm de profundidade

9.2. Testemunhos de sola das perfurações realizadas

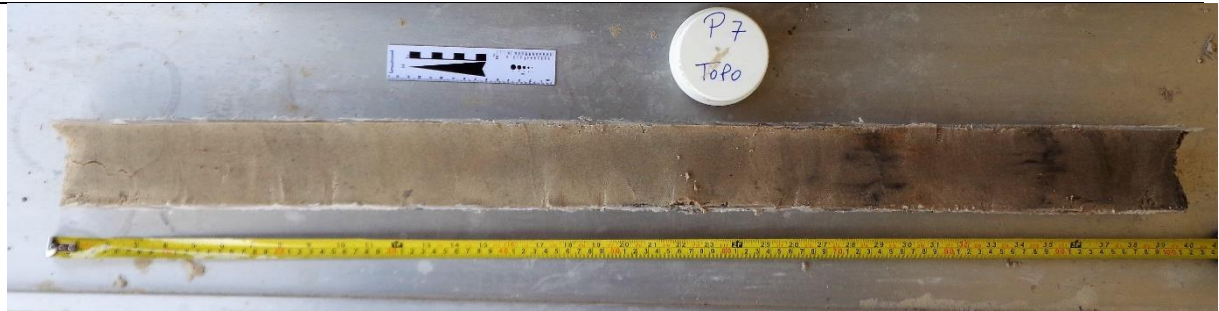
Apêndice 2: Testemunhos de solo



Testemunho do ponto P05, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P06, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P07, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P08, de 10 a 100 cm de profundidade



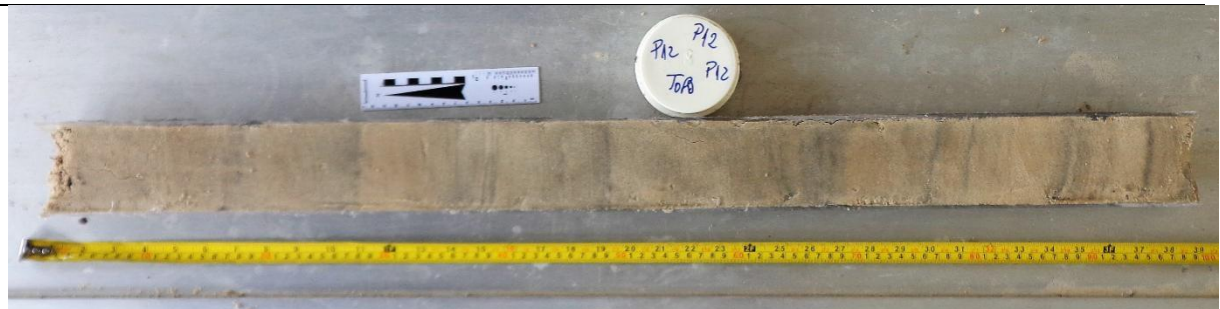
Testemunho do ponto P09, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P10, de 10 a 100 cm de profundidade



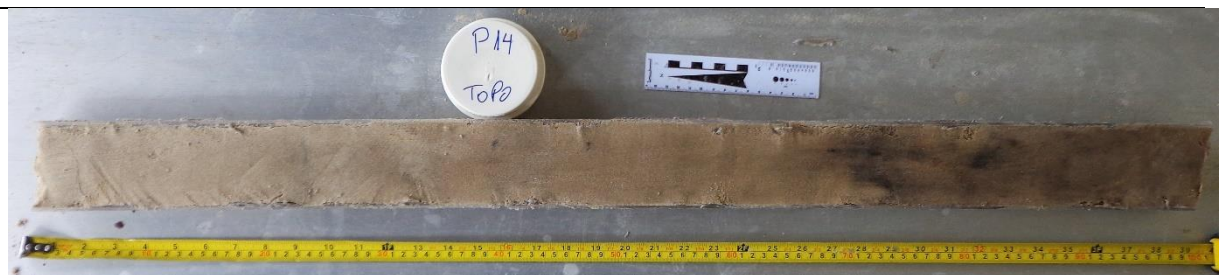
Testemunho do ponto P11, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P12, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P13, de 10 a 100 cm de profundidade



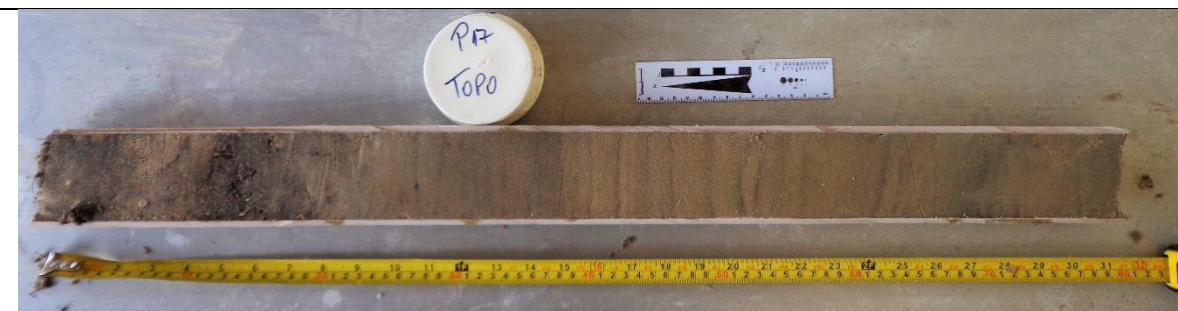
Testemunho do ponto P14, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P15, de 10 a 100 cm de profundidade



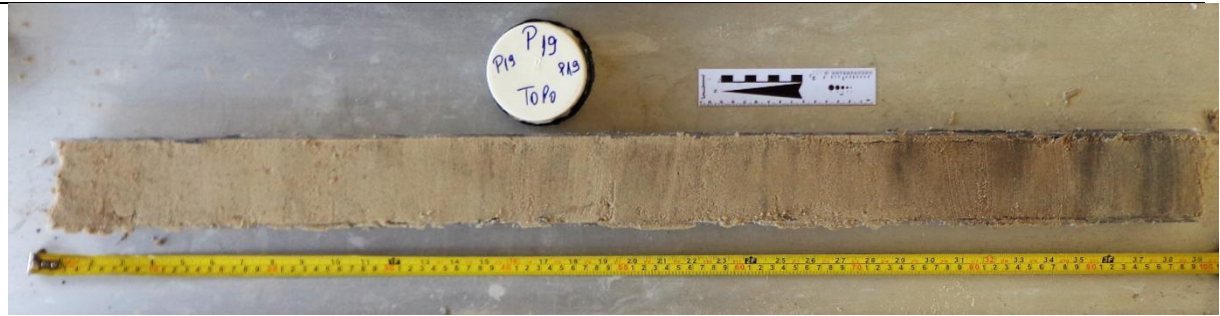
Testemunho do ponto P16, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P17, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P18, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P19, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P20, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P21, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P22, de 10 a 100 cm de profundidade



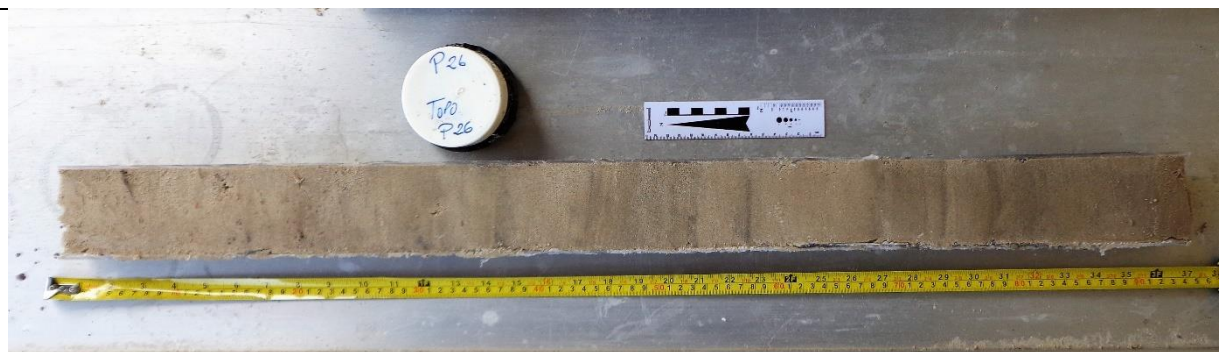
Testemunho do ponto P23, de 10 a 100 cm de profundidade



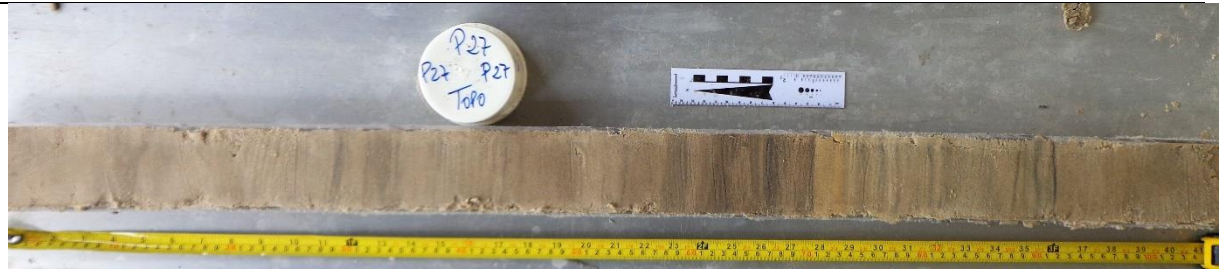
Testemunho do ponto P24, de 10 a 100 cm de profundidade



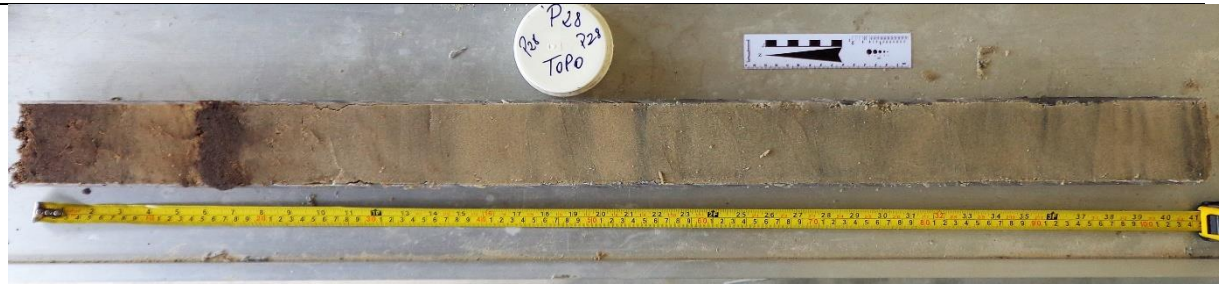
Espectros do ponto P25, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P26, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P27, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P28, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P29, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P30, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P31, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P32, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P33, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P34, de 10 a 100 cm de profundidade



Testemunho do ponto P35, de 10 a 100 cm de profundidade



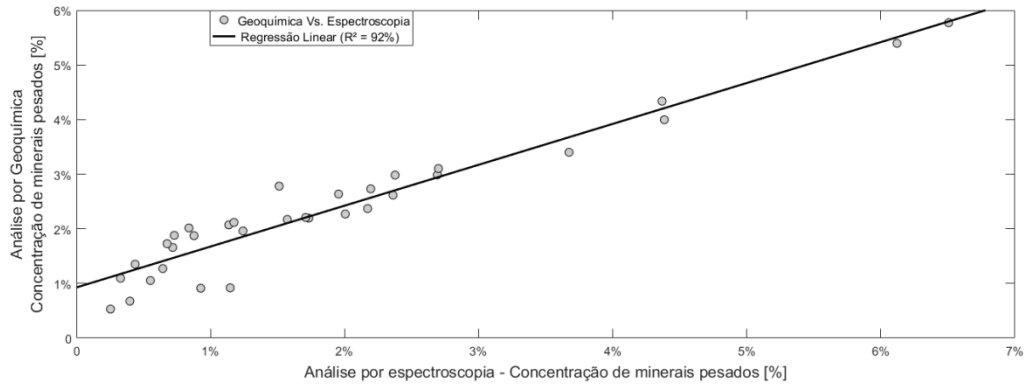
Testemunho do ponto P36, de 10 a 100 cm de profundidade



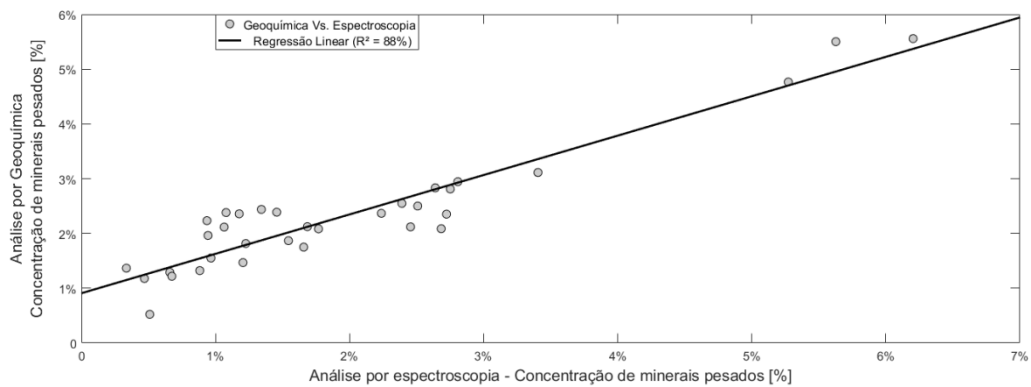
Testemunho do ponto P37, de 10 a 100 cm de profundidade

9.3. Dados da decomposição dos espectros e estimativa mineral via espectroscopia

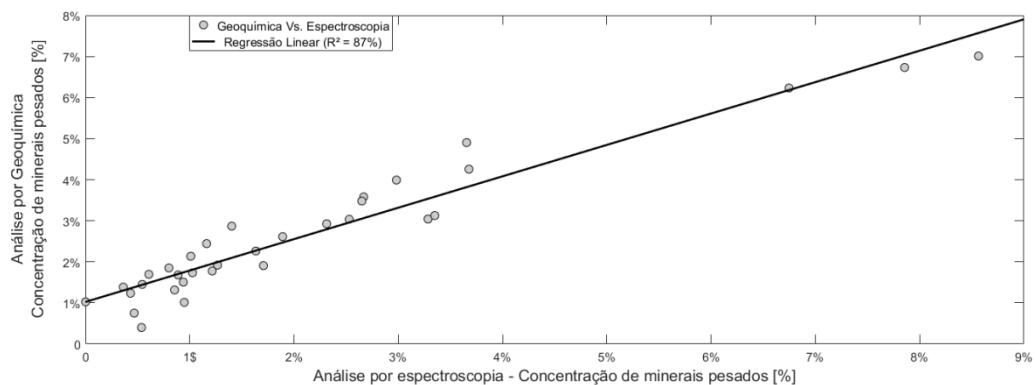
Apêndice 3: Análise comparativa das estimativas de presença mineral via geoquímica de laboratório e espectroscopia



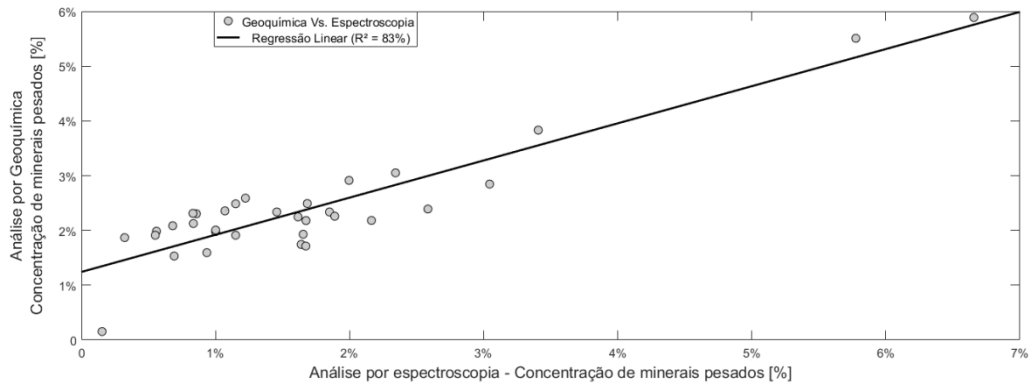
Geoquímica de laboratório Vs. Espectroscopia – 10cm



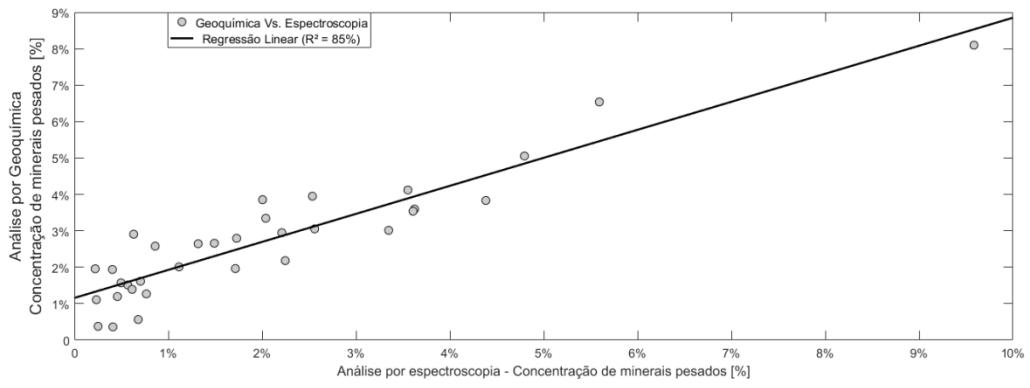
Geoquímica de laboratório Vs. Espectroscopia – 20cm



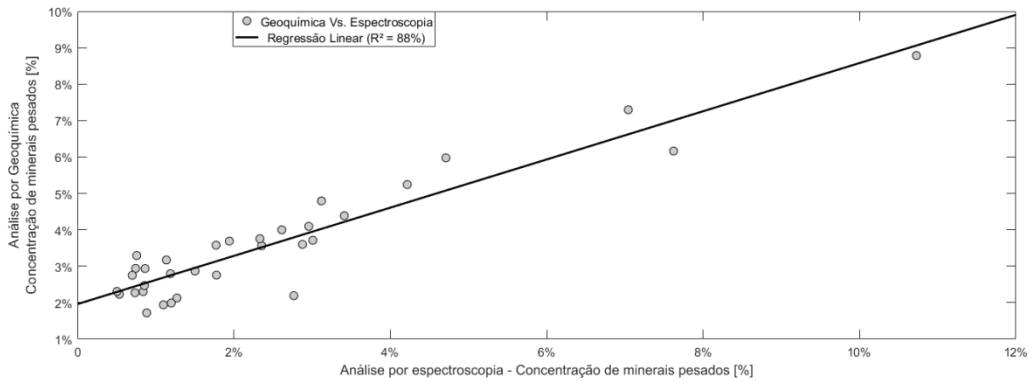
Geoquímica de laboratório Vs. Espectroscopia – 30cm



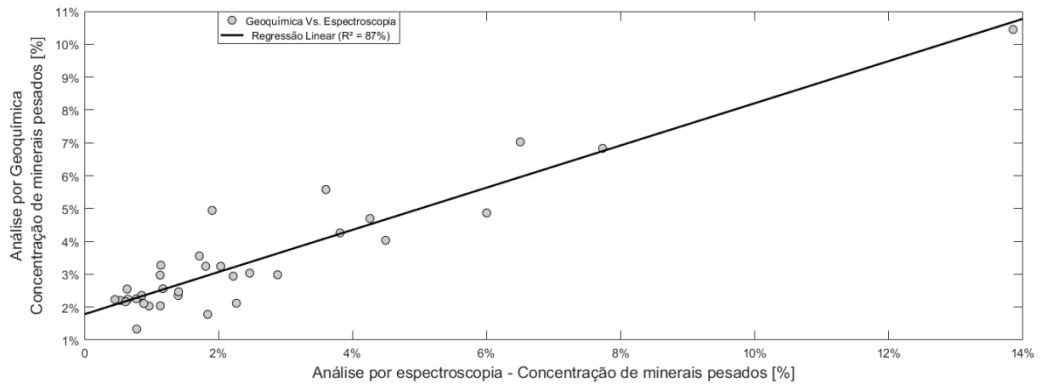
Geoquímica de laboratório Vs. Espectroscopia – 40cm



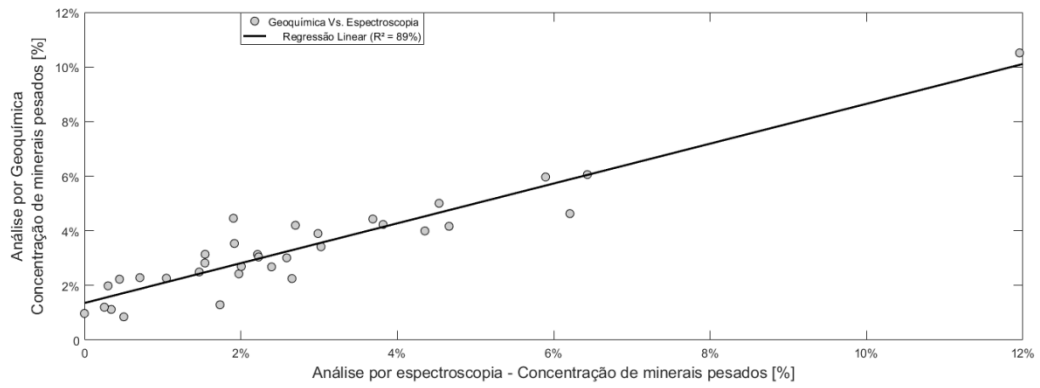
Geoquímica de laboratório Vs. Espectroscopia – 50cm



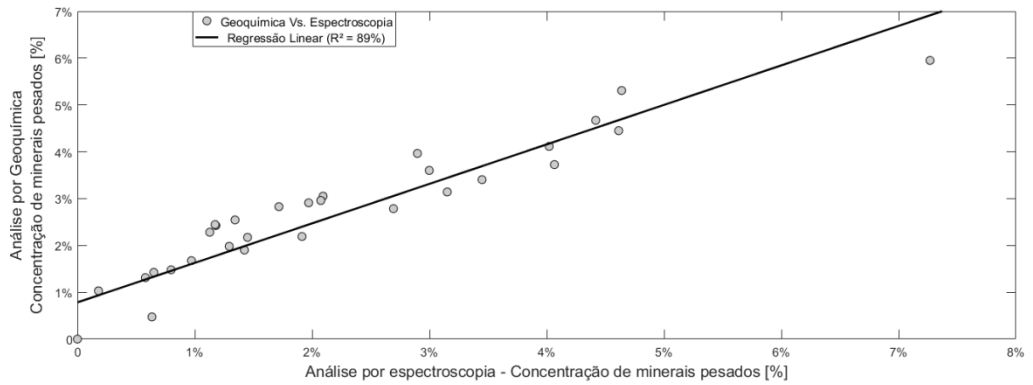
Geoquímica de laboratório Vs. Espectroscopia – 60cm



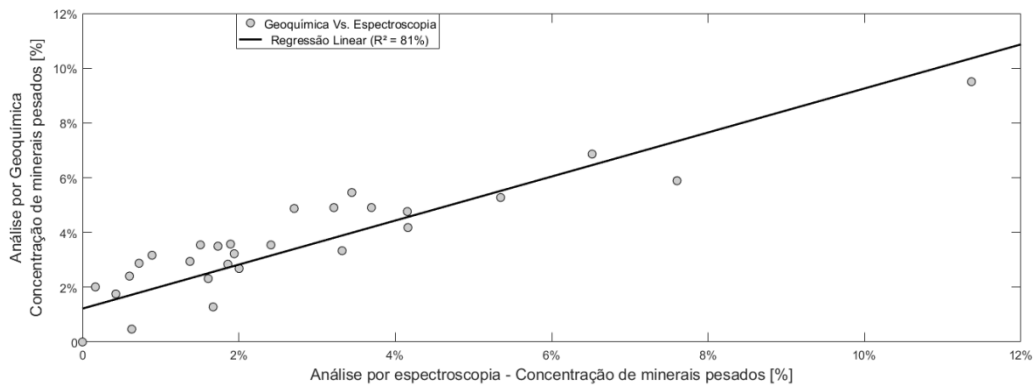
Geoquímica de laboratório Vs. Espectroscopia – 70cm



Geoquímica de laboratório Vs. Espectroscopia – 80cm



Geoquímica de laboratório Vs. Espectroscopia – 90cm



Geoquímica de laboratório Vs. Espectroscopia – 100cm

9.4. Rotinas MATLAB desenvolvidas

Apêndice 4: Códigos desenvolvidos

```
[funcoes_p05_10cm      valores_p05_10cm]=eig(esp_p05_10cm*esp_p05_10cm',
'vector');
save 'funcoes_p05_10cm' %salva as autofunções - salva em .mat
save 'valores_p05_10cm' %salva os autovalores- salva em .mat

valores_p05_10cm = abs(valores_p05_10cm (1:2150,:)); %exemplo para 10cm
valores_p05_10cm = valores_p05_10cm ./sum(valores_p05_10cm);%exemplo para
10cm
pesos_percent_p05_10cm = abs(valores_p05_10cm(2146:2150,:));%exemplo para
10cm
xlswrite('pesos_percent_p05_10cm.xls',pesos_percent_p05_10cm)
bandas_p05_10cm = diff(funcoes_p05_10cm);
save 'bandas_p05_10cm' % salva as bandas de importancia desses espectros
```

```
fx_assinatura = gradient(p05_10);%assinatura é o arquivo de assinatura da amostra  
ou
```

```
fx_assinatura = (fx_assinatura./ (max(fx_assinatura)));  
fx_assinatura = abs(fx_assinatura.*max(p05_10));  
xlswrite('bandas_assinatura_p05_10cm', fx_assinatura)  
fx_assinatura = fx_assinatura.*mascara; % separa apenas as bandas do titânio  
save 'fx_assinatura' %salva as bandas do titânio
```

```
plot(p3410(:,1),p3410(:,2),'b') % ponto34, 10cm de profundidade - azul  
hold on  
plot(p3420(:,1),p3420(:,2),'g') % ponto34, 20cm de profundidade = verde  
hold on  
plot(p3430(:,1),p3430(:,2),'r') % ponto34, 30cm de profundidade = vermelho  
hold on  
plot(p3440(:,1),p3440(:,2),'c') % ponto34, 40cm de profundidade = ciano (azul claro)  
hold on  
plot(p3450(:,1),p3450(:,2),'m') % ponto34, 50cm de profundidade = magenta (rosa)  
hold on  
plot(p3460(:,1),p3460(:,2),'y') % ponto34, 60cm de profundidade = amarelo  
hold on  
plot(p3470(:,1),p3470(:,2),'k') % ponto34, 70cm de profundidade = preto  
hold on  
plot(p3480(:,1),p3480(:,2),'+') % ponto34, 80cm de profundidade (azul com sinal "+")  
hold on  
plot(p3490(:,1),p3490(:,2),'o') % ponto34, 90cm de profundidade (azul com sinal "o")  
hold on
```

```
plot(p34100(:,1),p34100(:,2),'x') % ponto34, 100cm de profundidade (azul com sinal "x")
```

Figure

```
plot(p3410(:,1),funcoes_p34_10cm(:,2151),'b') % ponto34, função 1, 10cm  
hold on
```

```
plot(p3420(:,1),funcoes_p34_20cm(:,2151),'g') % ponto34, função 1, 20cm  
hold on
```

```
plot(p3430(:,1),funcoes_p34_30cm(:,2151),'r') % ponto34, função 1, 30cm  
hold on
```

```
plot(p3440(:,1),funcoes_p34_40cm(:,2151),'c') % ponto34, função 1, 40cm  
hold on
```

```
plot(p3450(:,1),funcoes_p34_50cm(:,2151),'m') % ponto34, função 1, 50cm  
hold on
```

```
plot(p3460(:,1),funcoes_p34_60cm(:,2151),'y') % ponto34, função 1, 60cm  
hold on
```

```
plot(p3470(:,1),funcoes_p34_70cm(:,2151),'o') % ponto34, função 1, 70cm  
hold on
```

```
plot(p3480(:,1),funcoes_p34_80cm(:,2151),'x') % ponto34, função 1, 80cm  
hold on
```

```
plot(p3490(:,1),funcoes_p34_90cm(:,2151),'+') % ponto34, função 1, 90cm  
hold on
```

```
plot(p34100(:,1),funcoes_p34_100cm(:,2151),'k') % ponto34, função 1, 100cm
```

```
espec_m=(p3410(:,2)+p3420(:,2)+p3430(:,2)+p3440(:,2)+p3450(:,2)+p3460(:,2)+p3470(:,2)+p3480(:,2)+p3490(:,2)+p34100(:,2))/10;
```

```
d34 = diff(espec_m);
```



```
a = max(espec_m);  
b = min(espec_m);  
d34_n = ((d34-(min(d34)))/(max(d34)-min(d34)));  
d34_n2 = (d34_n*(a-b))+b;  
plot(p3410(:,1),espec_m)  
hold on  
lambda = p3410(1:2150,1);  
plot(p3410(1:2150,1),abs(d34_n2))
```