PhD

3º CICLO

U.PORTO

Prospeção Geológica de Pegmatitos em Alto Ligonha (Zambézia, Moçambique), com base em Deteção Remota e Sistema de Informação Geográfica

U.PORTO

FACULDADE DE CIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DO PORTO

PhD

U.PORTO
FACULDADE DE CIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DO PORTO

Prospeção Geológica de Pegmatitos em Alto Ligonha (Zambézia, Moçambique), com base em Deteção Remota e Sistema de Informação Geográfica

Ubaldo Ginova Ombe Gemusse

Tese de Doutoramento apresentada à
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Geociências, com especialidade em Geologia Aplicada
e Métodos de Prospeção

Ano

2021

Ubaldo Ginova Ombe Gemusse

Orientador

Professor Doutor Alexandre Martins Campos de Lima,
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, da Faculdade de Ciências, da Universidade do Porto.

Coorientadora

Professora Doutora Ana Cláudia Moreira Teodoro,
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, da Faculdade de Ciências, da Universidade do Porto.

Universidade do Porto – Faculdade de Ciências

Porto, Dezembro de 2021

Este trabalho foi financiado pelo Instituto de Bolsas de Moçambique (IBE) no âmbito da bolsa de doutoramento com a referência D101/2016.

Nenhum país desenvolve sem vias de acesso adequadas

(autor desconhecido)

Agradecimentos

A Deus todo-poderoso por me ter facultado o Dom da Sabedoria, Fé e Perseverança e, também, pela sua proteção nos momentos difíceis e bons que passei durante essa jornada. Deus é Grande.

Um agradecimento muito especial aos meus orientadores, Professor Doutor Alexandre Martins Campos de Lima e Professora Doutora Ana Cláudia Teodoro, por terem aceitado a orientação desta tese, por me terem incentivado na candidatura para a Bolsa de Doutoramento financiada pelo Instituto de Bolsas de Moçambique. O meu muito obrigado pelos seus ensinamentos e conselhos que contribuíram, de forma entusiasta, para a efetivação deste trabalho, por todo empenho, apoio e disponibilidade praticamente absoluta.

Aos Professores do Programa Doutoral em Geociências, começando pela Professora Deolinda Flores, Doutora Helena Sant'Ovaia, Doutora Joana Ribeiro, Doutora Alexandra Guedes e Doutor Fernando Rocha. Ao Professor António Guerner pela força e apoio incondicional. Aos colegas do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento de Território, Ana Marta Gonçalves, Joana Fernandes (pelo apoio incansável nas análises e tratamentos de dados), Douglas Santos (pelos espectros), Sara Leal (apoio em base de dados), Diva Cabral, Sosdito Mananze, Ana Cláudia Santos, Cláudia Cruz, Violeta Ramos (um obrigado especial pela revisão linguística do trabalho), Luís Lima, Cátia Dias, Ricardo Ribeiro, Olaide Aderoju, Amade Gani (pelo apoio em dados geoquímicos de Moçambique), Bernardino Nhacumele, Albertina Nhavotso, e Rashida Senouci (pelas dicas do uso de ENVI), ao Francelino Wilson pelas observações linguísticas.

Ao pessoal da Secretaria do Departamento de Geociências e Ordenamento, Ambiente e Território da FCUP, que estiveram sempre disponíveis para realizar várias tarefas.

À antiga Universidade Pedagógica de Moçambique-Delegação da Beira, e à atual Universidade Licungo, Extensão da Beira, que me concedeu um período de 4 anos para realizar os meus estudos em Portugal.

Ao Sr. Afonso Álvaro Paporo, mais conhecido como Salé, pela cedência do meio de transporte durante todo o trabalho de campo em Muiane e Naipa.

Ao técnico da Direção Distrital dos Recursos Minerais de Zambézia, afeto em Alto Molocué,

o Sr. Meu Amigo Sílvio João Ribeiro, pela paciência que teve em estar comigo durante todo o trabalho de campo.

Ao Eng. Benjamim Uachave Singano, responsável da mina de Muiane, por ter aberto as portas da mina, e ao Sr. Bernabé Januário, chefe do Departamento de Minas na localidade de Muiane, e a Engenheira Faira Faquir Assane, chefe do Gabinete de Minas da Direção Provincial de Recursos Minerais da Zambézia (DPRMEZ), por agilizarem os tramites do envio das amostras de campo da Zambézia para Sofala.

Aos colegas da Direção Provincial de Recursos Minerais de Sofala (DPRMES), Higino Soares, Nilton, Octávio Manuel e Mildo Daremba, pelo apoio na tramitação de amostras de Sofala para Portugal.

Um agradecimento especial à Agência Espacial Europeia (ESA) e ao Serviço Geológico Americano (USGS) pelo acesso gratuito das imagens multiespectrais orbitais utilizadas.

À minha esposa Nídia, por me ter ajudado durante toda esta caminhada, e principalmente por ter sempre acreditado em mim.

Às minhas filhas Karen e Vick.

Aos meus irmãos, Gil e Marelu, cuja dedicação extrema foi indispensável à apresentação deste trabalho.

Aos meus amigos, cunhadas, cunhados, primos e primas, um agradecimento.

Um destaque muito especial para o meu Pai (António Jemusse), para a minha Mãe (Regina Ombe), e para o meu tio, Zacarias Ombe, por terem acreditado em mim durante todo este tempo, tendo sido um motivo de inspiração ao longo deste trabalho.

Resumo

Pretendeu-se com este trabalho contribuir para a prospeção geológica dos filões pegmatíticos com minerais de lítio em Moçambique, concretamente na região de Alto Ligonha, distrito de Gilé, Província de Zambézia, através da análise de assinaturas espetrais de imagens do sensor ASTER, Landsat 5 e 8, e Sentinel 2 que possam indicar a presença de pegmatitos mineralizados através do suporte do Sistema de Informação Geográfica, usando o software ENVI 4.8, QGIS 3.10, e Esri® ArcMap™ 10.8, Sentinel Application Platform (SNAP) e Ecognition 8.0. As imagens encontram-se disponíveis gratuitamente. Foram selecionadas imagens de várias séries, entre as que combinam menor nebulosidade e baixa cobertura de vegetação, das quais ASTER (27/05/2005), Landsat OLI (02/02/2018), Landsat 5 TM (23/10/1989) e Sentinel 2A (30/10/2019). O pré-processamento envolveu a correção atmosférica, conversão para refletância de superfície e a criação de uma máscara de vegetação para as imagens Landsat 5 e 8. Os principais estudos envolveram os seguintes pegmatitos: Marropino, Morrua, Naipa, Nuaparra e Muiane. Estes encontram-se localizados no Complexo de Nampula, região de Alto Ligonha, uma subdivisão estratigráfica tectônica do Cinturão de Moçambique. Os métodos de processamento de imagem incluíram análise de componentes principais (ACP), combinações RGB (vermelho, verde, azul), razão de bandas, classificação supervisionada e algoritmos de machine learning. Esta combinação de técnicas permitiu prever a ocorrência de pegmatitos com lítio nessas regiões. As razões de bandas e combinações RGB e ACP propostas permitiram a discriminação dos pegmatitos supostos portadores de Li das rochas encaixantes. Foram efetuadas amostragens dos pegmatitos de Muiane e Naipa e de suas rochas encaixantes para estudos espetrais e geoquímicos, nomeadamente, utilizando um espetroradiómetro e por fluorescência de raio X. Os resultados globais das classificações demonstraram maior precisão de classificação para as imagens Sentinel 2 A (pegmatitos de Muiane e Naipa), com os seguintes resultados: Distância Mínima (MinD) (Kappa > 0.85), Spectral Angle Mapper (SAM) (Kappa 0.6), Máxima Verossimilhança (Maxver) (K=0.98), e Suporte Vetorial Machine (SVM) (K=0.99). Para as imagens Landsat 8, os pegmatitos acima referidos apresentam resultados de Índice Kappa (MinD=0.9), (SAM=0.6), (Maxver=0.9) e (SVM=0.9). Para os pegmatitos de Marropino e Morrua utilizaram-se imagens ASTER e obtiveram-se os índices Kappa (MinD=0.5) e (SAM=0.6). A informação obtida por deteção remota tem vindo a ser aplicada em diversos sectores de estudo e torna-se agora relevante entender qual o valor desse informação para Moçambique. Os resultados demostram o potencial de deteção remota,

revelando que a classe dos pegmatitos aparece em todas as técnicas aplicadas nesse trabalho. Com as técnicas manuseadas, foram identificados novos alvos de pegmatitos, como Muiane II e Nassupe sobrepondo as rochas Mesoproterozóicas de Alto Ligonha

Palavras-chave: Deteção remota, classificação de imagens, razão de bandas, ACP, Combinação RGB, NDVI, pegmatitos, assinaturas espectrais.

Índice Geral

AGRADECIMENTOS V

RESUMO VII

ÍNDICE GERAL IX

ÍNDICE DE FIGURAS XIV

ÍNDICE DE TABELAS XXIV

ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS XXVIII

CAPÍTULO I 31

1.1. ORIGEM E JUSTIFICATIVA 31
1.2. PROBLEMATIZAÇÃO 32
1.3. OBJETIVOS 33
1.3.1. OBJETIVO GERAL 33
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 33
1.4. RELEVÂNCIA DA TESE 33
1.5. ASPETOS FÍSICO-GEOGRÁFICOS 34
1.5.1. TOPOGRAFIA DA ÁREA DE ESTUDO 36
1.5.2. CLIMA 37
1.5.3. HIDROGRAFIA 38
1.6. ASPETOS ECONÓMICOS 39
1.7. ECONOMIA, SERVIÇOS E POPULAÇÃO 39
1.8. HISTORIAL DO LOCAL DE RECOLHA DE DADOS 40
1.9. ESTRUTURA DA TESE 43

CAPÍTULO II 45

2.1. PROPRIEDADES DO LÍTIO **45**
2.2. APLICAÇÕES E PRODUTOS DO LÍTIO **46**
2.2.1. FONTES DE LÍTIO 47
2.2.2. MINERAIS DE LÍTIO EM PEGMATITOS 48
2.3. MINERAIS DE LÍTIO **53**
2.3.1. ESPODUMENA 53
2.3.2. PETALITE 54
2.3.3. LEPIDOLITE 54
2.3.4. EUCRIPTITE 55
2.3.5. HOLMQUISTITE 55
2.3.6. MINERAIS ARGILOSOS 56
2.3.6.1. Bikitaite 56
2.3.6.2. Caulinos 56
2.3.7. SALMOURAS 56

CAPÍTULO III **58**

3.1. DETEÇÃO REMOTA APLICADA À GEOLOGIA **58**
3.2. DETEÇÃO REMOTA EM MOÇAMBIQUE **66**
3.3. APLICAÇÃO DAS REDES NEURONAIS DE CONVOLUÇÃO (CNNS) **68**
3.4. APLICAÇÃO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS ORBITAIS EM NUVEM COM GOOGLE EARTH ENGINE – BIG DATA (GEE-DATA) **71**

CAPÍTULO IV **73**

4.1. CINTURÃO DE MOÇAMBIQUE **75**
4.2. GEOLOGIA REGIONAL DA SUBPROVÍNCIA DE NAMPULA **76**
4.2.1. SUPERGRUPO DE CHIÚRE 78
4.2.1.1. Grupo de Molocué 79
4.2.1.1.1. Formação de Morrua 82
4.2.1.1.2. Formação de Nipiode 82
4.2.1.1.3. Formação de Inrepele 83
4.2.2. GEOLOGIA LOCAL 83
4.2.3. TRABALHOS GEOLÓGICOS ANTERIORES EFETUADOS NA REGIÃO 87

CAPÍTULO V **89**

5.1. PROSPEÇÃO E CARTOGRAFIA **89**
5.2. MICROSCÓPIA ELETRÓNICA DE VARRIMENTO **90**
5.3. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X PORTÁTIL **91**
5.4. DIFRAÇÃO DE RAIOS X **93**
5.5. ESPETROSCOPIA DE REFLETÂNCIA **94**
5.5.1. REMOÇÃO DO CONTÍNUO 95
5.5.2. CRIAÇÃO DA BIBLIOTECA ESPECTRAL DE REFERÊNCIA 97
5.6. TÉCNICAS DE ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DE IMAGEM UTILIZANDO OS SENSORES ASTER, OLI, TM E MSI **102**
5.6.1. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP) 102
5.6.2. ÍNDICES DE VEGETAÇÃO 102
5.6.3. COMBINAÇÃO DE BANDAS 104
5.6.4. RAZÃO DE BANDAS 104
5.6.5. CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA 105
5.6.5.1. Spectral Angle Mapper (SAM) 105
5.6.5.2. Distância mínima ou Distância Euclidiana 105
5.6.5.3. Máxima verossimelhança 106
5.6.5.3.1. Comparação e verificação dos resultados das classificações 106
5.6.5.3.2. Matriz de confusão 106
5.6.6. MACHINE LEARNING 109
5.6.7. SUPPORT VECTOR MACHINE 109
5.6.7.1. Redes Neuronais de Convolução (CNN) 110

CAPÍTULO VI **112**

6.1. DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA **112**
6.1.1. PEGMATITOS DE MARROPINO 113
6.1.2. PEGMATITOS DE MUAINE 114
6.1.3. PEGMATITOS DE NAIPA 120
6.1.4. PEGMATITOS DE MORRUA 121
6.1.5. PEGMATITOS DE NUAPARRA 122
6.2. DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA ÓTICA **123**
6.3. MICROSCÓPIA ELETRÓNICA DE VARRIMENTO **131**
6.4. DIFRAÇÃO DE RAIO X **136**

CAPÍTULO VII **141**

7.1. FLUORESCÊNCIA DE RAIO X PORTÁTIL **143**
7.1.1. ELEMENTOS PRINCIPAIS 143
7.1.1.1. Silício 143
7.1.1.2. Alumínio 143
7.1.2. RELAÇÃO K/RB 146

CAPÍTULO VIII **152**

8.1. IMAGENS UTILIZADAS **154**
8.2. CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DAS IMAGENS **154**
8.3. ANÁLISES DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP) **161**
8.3.1. ACP PARA MINERAIS DE LÍTIO 161
8.3.2. ACP PARA OUTROS MINERAIS 177
8.4. ÍNDICE DE VEGETAÇÃO **182**
8.5. COMBINAÇÃO DE BANDAS **186**
8.5.1. SENSOR ASTER 187
8.5.2. LANDSAT 8 191
8.5.3. LANDSAT 5 TM 198
8.5.4. SENTINEL 2 200
8.6. RAZÃO DE BANDAS **204**
8.6.1. LANDSAT 8 207
8.6.2. SENSOR ASTER 211
8.6.3. LANDSAT 5 TM 217
8.6.4. SENTINEL 2 219
8.7. CARATERIZAÇÃO ESPECTRAL **222**
8.8. ALGORITMOS DE CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA E MACHINE LEARNING **233**
8.8.1. SENTINEL 2 A (PEGMATITOS DE MUIANE E NAIPA) 233
8.8.2. LANDSAT 8 (PEGMATITOS DE MUIANE E NAIPA) 243
8.8.3. LANDSAT 8 (PEGMATITOS DE MARROPINO) 250
8.8.4. ASTER (PEGMATITOS DE MUIANE E NAIPA) 255
8.8.5. ASTER (PEGMATITOS DE MARROPINO E MORRUA) 261
8.9. SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO EM GEE-BIG-DATA **269**
8.10. RELAÇÃO DOS PEGMATITOS CLÁSSICOS COM OCORRÊNCIA DE LÍTIO **273**
9.1. CONTRIBUIÇÕES DA TESE **276**
9.2. TRABALHOS FUTUROS **277**

ANEXOS 303

APÊNDICES 307

Índice de Figuras

Fig. 1: Mapa de Localização da área de estudo: a) Moçambique inserido no Continente africano; b) limites de Moçambique e, c) Pegmatitos estudados, localizados no distrito de Gilé. _____ *35*

Fig. 2: Topografia de Alto Ligonha: a) pegmatitos de Alto Ligonha; a1) Topografia de Pegmatitos de Muiane e Naipa; a2) Topografia de pegmatitos de Nuaparra 1 e 2; a3) Topografia dos pegmatitos de Morrua e Marropino _____ *37*

Fig. 3: Pegmatitos associados às províncias de Nampula e Zambézia. _____ *42*

Fig 4: Participação Económica na Extração no Mercado de Lítio em 2018, adaptado de Brown et al., (2018) _____ *47*

Fig. 5: Localização dos depósitos conhecidos de lítio no mundo. (Pegmatitos do tipo LCT, Granito lítio, Pegmatitos do tipo NYF, pegmatito granito comum (Bradley et al., 2010) _____ *48*

Fig. 6: Zonamento regional para a família LCT. Adaptado de (Cerny and Ercit, 1985; Cerny, 1991; London, 2008). Extraído de (Viera, 2010). _____ *50*

Fig. 7: Elementos principais do processo de deteção remota. Adaptado de Sherbinn et al. (2006). _____ *59*

Fig. 8: Mapa geológico simplificado da Província de Nampula, mostra a distribuição das principais unidades geológicas. Fonte: (Macey et al., 2013) _____ *74*

Fig. 9: Mapa Geológico do Norte de Moçambique, indicando as unidades litoestratigráficas e os Klippes de Mugeba e Monapo. Fonte: (Miller et al., 2013) _____ *75*

Fig. 10: Mapa da geologia regional do Nordeste de Moçambique mostrando a geologia e os principais elementos estruturais. Fonte: (Cronwright, 2005a) _____ *78*

Fig. 11: Modelo de evolução do Cinturão de Cisalhamento de Namama. ***A****- Período de 1060–920 Ma****; B****- Fecho e desenvolvimento do Cinturão de Cisalhamento de Namama no período Pan-Africano. ɣ1 e ɣ2 são granitos pós-cinemáticos e ɣ3 são granitos Pan-Africanos. Adaptado de Costa (1992) em Cronwrigth (2005).* _____ *81*

Fig. 12: a) Mapa da história do mapeamento geológico em Alto Ligonha; b) Relação dos pegmatitos alvos com as folhas 1538/1637. Adaptado de (Council for Geoscience, 2007) _____ *85*

Fig. 13: Geologia local _____ *86*

Fig. 14: Microscópio Eletrónico de Varrimento ambiental, de alta resolução (Schottky), com Microanálise por Raios X (CEMUP). 91
Fig 15:Difractómetro usado para a Difração de Raios X dos Caulinos de Muiane. 93
Fig. 16: Amostras da biblioteca da USGS (extraído no ENVI) a esquerda o plot normal e a direita o plot é apresentado a Remoção do contínuo. 95
Fig. 17: Espectros extraídas na ECOSTRESS Spectral Library - Version 1.0, biblioteca produzida pelo Instituto de Tecnologia de Califórnia (JPL) Jet Propulsion Laboratory. 95
Fig. 18: Métodos de remoção do contínuo: por "diferença do contínuo" e por "quociente do contínuo "extraído em (Kruse, 1993). 96
Fig. 19: Núcleo de quartzo. 114
Fig. 20: Modelo em Blocos de Muiane (no interior do retângulo) utilizado no relatório 43-101 de 2009. Fonte: Global Mining Services (Naude and Sperinck, 2009) 115
Fig. 21: Sondagem feita pela TMPL em 2009. Fonte: Global Mining Services (Naude and Sperinck, 2009). 116
Fig. 22: Caulino do pegmatito de Muiane 118
Fig. 23: Corpo pequeno de albite (cleavelandite) desenvolvido adjacententemente ao núcleo de quartzo no pegmatito Muiane. 118
Fig. 24: Pegmatito de Muiane (Caulinos). 119
Fig. 25: Exploração da zona central de pegmatito. 119
Fig. 26: Escombreiras de nódulos de lepidolite do Pegmatito de Naipa (diâmetro médio de 10-15 cm). 121
Fig. 27: Microfotografia de uma lepidolite extraida em Naipa, a) e c) observação em NC, pode-se observar que as cores de interferência são ligeiramente inferiores às da moscovite; b) e d) observação em NP, lepidolite em pegmatito (quartzo, microclina). 126
Fig. 28: Microfotografia do Feldspato de Muiane, a) e c) geminação Baveno (Leis de Carlsbad); b) e d) observação do feldspato em luz normal ou em nicóis paralelos. 127
Fig. 29: Microfotografia de um pegmatito: a (albite, moscovite),c (Qtz, albite, microclina),e (Qtz, moscovite.) em luz polarizada com nicois cruzados; b,d,f emnicois paralelos). 128
Fig. 30: Microfotografia de um pegmatito extraido em Muiane (a,b, c visuailizada em nicois paralelos e d visulaizada em nicois cruzados, nota-se plagioclases, horneblendas, e moscovite). 129
Fig. 31: Microfotografia de um pegmatito (granitoide), a) apresentado uma textura equigranular e média hipidiomorfia, e d) Luz natural e c) e b) em luz polarizada. 130
Fig. 32: Imagens de MEV da amostra LN1. 132
Fig. 33: Imagens de MEV da amostra PNC. 135

Fig. 34: Cálculo do índice de Hinckley no DRX da caulinite. Extraído em Silva e Santana (2016). 138
Fig 35: Espetro principal da caulinite extraídos da biblioteca espectral do USGS. 138
Fig. 36: Difratograma da amostra CM1. 139
Fig. 37: Difratograma da amostra CM2. 139
Fig. 38: Difratograma das micas dentro dos caulinos (CM2). 140
Fig 39: Distribuição dos teores de SiO_2 das amostras colhidas em Naipa e Muiane. 145
Fig 40: Distribuição dos teores de Al_2O_3 das amostras de Naipa e Muiane. 145
Fig 41: Relação K/Rb das amostras de Naipa e Muiane 147
Fig 42: Relação K e Rb das amostras de Naipa e Muiane 148
Fig 43: Relação K/Rb (amostragem). 149
Fig. 44: Distribuição das áreas com valores aproximados da relação K/Rb (Pegmatito de Naipa) na escala 1/50000. 151
Fig. 45: Fluxograma de pré-pós processamento das imagens. 153
Fig. 46: Mosaico da PC4 da imagem Landsat 5 TM (1989), resultado da análise das bandas (1246); a) pegmatito de Marropino; b) Pegmatito de Morrua. As mineralizações de lítio aparecem em cor branco, pixeis brilhantes. 162
Fig. 47: PC4 da imagem Landsat 5 TM (1989), resultado da análise das bandas (1246); a) pegmatito de Muiane e Naipa. As mineralizações de lítio aparecem em cor branca, pixeis brilhantes nos pegmatitos de Muiane. O pegmatito de Naipa não apresenta resultados positivos. 163
Fig. 48: Imagem Landsat 5 TM (1989). Resultado da análise das bandas (24). São apresentados os mosaicos dos pegmatitos (-PC2); a) pegmatito de Morrua; b) Pegmatito de Marropino. As mineralizações de lítio apresentam uma visualização cinza-claro 164
*Fig. 49: Imagem Landsat 5 TM (1989). Resultado da análise das bandas (24), (-PC2); a) pegmatito de Naipa, apresentando sinal negativo; os pegmatitos não se visualizam; os pegmatitos de Muiane apresentam sinal positivo; b) Pegmatitos de Naipa e Muiane. Imagem extraída do Google Earth (1990) ilustrando o pegmatito de Naipa e Muiane*165
Fig. 50: (PC4) da imagem Landsat 8 (2018), resultado da análise das bandas (2,3,5,11); as áreas conhecidas em mineralizações de lítio visualizam-se a branco; a) pegmatito de Morrua; b) Pegmatito de Marropino; c)1 imagem do google satélite (2018) pegmatito de Morrua; d) 2 imagem do Google satélite (2018) - pegmatitos de Marropino. 167
Fig. 51: Mosaico do resultado de ACP das bandas (2,3,5,11) L8, visualização de (PC4); as áreas conhecidas em mineralizações de lítio visualizam-se a branco; a) pegmatito de Namobene e Nassupe; b) pegmatito de Muiane II; c) imagem do Google satélite (2018) -

pegmatitos de Namobene e Nassupe; d) imagem do Google satélite (2018) - pegmatitos de Muiane II. _____ *168*
Fig. 52: ACP das bandas (2,3,5,11), visualização de (PC4); as áreas conhecidas em mineralizações de lítio visualizam-se a branco; a) pegmatito de Naipa e Muiane; b) imagem do Google satélite (2018) - pegmatitos de Naipa e Muiane _____ *169*
Fig. 53. Mosaico (PC2) da imagem Landsat 8 (2018) resultado da análise das bandas (3,5); a) Pegmatito de Marropino; b) Pegmatito de Morrua; c) Pegmatitos de Naipa e Muiane. _____ *170*
Fig. 54: Imagem ASTER (2005) seleção de PCA; a) PC2, visualização dos pegmatitos de Muiane e Naipa com o branco associado às mineralizações de lítio; a1) detalhes do pegmatito de Naipa; a2) detalhe do pegmatito de Muiane. _____ *172*
Fig. 55: Imagem ASTER (2005) PC2; é visível em branco o pegmatito de Marropino, área com mineralizações de lítio; _____ *173*
Fig. 56: Imagem ASTER (2005) seleção de PCA (-PC4), das bandas (1,3,11,14); a) Pegmatitos de Muiane e Naipa (a branco visualizam-se as mineralizações conhecidas); a1) Pegmatitos de Naipa, com ocorrências de mineralizações de lepidolites; a2) Pegmatitos de Muiane, com ocorrências de mineralizações de lítio; b) imagem extraída no Google Earth (2005) ilustrando os pegmatitos de Muiane e Naipa. _____ *174*
Fig. 57: Imagem Sentinel 2 A (2019) seleção de PCA (-PC2), das bandas (3,8) - pegmatitos de Muiane e Naipa (a branco visualizem-se as mineralizações conhecidas). _____ *175*
Fig. 58: Mosaico do resultado da ACP das bandas (3,8) Sentinel 2 A; visualização de (-PC2); as áreas conhecidas em mineralizações de lítio visualizam-se a branco; a1) pegmatitos de Namobene; a2) pegmatitos de Nassupe; b1) novos campos de prospeção designados por pegmatitos de Muiane II. _____ *176*
Fig. 59: PC4 da análise das bandas (1467) ASTER (2005). _____ *178*
Fig. 60: Combinação (PCs 1467). _____ *179*
Fig. 61: Combinação (PCs 2,5,6,7). _____ *180*
Fig. 62: PC1,2,3,4 da análise das bandas (2,5,6,7) Landsat 8 (2018). _____ *181*
Fig. 63: NDVI e Máscara de Vegetação de L8 dos pegmatitos de Naipa e Muiane. *183*
Fig. 64: NDVI de L8 dos pegmatitos, a)1. Naipa e Muiane e a)2. Namobene e Nassupe, entre outros _____ *184*
Fig. 65: NDVI da imagem Landsat 5 TM (1989) nos pegmatitos de Morrua e Marropino. _____ *185*
Fig. 66: NDVI da imagem Landsat 5 TM (1989) nos pegmatitos de Nuaparra, Naipa e Muiane. _____ *185*

Fig. 67:Combinação de bandas 2-1-13 (ASTER, 2005): pegmatitos de Muiane e Naipa; as áreas com mineralizações em lítio aparecem a amarelo carregado; os corpos de água aparecem a preto. _____ *188*
Fig. 68: Combinação (5-1-14) das bandas do sensor ASTER, 2005; detalhe de pegmatitos de Naipa e Muiane; as mineralizações de lítio aparecem a amarelo e água a preto. 188
Fig. 69: Combinação (9-8-2) das bandas do sensor ASTER, 2005; detalhe de pegmatitos de Naipa e Muiane; as mineralizações de lítio aparecem a amarelo esbranquiçado e a água a preto _____ *189*
Fig. 70:Combinação (9-8-2) das bandas do sensor ASTER, 2005; detalhe de pegmatitos de Nuaparra I e Nuaparra II; as mineralizações de lítio aparecem a amarelo esbranquiçado e a água a preto. _____ *190*
Fig. 71: Combinação RGB (3-2-7) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Naipa e Muiane. _____ *191*
Fig. 72: Combinação RGB (3-2-7) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Muiane II e Namobene. _____ *192*
Fig. 73: Combinação RGB (3-2-7) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Morrua e Marropino. _____ *193*
Fig. 74: Combinação RGB (2-3-4) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Muiane II e Namobene. _____ *194*
Fig. 75: Combinação RGB (2-3-4) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Morrua e Marropino. _____ *195*
Fig. 76: Combinação RGB (2-3-4) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Naipa e Muiane. _____ *196*
Fig. 77: Combinação RGB (7-6-3) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Muiane II e Namobene. _____ *197*
Fig. 78:Combinação RGB (7-6-3) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Morrua e Marropino. _____ *197*
Fig. 79: Combinação RGB (7-2-6) da imagem Landsat 5 pegmatitos de Morrua e Marropino. _____ *198*
Fig. 80: Combinação RGB (7-2-6) da imagem Landsat 5 pegmatitos de Naipa e Muiane. _____ *199*
Fig. 81:Combinação RGB (3-2-7) da imagem Landsat 5; pegmatitos de Morrua e Marropino. _____ *199*
Fig. 82:Combinação RGB (3-2-7) da imagem Landsat 5; pegmatitos de Naipa e Muiane. _____ *200*

Fig. 83: Combinação RGB (3-11-12) da imagem Sentinel 2 para pegmatitos de Namobene, Nassupe e Muiane II. _____ 201
Fig. 84:Combinação RGB (3-2-12) da imagem Sentinel 2, para pegmatitos de Naipa e Muiane. _____ 202
Fig. 85:Combinação RGB (3-2-12) da imagem Sentinel 2 para pegmatitos de Muiane II e Namobene. _____ 202
Fig. 86: Combinação RGB (3-2-12) da imagem Sentinel 2 para pegmatitos de Nuaparra I e Nuaparra II._____ 203
Fig. 87: Razão (3/5) do sensor OLI (2018) para prospeção de minerais de lítio (espodumenas); a) pegmatitos de Nuaparra I e II, ilustrando respostas negativas; b) pegmatitos de Muiane e Naipa; as mineralizações de lítio aparecem com sinais positivos. _____ 208
Fig. 88: Razão (3/5) do sensor OLI (2018) para prospeção de minerais de lítio (espodumenas); a) pegmatitos de Marropino; b) pegmatito de Morrua; as mineralizações de lítio aparecem com sinais positivos._____ 208
Fig. 89: Razão (3/5) do sensor OLI (2018) para prospeção de minerais de lítio (espodumenas); respostas em outros pegmatitos; a) Pegmatitos de Namobene e Nassupe; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara, muito intensa; a1) detalhe do pegmatito de Namobene; a2) detalhe do pegmatito de Nassupe; b) e b1) Pegmatito de Muiane II. _____ 209
Fig. 90: Razão (3/11) satélite Landsat 8 (2018) para prospeção de minerais de lítio (espodumenas); a) pegmatitos de Nuaparra I e II ilustrando respostas são negativas; b) pegmatitos de Muiane e Naipa; as mineralizações de lítio aparecem com sinais positivos. _____ 210
Fig. 91: Razão (3/11) do satélite Landsat 8 (2018) para prospeção de minerais de lítio (espodumenas); a) pegmatitos de Marropino; b) pegmatito de Morrua; as mineralizações de lítio aparecem com sinais positivos._____ 210
Fig. 92: Proposta da Razão (3/11) do satélite Landsat 8 (2018) para prospeção de minerais de lítio (espodumenas); respostas em outros pegmatitos; a) Pegmatitos de Namobene e Nassupe; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara, muito intensa; a1) detalhe do pegmatito de Namobene; a2) detalhe do pegmatito de Nassupe; b) e b1) Pegmatito de Muiane. _____ 211
Fig. 93: Razão (1/3) do sensor ASTER (2005) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); a) Pegmatitos de Nuaparra I e II; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara não muito intensa; b) Pegmatitos de Naipa e Muiane, ricos em

mineralizações de lítio; os pegmatitos aparecem a cinza-claro e os corpos de água em branco. _____ 213
Fig. 94: Imagem satélite identificando os pegmatitos de Nuaparra I e II, Naipa e Muiane. _____ 213
Fig. 95: Razão (1/3) do sensor ASTER (2005) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); a) Pegmatitos de Morrua; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara; b) Pegmatitos de Marropino ricos em mineralizações de lítio. _____ 214
Fig. 96: Imagem satélite identificando os pegmatitos de Marropino e Morrua._____ 214
Fig. 97: "Density slice" da razão (1,3) para prospeção de espodumenas do sensor ASTER; a) Pegmatito de Marropino; b) pegmatito de Morrua; c) Pegmatitos de Muiane e Naipa; a1) histograma da imagem ASTER (13) - pegmatitos de Morrua e Marropino; c1) histograma da imagem ASTER (13) - pegmatitos de Muiane e Naipa._____ 215
Fig.98:Razão (1/6) do sensor ASTER (2005) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); a) Pegmatitos de Nuaparra I e II; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara, não muito intensa; b) Pegmatitos de Naipa e Muiane, ricos em mineralizações de lítio; os pegmatitos aparecem a cinza-claro e os corpos de água a branco _____ 216
Fig.99: Razão (1/6) do sensor ASTER (2005) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); a) Pegmatitos de Morrua, as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara muito intensa; b) Pegmatitos Marropino, ricos em mineralizações de lítio; os pegmatitos aparecem a cinza-claro e os corpos de água a preto. _____ 217
Fig.100: Razão (2/4) do sensor TM (1989) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); a) Pegmatitos de Morrua; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara muito intensa; b) Pegmatitos de Marropino, ricos em mineralizações de lítio; os pegmatitos aparecem a cinza-claro e os corpos de água a preto. _____ 218
Fig. 101: Razão (7/6) do sensor TM (1989) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); a) Pegmatitos de Morrua; as mineralizações de lítio aparecem aa cor cinza-clara muito intensa; b) Pegmatitos de Marropino, ricos em mineralizações de lítio; os pegmatitos aparecem a cinza-claro e os corpos de água em preto. _____ 218
Fig. 102: Razão (3/8) do sensor MSI (2019) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); Pegmatitos de Muiane e Naipa; as mineralizações de lítio aparecem aa cor cinza-claro muito intensa, apresentando um sinal positivo; Pegmatitos de Nuaparra I e Nuaparra II; as mineralizações não são visíveis apresentando um sinal negativo. _ 219
Fig. 103: Razão (3/8) do sensor MSI (2019) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); Pegmatitos de Muiane II, Namobene e Nassupe; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara muito intensa apresentando um sinal positivo. ___ 220

Fig. 104: Razão (3/8) do sensor MSI (2019) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); Pegmatitos de Morrua e Marropino; ambas as minas apresentam mineralizações de lítio e aparecem a cor cinza-clara muito intensa apresentando um sinal positivo. _____ *220*

Fig. 105: Razão (2/11) do sensor MSI (2019) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); pegmatitos de Muiane II, Namobene e Nassupe; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara muito intensa apresentando um sinal positivo. ___ *221*

Fig. 106: Razão (2/11) do sensor MSI (2019) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); Pegmatitos de Muiane e Naipa; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara muito intensa apresentando um sinal positivo; pegmatitos de Nuaparra I e Nuaparra II; as mineralizações são pouco visíveis, principalmente Nuaparra II, apresentando um sinal positivo _____ *221*

Fig 107: Assinaturas espectrais das amostras de minerais analisados (a), com as respetivas curvas de refletância com o continuo removido (b), produzidas a partir do ENVI. _____ *225*

Fig 108: Espectro de refletância da amostra com o código PN1(2), onde a) o espectro normal da turmalina; b) espectro da turmalina com base na linha de base (basiline adaptive); c) amostra de mão da turmalina preta. _____ *226*

Fig 109: Espectro de refletância da amostra com o código LN1, onde a) o espectro normal da lepidolite; b) espectro da lepidolite com base na linha de base (basiline adaptive); c) amostra de mão da lepidolite; d) linha de remoção do Continuo da lepidolite, extraído na biblioteca da USGS (Clark et al., 2007) _____ *227*

Fig 110:Espectro de refletância da amostra com o código KN, onde a) o espectro normal da cunzite; b) espectro da cunzite com base na linha de base (basiline adaptive); c) amostra de mão da cunzite, d) Espetro da espodumena, com a Linha de remoção do Continuo, extraído na biblioteca espectral da USGS. _____ *228*

Fig 111: Espectro de refletância da amostra com o código MM, onde a)1 o espectro normal da moscovite; a)2 espectro da moscovite com base na linha de base (basiline adaptive); b) amostra de mão da moscovite; c) Linha de remoção do Continuo da moscovite, extraído na biblioteca da USGS (Kokaly; et al., 2017) _____ *229*

Fig 112:Espectro de refletância da amostra com o código FM1, onde a)1 o espectro normal da albite; a)2 espectro da albite com base na linha de base (basiline adaptive); b) amostra de mão da albite. _____ *230*

Fig 113: Espectro de refletância da amostra com o código FM2, onde a)1 o espectro normal da albite; a)2 espectro da albite com base na linha de base (basiline adaptive); b) amostra de mão da albite. _____ *231*

Fig 114: Espectro de refletância da amostra com o código FM4, onde a)1 o espectro normal da albite; a)2 espectro da albite com base na linha de base (basiline adaptive); b) amostra de mão da albite _____ *232*
Fig. 115: Classificação da imagem Sentinel 2 A (SVM) no pegmatito de Muiane e Naipa _____ *238*
Fig. 116: Classificação da imagem Sentinel 2 A (Maxver) no pegmatito de Muiane e Naipa. _____ *238*
Fig. 117: Classificação da imagem Sentinel 2 (2019) no pegmatito de Muiane (zona de treino); a) resultado usando o algoritmo MinD; a1) integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa; b) resultado usando o algoritmo SAM; b1) integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa. _____ *240*
*Fig 118: Curva espetral das amostras retiradas em Muiane e Naipa; imagem Sentinel 2 (2019).*_____ *241*
Fig 119: Curva espetral dos pegmatitos de Muiane e Naipa; imagem Sentinel 2 (2019). _____ *242*
Fig. 120: Classificação da imagem Landsat 8 OLI (2019) no pegmatito de Muiane (zona de treino); a) resultado usando o algoritmo SAM; a1) integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa; b) resultado usando o algoritmo MinD; b1) integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa. _____ *247*
*Fig 121: Curva espetral das amostras retiradas em Muiane e Naipa, imagem Landsat 8 OLI (2019).*_____ *248*
Fig 122: Curva espetral dos pegmatitos de Muiane e Naipa, imagem Landsat 8 OLI (2019). _____ *249*
*Fig. 123: Classificação da imagem Landsat 8 OLI (2019) no pegmatito de Marropino; a) resultado usando o algoritmo MinD; a1) integração da litologia e pegmatitos de Marropino; b) resultado usando o algoritmo SAM; b1) integração da litologia e pegmatitos de Marropino.*_____ *254*
*Fig 124: Histograma espectral das classes dos pegmatitos de Muiane com base nas imagens ASTER.*_____ *259*
Fig 125: Assinaturas espectrais dos pegmatitos de Muiane e Naipa (ASTER) extraído de (Gemusse et al., 2018) _____ *260*
Fig. 126: Classificação da imagem ASTER (2005) no pegmatito de Marropino e Morrua; a) resultado usando o algoritmo SAM; a1) integração da litologia e pegmatitos de Marropino; b) resultado usando o algoritmo SAM; b1) integração da litologia e pegmatitos de Morrua. _____ *263*

Fig. 127: Classificação da imagem ASTER (2005) no pegmatito de Marropino e Morrua; a) resultado usando o algoritmo MinD; a1) integração da litologia e pegmatitos de Marropino; b) resultado usando o algoritmo MinD; b1) integração da litologia e pegmatitos de Morrua. _____ *264*

Fig. 128: Classificação da imagem ASTER (2005) nos pegmatitos de Muiane e Naipa; a) resultado usando o algoritmo MinD; a1) integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa; b) resultado usando o algoritmo SAM; b1) integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa. _____ *265*

*Fig 129:Assinatura espetral das amostras retiradas em Muiane e Naipa, imagem ASTER (2005).*_____ *266*

Fig 130:Assinatura espetral dos pegmatitos de Muiane e Naipa, imagem ASTER (2005). _____ *267*

*Fig. 131: Classificação da imagem ASTER (2005) nos pegmatitos de Muiane e Naipa, resultado do algoritmo SVM.*_____ *268*

Fig. 132: a) Composição de bandas R6G5B4 e b) Classificação e segmentação por multiresulução nos parâmetros da imagem a partir do ECOGNITION _____ *271*

Fig. 133: Mapa de classificação, a) GMO Max Entropy Algorithm; b) CART Algorithm272

Fig. 134: Relação entre as estruturas metalogenéticas de Alto Ligonha e Ocorrências de Lítio; a) Pegmatitos de Marropino e Morrua; b) Pegmatitos de Muiane e Naipa; c) Pegmatitos de Nassupe e Namobene; d) Pegmatitos de Nuaparra I e Nuaparra II. Fonte: adaptado de (Aquater, 1983; Gomes et al., 2008) _____ *274*

Índice de Tabelas

Tabela 1: Principais caraterísticas físicas e químicas do lítio. Fonte: (Garrido, 1992). 45
Tabela 2: Minerais de lítio. _____ 51
Tabela 3: Percentagem de Lítio em depósitos de salmouras, _____ 57
Tabela 4: Exemplo da Estrutura da Biblioteca Espectral (Muiane)_____ 97
Tabela 5: Exemplo da Estrutura da Biblioteca Espectral (Muiane)_____ 99
Tabela 6: Exemplo da Estrutura da Biblioteca Espectral (Muiane)_____ 100
Tabela 7: Exemplo da Estrutura da Biblioteca Espectral (Naipa). _____ 101
Tabela 8: Medidas de concordância da qualidade da classificação dos valores Kappa (adaptado de (Landis and Koch, 1977b)_____ 108
Tabela 9: Representação matemática de uma matriz de confusão _____ 109
Tabela 10: Lista dos pegmatitos estudados nesse trabalho_____ 112
Tabela 11: Reservas prognósticas de feldspatos nos jazigos de Nuaparra I e Nuaparra II. _____ 123
Tabela 12: Lepidolite (serie entre Polilitionite e Trilitionite) adaptado de (Dana, 2008; Deer et al., 2010; Lima et al., 2010; Klein et al., 2012) _____ 124
Tabela 13: Caraterísticas Microscópicas óticas da Ortóclase, adaptado de (Dana, 2008; Deer et al., 2010; Klein et al., 2012) _____ 124
Tabela 14: Resultados da análise EDS da amostra LN1._____ 133
Tabela 15: Composição molecular da lepidolite (peso molecular 388,30 gm) e moscovite (peso molecular 398.71 gm) _____ 134
Tabela 16: Resultados da análise EDS da amostra PNC. _____ 134
Tabela 17: Resultados da análise EDS da amostra PNG. _____ 136
Tabela 18: Resultados da análise EDS da amostra PM1.1._____ 136
Tabela 19: Zonamento dos pegmatitos de Alto Ligonha proposto por Barros (Barros and Vicente, 1963; Council for Geoscience, 2007)._____ 142
Tabela 20: Resultados gerais das análises por FRX portátil. Amostras de Muiane (M) e Naipa (N). _____ 144
Tabela 21: Relação K/Rb (amostragem). _____ 149
Tabela 22: Relação K/Rb das amostras de Naipa e Muiane._____ 150
Tabela 23: Fontes das imagens._____ 155
Tabela 24: Características técnicas dos sensores remotos utilizados. Fonte: (Sabins, 1999; Roy et al., 2014; SUHET, 2015) _____ 156

Tabela 25: ACP para prospeção de minerais de lítio. Fonte: (Cardoso-Fernandes et al., 2019; Santos et al., 2019). _____ *161*
Tabela 26: ACP de bandas Landsat 5 (1989) (1,2,4,6) para pegmatitos de Marropino.162
Tabela 27: ACP de bandas Landsat 5 TM (2,4) para pegmatitos de Muiane, Naipa, Morrua e Marropino. _____ *163*
Tabela 28: ACP de bandas Landsat 8 (2018) (2,3,5,11) para pegmatitos de Marropino. _____ *166*
Tabela 29: ACP de bandas Landsat 8 (2018) (3,5) para pegmatitos de Muiane, Naipa, Morrua e Marropino. _____ *171*
Tabela 30: ACP de bandas ASTER (1,3) para Muiane e Naipa. _____ *171*
Tabela 31: ACP de bandas ASTER (1,3) para pegmatitos de Marropino. _____ *172*
Tabela 32: ACP de bandas ASTER (1,3,11,14) para Muiane e Naipa. _____ *173*
Tabela 33: ACP de bandas Sentinel 2 A (38) para Muiane e Naipa. _____ *175*
Tabela 34: ACP de bandas Sentinel 2 A (38) para Muiane II. _____ *175*
Tabela 35: ACP para prospeção de outros minerais. _____ *177*
Tabela 36: ACP de bandas ASTER (1,4,6,7) para Marropino e Morrua. _____ *178*
Tabela 37: ACP de bandas Landsat 8 (2,5,6,7) para Muiane e Naipa. _____ *179*
Tabela 38: Índices minerais para o sensor ASTER, satélite Landsat, usando combinações de bandas. _____ *186*
Tabela 39: Índices minerais para os Satélites Landsat 5 e 8, Terra-ASTER e Sentinel 2. _____ *205*
Tabela 40: Composições químicas dos principais minerais caracterizados espectralmente. _____ *224*
Tabela 41: Principais bandas de absorção relacionadas à presença de iões ou moléculas em minerais _____ *224*
Tabela 42: Valores de precisão global, índice Kappa da imagem Sentinel 2 A (Pegmatitos de Muiane e Naipa). _____ *235*
Tabela 43: Matriz de confusão para a imagem Sentinel 2 A (SVM) (Pegmatitos de Muiane e Naipa). _____ *236*
Tabela 44: Matriz de confusão para a imagem Sentinel 2 A (Maximoverssimelhança)237
Tabela 45: Matriz de confusão para a imagem Sentinel 2 A (Maxima verssimelhança)237
Tabela 46: Matriz de confusão para a imagem Sentinel 2 A (MinD) (Pegmatitos de Muiane e Naipa). _____ *239*
Tabela 47: Matriz de confusão para a imagem Sentinel 2 A (SAM) (Pegmatitos de Muiane e Naipa). _____ *239*

Tabela 48: Valores de precisão global, índice Kappa da imagem Landsat 8 OLI (Pegmatitos de Muiane e Naipa). _____ *244*
Tabela 49: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 OLI (SAM) (Pegmatitos de Muiane e Naipa). _____ *244*
Tabela 50: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 OLI (MinD) (Pegmatitos de Muiane e Naipa). _____ *244*
Tabela 51:Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 (SVM) (Pegmatitos de Muiane e Naipa). _____ *245*
Tabela 52: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 (Maxver) (Pegmatitos de Muiane e Naipa). _____ *246*
*Tabela 53: Valores de precisão global, índice Kappa da imagem Landsat 8 OLI (Pegmatito de Marropino).*_____ *250*
Tabela 54: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 OLI (MinD) (Pegmatitos de Marropino). _____ *251*
Tabela 55: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 OLI (SAM) (Pegmatitos de Marropino). _____ *251*
Tabela 56: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 (SVM) (Pegmatitos de Marropino). _____ *252*
Tabela 57: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 (Maxver) (Pegmatitos de Marropino). _____ *253*
*Tabela 58: Valores de precisão global, índice Kappa da imagem ASTER (Pegmatito de Muiane e Naipa).*_____ *255*
Tabela 59: Matriz de confusão para a imagem ASTER (SAM) (Pegmatitos de Muiane e Naipa). _____ *256*
Tabela 60: Matriz de confusão para a imagem ASTER (MinD) (Pegmatitos de Muiane e Naipa). _____ *257*
Tabela 61: Matriz de confusão para a imagem ASTER (Maxver). Pegmatitos de Muiane e Naipa. _____ *258*
Tabela 62: Matriz de confusão para a imagem ASTER (SVM) (Pegmatitos de Muiane e Naipa). _____ *259*
Tabela 63: Valores de precisão global, índice Kappa da imagem ASTER (Pegmatito de Marropino). _____ *261*
*Tabela 64: Matriz de confusão para a imagem ASTER (SAM) (Pegmatitos de Marropino e Morrua).*_____ *261*
*Tabela 65: Matriz de confusão para a imagem ASTER (MinD) (Pegmatitos de Marropino e Morrua).*_____ *262*

Tabela 66: Matriz de Confusão OBIA, Muiane-Naipa (Ecognition)_____ 270
Tabela 67: Matriz de Confusão OBIA, Muiane-Naipa (Ecognition)_____ 270
Tabela 68: Matriz de Confusão (CART Algorithm, Muiane-Naipa)_____ 271
Tabela 69: Matriz de confusão (GMO Max Entropy Algorithm, Muiane-Naipa) ____ 271

Abreviaturas e Acrónimos

Å	Angström – unidade de medida de comprimento que se relaciona com o metro através da relação: 1 Å = 10^{-10} m
ANN	Redes Neuronais Artificiais
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BCI	Banco Comercial de Investimento
BRGM	Bureau de Recherche Geólogigues et Miniéres
CGS	Council for Geoscience
CPU	Unidade Central de Processamento/ Central Processing Unit
DNG	Direção Nacional de Geologia
DOS1	Dark Object Subtraction 1
ENVI	Environment for Visualinzing Image (Software)
EPSG	European Petroleum Survey. Group
EOS	Earth Observing System
FM	Feldspatos de Muiane
GSD	Ground Sample Distance/ Distância de Amostragem no Solo
GDEM	Global digital elevation model
GPU	Graphics Processing Unit/ Unidade de Processamento Gráfico
HYMAP	Hyperspectral Mapping sensor of HyVista
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellit
LCT	Lítio, Césio, e Tântalo
LN	Lepidolites de Naipa
LREE	Elementos de Terras Raras Leves
LPDAAC	Land Processes Distributed Active Archive Center
MAE	Ministério de Administração Estatal
Maxver	Máxima verossimilhança
MinD	Distância Minima
MMCP	Portal do Cadastro Mineiro de Moçambique
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
MSI	Multiespectral Instrument
MSS	Multspectral scâner systems
NASA	National Aeronautics and Administration Space Agency
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NYF	Nióbio, ítrio e fluor
OLI	Operational Land Imager

RGB	Red, Green, Blue
SAM	Spectral Angle Mapper
SGMM	Serviços Geológicos Mineiros de Moçambique
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SNAP	Sentinel Application Platform
SWIR	Shortwave infrared
TIR	Thermal Infrared
TM	Tematic Mapper
u.m. a	Unidade de Massa Atômica (corresponde a 1/12 da massa do átomo de carbono -12)
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transversal de Mercator
VNIR	Visible and Near Infrared

Este documento foi redigido segundo o Novo Acordo Ortográfico

O sistema de referências bibliográficas e citações obedece às normas Clays and Clays Minerals (2014)

Capítulo I

I. Introdução

1.1. Origem e Justificativa

As principais justificativas deste trabalho de investigação baseiam-se na escassez bibliográfica do conhecimento em deteção remota aplicada em prospeção de minerais em Moçambique, principalmente na região de estudo (Alto Ligonha), e na demanda crescente do lítio no mundo, impulsionada pela sua utilização como elemento fundamental na produção de baterias para os ascendentes mercados dos telefones móveis e outros aparelhos eletrónicos portáteis, armazenamento de energias renováveis como eólica ou fotovoltaica e, principalmente, para o potencial mercado dos veículos elétricos e híbridos, e, futuramente, como combustível em reatores de fusão nuclear.

Caso estas aplicações se venham a concretizar a nível mundial, tal como é esperado, as atuais fontes e reservas de lítio rapidamente se tornarão insuficientes. Na expectativa de se alcançar um método para evidenciar os minerais de lítio nos pegmatitos de Alto Ligonha, nomeadamente, a partir dos seus afloramentos, mas também das escombreiras resultantes da sua exploração. Combinaram-se diferentes técnicas de deteção remota, com recurso a imagens do satélite Land Remote Sensing Satellite (Landsat), Sentinel 2, TERRA e do sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) e imagens disponibilizadas pelo Google Earth Pro e Google Earth Engine, com levantamentos cartográficos de pormenor de alvos revelados por análise remota, e todos os mapas são em coordenadas geográficas e com o DATUM WGS84.

A manipulação das imagens de satélite foi operada através do software QGIS, Sentinel Application Platform (SNAP), ArcGIS, Environment for Visualizing Images (ENVI), e Ecognition 8.0.

1.2. Problematização

A deteção remota pode modificar profundamente as condições técnicas de exploração dos recursos mineiros de qualquer país, inclusive Moçambique, um país com alto défice de investimento próprio, dependendo quase sempre de terceiros no que concerne à cartografia geológica. Entretanto, as técnicas propostas neste trabalho são meramente gratuitas, tornando-se, assim, uma grande vantagem na prospeção geológica de qualquer recurso geológico-mineiro que, dado a sua génese, permite a visualização a partir de imagens de satélites. Sendo assim, é levantada a seguinte questão: até que ponto a deteção remota contribui na identificação de informações geológicas e mineralógicas? A saber:

- na identificação de novas e antigas ocorrências de minerais, principalmente os de lítio;
- no mapeamento geológico de diferentes depósitos minerais;
- no reconhecimento de rochas ou minerais alterados;

  no fomento da mineração de minerais de lítio e outros em Moçambique.

As seguintes respostas apresentam-se como as mais óbvias:

- ✓ na medida em que a deteção remota é considerada uma área tecnológica que se tornou muito significativa nos levantamentos de dados geológicos e mineralógicos. No entanto, as aplicações são limitadas, devido à cobertura vegetal e de solos sobre alguns alvos (pegmatitos), minerais e rochas;
- ✓ a não destruição da rocha encaixante, minerais e vegetação na recolha dos dados torna a técnica mais sustentável e eficaz para as geociências, contribuindo na diminuição de poluentes atmosféricos. O tempo e a eficiência de custos dos dados (imagens) usados neste trabalho são considerados a mais-valia para a realidade de Moçambique;
- ✓ na medida em que os investimentos em Moçambique na área de Mineralogia Industrial tiverem um incremento na procura de minerais de lítio.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Esta tese tem como objetivo principal contribuir na prospeção geológica dos filões pegmatíticos com minerais de lítio, através da utilização de técnicas de deteção remota, identificando assinaturas espetrais através do uso de imagens do sensor ASTER, Landsat Tematic Mapper (TM) e Operational Land Imager (OLI), e Sentinel 2 Multiespectral Instrument (MSI), que possam indicar a presença de pegmatitos mineralizados.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar a mineralogia do lítio da rocha pegmatítica;
- Caracterizar as amostras de campo, a partir de uma análise quali-quantitativa de dados de espectroscopia de refletância;
- Sistematizar os principais depósitos existentes na área em estudo e suas mineralizações;
- Integrar imagens de satélites para a identificação dos minerais de lítio;
- Validar no terreno os minerais de lítio que ocorrem na região de Alto Ligonha (pegmatitos de Muiane e Naípa).

1.4. Relevância da tese

Com o tema referente à Prospeção de Lítio em Moçambique, concretamente nas localidades de Muaine, Naipa, e Marropino, Morrua, Nuaparra, todos na Província[1] da Zambézia, pretende-se contribuir na informação científica e económica que pode ser usada para novas prospeções e pesquisas geológicas na área em estudo através de:

- conhecimento geológico e estrutural da região;
- fomento da mineração de lítio;

[1] *Divisão territorial administrativa de nível superior*

- validação das técnicas de deteção remota de zonas de ocorrência de minerais de lítio em Moçambique;
- caracterização geoquímica dos depósitos não estudados anteriormente.

1.5. Aspetos físico-geográficos

A área de estudo localiza-se no nordeste da província da Zambézia, parte do distrito de Gilé. O distrito de Gilé situa-se a Norte da Cidade de Quelimane, confinando a Norte com o Distrito de Murrupula, Província de Nampula, através do rio Ligonha, a Sul com o Distrito de Pebane, a Este com o Distrito de Moma, da Província de Nampula, através do Posto Administrativo de Chalaua, a Oeste com o Distrito de Alto Molocué e a Sudoeste com o Distrito do Ile (MAE, 2005; Council for Geoscience, 2007) (Fig. 1). O distrito de Gilé está dividido em dois postos administrativos (Alto Ligonha e Gilé), compostos pelas seguintes localidades:

- Posto Administrativo de Alto Ligonha: Alto Ligonha, Inxotcha, Mirali, Muiane, Namihali, Namireco, Pury;
- Posto Administrativo de Gilé: Gilé, Kaiane, Mamala, Manhope, Moniea, Naheche, Uape.

De acordo com o conhecimento existente, atualmente o maior e mais importante campo pegmatítico de Moçambique é o da região do Alto Ligonha, estendendo-se ao longo de 170 km, desde Mocubela, a sul, até ao Alto Ligonha, a norte (Marques, 2017). Outros pegmatitos menos significativos ocorrem ao redor deste cinturão, numa área de aproximadamente 200 km de raio da cidade de Alto Ligonha (Cronwright, 2005a). O Posto administrativo de Alto Ligonha dista 408 Km da cidade de Quelimane.

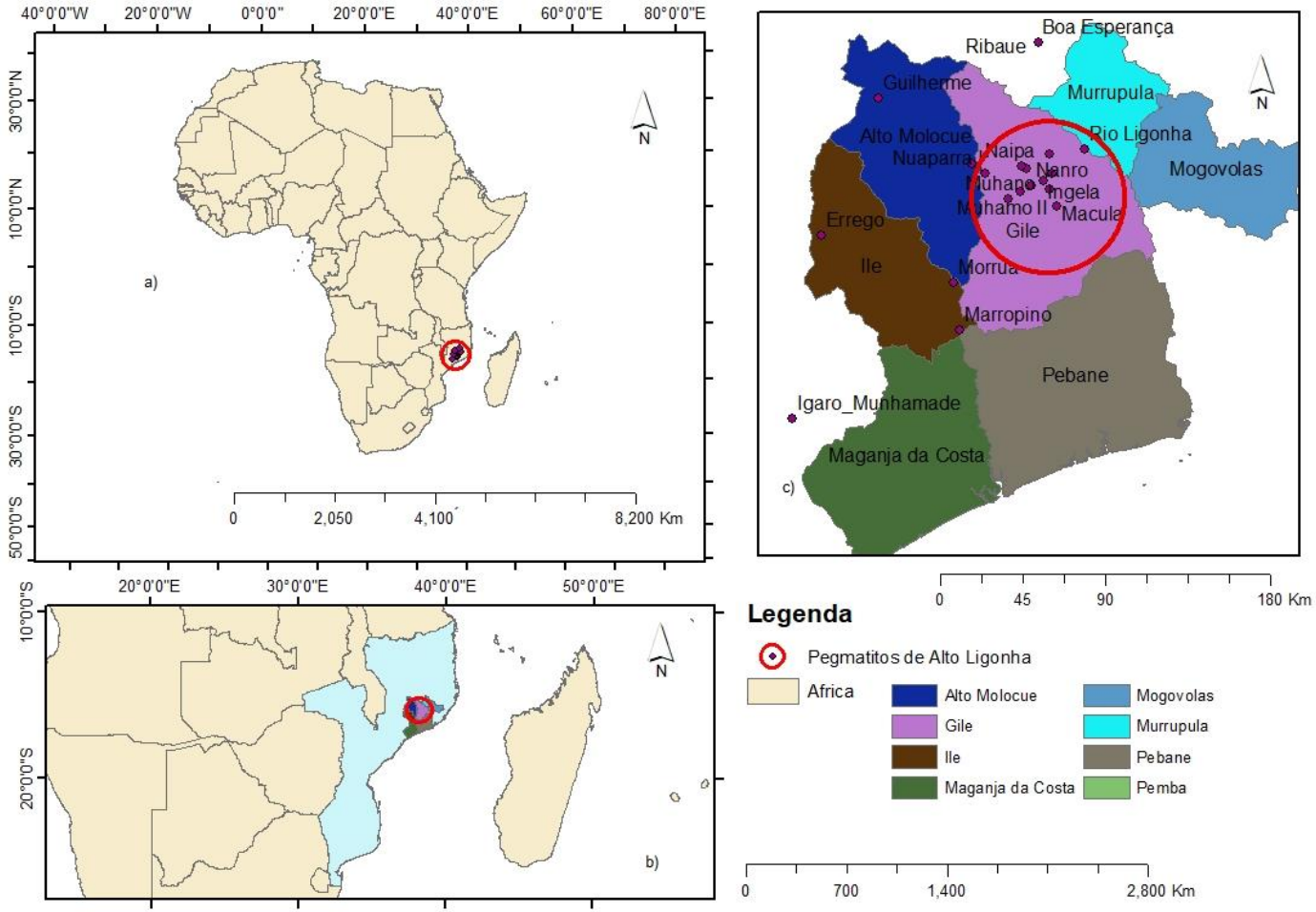


Fig. 1: Mapa de Localização da área de estudo: a) Moçambique inserido no Continente africano; b) limites de Moçambique e, c) Pegmatitos estudados, localizados no distrito de Gilé.

1.5.1. Topografia da área de estudo

De modo regional, a topografia do nordeste de Moçambique é suavemente inclinada, abrangida por cerca de duas zonas altimétricas, nomeadamente:

- a zona planáltica baixa (400 m – 700 m), que ocupa a maior porção do distrito de Alto Molocué, norte de Gilé;
- a zona planáltica média (700 m – 1000 m), e por uma pequena porção que atinge altitudes superiores a 1000 m denominada zona altiplanáltica, ao longo da direção E-W. A área de estudo situa-se numa zona relativamente baixa, onde corre o rio Metuce, onde também se encontram pequenos afluentes de alguns rios menores que ocorrem em toda a área de Gilé (Fig. 2).

Portanto, as regiões mais baixas encontram-se no Sul e Sudeste da região, isto porque todos os rios desaguam no Oceano Índico. As elevações estão associadas a alguns corpos intrusivos como granitos que ocorrem em larga escala nesta região. A sua estrutura geomorfológica resulta de grandes movimentos que envolvem a geodinâmica interna e externa, deste o Hadeano até o Fanerozóico (Boleo, 1950; Dos Muchangos, 1999). Sob o ponto de vista cronológico, distinguem-se em Moçambique, essencialmente três fases principais na formação do relevo: Pré-câmbrico, Karroo e Pós-Karroo (Dos Muchangos, 1999). Esta região compreende planaltos baixos, médios e sub-planaltos que abrangem altitudes que variam de 200 a 1000 m acima do nível médio do mar (MAE, 2005). As imagens encontram-se com o Datum (WGS_1984_UTM_Zone_37S, 32737 EPSG.

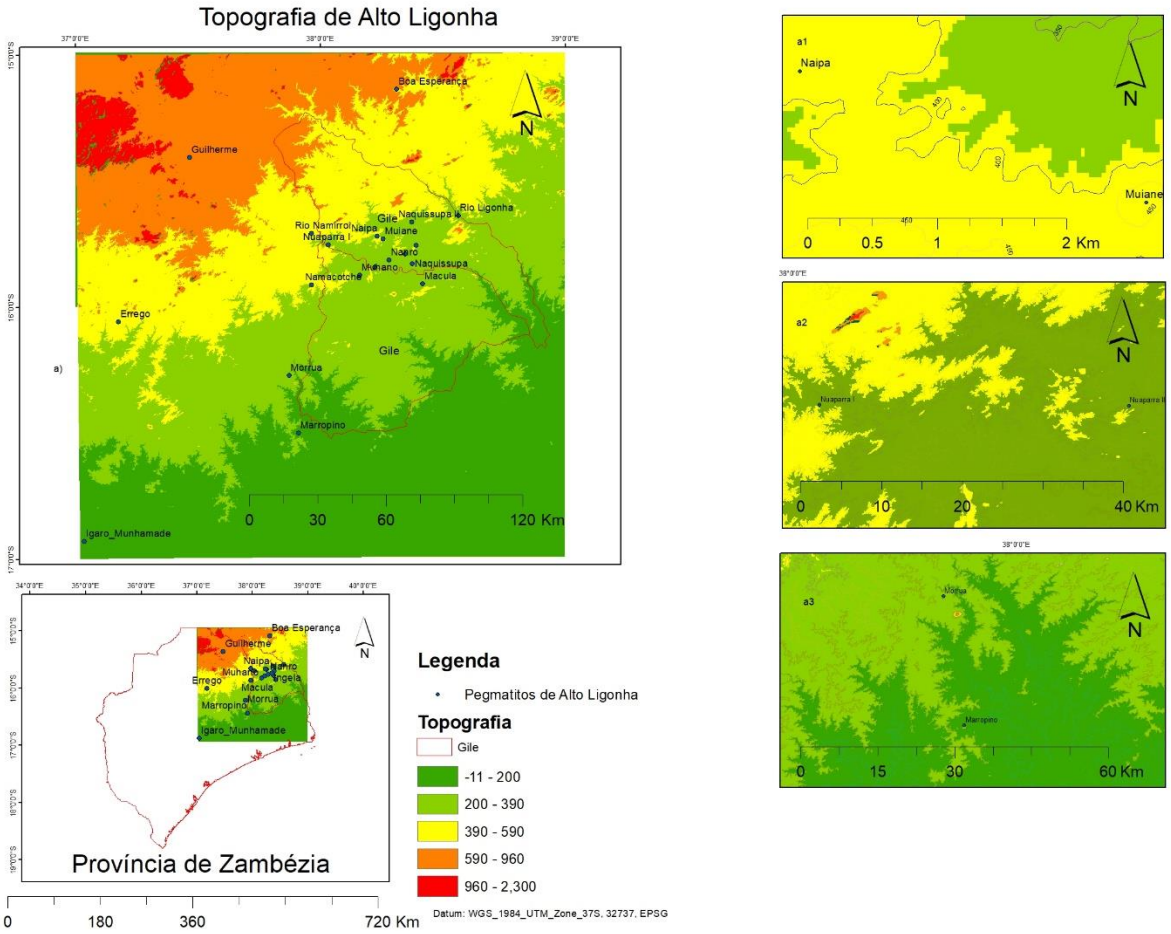


Fig. 2: Topografia de Alto Ligonha: a) pegmatitos de Alto Ligonha; a1) Topografia de Pegmatitos de Muiane e Naipa; a2) Topografia de pegmatitos de Nuaparra 1 e 2; a3) Topografia dos pegmatitos de Morrua e Marropino

1.5.2. Clima

A região de trabalho é influenciada pelo clima de tipo tropical chuvoso de savana onde as precipitações médias anuais são acima dos 800 mm, chegando, na maioria dos casos, a 1.200 ou mesmo 1.400 mm, concentrando-se no período compreendido entre novembro e finais de março, podendo, localmente, estender-se até maio. A evapotranspiração potencial regista valores médios na ordem dos 1.000 a 1.400 mm e as temperaturas médias anuais variam de 24º a 26ºC, facto que possibilita e encoraja a prática de agricultura de sequeiro com apenas uma colheita sem riscos significativos de perda das culturas devido ao défice hídrico (MAE, 2005; Diop *et al.*, 2016).

1.5.3. Hidrografia

A rede de drenagem é dominada essencialmente pela bacia do rio Metuce e, marginalmente, a sul e sudoeste pelos afluentes da margem esquerda do rio Namirroi. Podem distinguir-se fundamentalmente dois principais tipos de drenagens:

- uma rede de drenagem larga, do tipo paralelo a subparalelo, com cursos de água não encaixados ou pouco encaixados e vertentes pouco inclinados. Este tipo encontra-se instalado essencialmente onde afloram rochas dos litotipos do soco e é comum em quase toda a área;
- uma rede de drenagem apertada, dendríticas, com cursos de água geralmente encaixados, meandriformes, com cabeceiras curtas e rápidas. Este tipo é característico de regiões onde afloram rochas dos litotipos de "cobertura" (MAE, 2005).

Os rios mais abrangentes em termos regionais são:

- o rio Ligonha, com 400 km de comprimento, que nasce no monte Inago a mais de 1.700 m de altitude e a sua bacia hidrográfica é de 27.726 km^2. A totalidade do seu percurso segue a configuração do relevo e serve de limite entre as províncias de Nampula e da Zambézia. Ele atravessa regiões agrárias e mineiras de grande importância económica; (MAE, 2005).

1.6. Aspetos económicos

A agricultura é a atividade dominante e envolve quase todos os agregados familiares. De um modo geral, a agricultura é praticada manualmente em pequenas explorações familiares em regime de consociação de culturas com base em variedades locais (MAE, 2005). A produção agrícola é feita predominantemente em condições de sequeiro, nem sempre bem-sucedida, uma vez que o risco de perda das colheitas é alto, dada a baixa capacidade de armazenamento de humidade no solo durante o período de crescimento das culturas. O potencial para agricultura irrigada é muito fraco.

O Distrito de Gilé é rico em jazigos minerais cujo aproveitamento ainda é insignificante. Dos jazigos existentes, encontram-se a ser explorados os seguintes minerais: tantalite, berilo, turmalina, quartzo, lepidolite, esmeralda, entre outros.

1.7. Economia, Serviços e População

O distrito dispõe de um sistema formal de crédito e já se encontra representada em Gilé uma instituição bancária, o Banco Comercial e de Investimentos (BCI). Encontra-se a ser desenvolvido um projeto de viabilidade de exploração dos depósitos de tântalo, caulino e terras raras (monazite e niobiotantalite)(Cronwright, 2005b) na área de Muiane. Além disso, foi feito um investimento substancial na mineração de esmeraldas no distrito de Gilé.

A integração do distrito do Gilé nas redes de mercado é fraca, o que se fica a dever à sua pobre rede de estradas. Como resultado, a atividade comercial está limitada ao mercado local.

O Distrito de Gilé possui 222.387 habitantes, dos quais 107.420 homens e 114.967 mulheres (INE, 2017).

1.8. Historial do local de recolha de dados

Este trabalho contém dados recolhidos na Província Pegmatítica de Alto Ligonha, concretamente nas localidades de Marropino, Morrua, Nuaparra e Naipa-Muiane (vide a Fig. 3). Os pegmatitos de Muiane e Naipa representam o local de amostragem, onde se localizam as Concessões Mineiras que pertencem as empresas Euro Export, Limitada (Naipa), de capital espanhol, e da Tantalum Mineração e Prospeção, Limitada (Muiane**)**, consórcio que tem como minérios alvo a tantalite e gemas (turmalinas e variedades de berilos), uma empresa de capitais canadianos. A exploração de minerais nos pegmatitos de Muiane foi paralisada por três vezes em consequência de atos de violência. A mina encerrou pela primeira vez durante o conflito armado entre o Governo de Moçambique e o Partido RENAMO (Resistência Nacional de Moçambique) (1986-1992), e duas vezes nos últimos sete anos.

No mais recente episódio violento, em novembro de 2015, populares vandalizaram as instalações e danificaram equipamento diverso da Tantalum Mineração e Prospeção, limitada, causando o encerramento do empreendimento até aos dias de hoje. A empresa queixou-se de prejuízos na ordem dos 10 milhões de dólares, deixando 70 pessoas desempregadas.

Os outros pegmatitos estudados remotamente encontram-se nas concessões mineiras que pertencem à Empresa Highland African Mining Company, Lda. (HAMC) (pegmatito de Morrua (Fig. 3)a1 e Marropino (Fig. 3)a3. A mina do pegmatito de Marropino encontra-se encerrada desde 2013 devido ao difícil acesso para escoar a produção para o porto, tendo utilizado um longo trajeto rodoviário até ao porto de Walvis Bay, na Namíbia. Nenhum porto moçambicano está certificado para manusear produtos de Classe 7, definida em função da radioatividade do produto, e altos níveis de radiação de metal (Descrição das classes de risco de produtos perigosos, conforme definição da Organização das Nações Unidas). Um outro fator é a maior profundidade por onde se encontra o tântalo e a fraca qualidade de energia elétrica em Marropino. Esses elementos determinaram para o encerramento da mina, conduzindo ao despedimento de 377 trabalhadores que o Ministério dos Recursos Minerais e Energia de Moçambique (MIREME) tem procurado que sejam absorvidos nas concessões da empresa em Morrua e Mutala.

Os pegmatitos de Nuaparra (I-II) (Fig. 3)a4 foram igualmente analisados remotamente. Estes situam-se em ribeiras do rio Namirroi, 33 km a oeste de Muiane, e foram explorados pela

Sociedade Empresa Mineira do Alto Ligonha (EMDAL), entre1959 e 1983, extraindo berilo, topázio, columbotantalite, bismutite e quartzo rosa.

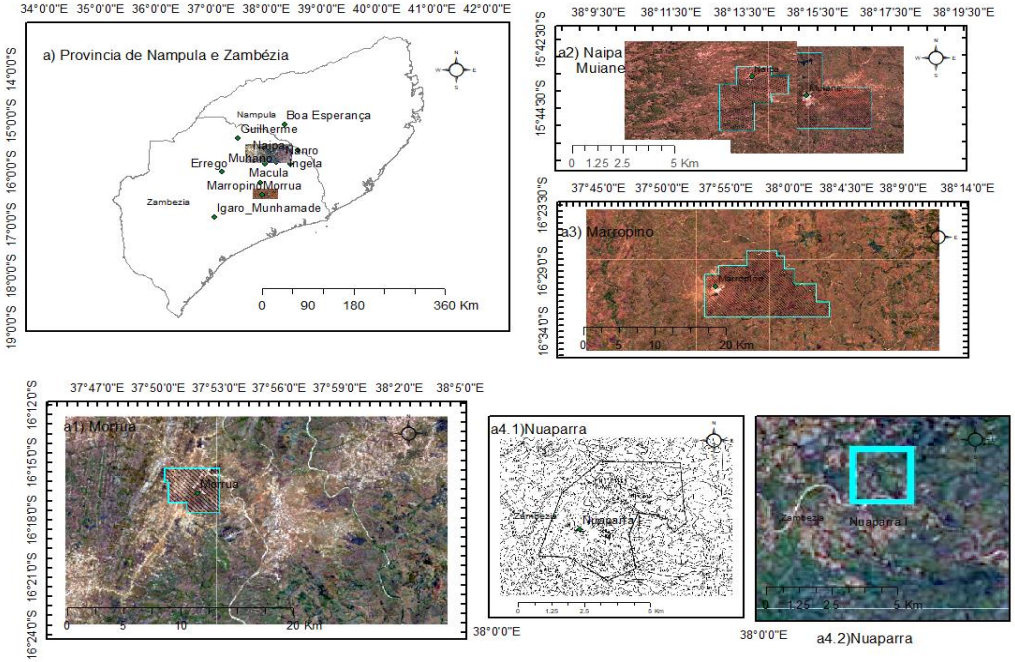


Fig. 3: Pegmatitos associados às províncias de Nampula e Zambézia.

Sendo: a) Pegmatitos da Província de Zambézia e Nampula, a1) Pegmatito de Morrua (724 C, Highland African Mining Company, Lda. (Água-marinha, Berilo, Esmeralda, Granadas, Lítio, Morganite, Tantalites, Topázio, Turmalina-Ha (15.5995)), a2) pegmatito de Naipa (Euro Export, Limitada, 437 CM-Be, Qz, Ta 3.7037 Ha) e pegmatito de Muiane (Tantalum Mineração e Prospeção Limitada, 178 CM Tantalite e Minerais Associados 15.638 Há), a3) pegmatitos de Marropino (Highland African Mining Company, Lda. Água-marinha, berilos, Esmeralda, Granadas, morganite, Tantalites, Topázio, Turmalina. Ha (11.56379)), a4.1) Mapa da área dos pegmatitos de Nuaparra I e Nuaparra II, as bolas vermelhas representam os pegmatitos de Nuaparra, antigas explorações da Inergeo (INTERGEO, 1983). a4.2) Sociedade Mineira de Nuaparra, Limitada, CM, com recursos berilo, bismuto, columbite, tantalite e topázio, com uma extensão de 514,43 hectares.

1.9. Estrutura da Tese

A prospeção de lítio em Moçambique, concretamente no distrito de Gilé, região de Alto Ligonha, é um produto meramente académico e científico, desenvolvido no âmbito do Programa Doutoral em Geociências, especialidade em Geologia Aplicada e Métodos de Prospeção, na Universidade de Porto (FCUP). Este documento encontra-se estruturado da seguinte forma:

- Capítulo II: Descrição sobre o lítio, incluindo as propriedades, aplicações produtos, fontes, e por fim minerais de lítio;
- Capítulo III: Estado de arte, onde se faz menção à deteção remota aplicada em geologia, deteção remota em Moçambique, aplicações das redes neuronais de convolução e, por fim, ás aplicações de processamento de imagens orbitais em nuvem com Google Earth Engine;
- Capítulo IV: Debruça-se sobre o enquadramento geológico, cinturão de Moçambique, geologia regional da Subprovíncia de Nampula, geologia da área de estudo, e a respetiva estratigrafia do Campo Pegmatítico de Alto Ligonha;
- Capítulo V: São detalhadas as metodologias aplicadas no trabalho (prospeção e cartografia, análises de microssonda de varrimento de algumas amostras, técnicas de difração de raios x dos caulinos, espectroscopia de refletância, aplicação de técnicas de deteção remota na geologia, como análise de componentes principais, índice de vegetação, combinação de bandas, razão de bandas, métodos de classificação supervisionada e algoritmos de machine learning);
- Capítulo VI: Petrografia, descrição macroscópica dos pegmatitos de Marropino, Muiane, Naipa, Morrua, Nuaparra e descrição microscópica ótica das amostras de Muiane e Naipa, microscopia eletrónica de varrimento e, por fim, difração de raios X;
- Capítulo VII: Geoquímica, tratando-se de fluorescência de raio X portátil, elementos principais das amostras analisadas, e relação K/Rb.
- Capítulo VIII: faz análise das aplicações de técnicas de processamento de imagens de satélites; imagens utilizadas, correção atmosférica das imagens, análises de componentes principais, índice de vegetação, combinação de

bandas, razão de bandas, caraterização espetral, métodos de classificação supervisionada e machine learning das imagens Sentinel 2 A, Landsat 8, e ASTER e por fim, relação dos pegmatitos clássicos com a ocorrência de lítio.

- As conclusões, recomendações e as referências bibliográficas.
- E, por fim, os anexos e apêndices.

Capítulo II

II. Lítio

2.1. Propriedades do lítio

O lítio é o elemento mais leve dos metais, com uma densidade de 0,535 g.cm^{-3}, cerca de metade da água (ver a Tabela 1). Não ocorre livre na natureza devido à sua alta reatividade, é o primeiro metal da tabela periódica e torna-se metálico à pressão de 450 GPa a 490 GPa.(Jeppson *et al.*, 1978; Bradley *et al.*, 2017).

Tabela 1: Principais caraterísticas físicas e químicas do lítio. Fonte: (Garrido, 1992).

Número atómico	*3*
Raio Atómico (Å)	1,56
Raio Iónico (Å)	0,68
Peso atómico (u.m.a)	6,94
Potencial iónico (V)	1,47
Potencial de ionização (V)	5,39
Densidade (g/cm^3)	0,534
Ponto de fusão (ºC)	180,5
Ponto de ebulição (ºC)	1330
Eletronegatividade	125

Na forma combinada encontra-se como componente menor em quase todas as rochas ígneas, e é também um componente de muitas salmouras naturais e de águas naturais minerais. O elemento lítio foi descoberto há 2 séculos (Wietelmann and Klett, 2018). Em 1800, o cientista brasileiro José Bonifácio de Andrada e Silva (1763–1838) descobriu dois minerais (petalite, espodumena) na Ilha Sueca Utö. Posteriormente, em 1817, o cientista sueco Johan August

Arfvedson (1792–1841), em coordenação com Jöns Jacob Berzelius (1779–1848), foram capazes de isolar um composto de sulfato que não continha nenhum dos metais alcalinos ou alcalinoterrosos conhecidos (Bradley *et al.*, 2017). O novo elemento, originalmente chamado de “lition”, foi finalmente chamado de “lítio”, derivado da palavra grega “lithos” para pedra (Wietelmann and Klett, 2018). Foi comercialmente produzido pela primeira vez em 1923 pela Metallgesellschaft AG.

2.2. Aplicações e produtos do lítio

Devido ao seu elevado calor específico, o maior de todos os sólidos, o lítio é usado em aplicações de transferência de calor e, por causa do seu elevado potencial eletroquímico, é usado como um ânodo adequado para as baterias elétricas (Boswell *et al.*, 2019).

O lítio é comercializado sob forma de três tipos de produtos: como minério em forma de concentrado, como composto químico e como lítio metal (Velho, 2005). O concentrado é aplicado nas indústrias de vidro, cerâmica e em vidrados para porcelana (Fig *4*), e nele destacam-se a petalite, a lepidolite e a ambligonite.

Segundo (Manthiram *et al.*, 2014; Deutsche Bank, 2016), o lítio é aplicado em:

- sais de lítio, particularmente o carbonato de lítio (Li_2CO_3) e o citrato de lítio, usados no tratamento da depressão bipolar, ainda que, ultimamente, se tenha estendido o seu uso ao tratamento da depressão unipolar;
- cloreto de lítio (LiCl) e o brometo de lítio (LiBr) que possuem uma elevada higroscopicidade (absorve a humidade do ar), por isso são excelentes secantes. O segundo é utilizado em bombas de calor de absorção, entre outros compostos como o nitrato de lítio ($LiNO_3$);
- estearato de lítio ($C_{18}H_{35}LiO_2$), lubrificante geralmente aplicado em condições de alta temperatura;
- hidreto de alumínio e lítio ($LiAlH_4$), agente redutor empregado na síntese de compostos orgânicos;

base hidróxido de lítio (LiOH), usada nas naves espaciais e submarinos para depurar o ar, extraindo o dióxido de carbono produzido pelos seus ocupantes;

- ligas metálicas de alumínio, cádmio, cobre e manganês, utilizados na construção aeronáutica, e projectos nucleares, assim como analgésico em operações de risco

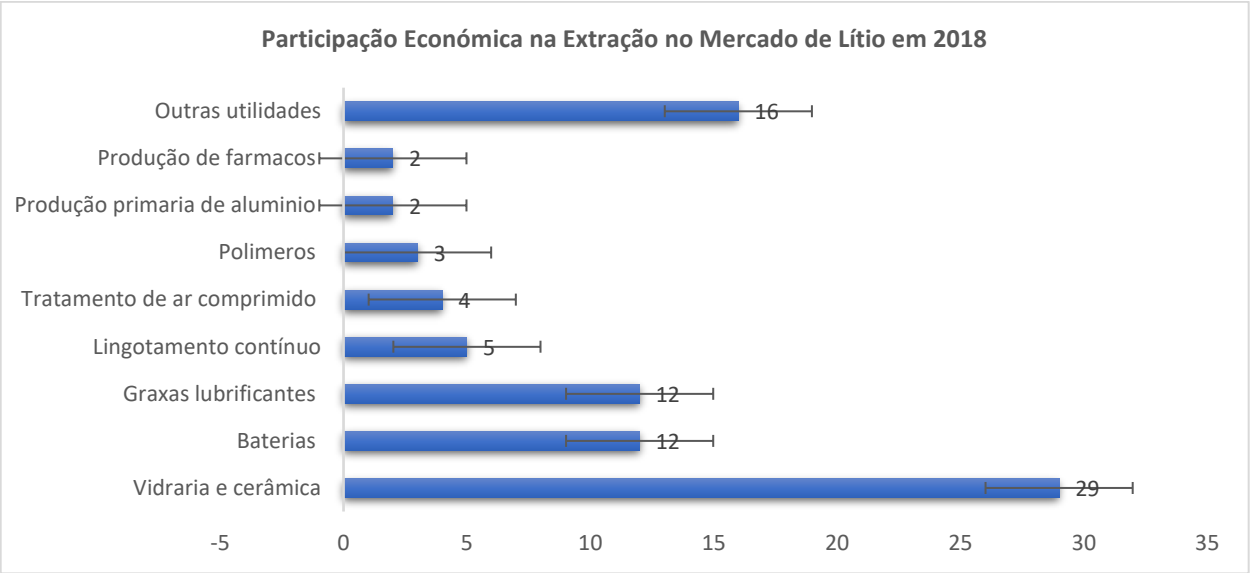


Fig 4: Participação Económica na Extração no Mercado de Lítio em 2018, adaptado de Brown et al., (2018)

2.2.1. Fontes de lítio

O elemento lítio é encontrado em minerais pegmatíticos, salmouras, argilas e, em concentrações baixas, em águas naturais. É considerado o 25º elemento mais abundante (a 20 mg / kg) na crosta terrestre (Meshram *et al.*, 2014).

A fonte comercial de lítio é em salmouras e pegmatitos. As salmouras de lítio conhecidas são encontradas principalmente na Argentina, Bolívia, Chile, China e Estados Unidos de América (EUA). Estas possuem várias características geológicas e/ou geográficas importantes, como o teor em lítio, a proporção de magnésio para lítio e a razão de evaporação (Mohr *et al.*, 2012; Warren, 2013). Os pegmatitos de lítio são encontrados principalmente na Austrália, Canadá, EUA, República Democrática do Congo (RDC), Sérvia, Áustria, China, Brasil, Namíbia, Portugal, Mali, Zimbabwe, República Sul Africana (RSA), Finlândia e Afeganistão (Mohr *et al.*, 2012). Na (Fig. 5) encontram-se representadas as reservas de minerais de lítio no mundo e a participação económica na extração no mercado de lítio (Fig 4).

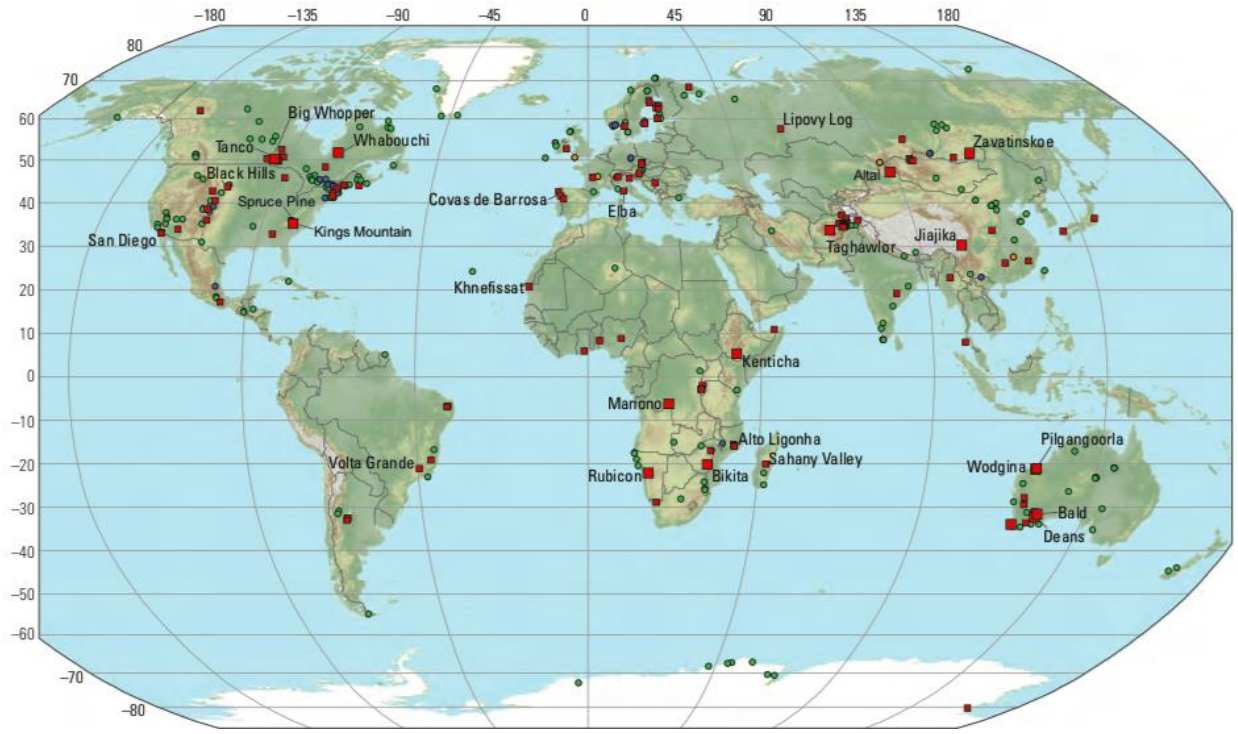


Fig. 5: Localização dos depósitos conhecidos de lítio no mundo. (Pegmatitos do tipo LCT, Granito lítio, Pegmatitos do tipo NYF, pegmatito granito comum (Bradley *et al.*, 2010)

2.2.2. Minerais de lítio em pegmatitos

São conhecidos mais de 150 minerais de lítio (Wietelmann and Bauer, 2003), que têm como características comuns a baixa densidade. Na (*Tabela 2*) encontram-se identificados alguns minerais de lítio.

Os principais minerais de lítio são os silicatos e os fosfatos que aparecem exclusivamente em pegmatitos graníticos, e, em menor quantidade, em sienitos nefelínicos (Garrido, 1992). Estes podem dividir-se em três grupos (aluminossilicatos anidritos, aluminossilicatos hidratados e fosfatos). Por vezes, o lítio encontra-se em coordenação octaédrica e na substituição isomórfica (Fe, Mg, B), principalmente em micas. Os minerais de lítio, por vezes, podem entrar em forma de redes em outros minerais como micas (biotites, moscovite, lamprofilite, flogopite), anfíbolas (arfvedsonite-eckermanite, horneblenda), piroxénios (egirine) e os ciclossilicatos (berilos) (Garrido, 1992).

O lítio ocorre predominantemente em pegmatitos que contêm paragéneses de minerais derivados da cristalização de fluidos pós-magmáticos ou da ação metassomática de fluidos pegmatíticos residuais (Velho, 2005). A distribuição do lítio nas rochas ígneas é controlada, em parte, pela relação (MgO+FeO) /Li_2O. Nos estádios iniciais da cristalização magmática, esta relação é muito elevada, sendo os átomos de Mg e Fe dos minerais ferromagnesianos substituídos preferencialmente pelo lítio, o qual se vai concentrando progressivamente no magma residual (Velho, 2005). Segundo (Černý, 1991), os pegmatitos da família LCT (Lítio, Césio e Tântalo) mostram algum grau de zonamento geoquímico regional em relação aos granitos associados (Fig. 6). Os pegmatitos de elementos raros são de forma clássica subdivididos em 3 famílias (Cerny, 1991; Cerny and Ercit, 2005):

- LCT – pegmatitos com Lítio (Li), Rubídio (Rb), Césio (Cs), Berilo (Be), Cálcio (Ca), Estanho (Sn), Tântalo (Ta);
- NYF (Nióbio, Ítrio e Fluor) – pegmatitos com Nb>Ta, Titânio (Ti), Ítrio (Y), Elementos de terras raras (REE);
- LCT + NYF – pegmatitos com assinatura geoquímica de mistura.

Dos pegmatitos proximais para os distais, foi definida a seguinte sequência espacial (Cerny, 1991): estéreis, tipo elementos raros, subtipo berilo-columbite, subtipo berilo-columbite-fosfato, subtipos espodumena ou petalite ± ambligonite, subtipo lepidolite, tipo albite-espodumena, tipo albite.

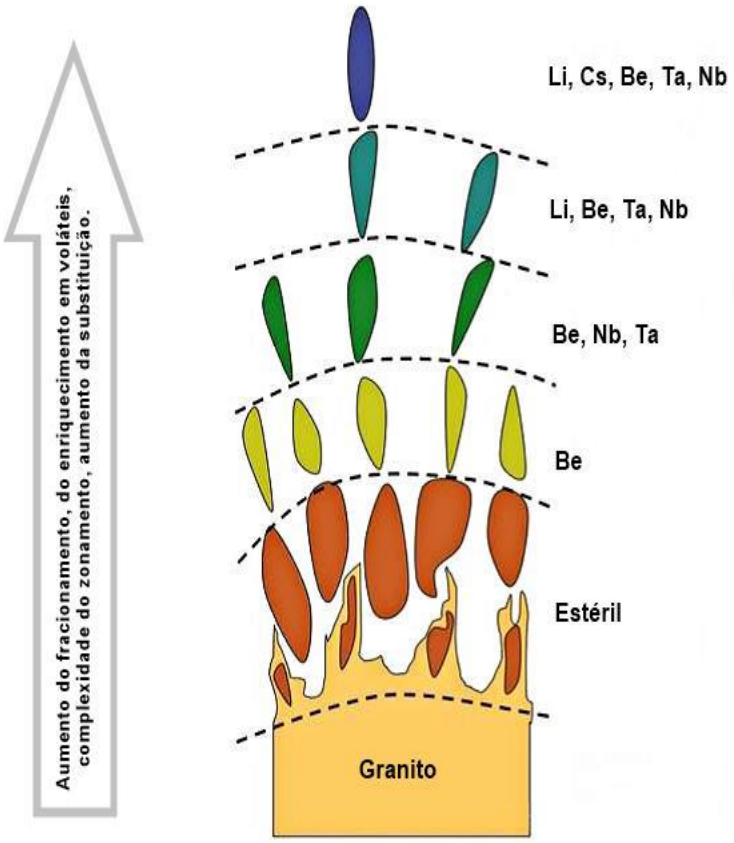


Fig. 6: Zonamento regional para a família LCT. Adaptado de (Cerny and Ercit, 1985; Cerny, 1991; London, 2008). Extraído de (Viera, 2010).

Tabela 2: Minerais de lítio.

Item	***Nome***	***Grupo***	***Sistema***	***Formula***	***d***[2]	***D***[3]	***Teor em Lítio***		***Fonte***
							Teórico	***Real***	
1	*Espodumena*	*Silicatos (Piroxénio)*	*Monoclínico*	*LiAlSi2O6*	*3 – 3,2*	*6,5 – 7,5*	*8,0*	*1,5 – 7,0*	(Deer *et al.*, 2010) (Klein *et al.*, 2012)
2	*Eucriptite*	*Silicatos (Piroxénio)*	*Hexagonal*	*LiAlSiO4*	*2.65*	*6,5*	*11,9*	*5,0*	(Klein *et al.*, 2012)
3	*Petalite*	*Silicatos (Piroxénios)*	*Monoclínico*	*LiAlSi4O10*	*2,3 – 2,5*	*6 – 6,5*	*4,9*	*3,0 – 4,5*	(Deer *et al.*, 2010)
4	*Lepidolite*	*Silicatos (Micas)*	*Monoclínico*	*K (Li, Al)3(Si, Al)4O10(F, OH)2*	*2,8 – 3,3*	*2,5 – 3*	*3,3 – 7,8*	*3,0 – 4,0*	(Klein *et al.*, 2012)
5	*Holmquistite*	*Silicatos (Anfíbola)*	*Ortorrômbico*	*Li2(Mg, Fe)3Al2Si8O22(OH)2*		*5-6*			(London, 1986)
6	*Zinnvaldite*	*Silicatos (Micas)*	*Monoclínico*	*K (Li, Al,Fe)3(Al,Si)4O10(F,OH)2*	*2,9 – 3,3*	*2,5 - 4*	*5,6*	*2,0 – 5,0*	(Klein *et al.*, 2012)
7	*Bikitaite*	*Zeólito (alumino silicatos hidratados)*	*Monoclínico*	*LiAlSi2O6H2O*	*2.30 - 2.34*	*6*	*3.40*		(Hurlbut, 1957)
8	*Polilitionite Teniolite Irvingite*	*Silicatos (Micas)*		*((MgKLi2Al) Si4O10F2)*					(Dana, 2008), (Klockmann and Ramdohr, 1961)
9	*Cookeite*	*Silicatos (Micas)/ Grupo das clorites*	*Triclínico (Monoclínico)*	*LiAl4(AlSi3) O10(OH)8*	*2.58 -2.69*			*3.12-2*	(Dana, 2008)
10	*Hectorite*	*Argilas*	*Monoclínico*	*(Mg, Li)3Si4O10(F, OH)2*					(Madejová *et al.*, 1998)
11	*Montebrasite*	*Fosfato*	*Triclínico*	*LiAl(PO4) (OH, F)*	*3,0*	*5,2 - 6*	*7,0*		(Klein *et al.*, 2012)
12	*Trifilite, Litiofilite*	*Fosfatos*	*Ortorrômbico*	*Li (Fe, Mn) PO4*	*3,42-3,56*				(Klein *et al.*, 2012)

[2] *Densidade (Peso Específico, gm/cm³).*

[3] *Dureza (Escala de Mohs*).

13	*Grifite*	*Fosfato*	*Cubico*	*(Mn, Na, Li)6CaFeAl2(PO4)6F*					
14	*Ambligonite, Fremontite, Natrambligonite, Natromontebrasite*	*Fosfato*	*Triclínico* *Monoclínico*	*(Na, Li) Al (OH, F) PO4*	*2,98-3,11*	*5,5-6,0*	*11,9*	*5,0*	(Dana, 2008; Klein *et al.*, 2012)
15	*Lithiotantite*	*Oxido*	*Monoclínico*	$Li(Ta,Nb)_3O_8$,					(Cerny and Ercit, 1985)

2.3. Minerais de Lítio

2.3.1. Espodumena

É um mineral do grupo das piroxenas, da família dos clinopiroxenas de lítio, ocorrendo naturalmente como espodumena ∝ (Dana, 2008; Dessemond *et al.*, 2019). Os outros polimorfos são a espodumena β e γ. As transformações entre as três formas são reconstrutivas. A espodumena ∝ é o polimorfo de mais baixa temperatura com simetria do grupo espacial C2/c (Deer *et al.*, 2010). A espodumena β é a forma tetragonal de alta temperatura e é isoestrutural com o polimorfo de sílica, keatite (dióxido de silício). Na terceira fase, formada a altas temperaturas, a espodumena aparece em γ, hexagonal que compõe parte do quartzo alta, solução sólida (quartzo alto) no sistema Li_2O-Al_2O_3-SiO_2 (LAS), podendo ser isoestrutural com o quartzo β (Deer *et al.*, 2010; Abdullah *et al.*, 2019). A transformação de espodumena ∝ em β, à pressão de 1 atm, ocorre a uma temperatura entre 530 e 550ºC (Deer *et al.*, 2010). A espodumena, com a exceção da substituição Li ⇌ (Na, K), não se afasta muito da fórmula ideal $LiAlSi_2O_6$. Em algumas espodumenas ocorre um pequeno excesso de Si, 2 átomos por unidade de fórmula, o que pode representar a quantidade de SiO_2 originalmente presente na solução sólida com a espodumena β. As frequentes inclusões de albite e de micas podem também contribuir para o excesso de Si (Lima, 2000).

A espodumena altera-se com facilidade, principalmente como resultado de uma atividade hidrotermal alcalina tardia, sendo o produto de alteração constituído por uma mistura de eucriptite ($LiAlSiO_4$, hexagonal) e de albite (Deer *et al.*, 2010). Há pouca variação nas propriedades óticas da espodumena, exceto para os minerais mais ricos em sódio que apresentam uma birrefringência maior. A cor verde da variedade hidenite, é devida a pequenas quantidades de crómio, e a cor rosa, cunzite, deve-se à presença de pequenas quantidades de manganês associados a uma razão baixa de Fe:Mn (Deer *et al.*, 2010). A espodumena distingue-se dos outros clinopiroxenos pelo seu pequeno ângulo de extinção γ: z, e da aegirina-augites pelo forte pleocroísmo e maiores índices de refração destes últimos minerais (Deer *et al.*, 2010). A espodumena é um mineral característico dos pegmatitos graníticos ricos em lítio. As associações mineralógicas mais frequentes incluem quartzo, petalite, albite, lepidolite e berilo (Drysdale, 1975). Como produtos de alteração da espodumena, identificam-se a caulinite, a montmorilonite e a clorite (cookeite) (Velho, 2005). As ocorrências de espodumena

em Moçambique estão descritas em locais como a Província Pegmatítica de Alto Ligonha, concretamente em Muiane, Naipa (Fung *et al.*, 1990), Naquissupa, Morrua, Nahora, Marigde, Marropino e Nanro (Quadrado, 1963; Cronwright, 2005a; Council for Geoscience, 2007), na região de Namacotche (Gomes, 2010).

2.3.2. Petalite

A petalite está entre os três minerais de lítio mais abundantes. Ocorre tipicamente em cristais de dimensões razoáveis nas partes mais internas dos pegmatitos zonados, em associação com o quartzo e a microclina (Lima, 2000; Gonçalves *et al.*, 2019; Llera *et al.*, 2019). A estrutura da petalite consiste numa configuração tridimensional de tetraedros SiO_4 e AlO_4 ligados por compartilhamento dos vértices, a sua fórmula encontra-se na (*Tabela 2*).

Em alternativa, os tetraedros SiO_4 podem ser considerados dispostos em arranjos, em folhas paralelas a (001), ligadas umas às outras por intermedio de tetraedros AlO_4 (Deer *et al.*, 2010). A composição química é normalmente bastante próxima de $LiAlSi_4O_{10}$, com uma percentagem de Li_2O de cerca de 4,1 moles% e com uma substituição de Li por Na ou K em quantidades diminutas: o elemento lítio foi descoberto pela primeira vez nesse mineral. O ferro está por vezes presente, numa proporção limitada, substituindo o Al (Dana, 2008). A petalite pode ser sintetizada a partir dos óxidos que compõem ou a partir de LiOH, $Al(OH)_3$ e ácido silícico (H_4O_4Si) (forma-se no intervalo de 330º-680º C). Altera-se frequentemente para montmorilonite, a qual pode formar película envolvente. Em Moçambique, a petalite foi descrita em pegmatitos de Muiane, Naipa, Nahora, Moneia e Morrua (Cronwright, 2005a; Braga *et al.*, 2008).

2.3.3. Lepidolite

A lepidolite é um filossilicato que apresenta cor violácea ou rosa (*Tabela 2*). O conteúdo de lítio vai desde 1,53% até o valor máximo teórico de 3,6%, apesar de em depósitos comercias, os teores variarem entre 1,4 e 1,9%. Trata-se de uma mica lítica e apresenta uma solução sólida completa entre este mineral e a moscovite (Deer *et al.*, 2010). O potássio pode ser substituído por percentagens consideráveis de sódio, rubídio e césio, enquanto que as posições octaédricas do alumínio e do lítio podem ser substituídas por magnésio, manganês e ferro (Raimbault, 1998).

A lepidolite ocorre, geralmente, em agregados compactos de laminas finas, ou segundo corpos granulares, e cristais prismáticos. A sua cor é caraterística - os cristais são de cor lilás, mas também pode ser púrpura, branca, cinzenta e vermelha. Possui uma dureza baixa, 2 na escala de Mohs, a densidade especifica é de 2,8 a 2,9 (Raimbault, 1998; Dana, 2008).

A moscovite de lítio, a polilitionite, e a teniolites [Si_3AlO_{10}] (F_5OH, O) $Al_6Li_6K_4$, são micas de lítio, com caraterísticas semelhantes às lepidolites. Na sua composição química, as teniolites possuem magnésio (Klockmann and Ramdohr, 1961). Ocorrências de moscovites de lítio e lepidolites foram descritas por Nunes, na região de Muiane e Naípa (Nunes, 2010). A cookeite é uma variedade de clorite de lítio (*Tabela 2*), aparecendo relacionada quer com a alteração de espodumena quer com a alteração da petalite. Considerado um mineral secundário de lítio, em Moçambique ocorre nos pegmatitos de Namivo (Neiva, 2013), Marropino, Naipa, Muiane e Naquissupa (Cronwright, 2005a).

2.3.4. Eucriptite

De acordo com o (Cerny, 1972), a fórmula química da eucriptite é $LiAlSi0_4$ - aluminossilicato de lítio (Lahti *et al.*, 1982). Para (Mrose, 1953; Buerger, 1954), a eucriptite deriva do SiO_2 ou ($Si_{12}O_{24}$), escrito pela seguinte fórmula ($_1$):

$$(Si_{12-x}Al_x)(Li_{x-y}Al_{y/3})O_{24} \qquad (1)$$

Esta fórmula é considerada uma fase mineralógica secundária, depois de espodumena ou de petalite (*Tabela 2*). Em Moçambique, encontra-se descrita em pegmatitos de Alto Ligonha (Marropino, Morrua) (Barros and Vicente, 1963).

2.3.5. Holmquistite

A holmquistite é uma anfíbola que aparece sob a forma de prismas alongados e/ou agregados fibrosos, de cor azul-verde e vermelha (violeta-azul nos agregados fibrosos). Forma-se nas hastes de incorporação de pegmatitos sem espodumena, principalmente em anfibolitos e

xistos verdes, e dá origem a auréolas nas zonas de contacto (Garrido, 1992). É também considerada a variedade lítica de glaucofona (Klockmann and Ramdohr, 1961). Por este motivo, pode constituir um mineral útil para a prospeção de pegmatitos litiníferos (London, 1986). Em torno de alguns pegmatitos sodalíticos em Moçambique foram descritos minerais de Holmquistite (Cronwright, 2005a).

2.3.6. Minerais argilosos

2.3.6.1. Bikitaite

Bikitaite é um zeólito raro que ocorre em duas localidades conhecidas como um produto de alteração da espodumena em diques de pegmatito ricos em lítio. Descrito e nomeado por Hurlbut, numa localidade de Zimbabwe (Bikita, Fort Victoria) (Hurlbut, 1957).

2.3.6.2. Caulinos

O caulino trata-se de um minério composto de silicatos hidratados de alumínio, como a caulinite e a haloisite, e apresenta características especiais que permitem a sua utilização no fabrico de papel, cerâmica, tintas, etc. (Velho, 2005).

Em Alto Ligonha (Muiane, Marropino, Nuaparra, Boila), ocorrem vários tipos de caulinos. Os de origem hidrotermal, de baixa temperatura, são apenas de interesse teórico (Fig. *24*) (Afonso and Marques, 1993; Pekkala *et al.*, 2008).

Foram publicados alguns resultados que mostram que os caulinos de Alto Ligonha poderiam ser beneficiados, como um subproduto de pegmatitos com tantalite (Council for Geoscience, 2007).

2.3.7. Salmouras

As salmouras são resíduos da precipitação de evaporitos, depositados em pretéritas bacias ou resultado de concentração mais moderna, por evaporação em ambientes naturalmente favoráveis. Nos evaporitos, a porosidade pode chegar a 45% de seu volume, que pode ser preenchida por salmouras ricas em lítio. Na (Tabela 3) encontra-se indicada a concentração de lítio nos depósitos de salmoura mais importantes.

Tabela 3: Percentagem de Lítio em depósitos de salmouras,

Região	ppm de lítio	Lítio%	Magnésio
Searles Lake (Califórnia)	70	0,0083	0,0034
Clayton Valley (Nevada)	100-300	0,03	0,040
Great Salt Lake (Utah)	28-60	0,006	0,80
Mar Morto- Israel, Jordânia		0,002	4,00
Quinghai (China	100		
Salar dei Hombre Muerto (Argentina)	100-700		
Salar de Uyuni (Bolívia),	100-500	0,025	0,54
Salar de Atacama (Chile	1000-5000	0,12	0,91
Lake Zabuye (Tibete)	700-1000		

Fonte: (USGS, 2019).

Capítulo III

III. Estado de Arte

3.1. Deteção remota aplicada à geologia

Existem inúmeros autores que definem a deteção remota, tais como (Lillesand and Kiefer, 1994; Cracknell and Hayes, 2007; Patiño, 2017). Entretanto, na década de 80, a "American Society for Photogrammetry and Remote Sensing" (ASPRS) define formalmente a deteção remota como "a medição ou aquisição de informação de alguma propriedade de um objeto ou fenómeno, por um dispositivo que não está em contato físico com o objeto ou fenómeno sob estudo" (Faracini, 2017). Considerando-se um conjunto de técnicas que permite obter informação sobre objetos, áreas ou fenómenos, através da análise de informação adquirida por aparelhos de informação (sensores) sem contacto com o objeto, área, ou fenómeno em estudo (Rocha, 2002). E uma serie de atualizações de publicações conceituais e das bibliotecas espectrais da USGS, que incluem curvas relativas a praticamente todos os minerais conhecidos (Kokaly; *et al.*, 2017). Entretanto, é aplicada para diversas áreas de ensino, pesquisa e extensão.

Para o caso específico da Prospeção Geológica, é usada em duas aplicações:

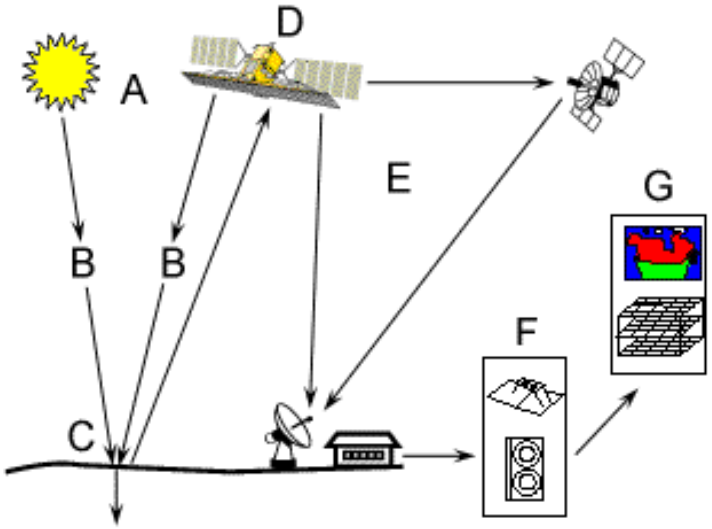
- mapeamento geológico (incluindo as litologias, falhas e fraturas que localizam depósitos de minério);
- reconhecimento de rochas alteradas hidrotermicamente através das suas assinaturas espectrais (Sabins, 1999).

As cenas (imagens) possuem informação sob a forma de energia ou radiação eletromagnética refletida ou emitida pela superfície terrestre ou pelos objetos nela existentes, codificada por sensores que detetam variações naquela radiação, em diferentes zonas do espetro eletromagnético (Fig. 7).

A adição mais importante à tecnologia da deteção remota foram os sensores hiperespectrais (Krishnamurthy and Sreenivasan, 2005), desenvolvidos por agências espaciais no mundo todo, fornecendo imagens com dezenas/centenas de bandas separadas. A sua vantagem é fornecer uma assinatura espetral diferenciada para cada píxel na imagem.

Ao combinar espetros de reflexão derivados de laboratório ou campo de minerais contra os espetros de pixeis individuais, o mineral dominante pode ser identificado. Assim, existe o

potencial de prospeção direta de minerais-chave associados à mineralização economicamente interessante(Spencer, 1995; Krishnamurthy and Sreenivasan, 2005).



A. Fonte de iluminação
B. Radiação
C. Interação com o objeto
D. Registo/gravação
E. Transmissão
F. Receção e processamento
G. Interpretação/análise/aplicação

Fig. 7: Elementos principais do processo de deteção remota. Adaptado de Sherbinn et al. (2006).

Alguns trabalhos importantes de especialização foram propostos por:

(Rowan and Mars, 2003) publicaram estudos sobre mapeamento litológico usando imagens ASTER para descrever o depósito de terras raras em Mountain Pass. Foram usadas 14 bandas do sensor ASTER, capazes de distinguir calcite e dolomite, depósitos cauterizados de skarn e mármores de zona de contacto dos depósitos das terras raras.

(Ducart, 2004), na sua dissertação, faz menção à caracterização da alteração hidrotermal associada às ocorrências auríferas de Los Menucos, Argentina, por meio de técnicas de deteção remota e espetroscopia de refletância, a partir de imagens do sensor ASTER. Foram aplicados métodos de classificação espectral Spectral Angle Mapping (SAM) e Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF), os quais permitiram identificar os afloramentos, associados a processos hidrotermais em ambos prospetos. O método MTMF, aplicado às bandas espectrais do infravermelho de ondas curtas/short wave infrared region SWIR (bandas 4 a 9), demonstrou maior eficiência no mapeamento da mineralogia de alteração.

(Rawashdeh *et al.*, 2006) desenvolveram um trabalho sobre o uso de técnicas de deteção remota, na investigação geológica, concretamente para detetar minerais em El Azraq-

Jordânia. Foram usadas imagens Landsat Enhanced The Mapper plus (ETM +) e Radar SAR (Synthetic Aperture Radar), com objetivo de classificar as unidades geológicas, discriminar a litologia e estruturas, e delinear as zonas associadas de alteração hidrotermal, usando as técnicas de ACP, RGB, razão de bandas e IHS. Os resultados foram satisfatórios, atingindo as finalidades propostas.

(Güler *et al.*, 2007) mostraram a eficácia de uso de imagens Landsat para determinar o uso e cobertura dos solos na Turquia, na região de Samsung. Foi usada a técnica de classificação supervisionada, e pós classificação, usando uma abordagem de classificação híbrida (não supervisionado e supervisionado).

(Poormirzaee and Oskouei, 2010) trouxeram uma abordagem de análise de dados espetrais em zonas de alterações a partir de imagens ETM na região de Yazd, Irão. Foi feita uma comparação dos resultados espectrais com a biblioteca espectral mineralógica da USGS. Os resultados dos métodos de processamento, ajuste mínimo, e ACP, foram integrados no software ArcGIS para se obter um mapa final de alteração hidrotermal.

(Sadeghi *et al.*, 2013) identificaram minerais de ferro na região Central de Irão, concretamente em Esfordi, a partir dos sensores ETM + e ASTER. Foram usados métodos de deteção remota como razão de bandas, combinação de bandas, filtragem combinada, banda linear de previsão, e classificação SAM. Os melhores resultados foram obtidos a partir de razão de bandas, RGB e filtragem. A principal razão para a ineficiência do método SAM é a presença de alterações de ferro em aluviões, na região sul da área de trabalho.

(Rajendran and Nasir, 2013) elaboraram um estudo detalhado sobre o mapeamento de áreas com potências de manganês usando dados do sensor ASTER em Omã, demostrando a capacidade do sensor em mapear nas regiões geográficas áridas do mundo, utilizando métodos de processamento de imagens (razão de bandas e análise de componentes principais).

(Tayebi *et al.*, 2014) estudaram as propriedades espectrais e mapeamento de alterações de fácies vulcânicas, no SE do Irão (Masahim), com base em imagens do sensor ASTER. Foi aplicado o algoritmo MTMF para mapear a distribuição sub-píxel de minerais alterados associados ao vulcão, com auxílio em espetroscopia de campo, e uma análise básica com a difração de raios X (DRX). A avaliação de precisão foi boa, e as imagens foram extraídas usando o método Píxel Purity Index (PPI).

(Calvin *et al.*, 2015) aplicaram técnicas de deteção remota em prospeção e exploração de minerais de origem geotérmica na região de Nevada, EUA. Os dados espetrais foram

recolhidos em campos e a sua validação foi feita em laboratório, a partir de um espectrômetro portátil ASD (0,4-2,5 m), nas configurações de campo e de laboratório. Os minerais foram identificados a partir dos dados do VNIR, SWIR e TIR. Os autores salientam que as técnicas modernas de deteção remota fornecem uma rápida avaliação regional para definir limites de diferentes recursos.

(Han and Nelson, 2015), com técnicas de deteção remota, realizaram o mapeamento de rochas hidrotermais, usando imagens Landsat 8 (no nordeste de Colúmbia-Britânica). O estudo demostrou a análise com base na desmistificação espetral para rochas hidrotermais alteradas. Mostraram a influência da topografia na resposta espetral da superfície, considerando importante em terrenos de alto relevo, como a Cordilheira. A inclusão de fatores topográficos na desmistificação espetral ajudou a distinguir os espetros de rochas alteradas e inalteradas, o que ajudou a produzir um mapa mais preciso.

(Zalaky and Elmonsif, 2016) estudaram mineralizações de urânio a partir de técnicas de deteção remota, usando combinações de métodos de filtragem, no norte de Egipto. A finalidade do trabalho consistiu em examinar a eficiência do sistema térmico avançado transportado pelo espaço, a partir de imagens ASTER. Foram analisadas as três bandas do visível, e seis bandas do infravermelho, com a resolução de 15 e 30 m. Os resultados permitiram a deteção de hematite, caulinite, ilite, alunite, sendo considerados rastreadores de uranio.

(Zimmermann *et al.*, 2016) demostraram a aplicação da deteção remota em rochas carbonatiticas enriquecidas com Nb-Ta-Elementos de terras raras leves (LREE) (Epembe/Namíbia), usando o algoritmo ruido mínimo de fração (MNF) e os resultados indicam que as combinações de informações espaciais-espectrais e geológicas melhoram a classificação, e permitiu a distinção entre classes espectralmente semelhantes. A maior precisão geral foi alcançada usando uma combinação de MNF, Índice de Posição Topográfica (IPT) e coordenadas espaciais como dados de entrada para classificação litológica.

(Cudahy, 2016), em uma revisão sobre projetos de mapeamento mineral para exploração liderada pela Organização de Pesquisas Científicas e Industriais da Commonwealth (CSIRO), na Austrália, apontou que a deteção remota hiperespetral pode ser menos popular entre as empresas de exploração devido à cobertura espacial limitada e pelo custo dos conjuntos de dados de qualidade e à complexidade inerente ao processamento dos dados hiperespectrais. Esses estudos mostram que as tecnologias de deteção espectral podem fornecer informações de minerais específicos que têm valor económico, ou seja, para mapeamento/ caracterização

mais precisa e eficiente do rególito ou deteção de minerais alterados de valor económico, como caulinos, granadas, cobre e ouro, entre outros.

(Paes *et al.*, 2016) avaliaram o potencial de lítio em Brasil, mais concretamente na área do médio rio Jequitinhonha, Nordeste de Minas Gerais (NE/MG), a partir de imagens ASTER, com dois métodos de classificação supervisionada, o SAM e o MTMF. Comprovou haver novas ocorrências de corpos pegmatíticos mineralizados, utilizando técnicas de classificação espectral baseadas em pixeis a pixeis de referência, amostrados na própria imagem os locais de lavras a céu aberto.

(van der Werff and van der Meer, 2016) ilustram o valor dos dados Sentinel 2 e Landsat 8 OLI para estudos geológicos, a partir de razão de bandas. Os resultados mostraram que as imagens Sentinel 2 têm uma semelhança ao olho humano, com uma correlação de aproximadamente 0,8 e superior, mas os intervalos de dados associados diferem significativamente. Os produtos resultantes também foram comparados a um mapa geológico publicado da área de estudo e é mostrado que os mapas resultantes correspondem ao modelo geológico conceitual do depósito epitérmico.

(Yao and Fu, 2017) aplicaram as técnicas básicas de deteção remota para identificação de novos alvos de prospeção geológica e mineral em Duolong (China). Foram usados modelos de exploração em deteção e, a posterior, a validação em campo. De acordo com a validação, novos alvos foram obtidos com sucesso (minerais hidrotermais metálicos e sedimentares). A deteção remota se torna um método mais eficaz nas prospeções geológicas.

(Van der Meer *et al.*, 2017) descrevem as potencialidades do Sentinel 2 para os trabalhos geológicos, com a finalidade de estimular a comunidade geológica e ciências do solo, entre outras, o uso dessas imagens em detrimento do sensor ASTER, com base em técnicas de razão de bandas na identificação de minerais férricos, óxidos, silicatos e carbonatos. As experiências mostraram robustez na concetualização de modelos de identificação de depósitos epitérmicos.

(Mendes *et al.*, 2017) aplicaram uma metodologia sugerida por (Paes *et al.*, 2016) para o Mapeamento espectral e identificação de assinaturas espectrais de minerais de lítio em imagens ASTER (NE/MG), com vista à identificação de novos depósitos na região de Vale do Jequitinhonha, Brasil. Foi aplicada às bandas ASTER VNIR e SWIR para segregar o ruído. A

análise estatística foi aplicada ao MNF, para determinar os pixeis de referência com o maior PPI, a partir do qual as assinaturas de referência em árvore foram selecionadas. Posteriormente, dois métodos de classificação supervisionados foram empregados, SAM e MTMF, apenas onde a localização dos afloramentos de metassedimentos, enquanto as outras litologias foram mascaradas.

(Bedini, 2017) fez uma revisão de dados hiperespectrais (ondas do infravermelho térmico) dos sensores AVIRIS e Hyperspectral Mapping sensor of HyVista (HyMap) na exploração mineral, focando-se nos depósitos minerais, de acordo com a sua formação (magmático, hidrotérmico, sedimentar e supergenico). Discutiu as possibilidades e limitações das imagens hiperespectrais espaciais de resolução espacial moderada para caracterização e deteção detalhadas de sistemas mineralizados para cada tipo de depósito principal.

(Adiri *et al.*, 2017) fizeram uma comparação dos resultados de aplicação de imagens dos satélites Landsat 8, ASTER e Sentinel 1, na extração automática de lineações, trazendo uma abordagem totalmente automática, que consiste em uma combinação de algoritmo de deteção de borda e algoritmo de vinculação de linha. Encontraram os parâmetros ideais para a extração automática de lineações na área de estudo.

(Ziaii *et al.*, 2017) trouxeram uma metodologia baseada em análise de imagem nas explorações de cromite em Faryab, SE do Irão, tendo como resultado uma confiabilidade da ausência ou existência de depósitos em áreas com potencialidades minerais e evitando a perca de tempo e orçamento, ajudando a tomar ótimas decisões administrativas e económicas em trabalhos de prospeção e pesquisa.

(Manuel *et al.*, 2017) analisaram a exploração mineral no centro de Portugal, a partir de deteção remota, usando algoritmos de processamento digital de imagens, como técnicas de combinação de bandas (RGB), filtros espaciais digitais, relações de bandas e análise de componentes principais. Foram aplicados aos dados de imagens de elevação de terreno e Landsat 8, levando à definição de locais possivelmente adequados à hospedagem de ocorrências minerais de Sn-W e Au-Ag.

(Kati *et al.*, 2018) apresentaram um estudo sobre aplicação de imagens ASTER e Sentinel 2 A, no mapeamento geológico no norte de Marrocos, região extremamente árida. Foram usadas técnicas de combinação de bandas (RGB) e ACP. Para as imagens Sentinel 2 A, foi testado a

combinação das ACP das bandas 8, 4 e 2. E para as imagens ASTER, foi testado a combinação das ACPs, resultado das bandas 3, 5 e 7.

(Saibi *et al.*, 2018) utilizaram a deteção remota aplicada ás geociências, sendo testado em três países: Afeganistão, Emirados Árabes Unidos e Argélia. Os resultados mostraram a eficácia desta técnica no mapeamento geológico e identificação de caraterísticas geológicas estruturais, geomorfologia e a geotermia. É de referir que a região de Alto Ligonha (Moçambique) apresenta um clima quase semelhante às três áreas caraterizadas por estes investigadores.

(Nikolakopoulos *et al.*, 2018) analisaram o uso combinado de dados em deteção remota e análises mineralógicas, elaborando estudos detalhados de mapeamento geológico e microestruturas com base nos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) na Ilha de Antíparos (Grécia). Foi provado que a deteção remota diminui o tempo necessário em campo e reduz o custo total.

(Zoheir *et al.*, 2019) trouxeram uma análise sobre as transpressões em zonas orogénicas com ouro, usando a deteção remota, na região de Barramiya-Mueilha, Egito. Foram usadas imagens Sentinel 1 e 2, RADAR, e ASTER, para explicar o controle regional e estrutural das mineralizações de ouro. A ACPs, combinação de bandas e razão de bandas permitiram uma perceção de alterações litológicas e hidrotérmicas. Os resultados permitiram a perceção de estruturas hospedeiras e a noção do prolongamento da evolução tectónica da região.

(Salehi *et al.*, 2019) fizeram uma comparação de dados ASTER e Sentinel 2, para o mapeamento geológico, na Groenlândia. Os dados de ASTER foram mais robustos em relação ao Sentinel 2, na descrição de unidades litológicas. O sucesso de ASTER deve-se às seis bandas SWIR possui, enquanto o Sentinel-2 possui apenas duas. Além disso, o Sentinel-2 não contém faixas da região do TIR. No entanto, o Sentinel-2 é mais adequado para o mapeamento de minerais contendo ferro, pois possui várias bandas que cobrem o recurso de absorção de ferro de 900 nm, enquanto o ASTER possui apenas uma banda que cobre esse recurso.

(Wu *et al.*, 2019) trouxeram um estudo sobre mapeamento de depósitos hidrotermais porfíricos, usando dados ASTER-SWIR. Foram testados métodos clássicos, como ACP, razão de bandas, SAM, e MTMF e associados a parâmetros do recurso de absorção. Os resultados de absorção indicaram a localização do minério de acordo com o mapeamento geológico do Distrito de Kalatag, noroeste da China.

(Ademir Marques *et al.*, 2019) desenvolveram estudos sobre como melhorar a resolução espacial das bandas espectrais Landsat a partir de uma única imagem RGB usando redes

neural artificiais. Foram fornecidas informações espetrais a partir de sensores multiespectrais e hiperespetrais. Para aumentar a resolução espacial, uma série de técnicas foi aplicada, como fusão de dados de ampliação e redes neuronais convolucionais mais avançadas para super-resolução. No entanto, as últimas requerem grandes conjuntos de dados. Para superar esse requisito, aumentaram a resolução espacial das bandas espectrais do Landsat usando redes neuronais artificiais que usam núcleos de píxel de uma única imagem de alta resolução do Google Earth. Utilizando esse método, as bandas espectrais de alta resolução foram geradas com tamanho de píxel de 1m, em contraste com os 15 m de bandas Landsat pancromáticas. Para avaliar as bandas espectrais previstas, foram utilizadas as medidas de validação Universal Quality Index (UQI) e SAM, apresentando valores de 0,98 e 0,16, respetivamente, apresentando bons resultados.

(Ninomiya and Fu, 2019) analisam os dados infravermelho térmico (TIR, 7–14µm) do sensor ASTER, fazendo uma comparação e medição dos dados espectrais a partir de laboratórios, para poder perceber as propriedades dos materiais litológicos e mineralógicos. E, por fim, foram propostos vários índices espectrais para extrair informações químicas e mineralógicas dos alvos geológicos.

(Pour *et al.*, 2019) trouxeram uma abordagem de mapeamento litológico-mineral e de alterações de minerais, usando dados ASTER e Landsat 8, em regiões remotamente de difícil acesso, como por exemplo oNordeste de Graham Land, Península Antártica onde foram usados técnicas de mapeamento espectral de Remoção Continuum (CR) e a técnica de Análise de Componentes Independentes (ACI) para mapear os píxeis relacionados a unidades litológicas pouco expostas, também foi detetado alvo em bandas de SWIR do ASTER para detetar características espectrais atribuídas a conjuntos minerais de alteração no nível de sub-píxel. Uma abordagem simples e robusta para analisar regiões inacessíveis.

(Bolouki *et al.*, 2019) usaram as redes Bayesianas para mapeamento em zonas com potencial de ouro, em Irão (Ahar - Arasbaran). Foram usadas imagens ASTER, Landsat 7 e 8 para identificar zonas de alteração hidrotermal, com técnicas de razão de bandas e ACPs. A validação foi positiva entre o campo e o laboratório.

(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019) descreveram uma abordagem de deteção de minerais de lítio em pegmatitos em Portugal, região de Fregeneda e Almendra, propondo novas combinações de RGB, relações de bandas e subconjuntos para ACP, capazes de diferenciar as assinaturas espectrais dos pegmatitos portadores de lítio das assinaturas espectrais das rochas hospedeiras. Sendo o lítio o alvo desta tese, houve a necessidade de fincar as recentes técnicas aplicadas pelos autores acima citados.

(Hewson *et al.*, 2020) ilustraram as aplicações de imagens ASTER para o mapeamento geotérmico e de minerais, otimizando as técnicas de exploração geotérmicas por meio do mapeamento das alterações e evaporação dos minerais. Foram usadas técnicas de sensores óticos e térmicos do sensor ASTER (VNIR-SWIR-TIR). Este estudo descreve os métodos existentes para a aplicação de dados ASTER para exploração geotérmica na África Oriental.
(Shirmard *et al.*, 2020) desenvolveram técnicas de redução de dimensionalidade seletiva para exploração mineral usando dados ASTER, em Irão. Foram usadas as técnicas de ACPs, ACI e MNF. Os resultados mostraram que a ACI foi mais robusta para gerar camadas temáticas de alteração hidrotérmica, em comparação com as outras técnicas de redução de dimensionalidade. Este estudo demonstrou que a integração de camadas temáticas de alteração baseada em deteção remota, derivada das técnicas de transformação, foi uma abordagem confiável e de baixo custo para o mapeamento de prospeção mineral em províncias metalogénicas, num estágio de reconhecimento da exploração mineral.

(Kumar *et al.*, 2020) trouxeram uma abordagem sobre o mapeamento litológico automatizado através da integração de técnicas de aprimoramento espetral e algoritmos Machine Learning, usando dados hiperespectrais AVIRIS-NG em granitos verdes contendo ouro em Hutti, Índia. Foi feita uma interação entre ACP e ACI para mapear diferentes rochas. O mapa final apresenta uma alta resolução, permitindo visualizar os contactos litológicos, rochas anfibólicas e granitos associados a um mapa de alteração da área onde se distingue a zona com potencial mineralização de ouro.
(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2020) usaram dados sobre pesquisas atuais e perspetivas futuras de mineralizações de lítio a partir de deteção remota. Ilustraram s mais recentes desenvolvimentoso realizados na exploração de lítio usando métodos de deteção remota, detalhando as principais fraquezas das abordagens, e mostrando como superar essas dificuldades, e esperando que os trabalhos sobre a prospeção de lítio aumentem, pois, a deteção remota é uma ferramenta integrada e fundamental para a exploração de lítio.

3.2. Deteção remota em Moçambique

Em 1980, fez-se a divulgação de um trabalho intitulado “Contribuição da deteção remota para o conhecimento geológico mineiro de Moçambique” (Afonso, 1980) cingiu-se em descrever as técnicas por ordem de prioridade e importância, começando pela aeromagnetometria, para deteção de minerais magnéticos, seguindo-se a aeorocintilometria para prospeção de minerais

radioativos e os métodos orbitais para a resolução de problemas geológico mineiros em geral. Entre os anos de 2002 a 2007, existiu um financiamento por várias instituições nacionais e internacionais que proporcionou um grande avanço no conhecimento geológico de Moçambique no seu todo, resultando em novas cartas geológicas à escala 1:250.000 abrangendo todo o território, e ainda 30 cartas à escala 1:50.000 em zonas mais promissoras sob o ponto de vista dos mesmos (Vasconcelos, 2014). Como técnicas de prospeção geológica aplicadas pelas instituições, foram utilizados o SIG e a deteção remota.

(Schetselaar *et al.*, 2008) trouxeram uma abordagem recente em Moçambique, sobre a interpretação geológica integrando a deteção remota, e os dados geológicos de campo, sendo usadas imagens Landsat TM, ASTER e dados SRTM. O trabalho foi orientado pelo conhecimento de guias de campo, uma vez que os dados de mapas geológicos disponíveis de Moçambique e dos países vizinhos foram utilizados, sempre que possível, para estabelecer relações entre os padrões de imagem e de mapa geológico que permitiram a calibração da interpretação de contactos e unidades em relação ao conhecimento anteriormente conhecido. Como resultados obteve-se mapas geológicos em escala 1: 250 000 e 1:50 000.

Um outro trabalho interessante foi desenvolvido por (Eberle *et al.*, 2010), nomeadamente, o mapeamento aero-geofísico de pegmatitos mineralizados na Província Pegmatítica de Alto Ligonha, no norte de Moçambique. Neste trabalho foi realizada a integração automatizada dos dados aero-geofísicos usando o algoritmo não supervisionado K-Means. Provou ser um método rápido, direto e efetivo para compilação de mapa integrado com valor adicionado, encorajando a adoção desta nova metodologia para aplicação em outros locais do Cinturão de Moçambique, sugeriu que este método faça parte integrante do processo de mapeamento em Moçambique.

(Gemusse *et al.*, 2018) analisaram o comportamento espetral dos pegmatitos de Naipa e Muiane (Moçambique), a partir dos dados de imagens satélites ASTER, Landsat 8 OLI, permitindo obter informações sobre a composição mineral e minerais de alteração da região estudada.

(Gemusse *et al.*, 2019) descreveram a comparação de diferentes técnicas de classificação de imagens satélites para o mapeamento de pegmatitos de Muiane e Naipa em Moçambique, tendo concluído que o uso de bandas espectrais do SWIR (imagens Landsat OLI, ASTER e Sentinel 2ª) é importante para a identificação de minerais e mapeamentos geológicos.

3.3. Aplicação das Redes Neuronais de Convolução (CNNs)

Em geociências, as aplicações de técnicas de machine learning está tendo um grande sucesso nos seus resultados. Por exemplo, (Pires de Lima *et al.*, 2019) desenvolveram um trabalho sobre as redes neuronais de convulção (CNNs) como uma ferramenta de classificação geológica, fazendo menção de diferentes trabalhos que tiveram sucessos, como (Meldahl *et al.*, 2001; DeVries *et al.*, 2018; Shoji *et al.*, 2018) e mais outros a seguir detalhados:

(Petliak *et al.*, 2019) aplicaram as CNNs para diferenciar a rocha exposta do solo nu. Produziram um conjunto de dados de treino mapeando as rochas expostas em oito locais de teste na região de Serra Nevada (Califórnia, EUA) usando as ortoimagens de 0,6 m do Programa Nacional de Inventário Aéreo (NAIP) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). Essas áreas foram utilizadas para treinar e testar as CNNs. O resultado classificou a rocha nua nas ortoimagens NAIP com uma pontuação F1 de 0,95. Comparativamente, a abordagem clássica da análise de imagem baseada na classificação orientada a objetos (OBIA) forneceu uma pontuação de 0,84 F1. Esta é uma melhoria em relação aos mapas existentes de cobertura do solso, que subestimam a rocha em quase 90%. Todos os modelos foram implementados com base na estrutura Tensorflow**,** e todos os testes foram executados no ambiente Amazon EC2 3.8xlarge com 2 GPUs NVIDIA Tesla M60. Foi usado o GoogLeNet, dividindo a classificação em nove categorias para melhorar a precisão da rotulagem do site e, portanto, melhorar a precisão do modelo final. Em seguida, as classificações foram verificadas manualmente usando o Google Earth, imagens do Programa Nacional de Inventário Aéreo (NAIP) de 2016 e a verificação de campo.

(Sun *et al.*, 2019) reconheceram a superfície impermeável urbana, como um indicador quantificável na avaliação da urbanização e de seus impactos ambientais. Este estudo propõe uma abordagem das CNNs 3D para extrair superfícies impermeáveis dos conjuntos de dados WorldView-2 e LiDAR (Light Detection And Ranging). Os resultados indicaram que a proposta de CNN 3D tem um grande potencial e melhor desempenho na extração de superfícies impermeáveis, com uma precisão geral superior a 93,00% e o valor global de Kappa acima de 0,89. Comparado com o classificador de SVM, a abordagem proposta de CNN 3D aproveita não apenas as informações espaciais e espetrais ao nível de pixeis, mas também os mapas de textura e recursos por meio de processos convolucionais em várias escalas que melhoram

a extração de superfícies impermeáveis. Foram usadas várias camadas convulsionais: multi-max-pooling, convoluções 3D usando um kernel 3D nas CNNs para camadas e uma camada softmax-loss (camada de saída).

(Liu *et al.*, 2018) utilizaram duas redes de aprendizagem, redes totalmente convolucionais (FCN) e redes neuronais convolucionais profundas baseadas em patches (DCNN). Dois classificadores, incluindo Random Forest (RF) e support vector machines (SVM), foram implementados no âmbito da OBIA para classificar sete tipos de cobertura da terra naturais, usando o software Trimble's eCognition. Em termos de resultados de precisão, as FCN tiveram um melhor desempenho, comparando com os métodos de classificação, independentemente do número de amostras de treino.

(Guidici and Clark, 2017) desenvolveram uma arquitetura de CNN 1-D, treinada e utlizada para classificar várias imagens hiperspectrais do sensor AVIRIS do visível e infravermelho, da baía de São Francisco, Califórnia, EUA (2015). Foi feita a comparação de classificadores RF e SVM, que foram treinados e testados com os mesmos dados, e simulados no Imager infravermelho hiperspetral (HyspIRI). Os dados das três imagens testadas melhoraram a precisão geral do classificador em 2,0% (SVM), 1,9% (CNN, kernel) para 3,5% (RF), ou seja, com exatidão global de 89,9% para CNN, 89,5% para SVM e 82,2% para RF, processados no Scikit-learn do Python. Concluíram que a CNN é robusta para aplicações de deteção remota hiperespectral devido à alta precisão de classificação e interpretabilidade de seus produtos internos.

(Suárez *et al.*, 2017) concluíram que os métodos convencionais de classificação de cobertura do solo são feitos através da interpretação visual de imagens de satélite, o que é caro, dispendioso e impreciso/subjetivo. Implementar métodos computacionais poderia gerar procedimentos de classificação de cobertura em imagens de satélite de forma automática, rápida, precisa e económica. Particularmente, métodos de machine learning são promissores métodos computacionais para estimar a cobertura dos solos. Foi apresentado o método baseado em CNN dentro da ConvNet rede de arquitetura para a classificação automática de cobertura do solo a partir de Landsat 5 – TM. Sendo o ConvNet (Tensorflow uma biblioteca de código aberto do Google) que foi treinado através da interpretação visual das imagens de satélite, gerando um mapa de cobertura do Parque Nacional Tuparro, Colômbia.

(Längkvist *et al.*, 2016) demonstraram a aplicação das CNNs em Matlab, usando uma ortoimagem multiplestral e um modelo digital de superfície (DSM) de uma cidade pequena, generalizando os resultados para uma região maior, sendo uma classificação rápida e precisa. Os resultados foram uma combinação de quatro CNNs com tamanho contextual variável que funcionou em paralelo e a melhor precisão de classificação foi de 94,49%. As CNNs individuais foram testadas, mas não aumentaram a precisão da classificação.

(Krizhevsky and Hinton, 2012) exploraram dois repositórios públicos de imagens – ImageNet LSVRC-2010 e LSVRC-2012 – que podem ser considerados como referências de desempenho para modelos de reconhecimento de imagens. Os repositórios foram constituídos de 1.2 milhões de imagens designadas para treino, 50.000 para validação e 150.000 para teste, todas com alta resolução. O modelo preditivo empregue foi uma CNN com 8 camadas, sendo 5 de convolução e 3 totalmente conectadas, alcançando as menores taxas de erros registadas até então para esse conjuntos de dados. Para o LSVRC-2010, obteve-se um erro de 37, 5% e 17, 0% para o erro top-11 e erro top-52, respetivamente. Já para o LSVRC-2012, obteve-se um erro de 36,7% para o erro top-1 e 15.3% para o erro top-5.

(Szuster *et al.*, 2011) avaliaram o desempenho das SVM na zona costeira tropical da Tailândia, a partir de imagens ASTER. Também foram testadas as mesmas imagens no software ENVI, e os classificadores Maxver e redes neuronais artificiais (ANN). As matrizes de confusão para cada técnica de classificação foram produzidas, indicando uma precisão global de 93,95%, 94,99% e 94,15% para Maxver, ANN e SVM, respetivamente.

3.4. Aplicação de Processamento de Imagens Orbitais em Nuvem com Google Earth Engine – Big Data (GEE-Data)

Foram analisadas algumas potencialidades em diferentes artigos sobre o Google Earth Engine (GEE)-Big Data. Esta plataforma é considerada a mais recente e avançada para o processamento de dados geoespaciais na nuvem (Hamunyela *et al.*, 2020; Tamiminia *et al.*, 2020), permitindo clarificar e demostrar longas séries temporais em pouco tempo, colaborando para o processamento de Gigabites de informação em tempo quase real, disponibilizando aos usuários a estrutura de processamento dos seus servidores (Cossu *et al.*, 2010; Khan *et al.*, 2014; Tamiminia *et al.*, 2020), e oferecendo ao seu utilizador uma interface baseada em um navegador da WEB com a utilização da programação JavaScript e Python (Gorelick, 2013; Gorelick *et al.*, 2017; Pruckner, 2018).

O GEE disponibiliza os produtos do sensor ASTER, MODIS, LANDSAT, NOAA e produtos MeaSUREs (novos registos de imagens da superfície terrestre que parte do princípio da junção de diferentes dados com o objetivo de formar uma série temporal única, consistente e coerente) (Ganem, 2017).

O aspeto negativo reside na gestão de tecnologia de informação, obtenção e armazenamento de dados, verificação dos arquivos obscuros, computadores de grandes capacidades, CPUs, GPUs e rede (Gorelick *et al.*, 2017). Para um país como Moçambique, esses requisitos de trabalho colocam ao investigador uma grande barreira para obter bons resultados.

O termo Big Data foi usado nas comunidades científicas no período dos anos 90 (Li *et al.*, 2016; Tamiminia *et al.*, 2020). O Big Data refere-se a um arcabouço de dados que só pode ser manipulado a partir de ferramentas digitais atuais (Rao and Mitra, 2015).

O GEE é uma ferramenta baseada em nuvem que facilita o acesso às imagens de satélites por meio de computação de alto desempenho e grandes imagens (Gorelick *et al.*, 2017; Goldblatt *et al.*, 2018). Os computadores com grande potência e desempenho estão se tornando cada vez mais abundantes e disponíveis para qualquer pesquisador (Cossu *et al.*, 2010; Gorelick *et al.*, 2017; Singha *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020b), essa metamorfose se dá através de técnicas como computação em nuvens associado aos mecanismos de inteligência

artificial (Kane *et al.*, 2015; Hess *et al.*, 2016; Mendonça *et al.*, 2018). Isto proporciona ao utilizador o desenvolvimento de algoritmos e ciclos rápidos de testes e melhorias para o processamento de dados em larga escala (Gorelick *et al.*, 2017).

Dentro do GEE, é possível encontrar os seguintes classificadores ou algoritmos (Fast Naïve Bayes, GMO Max Entropy, Winnow, Percetron, Pegasos, CART, Random Forest, IKPamir, Voting SVM, Margin SVM, entre outros (Shelestov *et al.*, 2017). Para este trabalho, optou-se em usar os seguintes algoritmos: Classification and Regression Tree (CART), e GMO Max Entropy. CART é um algoritmo estatístico, bastante robusto, atualmente usado por muitos pesquisadores que tiveram sucessos, nas suas analises estatísticas, e em deteção remota, como (Lawrence and Wright, 2001; Bishop, 2006; Venables and Ripley, 2006; Shelestov *et al.*, 2017). A estrutura desta técnica encontra-se em (Hess *et al.*, 1999; Breiman *et al.*, 2000; Bishop, 2006). E o algoritmo GMO Max Entroty, baseado em lógica, regressão multinominal (Dudik *et al.*, 2004; Bishop, 2006; Haykin, 2008; Shelestov *et al.*, 2017; Vallino and Huber, 2018; Cofré *et al.*, 2019).

Capítulo IV

IV. Enquadramento Geológico

Os pegmatitos da Província Pegmatítica do Alto Ligonha estão concentrados principalmente no Complexo de Nampula, localizado no Sul do Cinturão de Moçambique (Fig. 8). O Complexo de Nampula está limitado a Norte pelo Cinturão do Lúrio e o limite Sul é considerado onde este desaparece por baixo da cobertura Fanerozoica. O limite Este é marcado pela linha de costa Moçambicana e o limite Oeste encontra-se a Oeste dos cumes dos granulítos da zona de Namarroi (Cronwright, 2005a). Os principais elementos estruturais da unidade incluem o Cinturão de Cavalgamento de Namama, o "Klippe" de Mugeba, o "Klippe" Plantação Santos e a estrutura de Monapo (Fig. 9) (Macey *et al.*, 2013).

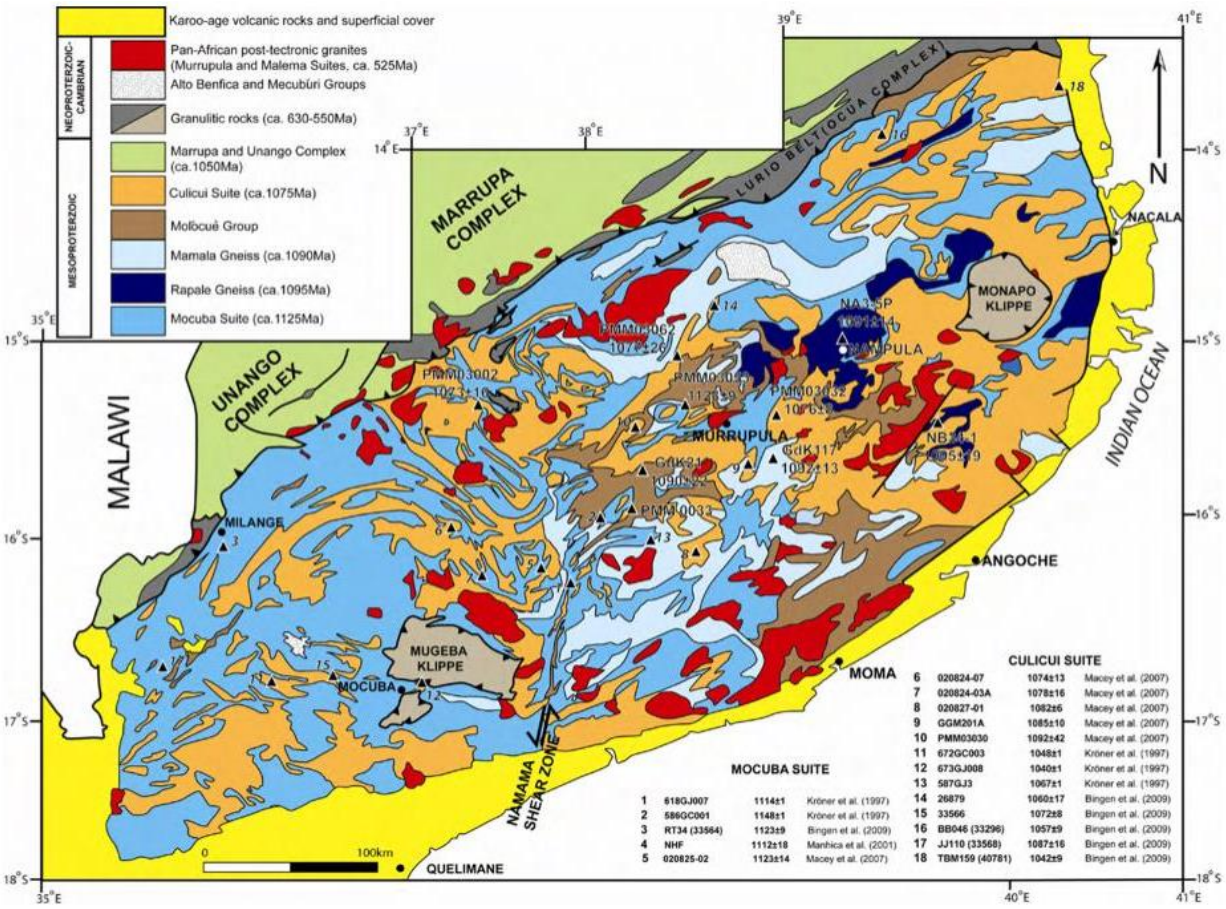


Fig. 8: Mapa geológico simplificado da Província de Nampula, mostra a distribuição das principais unidades geológicas. Fonte: (Macey et al., 2013)

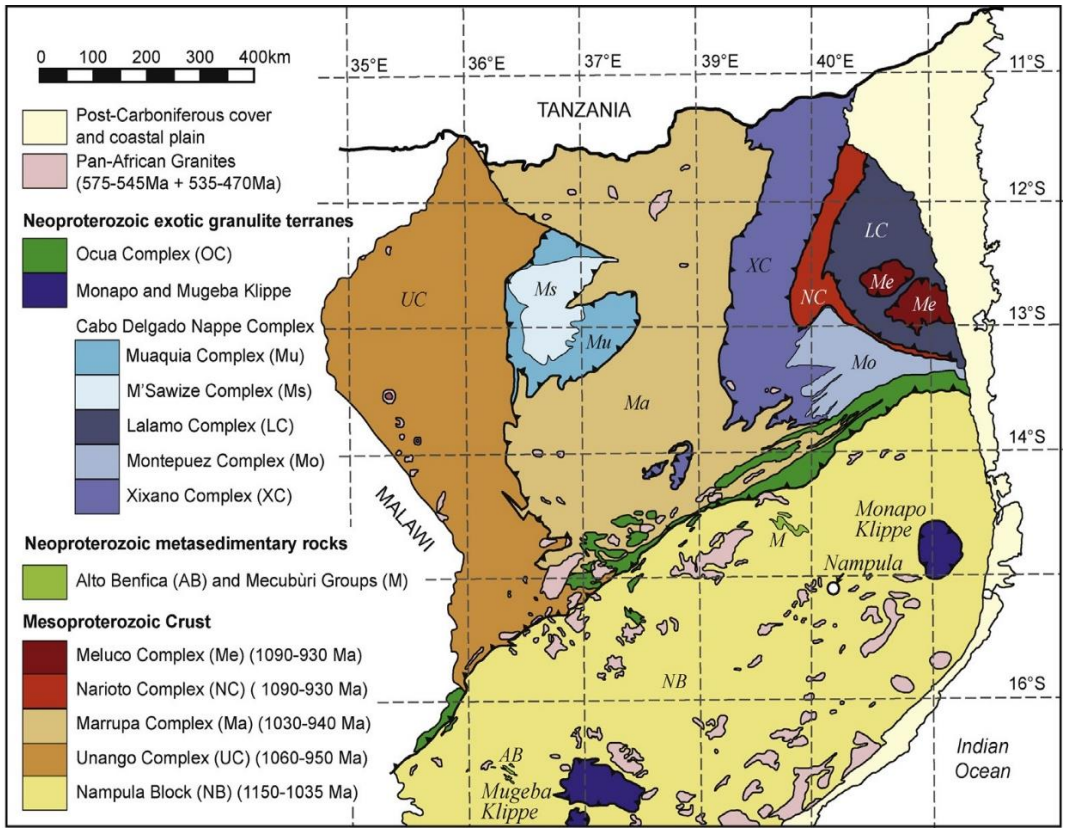


Fig. 9: Mapa Geológico do Norte de Moçambique, indicando as unidades litoestratigráficas e os Klippes de Mugeba e Monapo. Fonte: (Miller *et al.*, 2013)

4.1. Cinturão de Moçambique

O Cinturão de Moçambique foi designado por Holmes, em 1951 (Cronwright, 2005), como sendo uma grande descontinuidade estrutural ao longo da margem Este de África, no qual terminam os cinturões antigos (Grantham *et al.*, 2003). Trata-se de um cinturão policíclico, produto dos eventos magmáticos e orogénicos do Mesoproterozóico e Neoproterozóico a Paleozoico Inferior (Cronwright, 2005). A variação da idade do pico de metamorfismo de 520 a 640 Ma, que atravessa o Cinturão de Moçambique desde o Malawi à Antártida, sugere que o Cinturão de Moçambique reúne terrenos acrecionados em diferentes períodos (Krõner *et al.*, 1997; Cronwright, 2005a).

O Cinturão de Moçambique, no Norte de Moçambique, compreende material Mesoproterozóico e Neoproterozóico retrabalhado durante a orogenia Pan-Africana (Jamal

and De Wit, 2004; Cronwright, 2005a) e representa a terminação Sul do Cinturão de Moçambique (Krõner *et al.*, 1997; Cronwright, 2005a).

A região é representada principalmente por litologias de metamorfismo de alto grau, como gnaisses polideformados que foram cortados por numerosas estruturas Mesoproterozóicas a Neoproterozóicas.

A unidade é dividida em duas partes:

- O Complexo de Nampula, a Sul, que é dominado por migmatitos e ortognaisses que hospedam os pegmatitos de metais raros;
- O Complexo de Marrupa, a Norte, que compreende gnaisses, gnaisses migmatitícos e gnaisses granulíticos (Jamal and De Wit, 2004; Lächelt, 2004).
  As duas unidades são separadas pelo Cinturão de Lúrio.

Os principais desenvolvimentos estruturais e metamórficos do Sul do Cinturão de Moçambique foram interpretados como terem ocorrido durante o Neoproterozóico. Contudo, os trabalhos de muitos investigadores nos anos 1970 e 1980 sugeriram que o principal desenvolvimento estrutural da região ocorreu há 1000 Ma (orogenia Luriana) e que o evento Pan-Africano apenas foi responsável pela superimposição de feições e metamorfismo (Cadoppi *et al.*, 1987; Krõner *et al.*, 1997; Cronwright, 2005a).

Os recentes trabalhos de (Krõner *et al.*, 1997; Jamal and De Wit, 2004; Cronwright, 2005a) demonstraram que as principais evoluções estruturais e metamórficas ocorreram durante o Pan-Africano e as idades maiores Mesoproterozóicas são idades de cristalização das rochas deformadas.

4.2. Geologia regional da Subprovíncia de Nampula

Como anteriormente foi referido, os grandes elementos estruturais da unidade incluem o cinturão de Lúrio, o Cinturão de Cavalgamento de Namama, o “Klippe” Mugeba, o “Klippe” Plantação Santos e a estrutura de Monapo (Fig. 8). O Cinturão de Lúrio e o Cinturão de Cavalgamento de Namama tipicamente apresentam uma falha sinistral ou transpressional com a geometria de “dip-slipe” e “strike-slipe”. Trabalhos como os de (Krõner *et al.*, 1997; Jamal

and De Wit, 2004; Dias *et al.*, 2006) têm mostrado que os seus desenvolvimentos ocorreram durante a orogenia Pan-Africana entre 650-460 Ma (Grantham *et al.*, 2007). Posteriormente, o "evento termo-tectónico" (orogenia Pan-Africana entre 650-460 Ma), que provocou um aquecimento disperso da crusta foi acompanhado pela instalação de granitos (com idade de ~450 Ma) e pegmatitos metalíferos (com idade de ~430-450 Ma) (Aquater, 1983). Os granitos do primeiro ciclo (pré-Luriano), e talvez os granitos precoces do ciclo Luriano, apresentam-se mais ou menos foliados ou estirados. Os granitos tardios do ciclo Luriano e os granitos Pan-africanos não apresentam deformação (Aquater, 1983).

O Cinturão de Cavalgamento de Namama divide localmente a área em dois sectores Este e Oeste, correspondendo estes ao teto e muro, respetivamente. A característica típica do sector Este é a presença mais difundida de terrenos da cobertura ou da parte elevada do soco (Grupo do Rio Molocué e a Formação de Mamala e de Cavarro). Tais terrenos foram preservados da erosão, quando cobertos por unidades de proveniência mais interna, devido ao cavalgamento de unidades tectónicas (Fig. 10) (Aquater, 1983). No sector Oeste há, por outro lado, menores extensões dos terrenos mais altos do embasamento (Formação de Mamala) e de cobertura (Grupo do Rio Molocué), de maneira especial, os máficos do Complexo de Morrua; além disso, a Formação de Cavarro não está presente (Aquater, 1983). Este sector Oeste apresenta um carácter geológico peculiar e fundamental, constituído pela presença de um "nappe" de terrenos granulíticos muito desenvolvido, dividido em duas partes:

- ✓ a maior (mancha de Mugeba) foi modelada num largo sinforme de eixo aproximadamente WNW-ESE, o qual permitiu conservar-se até ao atual nível de erosão (Fig. 10);
- ✓ a menor (mancha da Plantação Santos), muito mais erodida, preservada apenas nalguns retalhos a sul de Mocuba.

A direção de transporte destas unidades alóctones é indicada com clara evidência por uma lineação muito frequente de estiramento (Aquater, 1983).

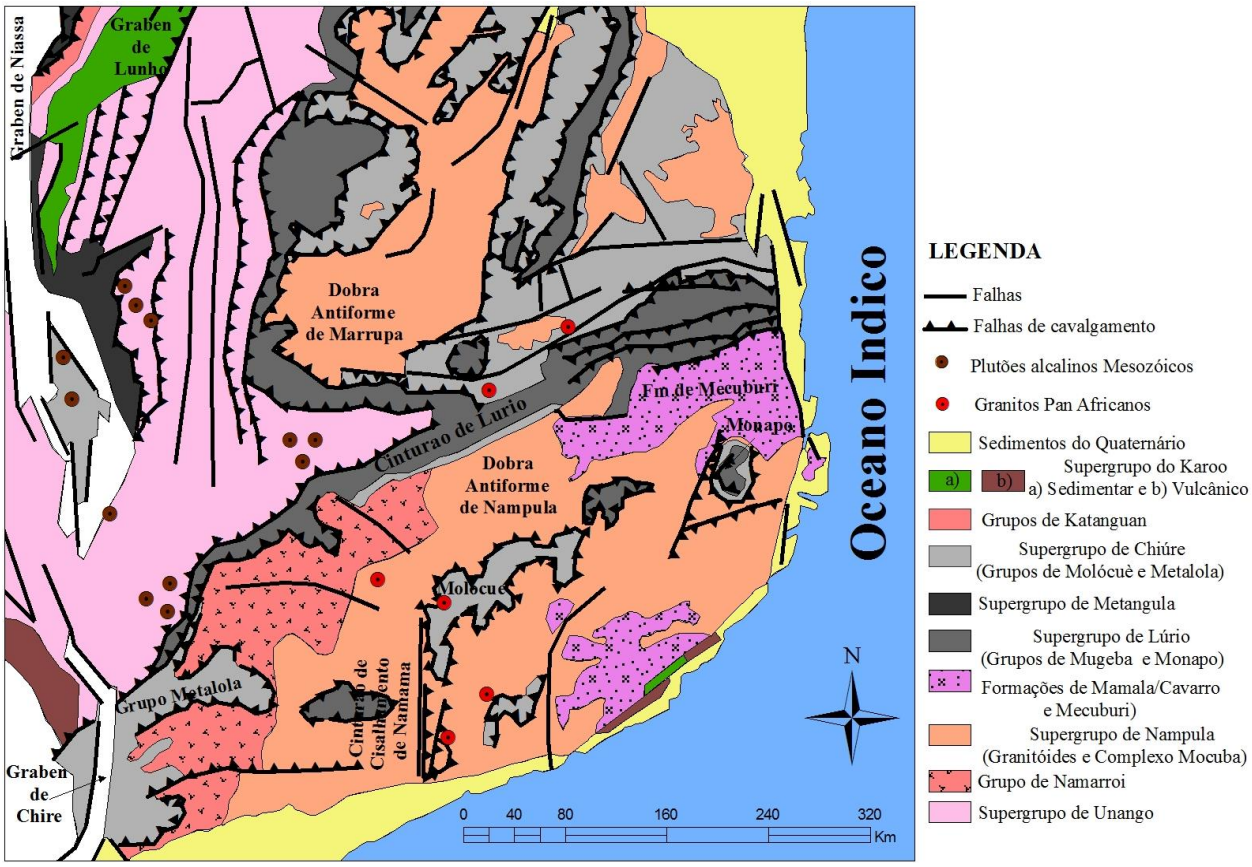


Fig. 10: Mapa da geologia regional do Nordeste de Moçambique mostrando a geologia e os principais elementos estruturais. Fonte: (Cronwright, 2005a)

4.2.1. Supergrupo de Chiúre

Este Supergrupo aflora em três áreas separadas cobertas pela Unidade de Nampula. Cada grupo individual ocorre em áreas específicas (Lächelt, 2004):

- o Grupo Nantire-Metil, entre Moma e Nametil, do limite Sudoeste da unidade;
- o Grupo de Molocué, na região central da unidade ao longo do Cinturão de Cisalhamento de Namama com tendência NNE-SSW;
- o Grupo de Metolola, que ocorre na região oeste da unidade, ao longo do Rift de Chire.

Em seguida faz-se uma descrição do Grupo de Molocué, área na qual o presente estudo se enquadra.

4.2.1.1. Grupo de Molocué

Este grupo localiza-se, principalmente, ao longo do Cinturão de Cavalgamento de Namama (Aquater, 1983). De acordo com a localização territorial, o grupo encontra-se subdividido do seguinte modo (Lächelt, 2004):

- ✓ Formação de Morrua (na região centro e norte);
- ✓ Formação de Nipiode (na região sul e inclui o Alto Ligonha);
- ✓ Formação de Inrepele.

Um facto muito importante é que as rochas deste grupo encontram-se ultramilonitisadas, laminadas e dobradas, encontrando-se dispostas inicialmente nas direções NE–SW e ENE–WSW, e atualmente dispostas na direção NNE-SSW. Esta mudança foi causada por um overprint tardio (Lächelt, 2004).

A distribuição das rochas destas formações ou deste complexo não é homogénea, com efeito: a Oeste do cinturão de cisalhamento de Namama predominam os gnaisses das Formações do Monte Inrepele e do rio Nipiode, com anfibolitos subordinados do Complexo de Morrua; na área do Cinturão de Cisalhamento de Namama, e sobretudo a Este desta, os litotipos do Complexo de Morrua tornam-se muito mais abundantes.

Na cobertura do Grupo do Rio Molocué distinguem-se duas partes com características opostas, quer pelas litologias, quer pelas condições ambientais e estruturais, sob as quais as rochas se formaram: uma porção “félsica”, correspondente às Formações do Monte Inrepele e do Rio Nipiode; e uma porção “máfica”, correspondente ao Complexo de Morrua (Lächelt, 2004).

O Ciclo Orogénico Luriano foi precedido por uma fase distensiva, que dilatou o embasamento e determinou a formação de uma bacia intracontinental. Na zona de margem continental, depositaram-se arenitos quartzosos, grauvaques, misturados com material argiloso ou argilo-calcáreo (Formação do Rio Nipiode), seguidos por uma sequência predominantemente arcósica (Formação do Monte Inrepele). Nestes sedimentos poderiam intercalar-se produtos magmáticos efusivos como consequência da atividade vulcânica ou, também, por limitada modificação de vulcanitos do embasamento (Aquater, 1983). Na bacia em distensão teve lugar uma intensa atividade magmática efusiva (basaltos toleíticos) e intrusiva (gabros e ultramafitos piroxénicos) e depositaram-se sedimentos margosos, arenosos e calcários misturados com

vulcanoclastitos (Fig. *11*). Nas bordas da bacia, próximo do talude continental, os grandes "apports" detríticos da área emersa favoreceram a acumulação de material grosseiro (metaconglomerado poligénico) (Aquater, 1983). Durante o evento orogénico Luriano, a bacia voltou a fechar-se e o metamorfismo (948 ± 39 Ma) transformou os materiais siálicos em quartzitos, micaxistos e paragnaisses e os da bacia "oceânica" em anfibolitos, metagabros, metaultramafitos, paragnaisses básicos e rochas calcosilicatadas. Os litotipos do Complexo de Morrua sugerem uma associação do tipo ofiolítica (Aquater, 1983). Quanto ao grau de metamorfismo, é geralmente de alto grau (fácies anfibolíticas de altas temperaturas e pressões) (Lächelt, 2004).

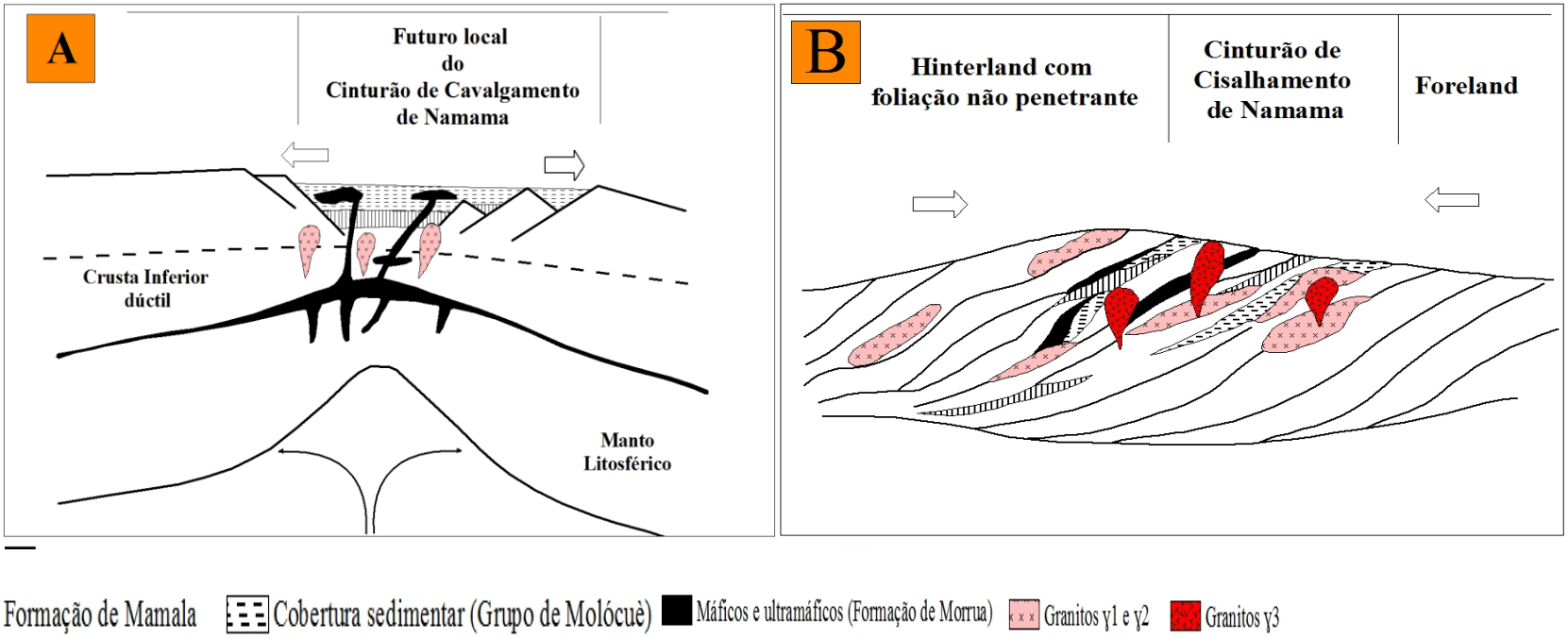


Fig. 11: Modelo de evolução do Cinturão de Cisalhamento de Namama. **A**- Período de 1060–920 Ma**; B**- Fecho e desenvolvimento do Cinturão de Cisalhamento de Namama no período Pan-Africano. ɣ1 e ɣ2 são granitos pós-cinemáticos e ɣ3 são granitos Pan-Africanos. Adaptado de Costa (1992) em Cronwrigth (2005).

4.2.1.1.1. Formação de Morrua

Esta formação inclui três grupos de rochas:

- ✓ gnaisses com anfíbola-granada-clinopiroxena, contendo piroxenitos. Estas rochas encontram-se metamorfizadas para fácies granulíticas;
- ✓ metagabros e rochas meta-ultrabásicas, como piroxenitos, anfibolitos e rochas talco-cloriticas. Esses depósitos estão retrometamorfisados;
- ✓ Metassedimentos como por exemplo, gnaisses portadores de flogopite, leucognaisses e quartzitos-ferruginosos (quartzito-Fe), conglomerados e gnaisses migmatitícos (Lächelt, 2004).

Essas rochas são consideradas de origem ígnea e vulcânica com afinidades toleíticas a calco-alcalinas (Pekkala *et al.*, 2008). A componente sedimentar encontra-se presente em forma de calco-silicatos finamente bandados e quartzitos ferruginosos impuros com granada, anfíbola, piroxena e epídoto (Aquater, 1983; Cadoppi *et al.*, 1987; Cronwright, 2005a).

4.2.1.1.2. Formação de Nipiode

Esta formação aflora largamente entre Mulevala e Mocubela, nas regiões do rio Nipiode. Representa o equivalente metamórfico duma fina sequência continental de águas superficiais compreendendo pelitos, quartzitos, arcoses, grauvaques e conglomerados ocasionais (Cadoppi *et al.*, 1987; Cronwright, 2005a). É constituída por uma unidade fundamental de gnaisses finos com bandas centimétricas a milimétricas, de composição variável, nas quais se intercalam gnaisses plagioclásicos, mais micáceos e micaxistos com biotite e/ou moscovite.

Os micaxistos com biotite e/ou moscovite, por vezes, gradam para um xisto com duas micas (Aquater, 1983). Nestes últimos litotipos aparece, por vezes, silimanite e, mais raramente, granada (Cadoppi *et al.*, 1987; Cronwright, 2005a).

4.2.1.1.3. Formação de Inrepele

Esta formação representa uma sequência félsica, substancialmente homogénea, cuja parte fundamental é constituída por gnaisses muito finos, leucocráticos, com conteúdo em máficos muito variável, mas sempre muito baixo (Aquater, 1983).

As principais litologias desta formação incluem: gnaisses leucocráticos de duas micas contendo parcialmente granada, leucognaisses acamadados com quartzo, moscovite, biotite e anfíbola laminados, gnaisse com moscovite, granada, microclina e quartzitos, incluindo quartzitos portadores de duas micas (Lächelt, 2004). A Formação de Inrepele é considerada como representante de uma sequência vulcânica félsica relacionada com material detrítico (Cadoppi *et al.*, 1987; Cronwright, 2005a).

4.2.2. Geologia local

A região de estudo é caracterizada por uma cobertura de grupos litológicos do Quaternário e uma base do Proterozóico (Neoproterozóico e Mesoproterozóico) abrangida pelas folhas 1538 de Murrupula e 1637 de Errego (Fig. 12 *e* Fig. 13) (ver Anexos 3 e 4).Trata-se de uma região dominada por gnaisses do Mesoproterozóico de médio a alto grau metamórfico que foram intrudidos por granitóides Pan-Africanos (450-530 Ma) e pegmatitos (~430-470 Ma) (Macey *et al.*, 2006, Gomes *et al.*, 2008). Na sua maioria, os pegmatitos encontrados na faixa de estudo estão encaixados em rochas filíticas, anfibolíticas, gnaisses intercalados máficos e leucocráticos e migmatíticas. Essas rochas pertencem ao Complexo de Nampula, uma divisão tectonoestratigráfica do “Mozambique Belt”, que está situada a Sul do Cinturão granulítico do Lúrio (CL) (Council for Geoscience, 2007).

Em Naipa são observados contactos dos granitos com as rochas encaixantes e é só observável no extremo ocidental da mancha, nas vizinhanças da mina de Marigde (vide anexo 1) (Nunes, 1966). Quanto à estrutura regional dos pegmatitos de Naipa, a faixa de rochas da série metassedimentar que constitui o fundo onde se encontra o pegmatito apresenta uma

estrutura geral NE-SW a ENE-WSW (ver Anexo 2). Esta estrutura é definida por sucessões de dobras com eixos orientados segundo a direção acima indicada, mergulhando para SW ou WSW. O comportamento das dobras apresenta-se de largamente ondulado até bastante apertado, este último caso bem evidente no vale do rio Enliua, a norte do Muiane (Anexo 2) (Nunes, 1966). Perturbações de estrutura regional assinaladas em certos locais à volta do maciço, como por exemplo, junto à confluência dos rios Tavane e Metuisse, ou a Norte e a Oeste da mina de Marigde, são resultantes da intrusão granítica de Naipa (Nunes, 1966).

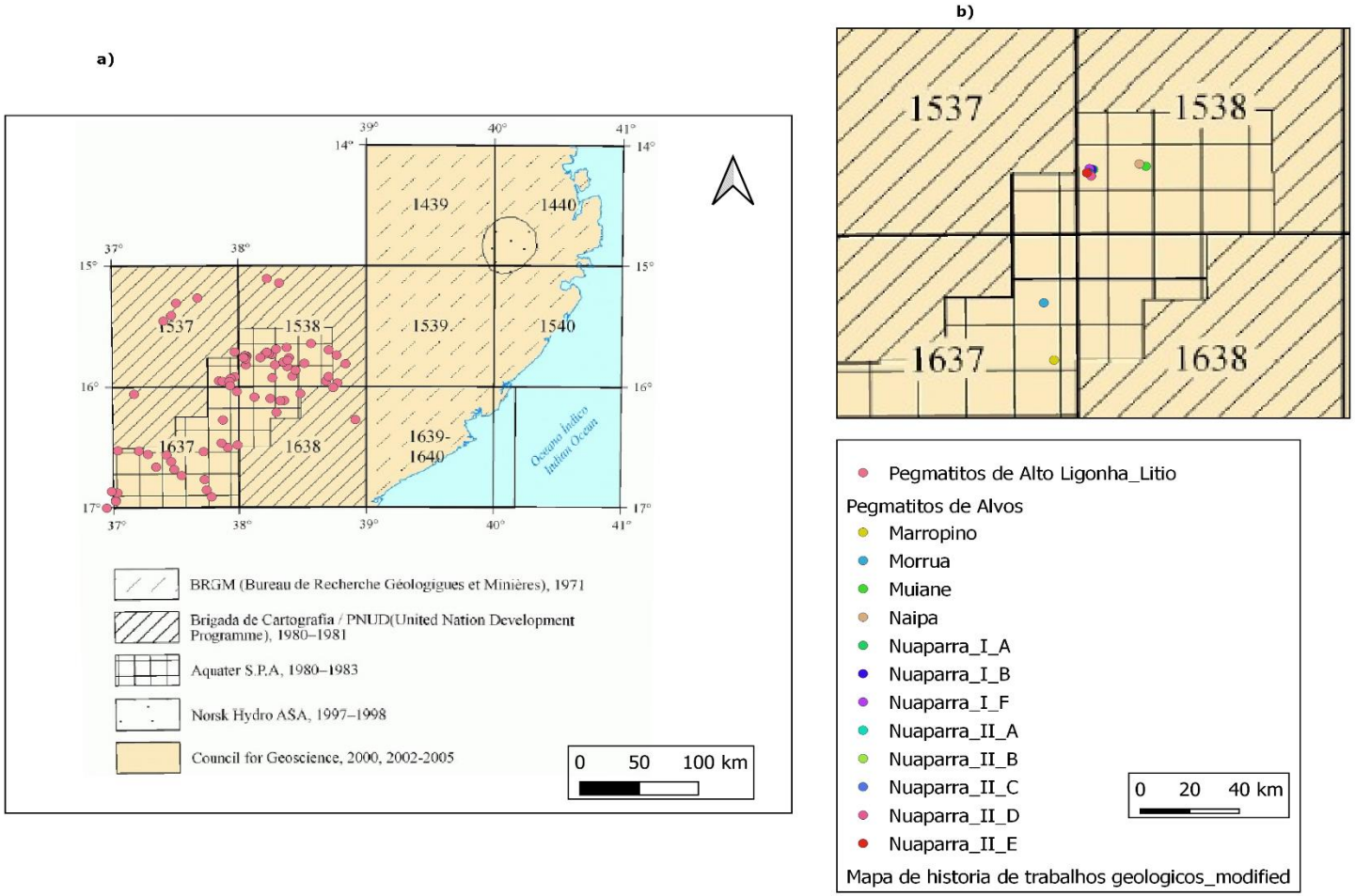


Fig. 12: a) Mapa da história do mapeamento geológico em Alto Ligonha; b) Relação dos pegmatitos alvos com as folhas 1538/1637. Adaptado de (Council for Geoscience, 2007)

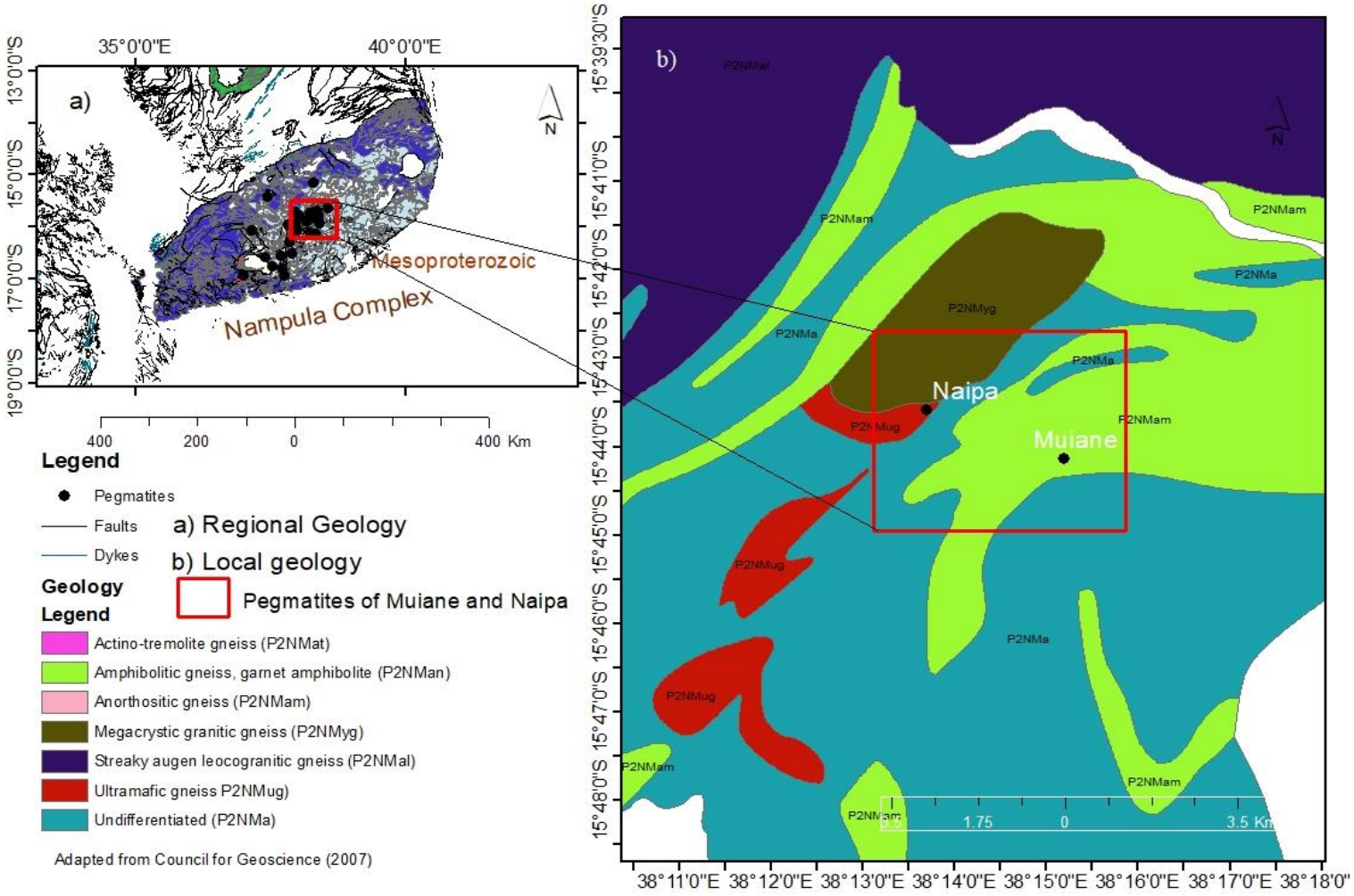


Fig. 13: Geologia local

4.2.3. Trabalhos geológicos anteriores efetuados na região

Em 1918 foi publicada a primeira carta geológica de Moçambique e, em 1951, foi desenvolvido o conceito de Cinturão de Moçambique (Mozambique Belt), como um cinturão orogénico de alto grau, com orientação N-S, nas margens Leste dos Crátons de Tanzânia e Kalahari (Manjate, 2015). A primeira referência escrita relacionada com o potencial mineral da área de estudo foi realizada em 1930 por António Joaquim, e os primeiros levantamentos geológicos da região foram realizados pela Repartição de Indústria e Geológica Portuguesa, em 1942 (Cronwright, 2005a). Durante os anos 1953 e 1954, a Companhia Americana E.J. Longyear foi encarregue de realizar pesquisas geológicas por parte do Governo português, o qual culminou com a publicação de um mapa geológico regional na escala 1:250000 e sua respetiva notícia explicativa, em 1954. Estes dividiram a estratigrafia Pré-Câmbrica em duas maiores unidades:

- o antigo basamento referido como "Gnaisses Regionais" (e relacionados com metassedimentos) e;
- jovens "Séries Metassedimentares-Xistosas", as quais hospedam grande parte dos pegmatitos. Os granitos jovens e os pegmatitos intruíram estas unidades (Cronwright, 2005a). Em 1970, a empresa francesa BRGM fez a revisão do antigo mapeamento feito pela companhia americana E. J. Longyear e desenvolveu um novo mapeamento, no Nordeste de Moçambique. Este novo mapeamento culminou com a produção de um mapa que introduziu a tectónica de Nappe, explicando a Estrutura do Monapo e Klippe de Mugeba (atual Complexo de Mugeba) (Aquater, 1983; Cronwright, 2005a). Estratigraficamente, reconheceram o Grupo de Nampula (atualmente Complexo de Nampula, constituído por gnaisses com extensão regional) e o Grupo de Lúrio, com séries metassedimentares. No ano de 1987, a empresa britânica Hunting Geology and Geophysics Ltd realizou pesquisa para o desenvolvimento na área mineral, na qual, produziu cartas específicas de depósitos de metais raros e terras raras de Moçambique (Krõner *et al.*, 1997; Cronwright, 2005a; Macey *et al.*, 2010) e deram um passo em frente ao estudar a evolução metamórfica e a tectónica da região, tendo contribuído no conhecimento dos depósitos minerais e nas condições de formação dos pegmatitos.

Em 2006, foi produzida uma Carta Geológica de Moçambique, na escala 1:250 000, e a respetiva Notícia Explicativa, pela Direção Nacional de Geologia (DNG) em parceria com a Council for Geoscience (CGS), através do Projeto de Capacitação Institucional no Sector geológico mineiro, nos distritos de graus 1537 (Alto Molocué), 1538 (Murrupula), 1539 (Nampula), 1540 (Mogincual), 1637 (Errego), 1638 (Gilé, área em que se encontram os pegmatitos em estudo) e 1639-40 (Angoche) (Council for Geoscience, 2007). Considerada geologia de base nesta tese sobre aplicações e técnicas de deteção remota para a prospeção geológica.

Em 2008, foi realizada a caracterização específica dos campos pegmatíticos e dos pegmatitos graníticos individuais de Alto Ligonha, tendo em consideração o conteúdo de Tântalo (Ta), concluindo que esses são menos especializados em Nióbio (Nb), por vezes os pegmatitos apresentam grandes dimensões (1Gt a 15Gt de material indiferenciado) e uma especialização LCT muito evoluída, com teores culminantes de Li (<15500 ppm), Cs (<6000 ppm) e Ta (<2100 ppm) (Gomes *et al.*, 2008). Os valores referidos foram alcançados em unidades tardias onde ocorrem minerais tipomórficos, tais como, abundante lepidolite, ocasional polucite, frequentes Mn-tantalite, várias microlites e mesmo estíbio-tantalite (Gomes *et al.*, 2008). Foi verificada a ocorrência de polucite no pegmatito de Namacotche, numa bolsada de cerca de 40 toneladas. Este pegmatito, que tem a direção geral dos pegmatitos da área de Alto Ligonha, sensivelmente E-O, com uma inclinação de 45 graus para Sul, é essencialmente formado no local de ocorrência de polucite, por quartzo e plagióclases, principalmente cleavlandite um pouco alterada, associados à lepidolite, que forma uma rede, de malha irregular, cujos interstícios são preenchidos pela polucite. Além desta espécie mineral, ocorrem neste pegmatito, espodumena, berilo, bismutite, microlite, colombo-tantalites e samarskite, os dois últimos em pequeníssima quantidade (Quadrado, 1963). Do projeto de doutoramento aqui apresentado, resultaram algumas publicações em congressos e revistas, que serão referidas devidamente ao longo dos diversos capítulos deste trabalho.

Capítulo V

V. Metodologias

O presente trabalho teve início em março de 2017, na Província[4] Pegmatítica de Alto Ligonha, situada na Zambézia, e representa o fulcro da Cintura Monapo-Mocuba cujos alinhamentos principais são grosseiramente sub-paralelos aos do "Mozambique Belt". Na zonografia desta província metalogénica encontram-se pegmatitos com estruturas internas e associações mineralógicas muito diversificadas, observando-se todos os termos externos da variabilidade paragenética própria da classe de elementos raros (Gomes, 2003). Foi aqui determinada uma área de treino (Pegmatitos de Muaine, Morrua e Marropino) e uma área de pesquisa (Nuaparra, Naipa). Entre agosto de 2017 e julho de 2018 foi realizado o trabalho de campo, o qual incluiu a georreferenciação, análise espetral, e a amostragem dos pegmatitos de Naipa e Muiane, na localidade de Muiane, distrito de Gilé, entre os quais 14 amostras, das quais, algumas apresentam mineralizações litiníferas (com lepidolite e ou espodumena, e caulinos com resíduos de lítio) foram obtidas. Desta amostragem resultou um conjunto de 5 lâminas delgadas e polidas. Foi com base nestas lâminas polidas que foram efetuados os estudos petrográficos e as análises ao microscópio eletrónico de varrimento e de elementos maiores e menores.

5.1. Prospeção e cartografia

A fase inicial do mapeamento geológico começou pela análise das cartas geológicas de Moçambique à escala 1:250 000, produzidas pelo Conselho de Geociências Sul-africano (CGS), Serviços Geológicos da Noruega (NGU), Serviços Geológicos da Finlândia (GTK), e extinta Direção Nacional de Geologia de Moçambique (DNG), folhas 1538 de Murrupula (Nampula) e 1638 de Gilé (Zambézia). A prospeção e pesquisa dos pegmatitos assentou num cuidado estudo prévio da região, com pesquisa bibliográfica, análise dos aspetos geológicos da região, o que, por fim, culminou na escolha de um método de tratamento de

[4] Sinónimo de Província metalogénica, região cujas jazidas minerais nela existentes têm as mesmas caraterísticas (Carvalho, 2011).

dados expedito e de fácil interpretação, resultando em cartas à escala 1:4000, com o cruzamento da cartografia e geologia de base. Os mapas obedecem ao DATUM (EPSG:32737, WGS 84 / UTM zone 37S).

5.2. Microscópia eletrónica de varrimento

Neste estudo recorreu-se ao Microscópio Eletrónico de Varrimento (MEV) para reconhecer algumas relações mineralógicas e texturais entre os minerais dos pegmatitos.

As análises foram realizadas no Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP). O exame MEV/Espetroscopia por energia dispersiva (EDS) foi realizado utilizando o Microscópio Eletrónico de Varrimento ambiental de alta resolução (Schottky), com microanálise por raios X e análise de padrões de difração de eletrões e eletrofundidos: Quanta 400FEG ESEM / EDAX Genesis X4M (Fig. 14). Neste equipamento encontra-se a fonte de alimentação – canhão de eletrões – um sistema condensador que permite variar a intensidade de iluminação, uma lente objetiva que fornece uma primeira ampliação do objeto e um sistema que forma a imagem final e a projeta - como é detalhado no capítulo das metodologias desse trabalho.

As amostras foram revestidas com um filme fino de carbono por vaporização, utilizando o equipamento JEOL JEE – 4X Vacuum Evaporator.

Estas análises serviram essencialmente para:

- identificar minerais acessórios e opacos, e esclarecer dúvidas que surgiram durante a análise petrográfica;
- fazer a descrição composicional, pontual e semi-quantitativa dos minerais colhidos na área de estudo, com a seguinte codificação: PNC, PM1, LN1 e FM2.

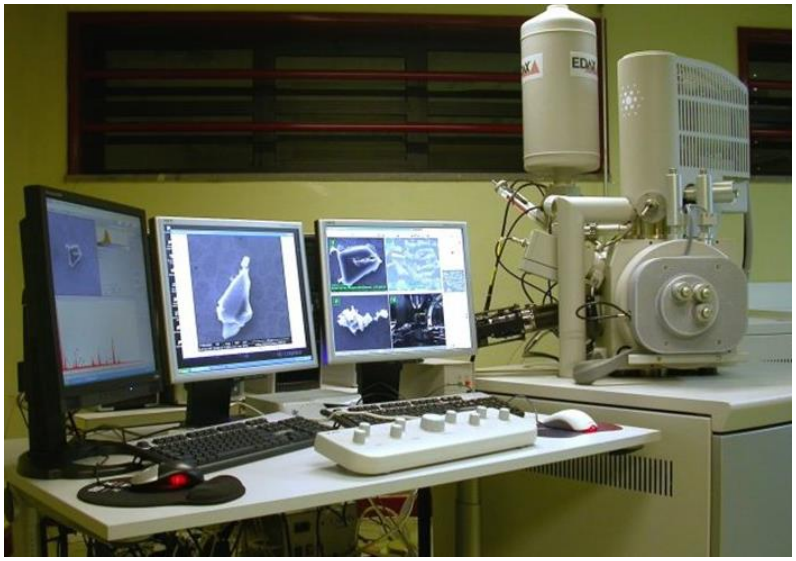


Fig. 14: Microscópio Eletrónico de Varrimento ambiental, de alta resolução (Schottky), com Microanálise por Raios X (CEMUP).

5.3. Fluorescência de Raios X Portátil

As amostras de minerais e rochas foram submetidas à análise química de quantificação dos elementos maiores, menores e traços. As análises químicas foram efetuadas no Espaço Geologia da FCUP, com recurso ao aparelho de Fluorescência de raios X Buker Titan. A FRX é uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos químicos (Z>10) presentes em uma amostra (análise qualitativa), assim como estabelecer a proporção (concentração) em que cada elemento se encontra presente na amostra.

Foram analisadas 14 amostras, cujos resultados encontram-se em (Tabela 20), detalhando dados de silício, alumínio, potássio e rubídio, obtidos na amostragem dos pegmatitos de Naipa e Muiane, por fluorescência de raio X portátil (FRX).

5.4. Difração de Raios X

Esta técnica foi usada para a análise dos caulinos (amostras CM1 e CM2). A difração de raios X (DRX) é o método analítico mais utilizado na quantificação de minerais argilosos (Gomes, 1988). É uma técnica que fornece informações detalhadas quanto à qualificação, caraterização e quantificação dos minerais presentes na argila (Gomes, 1988; Terroso, 2005). Além disso, a DRX é uma técnica de análise não destrutiva, rápida e muito versátil (permite vários tipos de preparação e tratamentos dos espécimes) (Gomes, 1988; Terroso, 2005). As análises de DRX foram executadas no laboratório de raios X do Departamento de Geociências, da Universidade de Aveiro, com o equipamento Philips/Panalytical modelo X Pert-Pro MPD, usando a radiação Cu Kα (Fig 15:). O equipamento de Difração de Raios-X consiste basicamente em um tubo emissor de raios-X, uma câmara circular onde se situa a amostra (goniómetro) e um detetor que recebe os raios difratados (Gemusse, 2014).

As amostras estudadas foram reduzidas a pó num moinho de argolas, com um almofariz de ágata, em 5', 700 rotações por minuto, material a processar com características moles, frágil e pastoso, de granulometria inicial ≤8 mm e final ≤ 10 μm.



Fig 15:Difractómetro usado para a Difração de Raios X dos Caulinos de Muiane.

5.5. Espetroscopia de Refletância

A espetroscopia é uma técnica usada há décadas para identificar, quantificar e compreender os materiais (sólidos, líquidos e gasosos) (Clark *et al.*, 2003).

A espetroscopia de refletância é um procedimento analítico que usa a energia eletromagnética refletida pelos objectos nas regiões do visível, infravermelho próximo (VNIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR), com a finalidade de obter informação sobre a composição mineralógica e química dos objetos analisados (Clark, 1999; Sabins, 1999). Foram examinadas 6 amostras colhidas em pegmatitos de Naipa, e 18 amostras colhidas em pegmatitos de Muiane, a partir do Espetroradiómetro de refletância, fabricado pela Analytical Spectral Devices (ASD) (ASD INC FIELDSPEC® 4), com um alcance de deteção de 350nm-2500 nm (VNIR, SWIR), pertencente a Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território.

Estas análises foram efetuadas com oobjetivo de obter o espetro mineralógico das amostras, para aferir ou comparar as assinaturas espetrais, quanto a sua similaridade de espectros, com as bibliotecas espectrais de referência como: USGS High Resolution Spectral Library (Kokaly; *et al.*, 2017) (Fig. 16), onde são apresentados 5 espectros (espodumena, quartzos, moscovite, lepidolite e feldspatos) e ECOSTRESS Spectral Library - Version 1.0, biblioteca produzida pelo Instituto de Tecnologia de Califórnia (JPL) Jet Propulsion Laboratory(Fig. 17).

Das duas bibliotecas espetrais apresentadas neste trabalho, somente a USGS High Resolution Spectral Library dá opção de utilizar a remoção do contínuo.

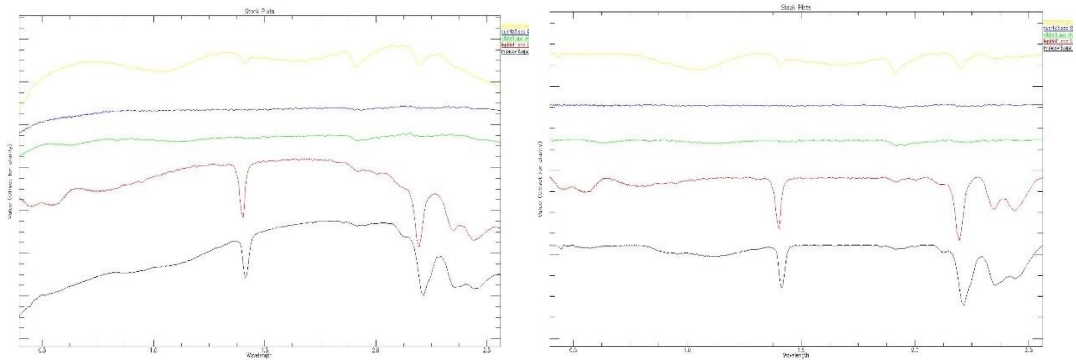


Fig. 16: Amostras da biblioteca da USGS (extraído no ENVI) a esquerda o plot normal e a direita o plot é apresentado a Remoção do contínuo.

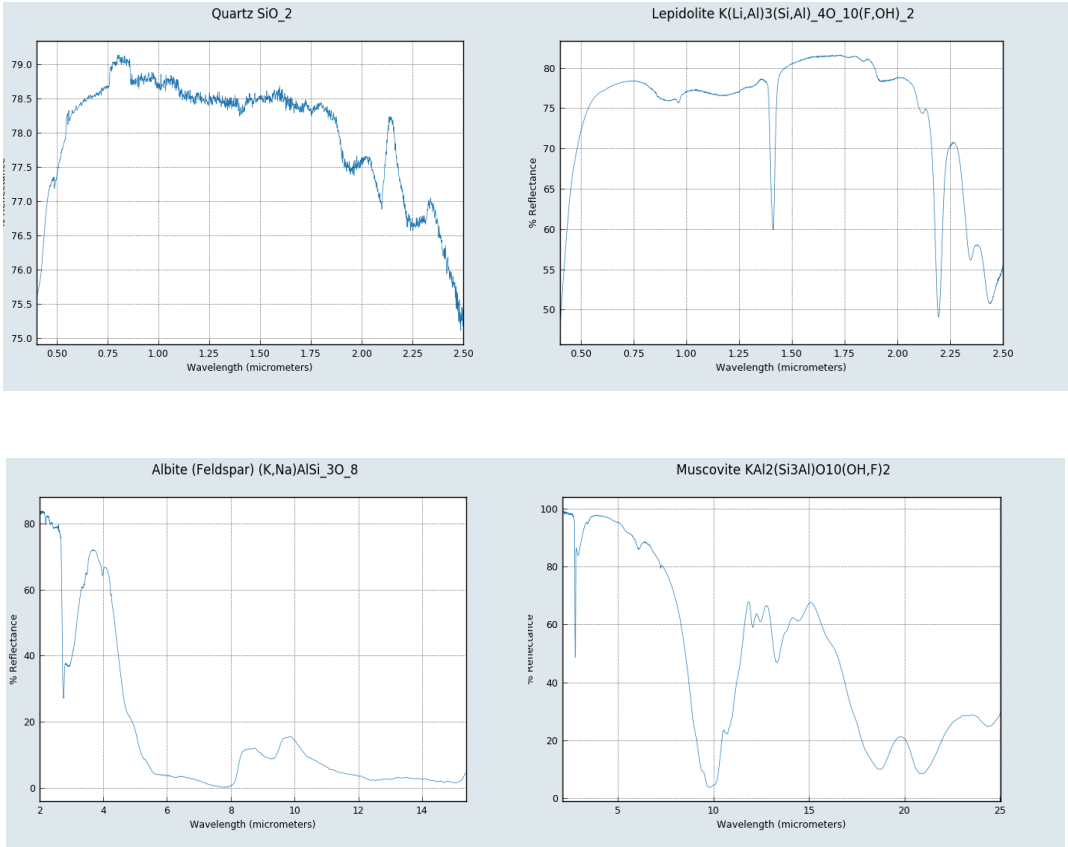


Fig. 17: Espectros extraídas na ECOSTRESS Spectral Library - Version 1.0, biblioteca produzida pelo Instituto de Tecnologia de Califórnia (JPL) Jet Propulsion Laboratory.

5.5.1. Remoção do Contínuo

A remoção do contínuo é uma técnica proposta por (Clark and Roush, 1984) que permite acentuar feições, contínuas e individuais, que retratam aspetos internos dos alvos, podem ser divididas em bandas definidas como um conjunto de medidas de refletância, entre dois comprimentos de onda. Técnica testada e tendo bons resultados em muitos trabalhos, como (Van Der Meer, 2000; Loum *et al.*, 2016; Cardoso-Fernandes *et al.*, 2020), sendo

considerada uma função matemática que segrega bandas de absorção particulares dos espectros de refletância com suas feições de absorção, permitindo assim uma melhor compreensão dos diferentes parâmetros das bandas espectrais (Kruse, 1988; Crowley *et al.*, 1989). Existem duas técnicas de corrigir o contínuo: quociente do contínuo e diferença do contínuo (vide a Fig. *18*).

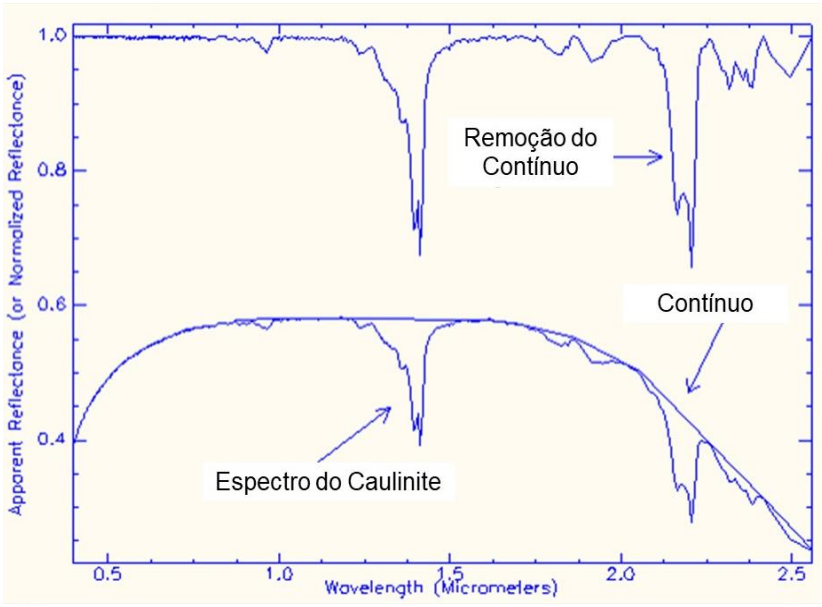


Fig. 18: Métodos de remoção do contínuo: por “diferença do contínuo” e por “quociente do contínuo “extraído em (Kruse, 1993).

Para este estudo foram usados dois softwares para geração dos espectros, o ENVI baseado em estudos de (Clark and Roush, 1984; Kruse *et al.*, 1993), permitindo a aplicação de remoção do contínuo e o Spectragryph-optical spectroscopy software (Menges, 2019), este último usado para a elaboração das curvas espectrais primárias, e a linha de base. A linha de base é interativa, podendo ser linear, adaptativa e de espalhamento (Liland *et al.*, 2010; Beleites, 2020); a linear é uma linha de base reta, com inclinação e deslocamentos variáveis, enquanto que, a adaptativa, é de forma variável, adaptam-se ao espectro; e, por fim, por espalhamento, serve para remover o conteúdo disperso dos espectros de UV-VIS de soluções de espalhamentos (Giguere *et al.*, 2017; Hu *et al.*, 2018b; Zhang *et al.*, 2020). Para este trabalho optou-se pela linha adaptativa, sugerida por (Giguere *et al.*, 2017; Wilson, 2020), pois, esta mostra uma aparência do espectro padrão encontrado em diferentes bibliotecas espectrais.

5.5.2. Criação da Biblioteca Espectral de Referência

Foi criado uma biblioteca espectral com base nos resultados do espetroradiómetro, onde são apresentados na (Tabela 4-Tabela 7).

Tabela 5: Exemplo da Estrutura da Biblioteca Espectral (Muiane)

Para ser efetuada uma análise semiautomática da composição mineralógica das curvas espetrais a partir de comparação das bibliotecas espetrais de referência.

Label	Face	Cor	Obs.	Foto
Muiane				
FM-01				
FM-01_00001-5	partida	branca-alaranjada		FM-01_00001-5.jpg
FM-01_00006-10	partida	branca-alaranjada		FM-01_00006-10.jpg
FM-01_00011-15	serrada	branca-abrilhantada		FM-01_00011-15.jpg
FM-01_00016-20	partida	branca-alaranjada		FM-01_00016-20.jpg
FM-02				
FM-02(1)_00001-5	partida	avermelhada		FM-02(1)_00001-5.jpg
FM-02(1)_00006-10	serrada	Branca-roseada		FM-02(1)_00006-10.jpg
FM-02(1)_00011-15	partida	avermelhada-escura		FM-02(1)_00011-15.jpg
FM-02(2)_00001-5	serrada	roseada		FM-02(2)_00001-5.jpg
FM-02(2)_00006-10	partida	roseada	zona escura com óxidos	FM-02(2)_00006-10.jpg
FM-03				
FM-03(1)_00001-5	partida	branca		FM-03(1)_00001-5.jpg
FM-03(2)_00001-5	serrada	avermelhada		FM-03(2)_00001-5.jpg
FM-03(2)_00006-10	exposta	avermelhada	alguns óxidos	FM-03(2)_00006-10.jpg
FM-03(2)_00011-15	exposta	tons escuros		FM-03(2)_00011-15.jpg
FM-03(2)_00016-20	partida	branca-alaranjada		FM-03(2)_00016-20.jpg
FM-03(2)_00021-25	partida	branca-alaranjada		FM-03(2)_00021-25.jpg
FM-03(2)_00026-30	partida			FM-03(2)_00026-30.jpg

Tabela 4: Exemplo da Estrutura da Biblioteca Espectra*l (Muiane)*

Label Muiane	Face	Cor	Obs.	Foto
FM-04				
FM-04(1)_00001-5	exposta	branca		FM-04(1)_00001-5.jpg
FM-04(1)_00006-10	partida			FM-04(1)_00006-10.jpg
FM-04(1)_00010-15	partida	com tons escuros		FM-04(1)_00010-15.jpg
FM-04(2)_00001-5	partida	branca	riscos escuros	FM-04(2)_00001-5.jpg
FM-04(2)_00006-10	partida	branca	com brilho	FM-04(2)_00006-10.jpg
FM-04(3)_00001-5	partida	branca-alaranjada		FM-04(3)_00001-5.jpg
FM-04(3)_00006-10	serrada	branca		FM-04(3)_00006-10.jpg
FM-04(3)_00011-15	partida	escura	com brilho	FM-04(3)_00011-15.jpg
FM-04(4)_00001-5	exposta	escura-translucida	rosa	FM-04(4)_00001-5.jpg
FM-04(4)_00006-10	partida	escura-translucida	rosa e azul	FM-04(4)_00006-10.jpg
FM-04(4)_00011-15	partida			FM-04(4)_00011-15.jpg
FM-04(5)_00001-5	partida	escura-leitosa	banca	FM-04(5)_00001-5.jpg
FM-04(5)_00006-10	partida	escura-leitosa	alguns óxidos	FM-04(5)_00006-10.jpg
FM-04(5)_00011-15	partida	escura-leitosa		FM-04(5)_00011-15.jpg
FM-L1				
FM-L1_00001-5	serrada	branca	zona arroxeada e brilho	FM-L1_00001-5.jpg
FM-L1_00006-10	partida	branca	com óxidos	FM-L1_00006-10.jpg
FM-V2-LM1				
FM-V2-LM1_00001-5	exposta		Quartzo, feldspato, Lepidolite	FM-V2-LM1_00001-5.jpg
FM-V2-LM1_00006-10	exposta		Quartzo, feldspato, Lepidolite	FM-V2-LM1_00006-10.jpg
FM-V2-LM1_000011-15	exposta		Quartzo, feldspato, Lepidolite	FM-V2-LM1_000011-15.jpg
FX_				
FX_00001-5	serrada	branca		FX_00001-5.jpg
FX_00006-10	partida	branca	zona alaranjada	FX_00006-10.jpg
FX_00011-15	partida	branca		FX_00011-15.jpg
FX_00016-20	partida	branca	zona alaranjada	FX_00016-20.jpg
PM-Q1				
PM-Q1_00001-5	exposta	escura-brilho	quartzo	PM-Q1_00001-5.jpg
PM-Q1_00006-10	exposta	esbranquiçada	quartzo	PM-Q1_00006-10.jpg
PM-Q1_00010-15	exposta		quartzo	PM-Q1_00010-15.jpg
PM-Q1(2)_0001-5	partida	leitosa		PM-Q1(2)_0001-5.jpg
PM-Q1(3)_0001-5				PM-Q1(3)_0001-5.jpg
PM-Q2				
PM-Q2_00001-5	partida	branca		PM-Q2_00001-5.jpg
PM-Q2_00006-10	exposta	branca-brilho		PM-Q2_00006-10.jpg
PM-Q2_000010-15	partido	branca-alaranjada		PM-Q2_000010-15.jpg
PM-Q3_00006-10	partida	branca	alguns óxidos	PM-Q3_00006-10.jpg
PM-Q3.1				
PM-Q3.1_00001-5	serrada	leitosa		PM-Q3.1_00001-5.jpg

PM-Q3.1_00006-10	partida			PM-Q3.1_00006-10.jpg
PM-Q3.1_00011-15	partida			PM-Q3.1_00011-15.jpg
PM-Q3.1_00016-20	partida			PM-Q3.1_00016-20.jpg
PM-Q3.1_00021-25	partida			PM-Q3.1_00021-25.jpg
PM-Q4				
PM-Q4_00001-5	partida	branca		PM-Q4_00001-5.jpg
PM-Q4_00006-10	partida			PM-Q4_00006-10.jpg
PM-Q4_00010-15	partida			PM-Q4_00010-15.jpg
PM-Q5				
PM-Q5_00001-5	partida	branca		PM-Q5_00001-5.jpg
PM-Q5_00006-10	partida	branca		PM-Q5_00006-10.jpg
PM-Q5_00011-15	partida			PM-Q5_00011-15.jpg
PM-Q6				
PM-Q6_00001-5	serrada	branca		PM-Q6_00001-5.jpg
PM-Q6_00006-10	partida	branca		PM-Q6_00006-10.jpg
		pigmentação		
PM-Q6_000011-15	partida	avermelhada		PM-Q6_000011-15.jpg
PM-Q7				
PM-Q7(1)_00001-5	partida	leitosa		PM-Q7(1)_00001-5.jpg
PM-Q7(1)_00006-10				PM-Q7(1)_00006-10.jpg
PM-Q7(2)_00001-5	partida	escura		PM-Q7(2)_00001-5.jpg
PM-Q7(2)_00006-10	partida	leitosa		PM-Q7(2)_00006-10.jpg
PM-Q8				
PM-Q8_00001-5	partida	branca		PM-Q8_00001-5.jpg
PM-Q8_00006-10		com óxidos		PM-Q8_00006-10.jpg
PM-Q8_00011-15		com óxidos		PM-Q8_00011-15.jpg
PM-Q8_00016-20		brilho		PM-Q8_00016-20.jpg
PM-1.1				
PM-1.1_00001-5	partida	branca	com óxidos	PM-1.1_00001-5.jpg
PM-1.1_00006-10	partida	branca		PM-1.1_00006-10.jpg
PM-1.1_00011-15				PM-1.1_00011-15.jpg

Tabela 5: Exemplo da Estrutura da Biblioteca Espectral (Muiane)

Label	Face	Cor	Obs.	Foto
Muiane				
PM-05_00001-5	partida	Leitosa	coloração verde	PM-05_00001-5.jpg
PM-05_00006-10	exposta	branco-prateada	coloração azul	PM-05_00006-10.jpg
PM-05_000010-15	exposta	branco-prateada	coloração branca	PM-05_000010-15.jpg
PM-05_000016-20	exposta	Branca	leitosa	PM-05_000016-20.jpg
PM-B1				
PM-B1_00001-5	partida	branca	brilho	PM-B1_00001-5.jpg
PM-B1_00006-10	partida	branca		PM-B1_00006-10.jpg
PM-B1_00011-15	partida	branca	zona escura	PM-B1_00011-15.jpg
PM-Q9				
PM-Q9_00001-5	partida	alaranjada		PM-Q9_00001-5.jpg
PM-Q9_00006-10	partida	alaranjada		PM-Q9_00006-10.jpg
PM-Q9_00011-15		branca		PM-Q9_00011-15.jpg
PM-Q10				
PM-Q10_00001-5	exposta	brilho	mica	PM-Q10_00001-5.jpg
PM-Q10_00006-10	exposta			PM-Q10_00006-10.jpg
LM-1				
LM-1_00001-5	partida	roseada		LM-1_00001-5.jpg
LM-1_00006-10	partida	roseada		LM-1_00006-10.jpg
LM-1_000010-15	partida	roseada	com prateado	LM-1_000010-15.jpg
LM-1_000016-20	partida	roseada	com óxidos	LM-1_000016-20.jpg
LM-1_000021-25	partida	roseada	rosa escuro	LM-1_000021-25.jpg
MM-01				
MM-01_00001-5	exposta	escura	mica	MM-01_00001-5.jpg
MM-01_00006-10	exposta	escura	mica	MM-01_00006-10.jpg
MM-02				
MM-02_00001-5	exposta	escura	mica	MM-02_00001-5.jpg

Tabela 6: Exemplo da Estrutura da Biblioteca Espectral (Muiane)

Label NAIPA	Face	Cor	Obs.	Foto
LN-01				
LN-01(1)_00001-5	serrada	rosa		LN-01(1)_00001-5.jpg
LN-01(1)_00006-10	partida	rosa-claro	alguns óxidos	LN-01(1)_00006-10.jpg
LN-01(2)_00001-5	exposta	alaranjada com brilho	óxidos	LN-01(2)_00001-5.jpg
LN-01(2)_00006-10	partida	tons de roxo		LN-01(2)_00006-10.jpg
LN-01(2)_000011-15	partida	roxo com brilho	Zona escura	LN-01(2)_000011-15.jpg
LN-02				
LN-02_00001-5	partida	alaranjada	com óxidos	LN-02_00001-5.jpg
LN-02_00006-10	serrada	roxa	com brilho	LN-02_00006-10.jpg
LN-02_00011-15	partida	roxa		LN-02_00011-15.jpg
LN-02_00016-20	partida	roxa	com pigmentos escuros	LN-02_00016-20.jpg
LN-03				
LN-03_00001-5	serrada	roxa com brilho	lepidolite	LN-03_00001-5.jpg
LN-03_00006-10	exposta	roxa e parte alaranjada	lepidolite	LN-03_00006-10.jpg
LN-03_00010-15	exposta	roxa com parte esbranquiçada	lepidolite	LN-03_00010-15.jpg
LN-04				
LN-04_00001-5	partida	roxa e branca	com brilho	LN-04_00001-5.jpg
LN-04_00006-10	partida	roxa e branca	com óxidos	LN-04_00006-10.jpg
LN-04_00011-15	partida	branca		LN-04_00011-15.jpg
PN-16				
PN-16_00001-5	exposta	leitosa		PN-16_00001-5.jpg
PN-16_00006-10	partida	leitosa	pigmentos brancos	PN-16_00006-10.jpg
PN_01				
PN_01(1)_00001-5	partida	leitosa	com riscos de turmalina e óxidos	PN_01(1)_00001-5.jpg
PN_01(1) _00006-10	partida	escura com óxidos		PN_01(1)_00006-10.jpg
PN_01(1)_00011-15	partida	escura com óxidos		PN_01(1)_00011-15.jpg
PN_01(2)_00001-5	partida	escura com óxidos	Turmalina	PN_01(2)_00001-5.jpg
PN_01(3)_00001-5	partida	leitosa		PN_01(3)_00001-5.jpeg
PN_01(3)_00006-10	exposta	leitosa	quartzo	PN_01(3)_00006-10.jpg
KN-01				
KN-01_00001-5	serrada	leitosa	quartzo	KN-01_00001-5.jpg
KN-02				
KN-02_00001-5	partida	leitosa	quartzo	KN-02_00001-5.jpg
PNG-01				
PNG-01_00001-5	Partida	leitosa	quartzo (PNGQ)	PNG-01_00001-5.jpg
PNG-01_00006-10	Partida	Leitosa	com brilho	PNG-01_00006-10.jpg
PNG-01_000011-15	Partida	Verde-escuro	fragmentos brancos (PNGT)	PNG-01_000011-15.jpg
PNG-01_000016-20	Partida	Verde-escuro	com óxidos (PNGT)	PNG-01_000016-20.jpg
PNG-01_000021-25	Partida	Branca	com muitos óxidos (PNGI)	PNG-01_000021-25.jpg
PNG-01_000026-30	Partida	Alaranjada	com brilho (PNGI)	PNG-01_000026-30.jpg
PNG-01_000031-35	Partida	alaranjada	pigmentação branca (PNGI)	PNG-01_000031-35.jpg
PNG-01_000036-40	serrado	branca		PNG-01_000036-40.jpg

Tabela 7: Exemplo da Estrutura da Biblioteca Espectral (Naipa*)*.

5.6. Técnicas de análise e classificação de imagem utilizando os sensores ASTER, OLI, TM e MSI

5.6.1. Análise de Componentes Principais (ACP)

A primeira das técnicas utilizadas foi a Análise de Componentes Principais (Principal Components Analysis - PCA), considerada por Cŕosta *et al.* (2003) como uma das técnicas mais valiosas no processamento digital de imagens. É um método de análise estatística capaz de melhorar a interpretação de dados multiespectrais usados em deteção remota (Çorumluoğlu and Vural, 2013). É uma técnica de ordenação multivariada, que possibilita detetar mudanças na ocupação do solo a partir de uma série de imagens multitemporais (Loughlin, 1991; Cŕosta *et al.*, 2003). Permite ainda a padronização de séries de imagens distintas, um passo necessário em qualquer procedimento de deteção digital de alterações da cobertura do solo. A técnica é rápida, robusta e confiável, e não requer correção atmosférica ou radiométrica (Loughlin, 1991). A partir desta análise selecionou-se a componente que tivesse os valores mais significativos formados pelas bandas selecionadas para analisar e avaliar os pegmatitos. As ACPs foram realizadas com as bandas do sensor ASTER, Landsat 5 TM, Landsat 8 e Sentinel 2. Os dados TM e ASTER foram anteriormente realizados com sucesso no mapeamento de zonas de alteração (Carranza and Hale, 2002; Moore *et al.*, 2008; Zadech *et al.*, 2014) e para a identificação de minerais de lítio e outros, em zonas de alteração, foram testados os sensores ASTER, TM, Landsat 8, e Sentinel 2 propostos por (Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2019). No subcapítulo 8.3 são apresentadas com mais detalhes a análise e a discussão das ACPs.

5.6.2. Índices de Vegetação

Esta sub-secção mostra uma análise multitemporal do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI) para cada uma das imagens (ASTER, OLI, TM e Sentinel 2), conjuntamente com a classificação da ocupação do solo

para cada uma das imagens, que posteriormente será usada para a criação de classes de exclusão e produção da matriz de alteração.

O NDVI corresponde à razão entre a diferença das refletâncias das bandas no infravermelho próximo e no vermelho do visível, e pela soma dessas mesmas refletâncias, tal como exposto na equação (2) (Rouse *et al.*, 1973). O NDVI é um indicador sensível da quantidade e condição da vegetação, cujos valores variam no intervalo de -1 a 1. Nas superfícies que contêm água ou nuvens, este valor é sempre menor do que 0. Esta técnica tem a vantagem de minimizar certos tipos de ruídos correlacionados à banda e influências atribuídas a variações de irradiância direta e difusa, sombras de nuvens, ângulos solares, topografia e atenuação atmosférica (Huete *et al.*, 1999; Castro and Amaral, 2017). Os valores negativos do NDVI (entre –1 e 0) indicam a presença de água nos pixeis, enquanto os valores positivos de NDVI mostram uma possível contaminação devido a outros usos da terra (Weier and Herring, 2000) (vide a fórmula do NDVI).

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \qquad (2)$$

Em que:

NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada;

NIR = refletância na banda do infravermelho próximo;

Red = refletância na banda vermelha.

Os valores obtidos no NDVI variam entre +1 e -1, em que, quanto mais próximo de -1, menor a densidade da cobertura vegetal, e quanto mais próximo de +1, maior é a densidade (Eduvirgem *et al.*, 2018).

5.6.3. Combinação de Bandas

A composição de bandas é uma técnica usada no processamento de imagens de satélite que compõe imagens das bandas espectrais diferentes num sistema ternário RGB (vermelho, verde e azul), com intuito de melhorar a visualização da imagem. Os pegmatitos são facilmente distinguidos nas imagens satélites devido à forma como se apresentam, pois são corpos bem visíveis e desenvolvidos. Recentemente, (Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019) usaram esta técnica para distinguir minerais de ferro e argilas, baseando-se nas combinações 2-5-7 (Landsat 8 OLI), 2-8-12 (Sentinel 2A), e 7-2-6 Landsat 5 TM, ambas contendo faixas desde o VNIR e SWIR, bem como outras combinações para prospetar minerais de lítio. Estes autores também concluíram que estas combinações são adequadas para estudos de estruturas geológicas, como falhas e contactos litológicos e estruturais a partir de bandas do ASTER (TIR) (Carmelo *et al.*, 2009; Aboelkhair *et al.*, 2010; Papadaki *et al.*, 2011; Ninomiya and Fu, 2016).

5.6.4. Razão de Bandas

A razão de bandas é muito usada para realçar feições de interesse, sendo recomendada para a exploração mineral, pois realça o contraste entre os diferentes materiais na imagem (Zacchi *et al.*, 2010). De um modo geral, as bandas 4 (0,76 – 0,90µm), 5, e 7 (2,08 – 2,35 µm) do satélite Landsat 5 e 7 fornecem melhor informação geológica, a qual realça as rochas com mais refletância. As bandas do SWIR do ASTER têm uma recomendação unânime para investigações geológicas (Gemusse *et al.*, 2018).

Os investigadores Sultan *et al.* (1987) utilizaram a razão de bandas do SWIR (1,3 a 2,5 µm) de imagens Landsat TM para identificar e diferenciar litologias, já que muitos minerais formadores de rochas apresentam picos de absorção e refletância, característicos das regiões do espectro eletromagnético. As principais bandas de absorção ocorrem nos seguintes comprimentos de onda: 1,40 µm, 1,94 µm e 2,7 µm (Knipling, 1970; Woolley, 1971). Esta técnica é usada na área das geociências por vários autores, por exemplo (Sultan *et al.*, 1987; Sabins, 1999; Cardoso-Fernandes, 2018; Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019).

5.6.5. Classificação Supervisionada

Três algoritmos classificadores foram selecionados para classificar a área de estudo. Para a classificação baseada no pixel foram adotados os seguintes algoritmos: Spectral Angle Mapping (SAM), Distância Mínima ou Euclidiana (MinD) e Máxima Verossimilhança (Maxver) (Sohn and Rebello, 2002; Prudente *et al.*, 2017; Minghelli *et al.*, 2020).
As classificações foram feitas com a utilização de dois métodos:

a) baseada no pixel: utiliza a informação espectral de cada píxel para encontrar as regiões homogéneas;
b) por regiões: baseia-se na utilização da informação espectral de cada "píxel" e da informação espacial que envolve a relação com seus vizinhos.

5.6.5.1. Spectral Angle Mapper (SAM)

O SAM é uma técnica de classificação supervisionada que calcula a similaridade entre os espectros de cada píxel da imagem com os espectros de referência provenientes de bibliotecas espectrais ou de amostras selecionadas em campo ou laboratório (Kruse,et al. 1993). É um dos métodos mais usados para o mapeamento de minerais hiperespetrais (Rajendran and Nasir, 2019). É apresentada a equação 3, onde a similaridade espetral entre o espectro teste (ou píxel – t) e o espectro de referência (r) é expressa em termos de um ângulo meio entre os dois espetros, Θ, e calculado para cada banda, i, tal como se ilustra na equação (3):

$$\Theta = \cos^{-1}\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} t_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} t_i^2 \sum_{i=1}^{n} r_i^2}}\right) \quad (3)$$

Desta forma, os espectros são tratados como vetores no espaço com dimensionalidade n igual ao número de bandas (Ducart, 2004; Rashmi *et al.*, 2014).

5.6.5.2. Distância mínima ou Distância Euclidiana

É o método de classificação supervisionada, baseado em pixeis, e considerada a abordagem mais antiga e simples para o reconhecimento de padrões ou de correspondência (Wacker and Landgrebe, 1972). A média de cada classe é gerada através das amostras, e em seguida cada píxel é atribuído àquela classe cuja distância Euclidiana

entre o valor do píxel e a média da classe for menor, ou seja, a classe da qual a média do píxel está mais próximo. Cada amostra foi selecionada em diferentes locais na área de estudo (Muaine e Naipa), visando a diversificação das áreas de amostragem ao longo da imagem (Cruz and Ribeiro, 2008).

5.6.5.3. Máxima verossimelhança

Este método é baseado no princípio de que a classificação errada de um píxel particular não tem mais significado do que a classificação errada de qualquer outro píxel na imagem (Smith, 1985; Richards and Jia, 1986). Considera a análise das distâncias entre médias dos níveis das classes, utilizando parâmetros estatísticos. Para que a classificação seja precisa o suficiente, é necessário um número razoavelmente elevado de pixeis para cada conjunto de treino (Dymond, 1986; Meneses and Almeida, 2012; Wang *et al.*, 2020a). Os conjuntos de treino definem o diagrama de dispersão das classes e suas distribuições de probabilidade, considerando a distribuição de probabilidade normal para cada classe do treino.

5.6.5.3.1. Comparação e verificação dos resultados das classificações

O processo de avaliação não está terminado sem que se faça uma análise temática dos resultados que permita ao utilizador conhecer o nível de exatidão da classificação, relacionando-o para isso com um mapa de referência que traduza com rigor as classes que caracterizam a imagem (Buchanan, 1981; Martins, 2012; Nelson *et al.*, 2015).
O controlo dos resultados da classificação é um dos passos mais importantes para se chegar a um resultado homogêneo, mas também para controlar a qualidade das diferentes classificações aplicadas. Para efetuar este controlo, existem dois métodos de avaliação de exatidão temática, sendo eles a matriz de confusão e o índice de concordância Kappa (Foody, 2002; Gómez and Montero, 2011; Martins, 2012).

5.6.5.3.2. Matriz de confusão

A matriz de confusão é formada por um arranjo quadrado de números dispostos em linhas e colunas que expressam o número de unidades de amostras de uma categoria da legenda

inferida por um classificador (ou regra de decisão), em comparação com a categoria atual verificada no campo (Congalton, 1991).

Os resultados da matriz de confusão permitem calcular os seguintes índices: exatidão global, exatidão do produtor, exatidão do utilizador, índice Kappa, da globalidade da legenda e por classe individual.

Os índices mais frequentemente utilizados para avaliar os mapas derivados de imagens de satélite são: precisão global, precisão do produtor, precisão do utilizador e kappa (Congalton and Green, 2009). A exatidão global permite calcular a viabilidade global do mapa, relacionando os elementos da diagonal com o total de amostras recolhidas, dada pela seguinte equação 4 (Exatidão Global) (Congalton and Green, 2009):

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{c} x_{ii}}{n} \quad (4)$$

Onde a exatidão global (G) é calculada dividindo a soma da diagonal principal da matriz de erros x_{ii}, pelo número total de amostras recolhidas n. A distribuição da exatidão ao longo das categorias individuais não é apresentada na exatidão global, entretanto a exatidão de uma categoria individual é obtida através da divisão do número total de amostras classificadas corretamente naquela categoria pelo número total de amostras daquela categoria (Story and Congalton, 1986; Congalton, 1991).

A exatidão do produtor e de utilizador são maneiras de representar a exatidão de uma categoria ou classe individualmente. A exatidão de produtor refere-se às amostras que não foram classificadas corretamente como pertencendo àquela categoria, sendo omitidas de sua categoria correta. E a exatidão de utilizador indica a probabilidade que um píxel classificado na imagem de fato representa aquela categoria no campo (Congalton and Green, 2009).

A análise de Kappa é uma técnica multivariada discreta usada na avaliação da precisão temática e utiliza todos os elementos da matriz de confusão no seu cálculo. O coeficiente Kappa (K) é uma medida da concordância real (indicado pelos elementos diagonais da matriz de confusão) menos a concordância por hipotese (indicado pelo produto total da linha e coluna, que não inclui entradas não reconhecidas), ou seja, é uma medida do quanto à classificação está de acordo com os dados de referência. O coeficiente Kappa pode ser calculado através da equação 5:

$$K = \frac{n\sum_{i=1}^{c} x_{ii} - \sum_{i=1}^{c} x_{i+}x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^{c} x_{i+}x_{+i}} \quad (5)$$

Onde K é uma estimativa do coeficiente Kappa; x_{ii} é o valor na linha $_i$ e coluna $_i$; xi + é a soma da linha i e x+ i é a soma da coluna i da matriz de confusão; n é o número total de amostras e c o número total de classes. Embora o coeficiente Kappa seja muito utilizado na avaliação da exatidão de mapeamento, não existe uma fundamentação teórica para recomendar quais os níveis mínimos aceitáveis deste coeficiente numa classificação (Figueiredo and Vieira, 2007; Congalton and Green, 2009). Entretanto, a (Tabela 8) apresenta níveis de concordância da classificação para o valor de Kappa obtido, normalmente aceitos pela comunidade científica.

Tabela 8: Medidas de concordância da qualidade da classificação dos valores Kappa (adaptado de (Landis and Koch, 1977b)

Valor Kappa	Níveis de concordância ou qualidade do mapa temático
<0,00	Péssima
]0.0, 0.20[	Baixo
[0.20, 0.40[	Razoável
[0.40, 0.60[	Moderado
[0.60, 0.80[	Substancial
[0.80, 1.00[	Quase perfeito
=1	Perfeito ou excelente

O uso do coeficiente Kappa é satisfatório na avaliação da exatidão de uma classificação temática, pelo facto de levar em consideração toda a matriz de confusão no seu cálculo, inclusive os elementos de fora da diagonal principal, os quais representam as discordâncias na classificação, ao contrário, por exemplo, da exatidão global, que utiliza somente os elementos diagonais (concordância real) (Congalton, 1991).

A (Tabela 9) mostra a representação de uma matriz de confusão. Os elementos da diagonal principal (em negrito) indicam o nível de concordância, entre os dois conjuntos de dados.

Tabela 9: Representação matemática de uma matriz de confusão

Classificação	**Dados de referência**			**Total nas linhas $_{ni+}$**
	1	2	c	
1	$\mathbf{x_{11}}$	x_{12}	x_{1c}	x_{1+}
2	x_{21}	$\mathbf{x_{22}}$	x_{2c}	x_{2+}
c	x_{31}	x_{32}	$\mathbf{x_{3c}}$	X_{c+}
Total de colunas n_{+i}	x_{+1}	x_{+2}	x_{+c}	n

Fonte: adaptado de (Kruse *et al.*, 2015; Zeng, 2020)

Normalmente, abaixo das colunas representa-se o conjunto de dados de referência que é comparado com os dados do produto da classificação que são representados ao longo das linhas.

5.6.6. Machine learning

O termo Machine learning refere-se à deteção automatizada de padrões significativos nos dados. Nas duas últimas décadas, tornou-se uma ferramenta comum em quase todas as tarefas que exigem extração de informações de grandes conjuntos de dados (Shwartz and David, 2014; Lecun *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2017). Neste estudo, após a aquisição de dados e pré-processamento dos mesmos, o passo seguinte passa pela criação de conhecimento (gerar conclusões novas), a qual consiste na identificação de pegmatitos litiníferos e zonas de alteração (nos pegmatitos). A seguir serão abordadas dois algoritmos de Machine Learning (SVM e CNN) e algumas aplicações em deteção remota.

5.6.7. Support Vector Machine

O Support Vector Machine (SVM) representa uma generalização do algoritmo *Generalized Portrait* desenvolvido na Rússia, nos anos sessenta (Vapnik and Lerner, 1963; Platt, 1998). Trata-se de um algoritmo de machine learning supervisionado que pode ser utilizado para classificação e regressão, e é considerado o estado da arte para a classificação de dados, em conjunto com classificadores como o Random Forests (RF) e as Artificial Neural Networks (ANN) (Khatami *et al.*, 2016). A maior vantagem do algoritmo SVM consiste em treinar um classificador de forma que este aprenda um mapeamento por meio de exemplos e seja capaz de classificar um exemplo ainda não visto com a mesma distribuição probabilística (Nascimento *et al.*, 2009). Têm como objetivo, igualmente, a determinação

de limites de decisão que produzam uma separação ótima entre classes por meio da minimização dos erros (Vapnik, 2000).

5.6.7.1. Redes Neuronais de Convolução (CNN)

Do ponto de vista matemático, a convolução é uma função linear que se baseia na multiplicação de duas matrizes (Spolti, 2018). A CNN é uma das mais eficientes abordagens entre todas as estruturas baseadas em aprendizagem profunda que não requer extração prévia de recursos e, portanto, possui uma maior capacidade de generalização (Lecun *et al.*, 2015). Nos últimos tempos, a CNN possui uma ampla abrangência em diferentes áreas de pesquisa. Inspiradas pela alta eficiência do cérebro humano no reconhecimento de objetos, características espaciais de alto nível produzidas por aprendizagem atraíram um interesse substancial em várias aplicações, como o reconhecimento de objetos, a rotulagem de cenas e a análise de documentos (DiCarlo *et al.*, 2012).

Uma CNN consiste em três tipos de camadas: a camada de convolução, a camada de pool, e a camada totalmente conectada (Zhu *et al.*, 2017). A camada de convolução extrai informações das camadas anteriores e atua como um filtro no domínio da imagem. Os valores do filtro também determinam o tipo de informação a ser extraída. Este filtro é sensível à informação espacial e é definido como uma grade retangular dentro da camada. Esta camada é visualizada na fórmula 6, como uma simples convolução (Rezaee *et al.*, 2018):

*Característica do mapa=Entrada*Kernel*

$$= \sum_{y=0}^{\text{Colunas}} \left(\sum_{x=0}^{\text{Linhas}} \text{Entradas}\,(x-a, y-b)\,\text{kernel}\,(x,y) \right) \quad (6)$$

A segunda camada, a chamada camada de pooling, reduz o tamanho de dados e preserva as informações mais importantes e a geometria dos dados de entrada. Em cada camada de pool, um número específico é determinado pela subamostragem de um pequeno retângulo selecionado. Existem métodos diferentes de subamostragem, como o uso de valor máximo ou uma combinação linear (Lecun *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2018; Rezaee *et al.*, 2018).

A última camada, a camada totalmente conectada, é a razão parte da rede, que determina o rótulo final dos dados de entrada. Particularmente, cada neurónio recebe as informações de todos os neurónios, nas camadas anteriores, para tomar a decisão final. No entanto,

este não tem a função de preservar a geometria, além de transformar a camada de entrada em um vetor (Rezaee *et al.*, 2018).

Capítulo VI

VI. Petrografia

6.1. Descrição Microscópica

Os pegmatitos da região de Alto Ligonha têm um historial de exploração mineira de gemas, minerais indústrias e metais raros, como os elementos de terras raras (ETR), Be, Nb-Ta, Li e U-Th, desde a década de 1950 até aos dias de hoje (Melcher *et al.*, 2008). A região de Alto Ligonha, reconhecida internacionalmente como seleiro de gemas (Gemusse, 2014), é rica em minerais raros, destacando-se as concessões de licenças de exploração em vigor desde o passado colonial até ao presente, para a exploração de tantalite e berilo no distrito de Gilé, nas localidades de Marropino, Morrua, Muiane e Naipa, e de algumas gemas no distrito de Mocuba, e de escassos afloramentos no distrito de Lugela, posto administrativo de Namagoa e Munhamade (Gemusse, 2014). Estes pegmatitos ocorrem em metassedimentos Pré-Câmbricos constituídos por gnaisses finos, xistos, quartzitos, e por vezes em granulítos e migmatitos, e ainda em rochas de características básicas e ultrabásicas (Afonso, 1976). A (Tabela 10) ilustra as extensões dos pegmatitos referenciados neste trabalho.

Tabela 10: Lista dos pegmatitos estudados nesse trabalho

Zona	Campo	Grupo	Pegmatito	Extensão	
				(km^2)	Ha
Cinturão/falha de Namama	Metela	Marropino	Marropino	115.6379	11563,79
	Alto Ligonha	Morrua	Morrua	15.599	1559.95
		Muiane	Naipa	3.703	370,37
			Nuaparra	18.75	1875
			Muiane	15.63	1563.8

Fonte: adaptado de Portal do Cadastro Mineiro de Moçambique (MMCP)

6.1.1. Pegmatitos de Marropino

Este pegmatito encontra-se situado junto ao rio Namaera, pequeno tributário do rio Metela, o qual apresenta água apenas durante o período de maior pluviosidade (período compreendido entre novembro de um ano e finais de março, podendo localmente estender-se até maio). Com rochas encaixantes, essencialmente metabasitos alterados no sector noroeste (NW) e gnaisses biotíticos e horneblêndicos no sector sudeste (SE), esta litologia pertence ao Grupo do Alto Molocué (Aquater, 1983). Trata-se de um pegmatito com cerca de 0,48 Ga de idade (Melcher *et al.*, 2008). O centro do pegmatito é caracterizado por um núcleo de quartzo (Fig. *19*).

O pegmatito da área do Marropino é do tipo espodumena-microclina-albite, sendo zonado, complexo e irregular (Council for Geoscience, 2007). Possui direção N 80º E e inclinação variável entre 10 e 40º para S. A mineralização do corpo pegmatítico principal deste jazigo é constituída, essencialmente, por columbo-tantalite, microlite e manganotantalite. Acessoriamente contém bismutite, lepidolite e monazite.

Neste pegmatito diferenciam-se duas fácies:

- pegmatito caulinizado, com teores médios de Ta_2O_5 de 240 g/t e de Nb_2O_5 de 118 g/t;
- pegmatito não caulinizado, com teores médios de Ta_2O_5 de 273 g/t e de Nb_2O_5 de 104 g/t.

O contacto entre o pegmatito e a rocha marginal é assinalado, frequentemente, pela presença de clorite e flogopite (Barros, 1963).

Na classificação de Cerny (1982, 1989), Marropino pode ser encarado como um distrito pegmatítico altamente tantalífero (Gomes *et al.*, 2008). Apresenta pegmatitos por vezes de grandes dimensões (1 Gt a 15 Gt de material indiferenciado) e uma especialização LCT muito evoluída com teores culminantes de Li (<15500 ppm), Cs (<6000 ppm) e Ta (<2100 ppm) (Gomes *et al.*, 2008). Os valores referidos são alcançados em unidades tardias onde ocorrem minerais tipomórficos tais como, abundante lepidolite, ocasional polucite, frequente Mn-tantalite, várias microlites e até mesmo estibiotantalite. Os conteúdos médios de Ta dos jazigos LCT mais mineralizados situam-se no intervalo 125 - 300 ppm (as médias incluem todas as unidades de estrutura interna) (Gomes *et al.*, 2008).

As reservas económicas correspondem a 14 420 000 t do minério, contendo 3820 t de Ta_2O_5 e 1489 t de Nb_2O_5. Para o pegmatito caulinizado, do minério, contendo 3820 t de minério, com 1722 t de Ta_2O_5 e 874 t de Nb_2O_5, e entre 1962-1963, do pegmatito de

Marropino extraíram-se 521 t de lepidolites (Hunting, 1985; Council for Geoscience, 2007).Cerca de 81 t de Ta foram produzidas a partir do depósito de Marropino em 2006 (Melcher *et al.*, 2008).

Os minerais economicamente viáveis no pegmatito de Marropino são a columbo-tantalite, a microlite, os minerais de lítio, nomeadamente, a lepidolite e a espodumena (em gema - cunzite), o bismuto, o berilo (industrial), gemas (água-marinha e morganite), o zircão e a monazite (Cronwright, 2005a).

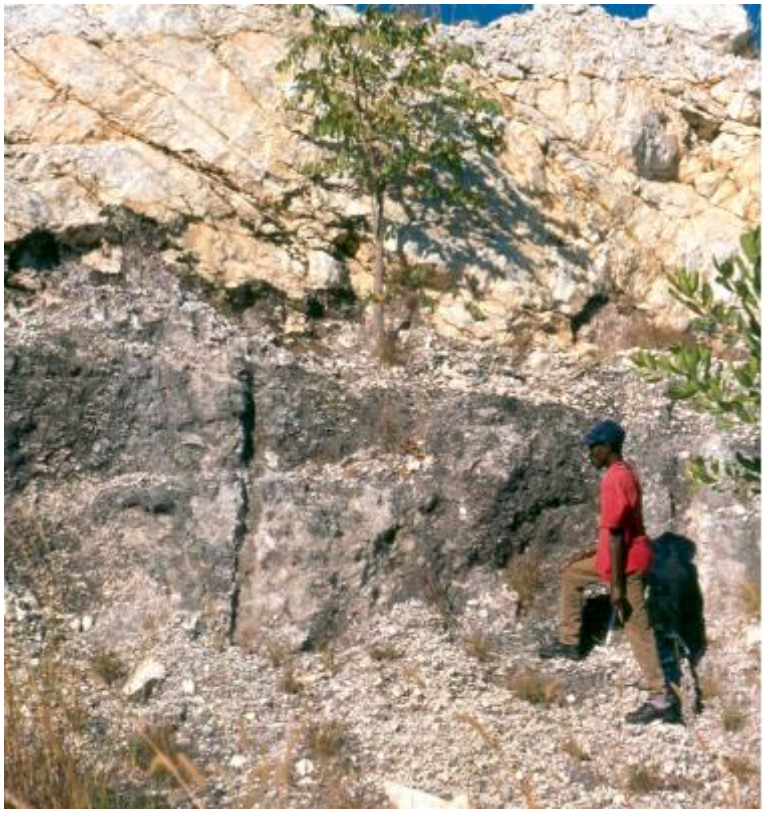


Fig. 19: Núcleo de quartzo.

Fonte: (Cronwright, 2005a).

6.1.2. Pegmatitos de Muaine

Este pegmatito fica situado junto à povoação do mesmo nome, a cerca de 45 km a sul do Alto Ligonha. É servido pelas seguintes estradas:

- Muaine-Nampula, 124 km (distância de Muiane a Nampula);
- Muiane-Gilé, 70 km (distância de Gilé a Muiane);
- Muiane-Alto Molocué, 118 km (distancia de Muiane a Alto Molocué).

O corpo principal trata-se de um filão de forma lenticular de direção NE-SW, inclinando cerca de 25º para o SE e cuja possança varia de 50 a 110 m. O filão encontra-se submetido a processos de alteração, principalmente à caulinização (Fig. *24* e Fig. 25) de feldspatos e espodumena e à cookeitização de espodumena e turmalina. Este corpo identifica-se geograficamente pelo núcleo de quartzo que constitui a crista do monte Muiane. O dique pegmatítico que aflora a oeste do monte Muiane caracteriza-se por uma elevada resistência à meteorização e possui a seguinte composição mineralógica: microclina, quartzo, albite, moscovite, biotite, granada e turmalina (Barros and Vicente, 1963).

Em 2009, consultores independentes da Global Mining Services indicaram que em Muiane se encontravam 1.315 t com 250 ppm de Ta_2O_5 usando um baixo teor de corte de 50 ppm e utilizando toda a informação de sondagem disponível na altura (Naude and Sperinck, 2009). O recurso delineado dentro da área da caixa representa apenas uma pequena parte da Licença 178C. A Licença 178C é uma licença mineira para tântalo e minerais associados. Um recurso adicional de tântalo ainda está disponível nesta licença, a E da área delineada, no lugar sombreado e denominado por Vale dos Espíritos (Fig. 20).

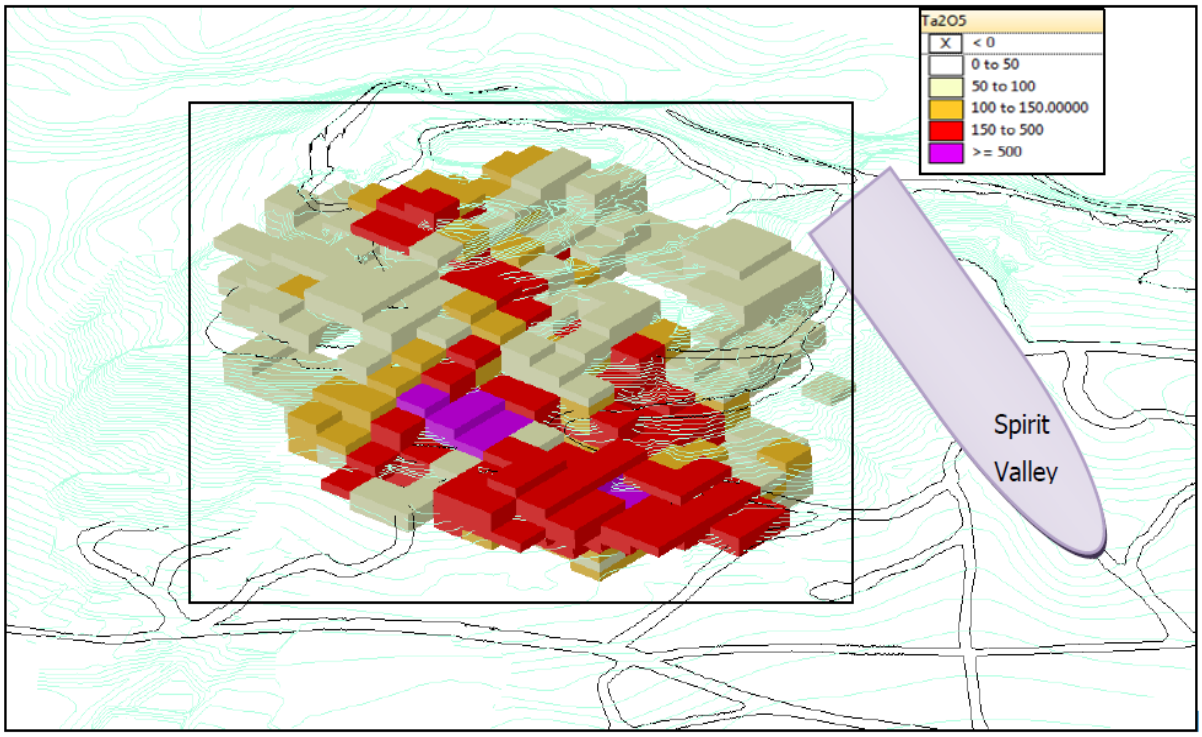


Fig. 20: Modelo em Blocos de Muiane (no interior do retângulo) utilizado no relatório 43-101 de 2009. Fonte: Global Mining Services (Naude and Sperinck, 2009)

Nos finais de 2009, a Tantalum Mineração e Prospeção Limitada (TMPL) sondou 1473 m na área do Vale dos Espíritos e obteve resultados encorajadores. Estes resultados ainda não foram incorporados a um novo recurso. Duas secções de sondagem estão demonstradas na (Fig. 20) e realçam os resultados espetaculares obtidos, incluindo os 16 m com 1047 ppm de Ta_2O_5 e aos 7 m com 373 ppm deTa_2O_5. Esta sondagem mostra que a mineralização está aberta a NE, estendendo-se abaixo da área de acampamento e a SO do atual local de mineração.

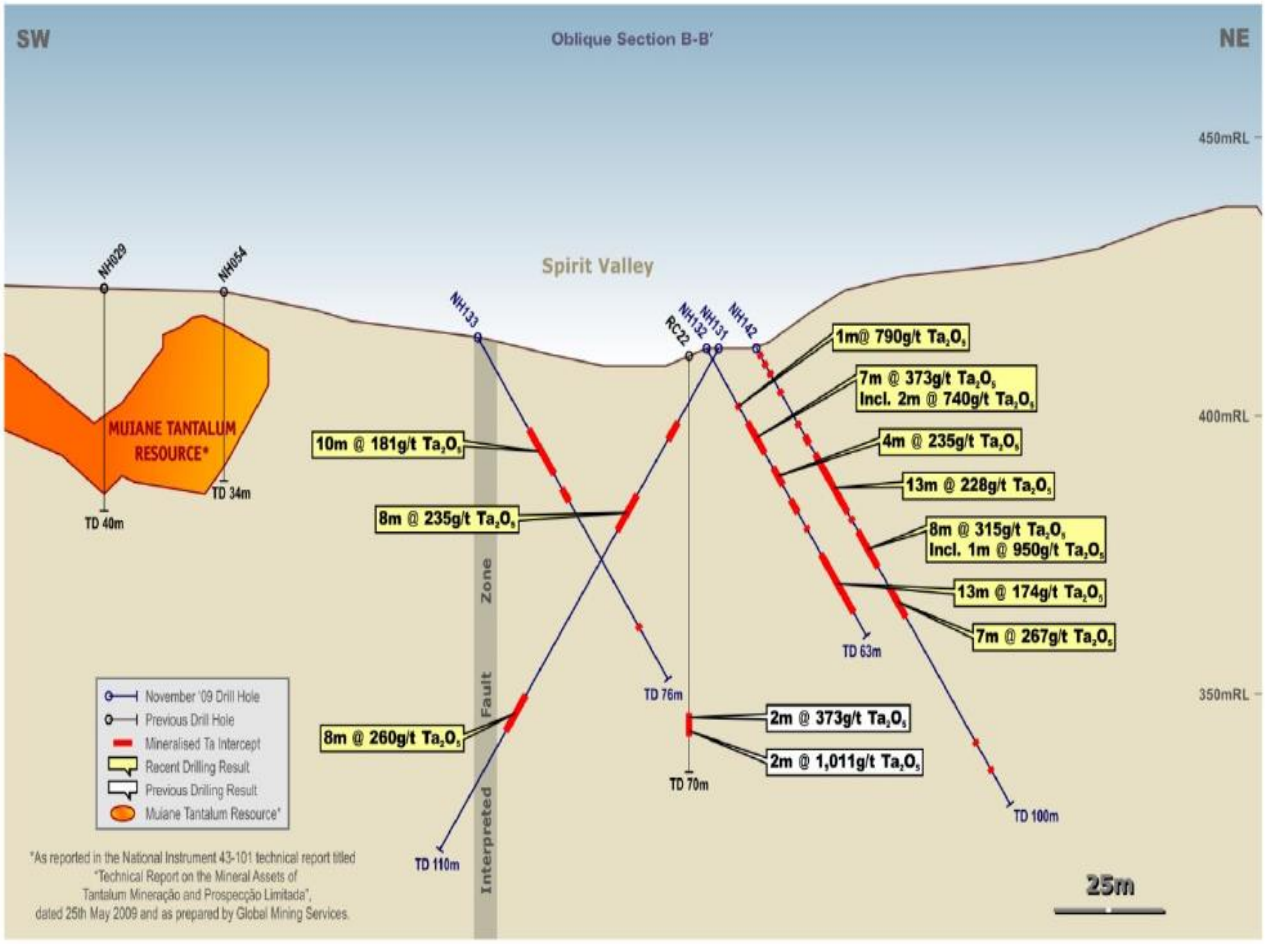


Fig. 21: Sondagem feita pela TMPL em 2009. Fonte: Global Mining Services (Naude and Sperinck, 2009).

Estes pegmatitos são ricos em nióbio e tântalo, possuem a direção variável entre N45ºE e N80ºE, inclinação de cerca de 15º a 20º para SE e apresentam dimensões que ultrapassam 1 km de comprimento por 400 m de largura. Possuem uma estrutura zonada complexa, onde os minerais de nióbio e tântalo se encontram na zona dos grandes feldspatos, em vários estados de alteração, na zona lítica (Gomes *et al.*, 2008). São encontradas cleavelandites (Fig. *23*), polucite um pouco alterada associadas à lepidolite, a qual forma

uma rede de malha irregular, cujos interstícios são preenchidos pela polucite (Quadrado, 1963; Teertstra, 1991), formando grandes massas radiais (foram observados cristais que chegam a ultrapassar os de 10 mm de diâmetro).

Para (Fung *et al.*, 1990), o pegmatito de Muiane mostra um zonamento em:

- núcleo de quartzo;
- zona de lítio (Nb-tantalite, Mn-columbite, Sb-tantalite, Ta-columbite, Sc-ixiolite, Bi-tantalite);
- zona interna (Ta-columbite, microlite);
- zona externa (columbite, Ta-columbite).

Esta zonação é baseada na distribuição dos principais minerais: quartzo, microclina, albite, moscovite, biotite, cleavelandite, espodumena (cookeite), lepidolite, turmalina e berilo (Fung *et al.*, 1990).

Nas várias zonas do pegmatito, a mineralização em Ta é bastante em Ta-columbite, Sc-ixiolite e Bi-tantalite. As estruturas zonais encontram-se mal definidas a NE do veio, onde, na verdade, não existe zona de lítio e apenas as zonas externa e interna estão presentes. O pegmatito é classificado como um pegmatito complexo, zonado e diferenciado do tipo sodalítico (Fung *et al.*, 1990).

De Muiane para Naipa existe uma divisória que não contem afloramentos, com exceção, a princípio, dum possante pegmatito com bastante moscovite, a 105º N do pico do Muiane e de cujo filão de Muiane parece ser o prolongamento. Noutro ponto, num alto, muitos e grandes blocos de quartzo, que devem fazer parte campo filoniano do Naipa (Borges and Nunes, 1949).



Fig. 22: Caulino do pegmatito de Muiane



Fig. 23: Corpo pequeno de albite (cleavelandite) desenvolvido adjacententemente ao núcleo de quartzo no pegmatito Muiane.



Fig. 24: Pegmatito de Muiane (Caulinos).



Fig. 25: Exploração da zona central de pegmatito.

6.1.3. Pegmatitos de Naipa

Correspondem a uma massa pegmatítica de grandes dimensões da qual emanam como extensões apicais alguns corpos LCT (com mineralização culminante em Li, Cs, Ta) de paraxismo de fracionação pegmatítica (Gomes, 2003). Os pegmatitos graníticos de Naipa intruíram um filito clorítico e gnaisses com anfíbola e biotite Kibarianos (Neiva and Gomes, 2010). Do ponto de vista paragenético, pode dizer-se que coexistem no mesmo grupo os subtipos com lepidolite ou espodumena, ou ainda, com elbaíte (Neiva and Gomes, 2010). Nestes filões a lepidolite é muito generalizada (Fig. 26). A estrutura interna é homogénea com massas de substituição pequenas e localizadas. As paragéneses predominantes são típicas dos estados menos evoluídos da fracionação pegmatítica (Nunes, 1966; Gomes, 2009), tipo:

- ✓ Intercrescimento gráfico Mn-almandina – Mn-columbite;
- ✓ Nb – tantalatos do termo columbite a Mn-columbite-com padrões de zonalidade oscilatória normais;
- ✓ Conteúdo médio de Cs para amostras em canal da zona mural de 125 ppm.

Este pegmatito deriva de um granito peraluminoso e pan-africano, havendo contactos graduais entre o granito e os pegmatitos graníticos que pertencem à família LCT do tipo complexo (Neiva and Gomes, 2010), economicamente viável para a exploração de columbite, feldspatos, tantalites, lepidolites, berilos e granada Mn-almandina e berilo de variedades azuis) (Gomes, 2003).



Fig. 26: Escombreiras de nódulos de lepidolite do Pegmatito de Naipa (diâmetro médio de 10-15 cm).

6.1.4. Pegmatitos de Morrua

Encontram-se localizado no campo pegmatítico de Morrua, pertence aos campos pegmatíticos de Melele, a cerca de 5 km a NW do monte Morrua. O acesso à mina faz-se por estrada, a partir do Alto Molocué, do Gilé e do Mulevale (Barros and Vicente, 1963) e dista do porto de Pebane cerca de 150 km (Afonso and Marques, 1993). O pegmatito está encaixado em rochas de natureza sedimentar e vulcânica do período Mesoproterozóico, pertencente ao grupo de Molocué (Hartzer and Manhiça, 2008) que é caracterizado por uma grande heterogeneidade litológica (Afonso *et al.*, 1998) e apresenta, em geral, um elevado grau de metamorfismo: faces anfibólicas de alta pressão e alta temperatura (Lächelt, 2004). As dimensões do pegmatito são

difíceis de determinar por estar em grande parte recoberto por solos residuais (Afonso *et al.*, 1998).

O pegmatito de Morrua é constituído por gnaisses biotíticos bandados e migmatitos, gnaisses quartzo-feldspáticos portadores de silimanite e gnaisses anfibolíticos, mineralogicamente muito ricos em tantalites, diversos berilos (morganite e água-marinha), rútilo, ilmenite, microlite, zircão, petalite, espodumena (Barros and Vicente, 1963), polucite (Teertstra, 1991) e ouro (Pedro, 1986; Council for Geoscience, 2007). O pegmatito de Morrua foi o maior produtor de minerais de Nb-Ta em Moçambique durante 22 anos (1957 a 1979) e produziu 1900 t de concentrado contendo 1300 t de Ta_2O_5 (Hunting, 1985, Council for Geoscience, 2007), para além de espodumena, berilo e ouro (Melcher *et al.*, 2008).

6.1.5. Pegmatitos de Nuaparra

Localizados na região de Nuaparra, posto administrativo de Alto Ligonha, os pegmatitos de Nuaparra, segundo (Gomes *et al.*, 2008), é um pegmatito evoluído (LCT). Para (Afonso and Marques, 1993), trata-se de uma concentração de feldspato de alta qualidade constituída por microclina-pertite, quartzo e moscovite. Os pegmatitos desta região cobrem uma área aproximadamente de 2600 x 1800 m, com um veio maior aproximadamente de 1300 x 150 m (Lächelt, 2004). Apresentam um comprimento superior a 1500 m, largura variável, entre 50 e 200 m, e espessura de 10 m. Possuem atitude sub-horizontal e têm estrutura interna zonada onde a matéria-prima feldspática se encontra na zona dos grandes feldspatos (vide a Tabela 11).

No pegmatito de Nuaparra podem distinguir-se duas zonas, no que se refere à sua composição e à sua estrutura:

- pegmatito de bloco grosso, contém feldspato de alta qualidade (75-85%) e baixo conteúdo de óxidos de ferro e titânio (< 0,15%);
- pegmatito de bloco miúdo, constituído por feldspato de qualidade média à baixa e com o conteúdo de óxidos de ferro e titânio que varia entre 0,17 e 0,4%.

As reservas da categoria C_2 do feldspato de bloco grosso são de 1 072 000 t e as de bloco miúdo são de 860 000 t até à profundidade de 10 a 15 m. A razão estéril/minério é de 1 para 3,03 (INTERGEO, 1983; Council for Geoscience, 2007).

As características químicas deste feldspato são: FeO – 0,09 a 0,58%; TiO_2 – 0,016 a 0,07%; K_2O/K_2O+Na_2O – 0,088 a 0,67%; teor de feldspato – 45 a 95%. Estas características são apropriadas para a cerâmica, olaria, indústrias de vidro, etc. O quantitativo de reservas acima mencionadas diz respeito a 40 630 m^2 da superfície dos corpos pegmatíticos de Nuaparra

(INTERGEO, 1983). Como subproduto da extração do feldspato, poderão ser explorados, no pegmatito em questão, mica de qualidade inferior (55 000 t) e outros minerais úteis, tais como quartzo gemológico, berilo, topázio, turmalina, bismutite e columbo-tantalite, cujas reservas estão avaliadas em 50 a 400 t. Estimam-se, em termos de reservas de feldspatos, e segundo os Serviços Geológicos Mineiros de Moçambique (SGMM), ex. Direção Nacional de Geologia (DNG), atual Instituto Nacional de Minas (INAMI), e os dados do jazigo de Nuaparra apresentados na (Tabela 11) (INTERGEO, 1983).

Tabela 11: Reservas prognósticas de feldspatos nos jazigos de Nuaparra I e Nuaparra II.

		Nuaparra I	Nuaparra II
Comprimento do jazigo	m	300	200
Largura	m	200	100
Superfície	m^2	60.000	20.000
Profundidade	m	15	10
Capacidade cúbica	m^3	900.000	200.000
Peso específico	t/ m^3	2,5	2,5
Reservas	t	2.250.000 200.000	500.000 250.000

6.2. Descrição Microscópica Ótica

Foram analisadas as amostras de minerais e rochas observados sob a luz polarizada (nicóis paralelos e nicóis cruzados). As amostras foram colhidas entre os pegmatitos de Naipa e Muiane.

A primeira descrição consistiu na amostra de lepidolites de Naipa (LN), colhida nas escombreiras de Naipa. Estas lepidolites observadas são compostas de minerais típicos de pegmatitos sodalíticos e encontram-se na zona dos minerais líticos. Apresentam uma cor rosa-púrpura, lilás rosada e rosa, ilustradas na (Fig. *27*). Na (Tabela 12) são apresentadas algumas características das lepidolites observadas em microscópio ótico.

A lepidolite é transparente à translúcida sem pleocroísmo (Klein *et al.*, 2012). Ocorre em placas e escamas intercrescidas e forma massas de grão fino a médio. É também observado um intercrescimento com moscovite. Pode ser maclada, tal como as moscovites.

Tabela 12: Lepidolite (serie entre Polilitionite e Trilitionite) adaptado de (Dana, 2008; Deer *et al.*, 2010; Lima *et al.*, 2010; Klein *et al.*, 2012)

Forma	Semelhante ao resto das micas, em massas esfoliantes ou agregados de cristais planares de tamanho fino a grande.
Cor	Geralmente incolor (pode ser levemente colorido em rosa-violeta)
Pleocroísmo	Rosa sem cor violeta
Maclas	Com o plano de composição {001}, não distinguível em folhas finas
Relevo	Baixo + Médio +
Birrefringência	0,018 a 0,038 (Médio - Alto)
Cor da Interferência	Cores de 2ª ordem, um pouco inferiores às da moscovite
Alongamento	Positiva
Ângulo de Extinção	0º = reto (pode variar entre 1 -7º)

A segunda descrição foi feita a partir da amostra de feldspatos de Muiane (FM) (vide a Tabela 13) que representa os feldspatos potássicos dos pegmatitos de Muiane, colhida num veio. Trata-se de uma ortóclase, polimorfo da microclina (Fig. *28*). Possui geminação comum, simples, de contacto, ou de penetração, de acordo com as Leis de Carlsbad (mais comum), Baveno (Dana, 2008; Klein *et al.*, 2012). A análise dos feldspatos tem como finalidade perceber a abundância de feldspatos nas paragéneses pegmatíticas associado à capacidade destes, especialmente, nos termos potássicos, incorporarem na sua estrutura elementos traço (Rb, Li, Cs, Sr, Ba, por exemplo) (Cerny *et al.*, 1985), sendo utilizados os feldspatos como indicadores de diferenciação pegmatítica ou reveladores de relações petrogenéticas (Viera, 2010). A amostra FM, extraída em pegmatitos félsicos e alterados, apresenta frequentemente macrocristais.

Tabela 13: Caraterísticas Microscópicas óticas da Ortóclase, adaptado de (Dana, 2008; Deer *et al.*, 2010; Klein *et al.*, 2012)

Forma	Os cristais são normalmente prismáticos curtos ao longo de [100] ou [001], tabulares em [010].
Cor	Geralmente incolor ou baço
Pleocroísmo	Não apresenta
Maclas	Exibe tipicamente maclas de Carlsbad. Também há informação de ocorrência de maclas de Baveno e Manebach em ortóclase.
Relevo	Forte negativo (-), moderado negativo (-), fraco negativo (-)
Birrefringência	Até branco de primeira ordem (aproximadamente 0,007)
Ângulo de Extinção	Extinção paralela à clivagem

.

A outra amostra analisada foi dominada por pegmatito de Naipa caulinizado (PNC) (Fig. *29*), extraída em pegmatitos de Naipa. Da microfotografia observa-se os seguinte pontos, a (albite, moscovite), c (Qtz, albite, microclina), e (Qtz, moscovite), em luz polarizada com nicois cruzadas; b,d,f em nicois paralelos.

A quarta amostra analisada foi designada por pegmatito de Muiane 1 (PM1.1), foi extraída dos pegmatitos de Muiane (Fig. *30*). Na microfotografia nota-se uma textura equigranular, cristais com hábitos hexagonais, grãos de biotite, feldspato, quartzo e horneblenda. Trata-se aparentemente de um granitoide, maioritariamente constituído por quartzo que ocorre na forma subédrica, apresentando bordos regulares e lineares, e geralmente com extinção ondulante. Alguns cristais possuem subgranulação, e, por vezes, são visíveis inclusões de moscovite.

A quinta amostra analisada foi designada por pegmatito de Naipa grande (PNG), colhida ao longo dos pegmatitos de Naipa (Fig. 31), corresponde a um granitoide. A rocha apresenta uma textura equigranular média hipidiomórfica com quartzo poligonal, biotite, plagióclase (albite) e microclina. Seguidamente são descritos os minerais observados na amostra PNG.

- Plagióclase: cristais anédricos a subéricos, bastante saussuritizados[5] e com macla polissintética. Contato irregular entre grãos.
- Biotite: lamelas irregulares com pleocroísmo em tons marrons na posição de máxima reflexão. Extinção do tipo “bird eye”.
- Quartzo: grãos anédricos, extinção ondulante e contactos variando de retilíneos a irregulares.
- Horneblenda: cristais subeuédricos pleocroicos, prismáticos, variando entre os tons verde e castanho, clivagem basal característica com ângulos aproximados de 56 a 124° adaptado de (Dana, 2008; Deer *et al.*, 2010; Klein *et al.*, 2012).

[5] Alteração hidrotermal das plagióclases

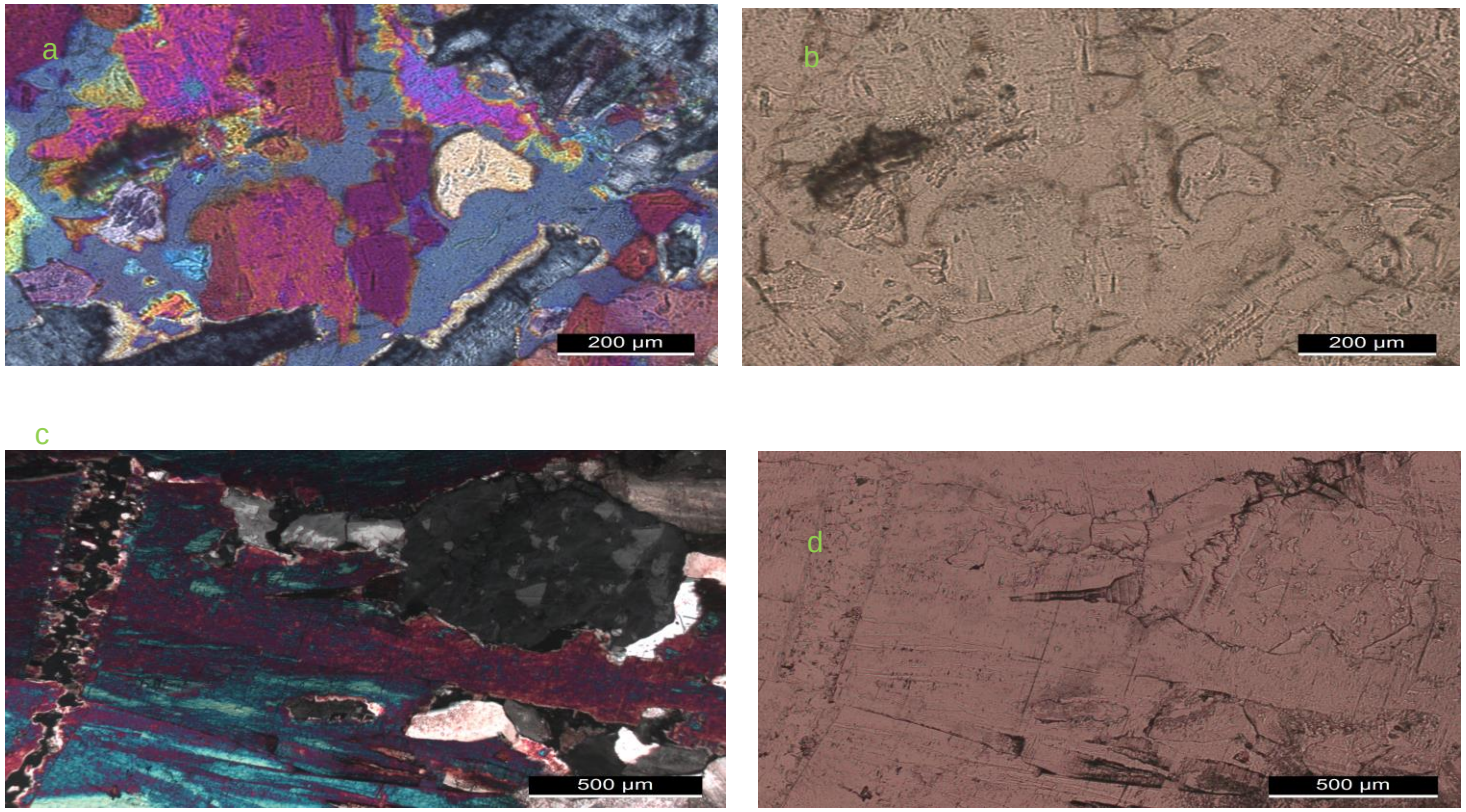


Fig. 27: Microfotografia de uma lepidolite extraida em Naipa, a) e c) observação em NC, pode-se observar que as cores de interferência são ligeiramente inferiores às da moscovite; b) e d) observação em NP, lepidolite em pegmatito (quartzo, microclina).

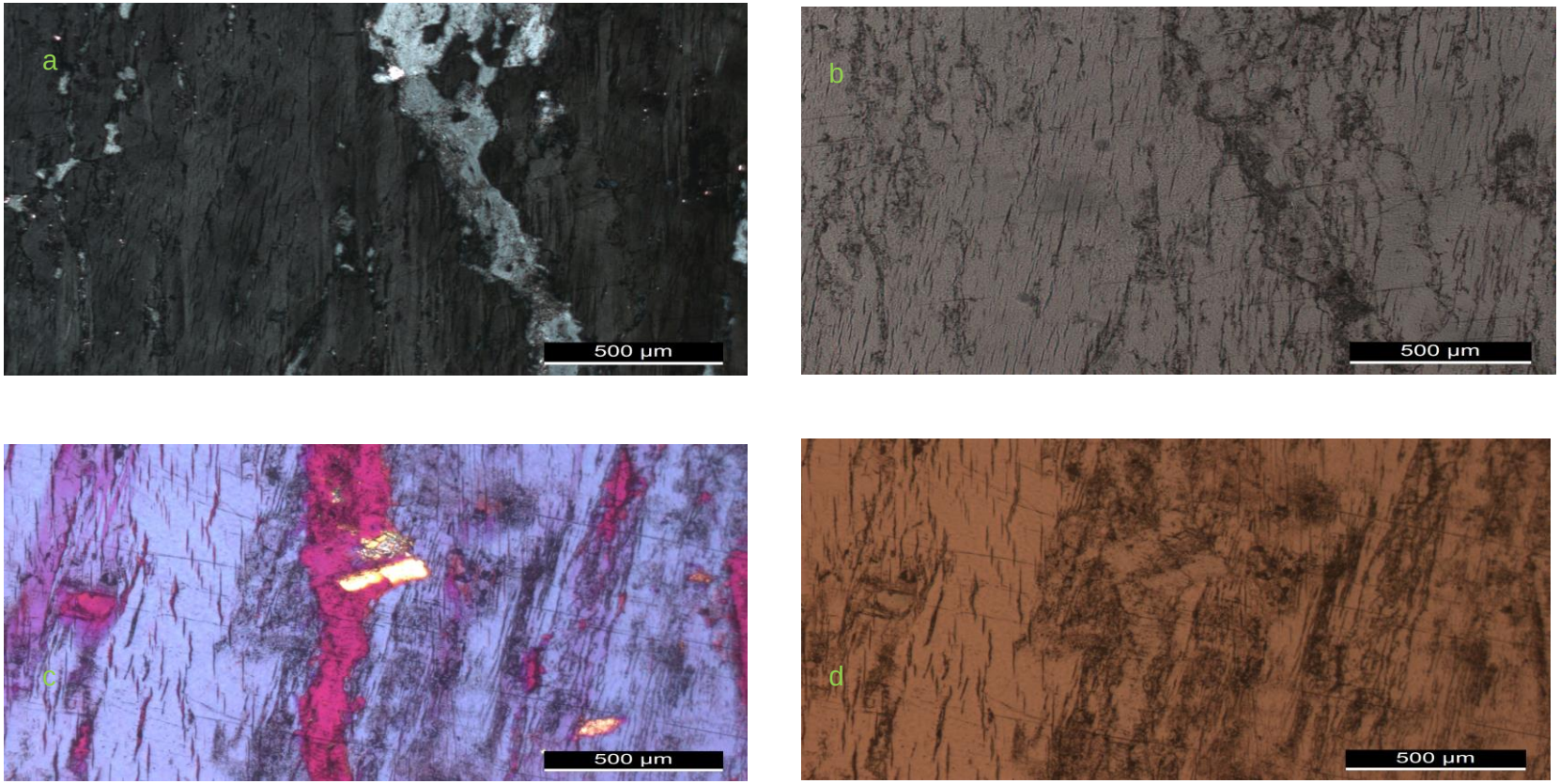


Fig. 28: Microfotografia do Feldspato de Muiane, a) e c) geminação Baveno (Leis de Carlsbad); b) e d) observação do feldspato em luz normal ou em nicóis paralelos.

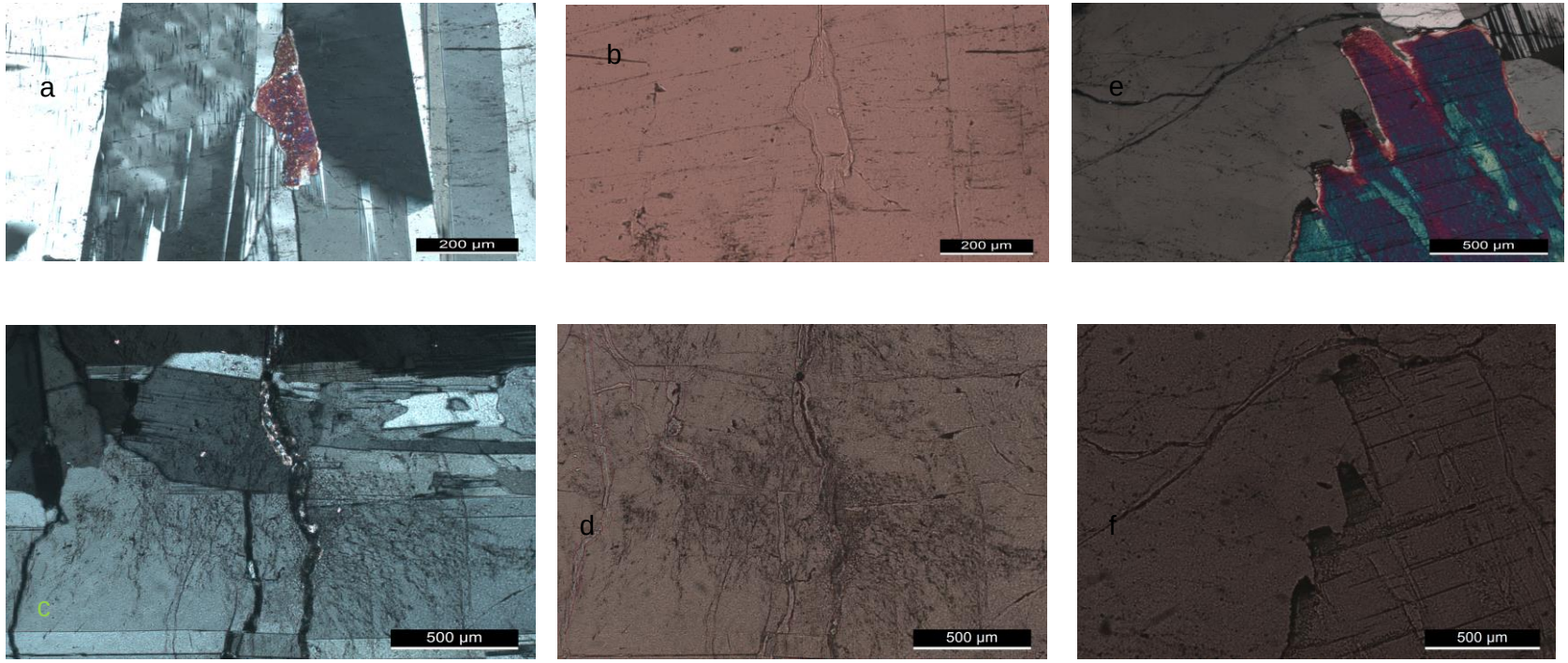


Fig. 29: Microfotografia de um pegmatito: a (albite, moscovite),c (Qtz, albite, microclina),e (Qtz, moscovite.) em luz polarizada com nicois cruzados; b,d,f emnicois paralelos).

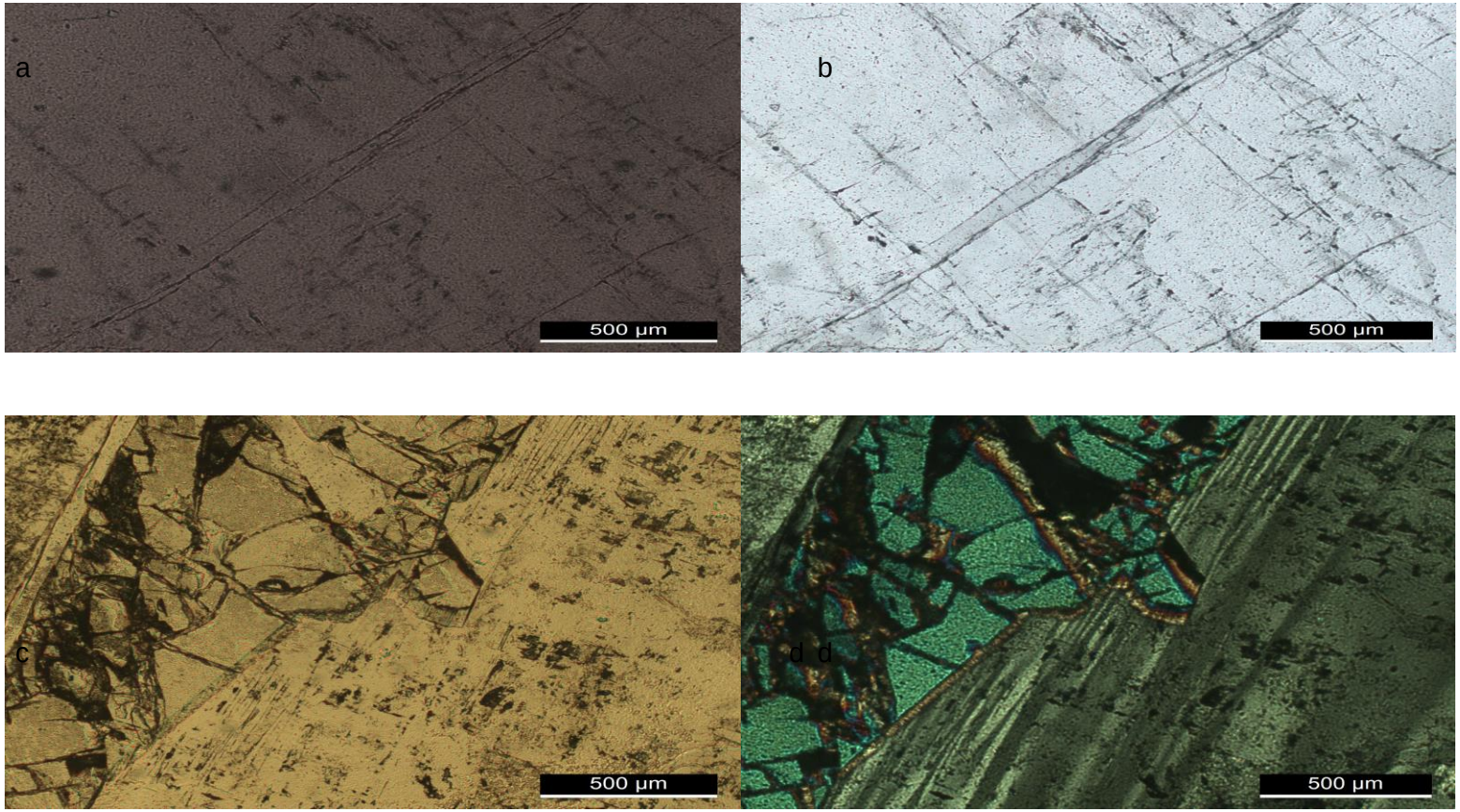


Fig. 30: Microfotografia de um pegmatito extraido em Muiane (a,b, c visuailizada em nicois paralelos e d visulaizada em nicois cruzados, nota-se plagioclases, horneblendas, e moscovite).

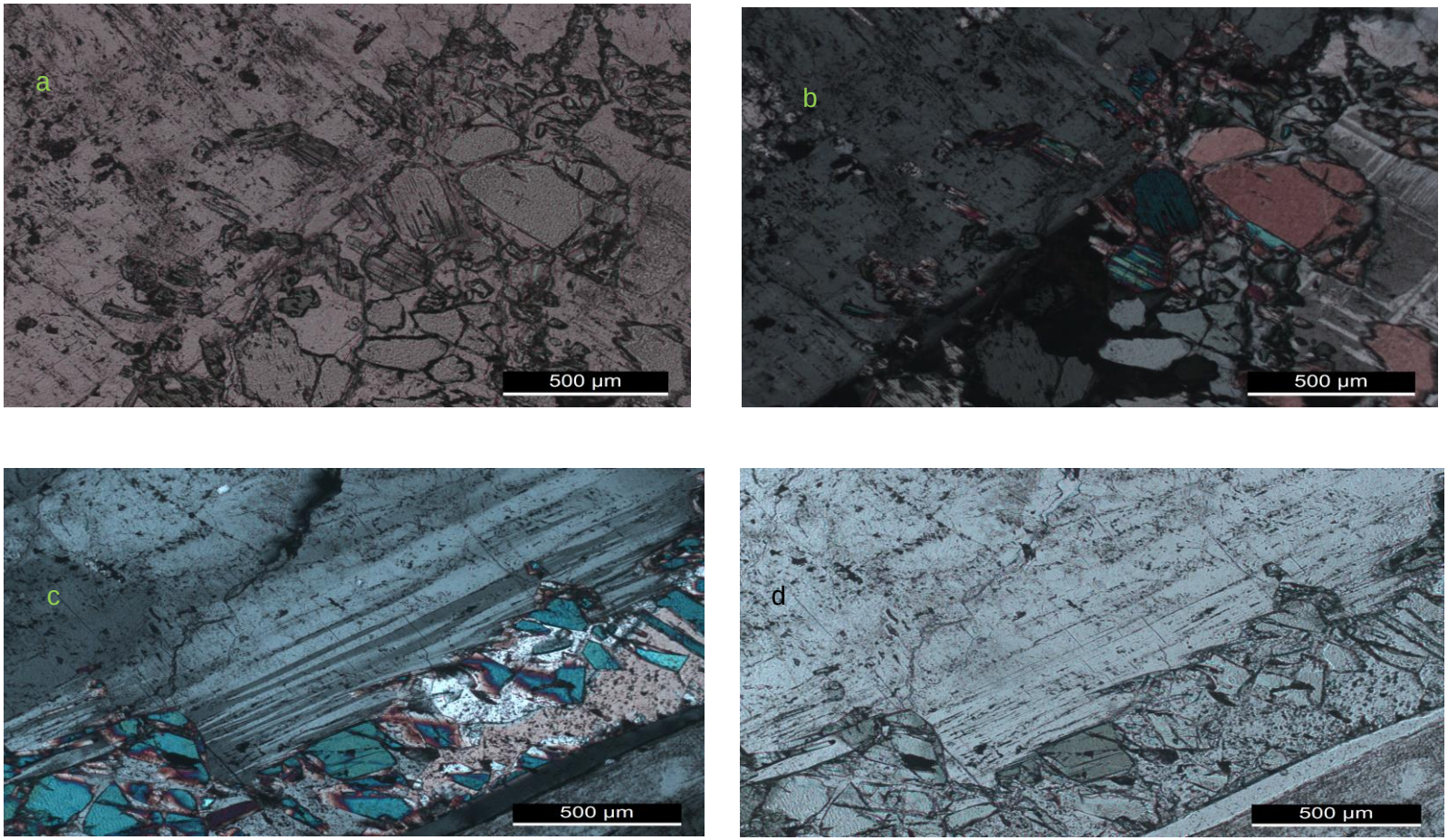


Fig. 31: Microfotografia de um pegmatito (granitoide), a) apresentado uma textura equigranular e média hipidiomorfia, e d) Luz natural e c) e b) em luz polarizada.

6.3. Microscópia Eletrónica de Varrimento

Recorreu-se ao Microscópio Eletrónico de Varrimento (MEV) (

Fig. 14) para reconhecer as relações mineralógicas e texturais entre minerais dos pegmatitos de Muiane e Naipa, com os seguintes códigos: PNC, PM1, LN1, FM2. Quanto a amostra LN1, que se trata de uma lepidolite, verifica-se que a mesma apresenta fácies de composições diferentes de alumino, onde a fase Z3 apresenta uma composição de 37,54%, tratando-se de uma moscovite.. Na (Tabela 15) é apresentada a distribuição do peso molecular da lepidolite e da moscovite sugerida por (Dana, 2008; Deer *et al.*, 2010; Klein *et al.*, 2012).

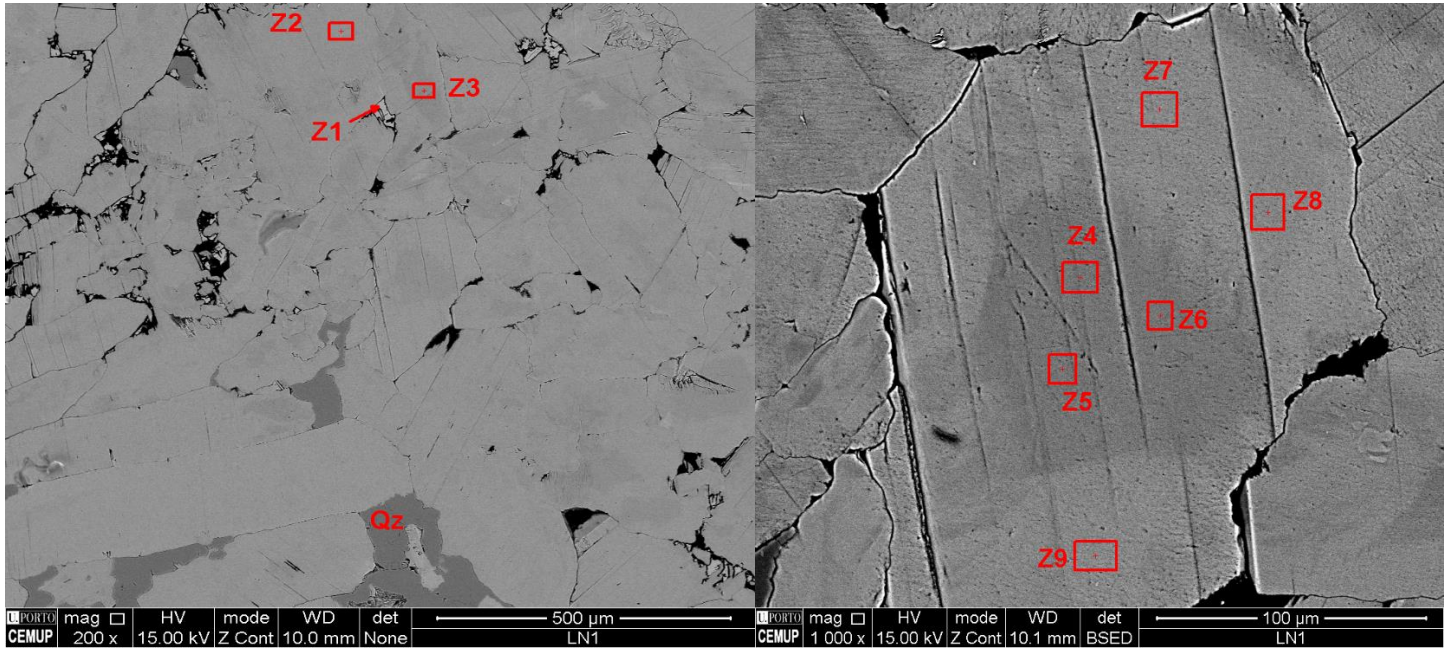


Fig. 32: Imagens de MEV da amostra LN1.

Tabela 14: Resultados da análise EDS da amostra LN1.

	LN1								
Formula química	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
F_2O		5,60	0,83	1,22	1,42	1,60	6,33	6,69	5,75
Na_2O			0,43	0,44	0,48	0,46	0,24	0,17	0,19
Al_2O_3	17,15	26,96	37,54	35,85	36,16	35,56	26,70	25,69	27,39
CaO									
SiO_2	66,40	56,14	49,74	50,50	50,17	50,93	54,54	55,13	54,32
K_2O	16,45	11,30	11,45	11,99	11,76	11,45	11,11	11,28	11,36
MnO							1,08	1,04	0,99
Fe_2O_3									

.

Tabela 15: Composição molecular da lepidolite (peso molecular 388,30 gm) e moscovite (peso molecular 398.71 gm)

	Lepidolite ($K(Li, Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(F,OH)_2$)		**Moscovite ($KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$)**	
K	10,07 %	12,13 % K_2O	9,81 %	11,81 % K2O
Li	3,58 %	7,70 % Li2O		
Al	6,95 %	13,13 % Al_2O_3	20,30 %	38,36 % Al2O3
Si	28,93 %	61,89 % SiO2	21,13 %	45,21 % SiO2
H	0,26 %		0,46 %	4,07 % H2O
O	45,32 %		47,35 %	
F	4,89	4,89 % F	0,95 %	0,95 % F

Fonte: adaptado de: (Dana, 2008; Deer *et al.*, 2010; Klein *et al.*, 2012)

Para a amostra PNC, pegmatito de Naipa, utilizando-se MEV/EDS, foi identificada apatite (Fig. *33*b). Este mineral ocorre normalmente em cristais com hábito prismático alongado, e, por vezes, curto a tabular (Klein *et al.*, 2012). Trata-se de um mineral acessório em rochas ígneas, sedimentares, metamórficas e em pegmatitos e outros veios, provavelmente de origem hidrotermal (Deer *et al.*, 2010; Klein *et al.*, 2012).

Os cristais de apatite acessórios são subédricos e ocorrem sobretudo associados à moscovite.

Tabela 16: Resultados da análise EDS da amostra PNC.

	PNC			
Fórmula química	Z1	Z2	Z3	Z4
F_20	6,41	1,90		4,73
Na_2O	0,35	0,60		
Al_2O_3	26,35	35,75	54,20	28,84
SiO_2	54,24	49,77	45,80	54,60
K_2O	10,99	11,23		11,06
MnO	1,65	0,75		0,77

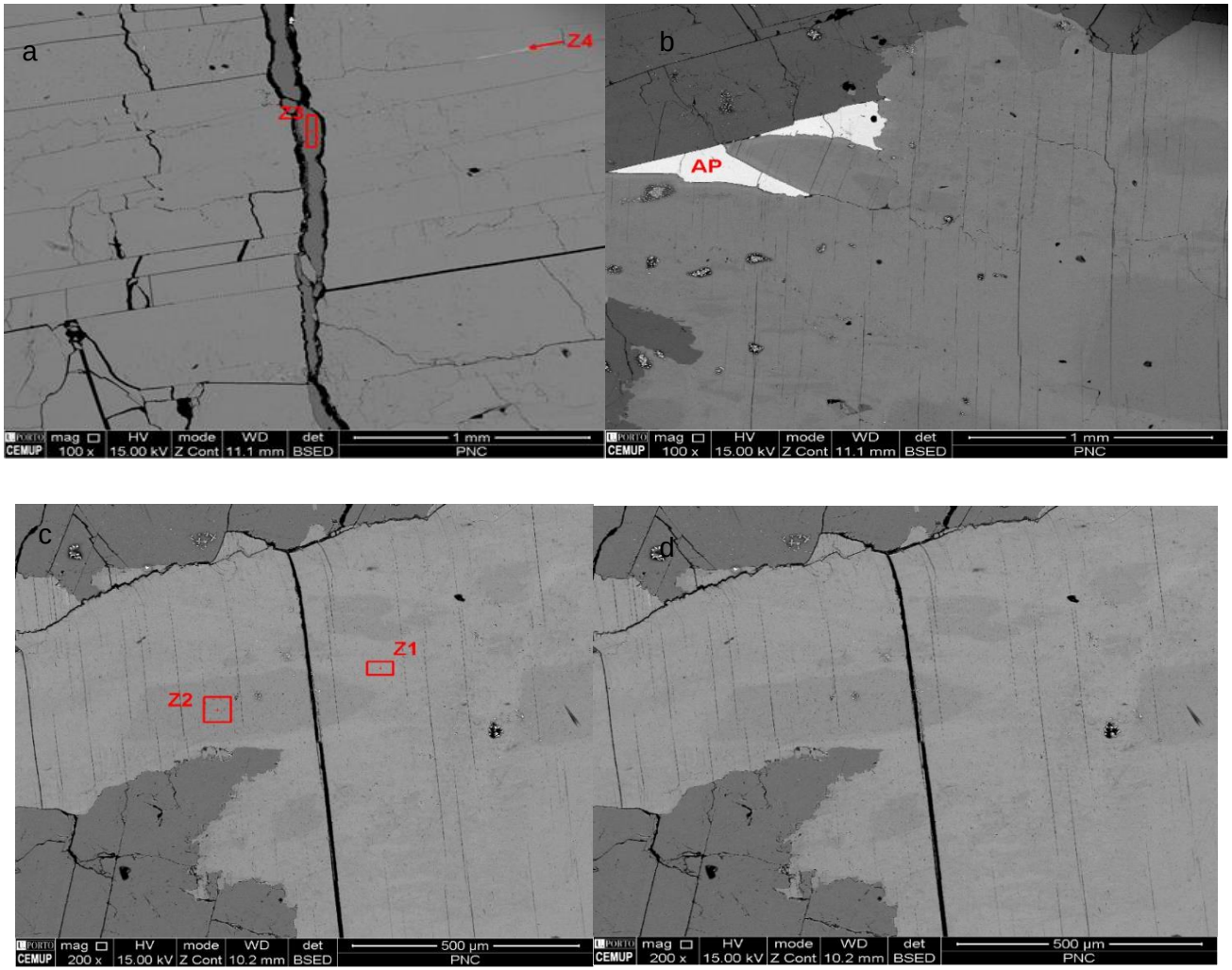


Fig. 33: Imagens de MEV da amostra PNC.

Tabela 17: Resultados da análise EDS da amostra PNG.

	PNG				
Fórmula química	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Na2O	2,79	2,27			
Al2O3	42,68	41,74	52,77	36,56	17,28
CaO		1,62			
SiO2	46,05	45,71	45,84	50,84	66,69
K2O				12,60	16,03
MnO	1,64	1,26			
Fe2O3	6,83	7,40	1,39		

Tabela 18: Resultados da análise EDS da amostra PM1.1.

	PM1.1		
Fórmula química	Z1	Z2	Z3
Na2O			
Al2O3	55,27	55,09	51,67
CaO			
SiO2	44,73	44,91	48,33
K2O			
MnO			
Fe2O3			

6.4. Difração de Raio X

Esta fase foi desenvolvida com base na difração de raios X, onde foram analisados caulinos de Muiane, com os códigos CM1, CM2. A DRX é utilizada na identificação, caracterização e determinação da estrutura cristalográfica dos minerais (Ermrich and Opper, 2011; Veiga, 2011).

A caulinite é um mineral dominante na composição dos caulinos. A fórmula estrutural da respetiva célula unitária, $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$, corresponde à seguinte composição percentual aproximada: 13,96% de H_2O, 39,50% de Al_2O_3 e 46,54% de SiO_2 (Velho, 2005). Os difratogramas dos caulinos são apresentados nas (Fig. 36 e Fig. 37).

Nas zonas pegmatíticas de Moçambique, zonas líticas, sodalíticas e dos feldspatos, segundo (Barros and Vicente, 1963), as caulinites são considerados minerais economicamente viáveis (Cronwright, 2005a). Estes pegmatitos são de extrema importância pelo seu historial, pois, durante o período de 1963, o pegmatito de Muiane produziu 5 t de caulino e apresentou uma reserva de 3 315 342 t de material de pegmatito caulinizado (com ~ 50% de caulino) (Lächelt, 2004; Cronwright, 2005a; Council for Geoscience, 2007). Outros pegmatitos caulinizados são os de Marropino, Naipa, Naquissupa.

O empilhamento da caulinite, ou seja, o grau de cristalinidade pode ser verificado pelos planos basais d_{021}, d_{060} observados no DRX (Mantovani *et al.*, 2009). A (Fig. 34) mostra as alterações da estrutura cristalina da caulinite que podem ser avaliadas pelo índice de Hinckley (IH), obtido pelo DRX. O IH é amplamente utilizado para descrever a cristalinidade e o grau de ordem/desordem da caulinite utilizando as reflexões d_{110} e d_{111} localizadas no intervalo de 20-23º 2θ (Ptáček *et al.*, 2013; Silva and Santana, 2016). Estas reflexões são intensas e bem definidas quando a caulinite tem elevado grau de ordenamento (Silva and Santana, 2016). Comparando-se os difratogramas apresentados nas (Fig. 36 e Fig. 37), conclui-se que os dois picos presentes correspondem à caulinite e à ilite, apresentando uma distância interplanar Å (pico principal de 7 Å) e picos secundários de 3,38 Å, 10,37 Å e 7.33 Å, sugerindo três fases minerais, caulinite (Kaol), ilite (Il) e esmectite (Sm) (Liew *et al.*, 1985). A equação de indicação da distância da caulinite é representada a seguir:

Fórmula de indicação da distância da caulinite

$$\boldsymbol{d001} = c_o(1-\cos^2\alpha - \cos^2\beta)^{1/2} = \mathbf{0{,}72\ nm = 7{,}2}\ \text{Å} \qquad (7)$$

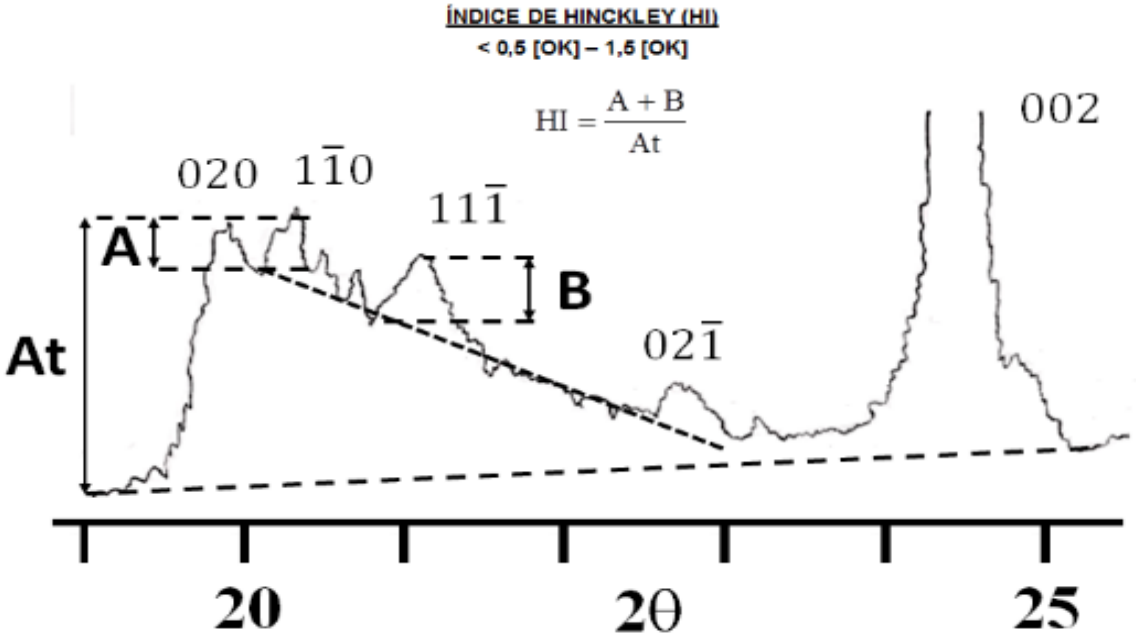


Fig. 34: Cálculo do índice de Hinckley no DRX da caulinite. Extraído em Silva e Santana (2016).

A caulinite apresenta diferenças espectrais nas feições de absorção duplas localizadas em 1,4 µm e 2,2 µm. A feição dupla em 1,4 µm é uma função das vibrações dentro de iões hidróxido (OH-) e moléculas de água (H_2O) (Fig *35*) (Clark, 1999).

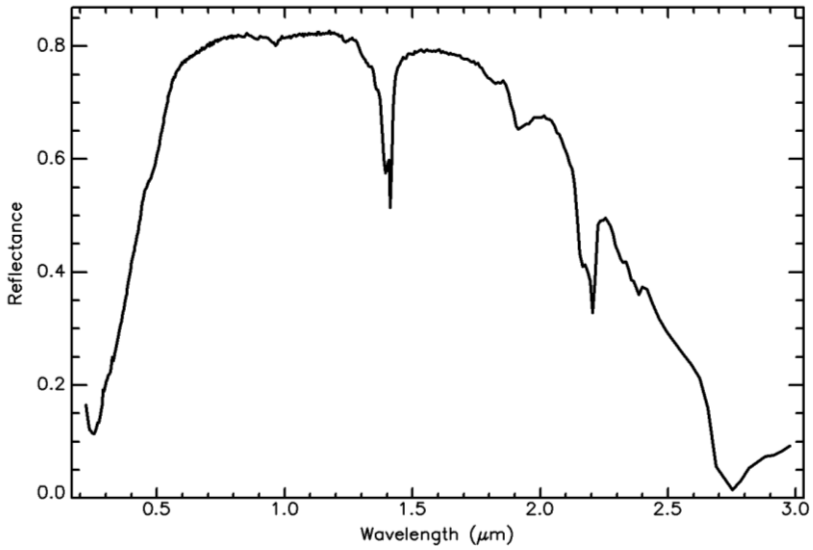


Fig 35: Espetro principal da caulinite extraídos da biblioteca espectral do USGS.

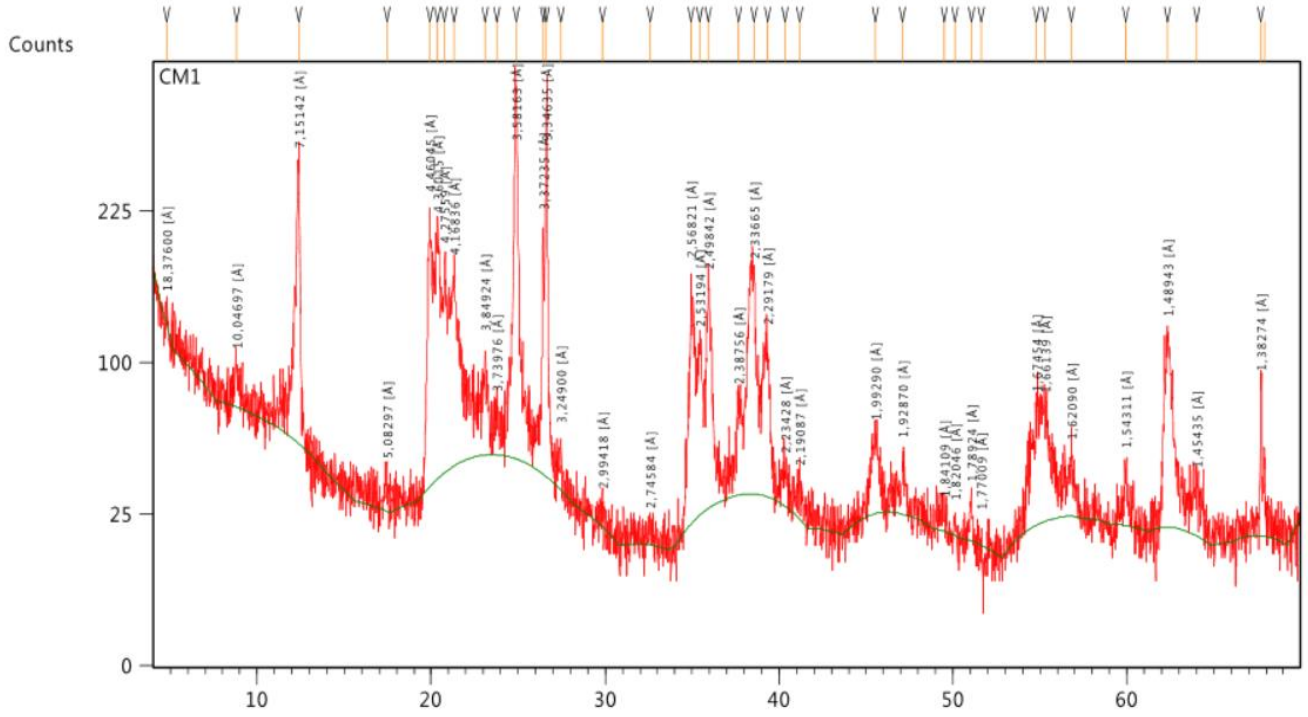


Fig. 36: Difratograma da amostra CM1.

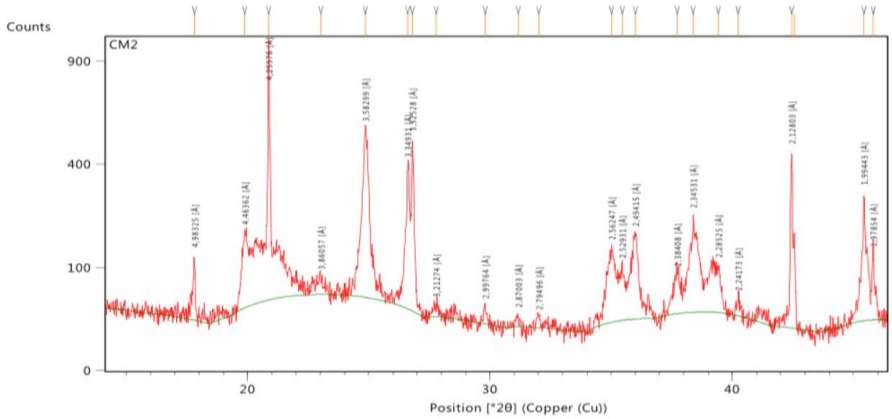


Fig. 37: Difratograma da amostra CM2.

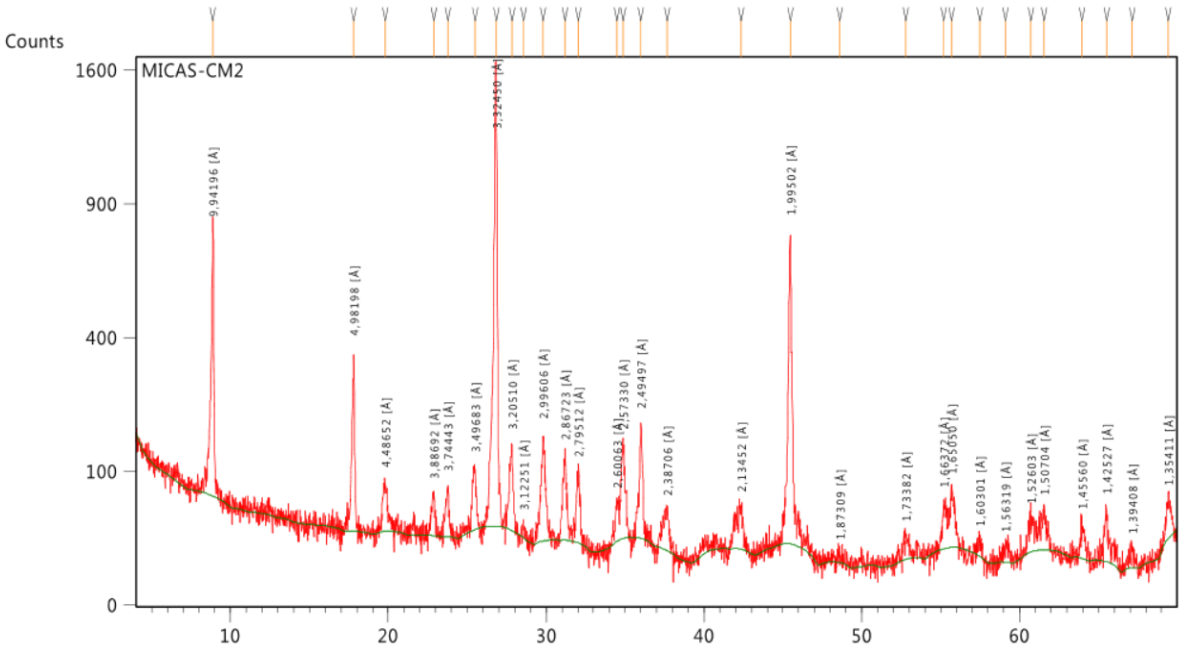


Fig. 38: Difratograma das micas dentro dos caulinos (CM2).

Capítulo VII

VII. 7. Geoquímica

O lítio, alvo deste trabalho, é encontrado apenas como um elemento traço (ppm), estando representado na crosta terrestre pelo valor médio de 1,6 ppm e, na crosta oceânica, de 4,3 ppm (Sun and McDonough, 1989). Desde o passado colonial, até os dias de hoje, nos dois pegmatitos onde foram recolhidas amostras estudadas (Muiane e Naipa) são exploradas colombo-tantalites, microlites, diferentes tipos de gemas de berilos, espodumenas e quartzo. Na região de Alto Ligonha aflora um extenso campo pegmatito granítico, da família LCT, com graus de diferenciação variáveis (Barros and Vicente, 1963), como ilustra a (Tabela 19). A alteração das amostras analisadas é muito generalizada, sendo raras aquelas que não mostram sinais, pelo menos incipientes, de meteorização, quiçá minerais hidrotermais.

A amostragem foi do tipo pontual, tendo servido de base as análises químicas e a realização de 5 lâminas com os seguintes códigos: LN1, FM, PNC, PM1.1 e PMG, detalhadas nos pontos 6,2 e 6,3 (Microscópia ótica e de varrimento). Na maioria das amostras foi realizada a análise por fluorescência de Raio X portátil (FRX).

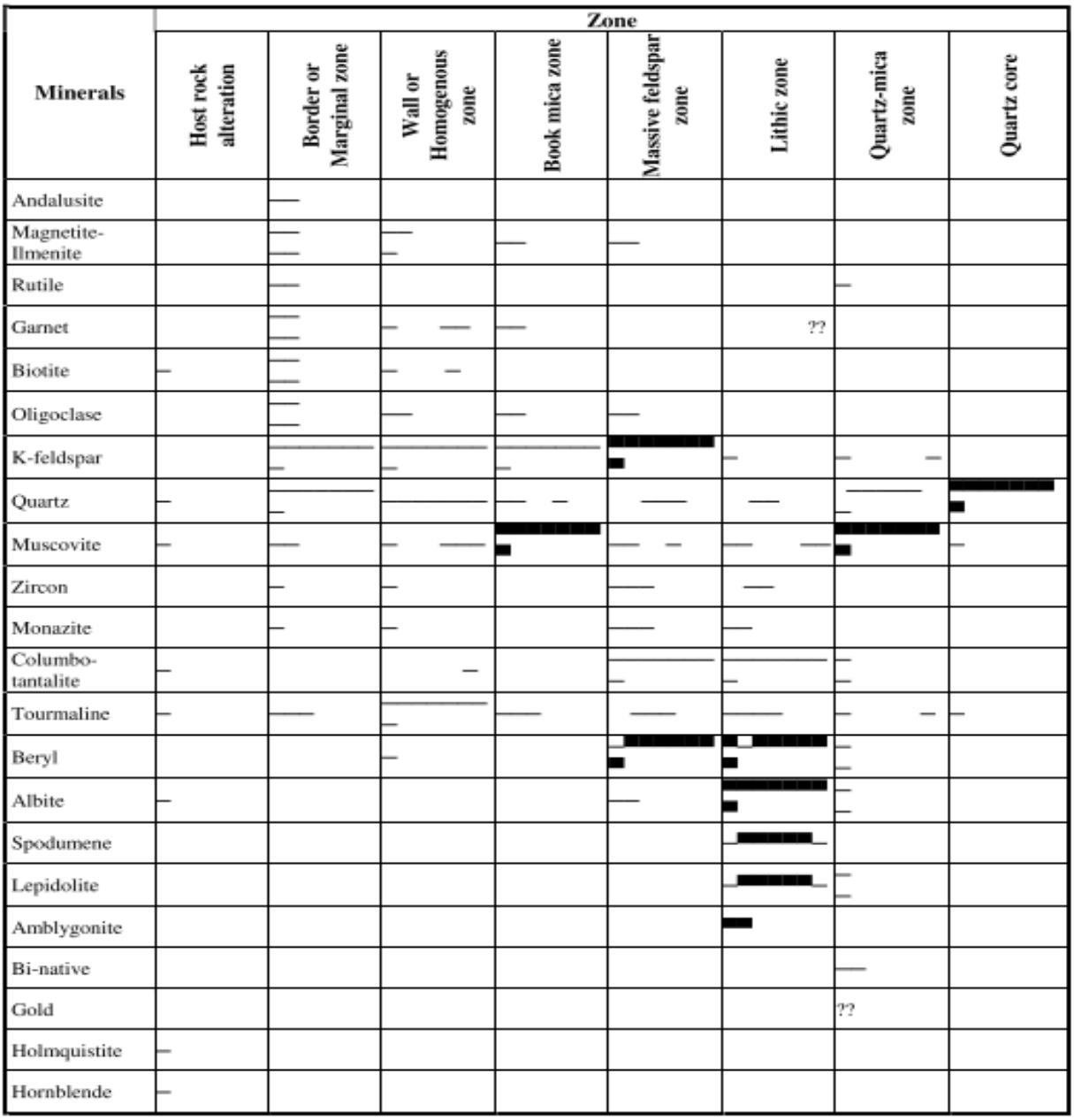


Tabela 19: Zonamento dos pegmatitos de Alto Ligonha proposto por Barros (Barros and Vicente, 1963; Council for Geoscience, 2007).

7.1. Fluorescência de Raio X portátil

Na (Tabela 20) são apresentados os resultados detalhados correspondentes aos teores de silício, alumínio, potássio e rubídio obtidos nos pegmatitos de Naipa e Muiane por fluorescência de raio X portátil (FRX).

7.1.1. Elementos principais

7.1.1.1. Silício

Para (Taylor, 1964), o silício corresponde a 32,3%, em média, dos granitos e pegmatitos, sendo, pois, o elemento mais abundante nestas rochas. O quartzo, os feldspatos e, em menor grau, as micas e alguns minerais secundários, são responsáveis pela presença do silício nas rochas colhidas entre os pegmatitos de Muiane e Naipa. Só os feldspatos, por sua vez, representam entre 33,2% e 68 % da sílica total (Fig *39*).

Numa determinada série magmática, as rochas mais silicatadas consideram-se como aquelas correspondentes a uma mais avançada diferenciação. No decorrer deste fenómeno, também se verifica um progressivo aumento da complexidade dos silicatos, desde uns com estrutura simples, como os borossilicatos, até aqueles com complexas malhas, como os tectossilicatos (Nunes, 1966). As amostras analisadas revelam teores de sílica entre 96,22% e 43,22%, com um valor médio de 79,50%.

No (Fig *39*) apresenta-se a dispersão dos teores de sílica dos pegmatitos de Muiane e Naipa em 14 amostras. As diferenças em silício provavelmente resultam do facto de as rochas serem granitoides, dentro do campo das rochas ígneas quartzosas, sendo também estudadas e detalhadas em (Nunes, 1966).

7.1.1.2. Alumínio

O alumínio é o metal mais abundante nas rochas ígneas, representando nos granitos 7, 70%, de acordo com o teor médio sugerido por (Taylor, 1964). Os feldspatos, dada a sua comparticipação na constituição dos pegmatitos, são responsáveis pela maior parte do alumínio que estas rochas contêm. Considera-se que, nos feldspatos potássicos, este elemento pode figurar em percentagem ilustrada no (Fig *40*). O alumínio é um componente normal das micas (Barton and Karathanasis, 2002).

	KN1 (Espodumena)	KN2 (Espodumena)	PN1 (Feldspato)	PN1 (Quartzo)	PN1 (Quartzo)	PN2 (Feldspato)	PN2 (Feldspatos)	PN2 (Quartzo)	TN1 (Turmalina)	LN1 (Lepidolite)	LN1 (Lepidolite)	LN1(Lepidolite)
SiO_2 (%)	80.8284	72.8634	70.8019	55.0408	45.3937	65.0570	70.0777	61.0832	40.3202	35.5941	26.7494	49.4471
Al_2O_3 (%)	31.3616	28.9563	21.1575	9.4775	15.8883	15.8936	18.1096	15.6440	31.3538	19.5092	13.1088	26.4306
K_2O (%)	< LOD	0.2812	3.0544	0.7977	6.9230	0.1152	0.2403	0.1402	0.4755	4.6711	2.6343	7.6685
Rb (%)	< LOD	0.0003	0.4831	0.2954	0.6609	0.0087	0.0014	0.0035	0.0906	1.4846	0.9570	1.5298

	PM1 (Quartzo)	PM1 (Quartzo)	FM1 (Feldspato)	FM2 (Feldspato)	LM1 (Lepidolite)	CM1 (Caulino)	FM3 (Feldspato)	FM3(Feldspato)	FM4 (Feldspato)	FM4 (Feldspato)	FM4 (Feldspato)	FM5 (Feldspato)
SiO_2 (%)	92.5869	74.5599	67.6658	64.0125	41.7274	42.5288	35.2261	74.4808	65.0176	68.2545	51.1578	62.1534
Al_2O_3 (%)	14.6428	3.2247	20.5518	21.8663	24.8309	28.1346	15.1132	22.9210	21.3096	23.1916	31.3010	39.7868
K_2O (%)	0.1956	0.2139	12.2857	12.7887	5.4661	2.0870	3.3529	12.4295	12.4295	9.2954	0.1746	1.3362
Rb (%)	0.0013	< LOD	0.0642	0.2108	1.5741	0.0120	0.0862	0.0939	0.1124	0.1620	0.0012	0.0710

	FM5 (Feldspato)	LM2 (Lepidolite)	LM2 (Lepidolite)	LM3 (Lepidolite)	LM3 (Lepidolite)	LM3 (Lepidolite)	GM1 (Granodiorito)
SiO_2 (%)	65.4678	43.5211	43.5211	32.0168	38.6444	39.0259	55.3204
Al_2O_3 (%)	41.8015	21.2031	21.2031	15.6773	23.2539	40.9983	17.2715
K_2O (%)	0.0318	4.2312	4.2312	4.8759	5.0210	0.6557	8.5089
Rb (%)	0.0023	1.2760	1.2760	1.4599	1.3530	0.0712	0.0411

Tabela 20: Resultados gerais das análises por FRX portátil. Amostras de Muiane (M) e Naipa (N).

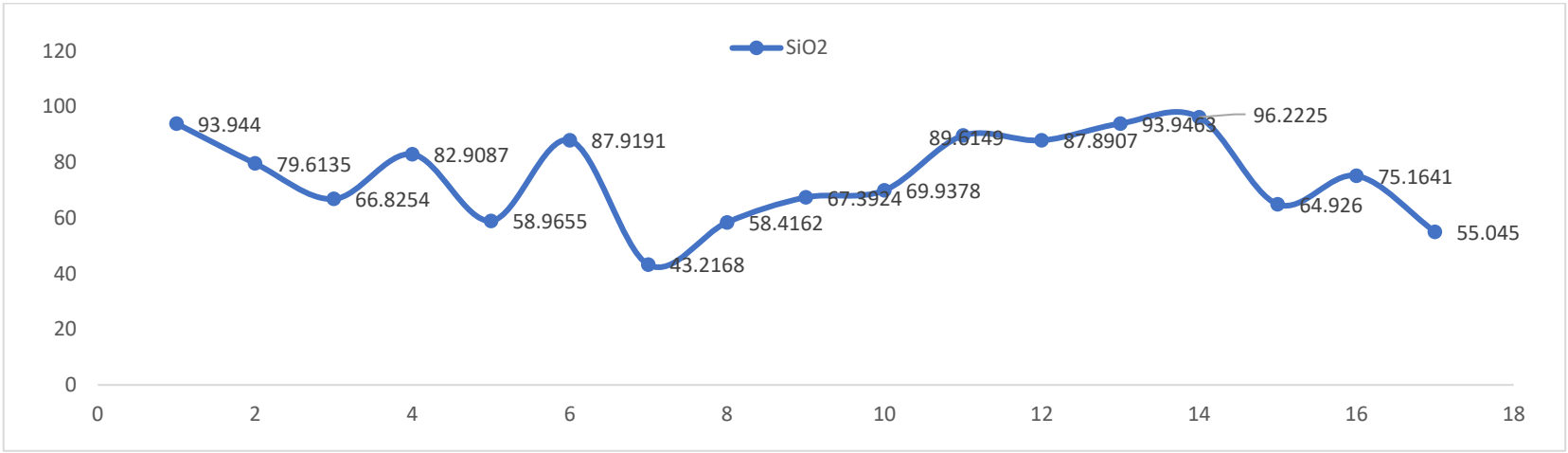


Fig 39: Distribuição dos teores de SiO_2 das amostras colhidas em Naipa e Muiane.

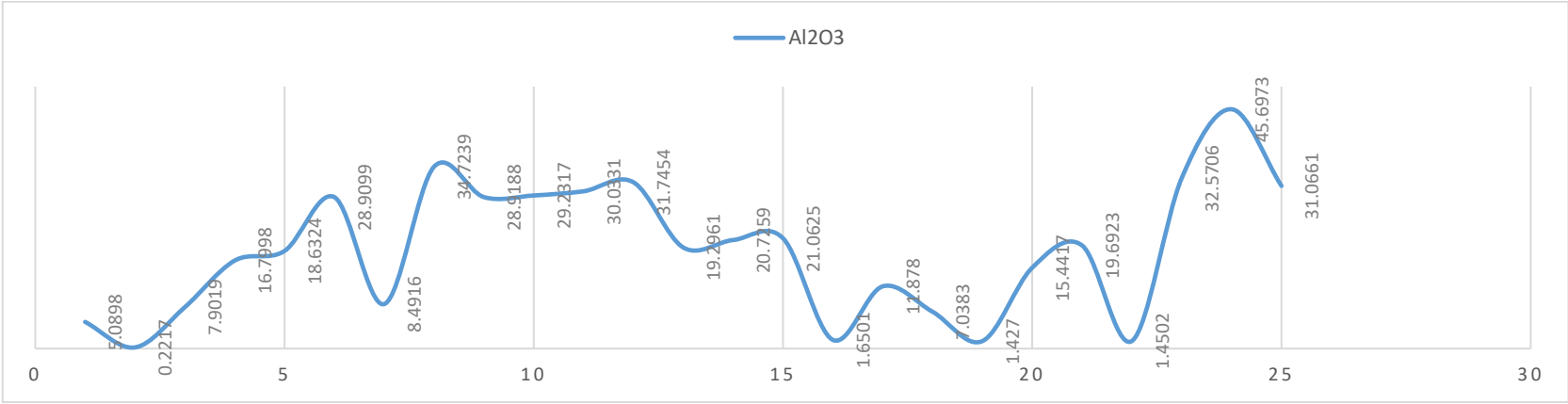


Fig 40: Distribuição dos teores de Al_2O_3 das amostras de Naipa e Muiane.

7.1.2. Relação K/Rb

Alguns autores clássicos, como (Sodolov, 1960; Correia Neves and Lopes Nunes, 1966), consideram que nos pegmatitos, pelo facto de representarem um estádio final da consolidação do magma, se podem definir várias fases de diferenciação, tanto mais que nestas rochas ocorrem cristais bem desenvolvidos e facilmente destacáveis de feldspato potássico, mineral onde são de esperar mais elevadas concentrações de rubídio (Nunes, 1966), como se verifica nos resultados das análises, tanto de Muiane e assim como de Naipa (Tabela 20).

Um alto conteúdo de Rb ocorre no feldspato-K de pegmatitos graníticos da classe dos elementos raros, e particularmente fracionado e em pegmatitos complexos com polucite da família LCT (Černý, 1991; Teertstra *et al.*, 1998).

O potássio representa em média 3,34% da composição do granito (Taylor, 1964). As análises feitas por (Nunes, 1966), em Naipa, mostram que este metal encontra-se distribuído entre a microclina e as micas, devendo caber aos feldspatos mais micas de 95% do potássio existente.

A quantidade de rubídio existente na crosta terrestre foi considerada insignificante pelos primeiros investigadores no campo da geoquímica. O rubídio encontra-se integrado nas estruturas dos feldspatos e das micas, e nos primeiros, especialmente nos potássicos (Nunes, 1966). Os valores obtidos da relação K/Rb são apresentados nas figuras (Fig *41*-Fig *43*) e nas tabelas (Tabela 21, Tabela 22), apresentando como valor mais elevado 900 ppm nos pegmatitos de Muiane.

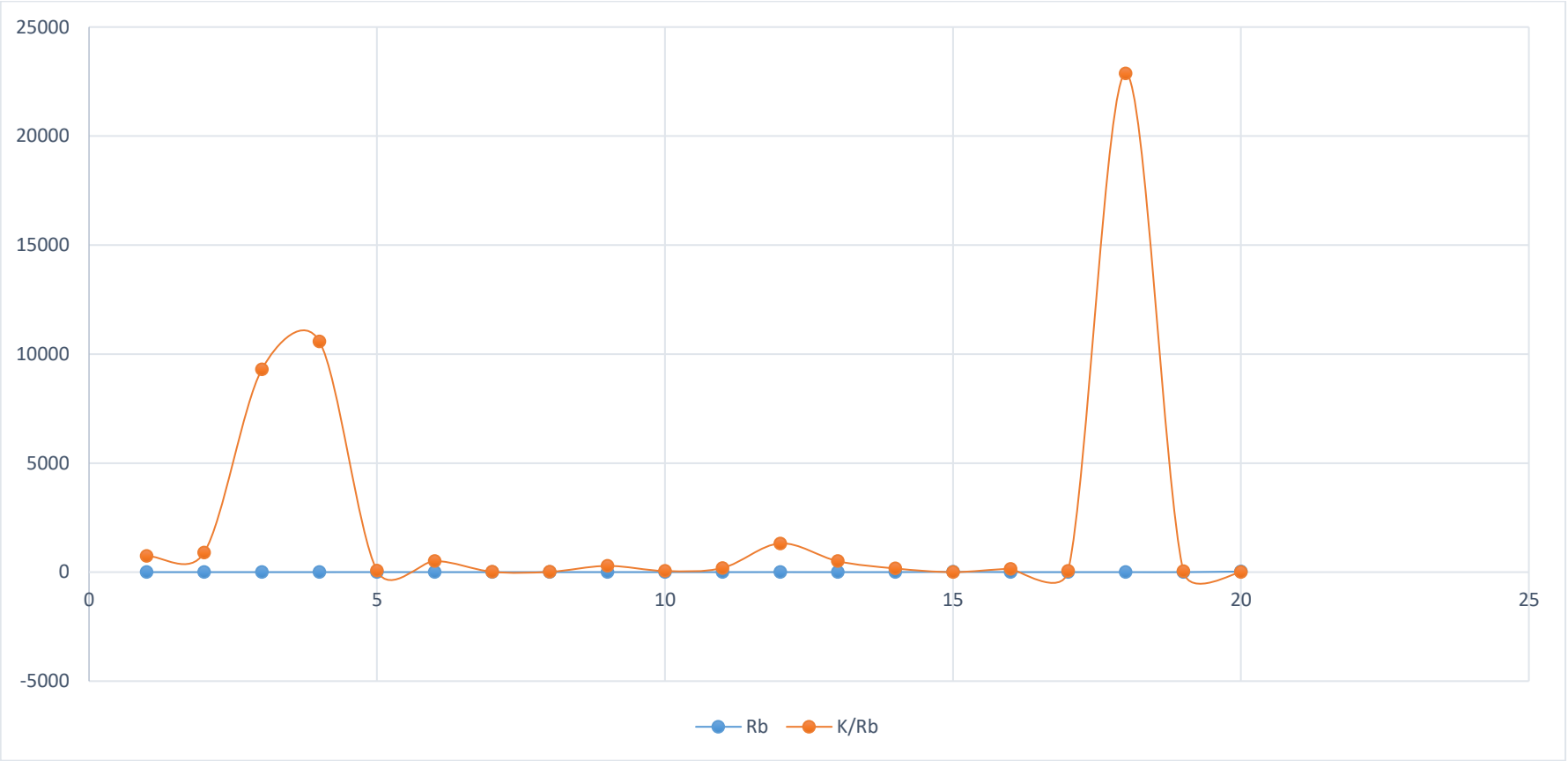


Fig 41: Relação K/Rb das amostras de Naipa e Muiane

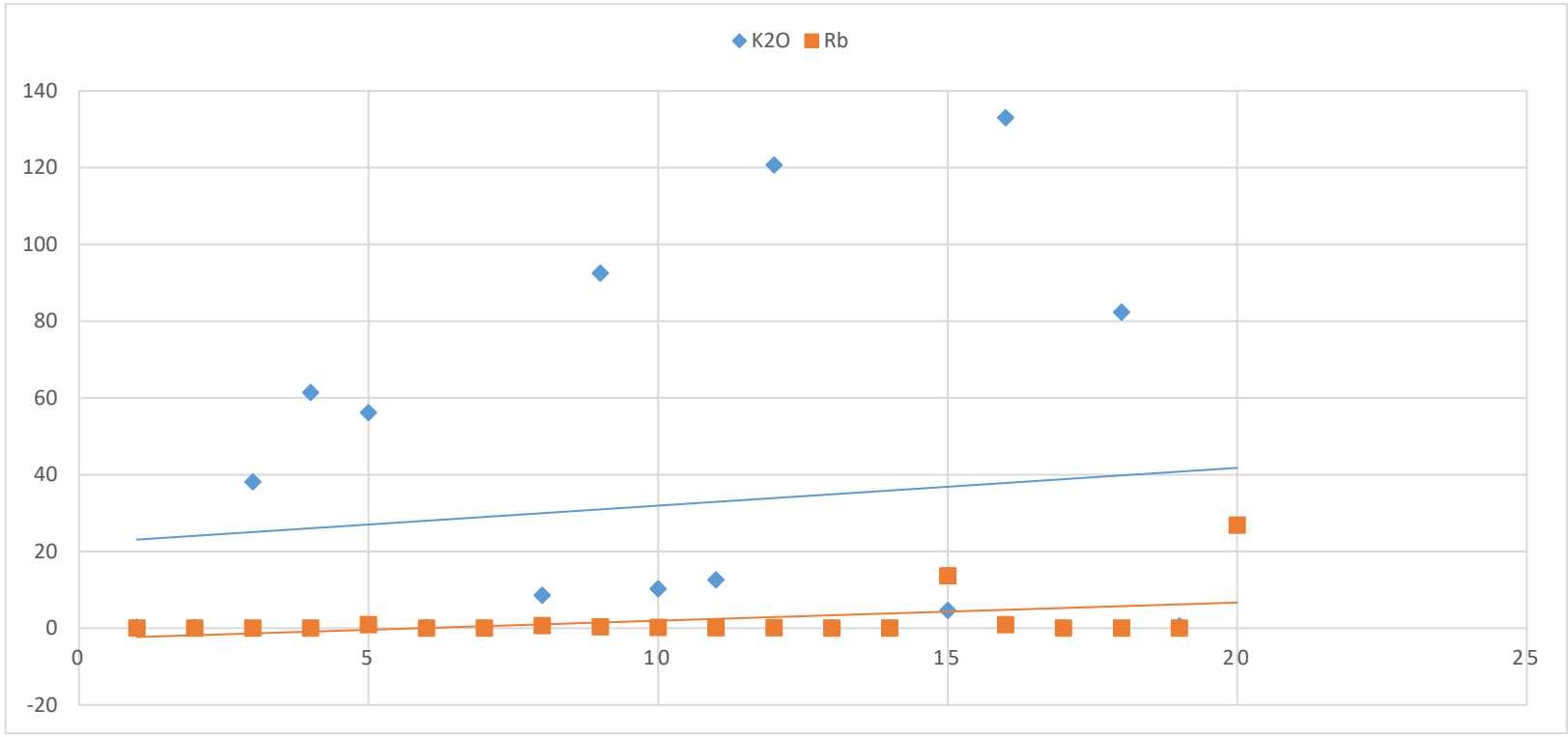


Fig 42: Relação K e Rb das amostras de Naipa e Muiane

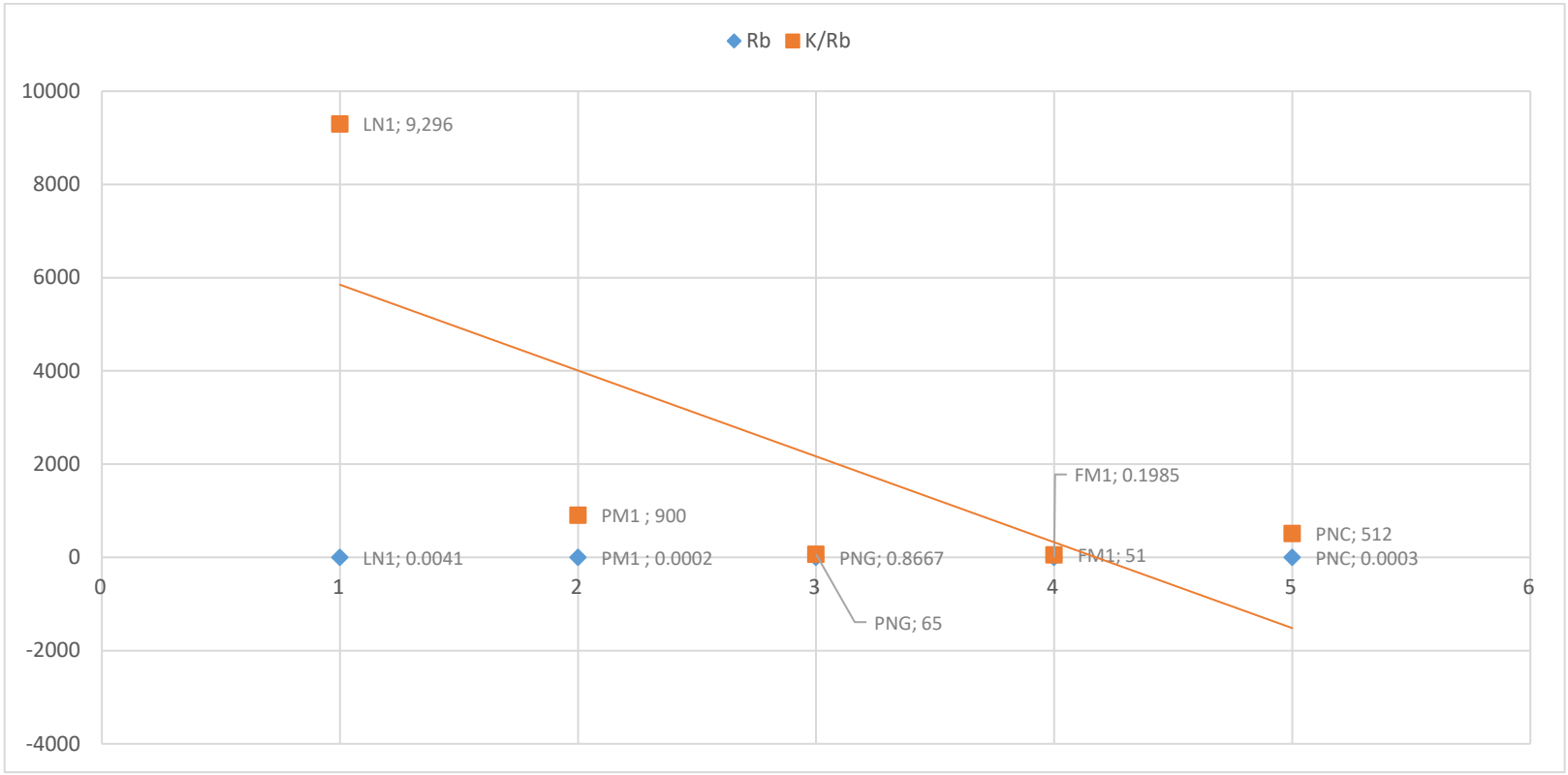


Fig 43: Relação K/Rb (amostragem).

Amostras	LN1	PM1	PNG	FM1	PNC
Rb (%)	0.0041	0.0002	0.8667	0.1985	0.0003
K/Rb (%)	9,296	900	65	51	512

Tabela 21: Relação K/Rb (amostragem).

Amostras	K2O (%)	Rb (%)	K/Rb
PN1	0,2213	0,0003	7,37
PM1	0,1799	0,0002	899,5
LN1	38,112	0,0041	9,29
LN2	61,387	0,0058	1,05
PNG	56,175	0,8667	6,48
PNG	0,1537	0,0003	5,12
PNGT	0,086	0,0057	150,8
MM1	8,549	0,6409	1,33
MM2	92,447	0,3236	2,85
FM1	10,22	0,1985	514,8
FM2	12,619	0,0662	1,90
FM3	120,661	0,0916	1,317
PMQ2	0,1512	0,0003	504
PMQ4	0,1343	0,0008	167,8
LM1	4,591	13,657	3,36
PM3	132,958	0,9069	1,46
PM5	0,0412	0,0008	51,5
PLM	82,345	0,0036	2,28
CM2	0,5911	0,0118	5,00
CM1	26,839	26,839	2,41

Tabela 22: Relação K/Rb das amostras de Naipa e Muiane.

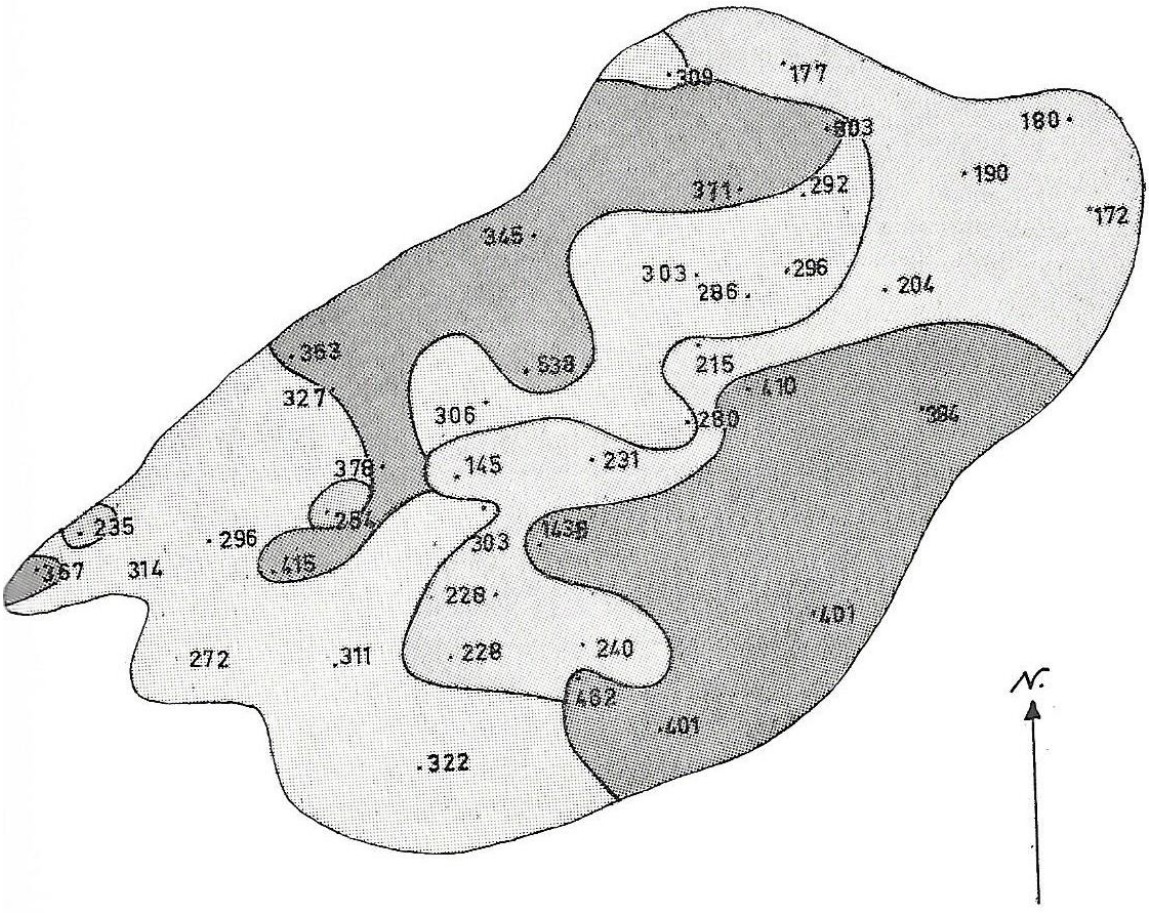


Fig. 44: Distribuição das áreas com valores aproximados da relação K/Rb (Pegmatito de Naipa) na escala 1/50000.

Fonte: Nunes (1966).

Capítulo VIII

VIII. Aplicação de técnicas de análises de imagens de satélites

Existem vários métodos baseados em SIG usados para mapear, identificar e caraterizar os minerais (Ziaii *et al.*, 2011). Neste ponto tratar-se-á da análise e discussão de dados, mostrando o contributo do estudo em ciências geológicas da região de Alto Ligonha (Moçambique).

Também são descritos a componente de aplicabilidade da deteção remota, sistemas de sensores, resoluções, e aplicação de técnicas de classificação utilizando o sensor ASTER, Landsat 8 (Sensor OLI), Sentinel 2 A (MSI), abordando as caraterísticas de cada imagem, correção atmosférica das três imagens, operações aritméticas das bandas (PCA, NDVI, combinação de bandas, razão de bandas), e caraterização espetral dos minerais de referência, processamento das imagens, usando os algoritmos: SAM, MinD, Maxver, e SVM, CNN e os resultados obtidos com os métodos de mapeamento espetral, sendo feita uma avaliação da exatidão, dos erros de comissão e omissão e por fim do coeficiente de concordância Kappa da cartografia resultante.

Na (Fig. 45) apresenta-se o fluxograma das técnicas de deteção remota aplicadas nesse trabalho, desde o download das imagens, aos processos de pré e pós-processamento.

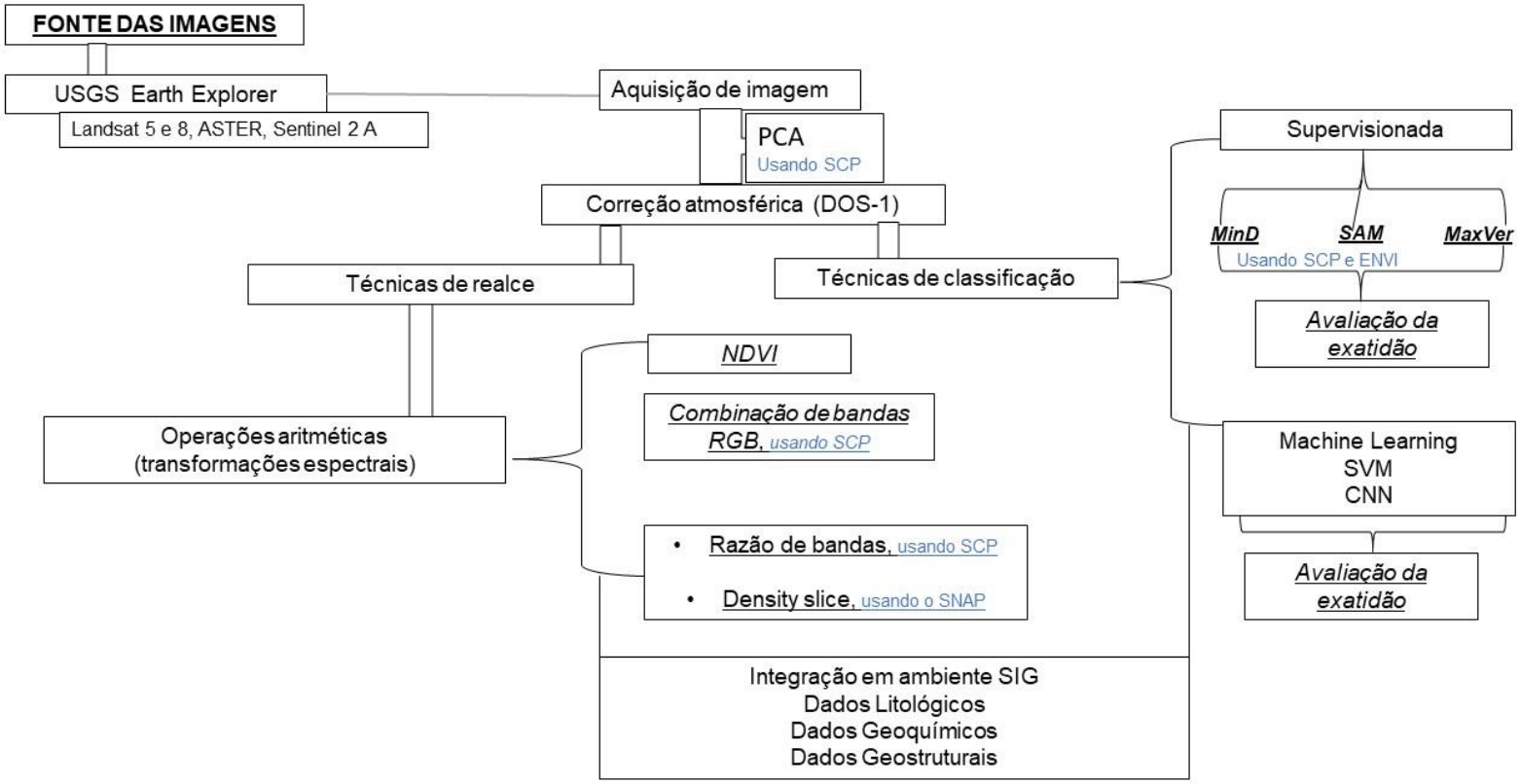


Fig. 45: Fluxograma de pré-pós processamento das imagens.

8.1. Imagens utilizadas

Para este trabalho foram usadas as imagens Landsat (5 e 8), ASTER e Sentinel 2A, todas com enorme aplicação no ramo das geociências. As suas características encontram-se detalhadas nas (Tabela 23 e Tabela 24). A classificação de imagens é geralmente definida como o processo de extração de diferentes classes ou temas, a partir de dados registados por sensores remotos (Xie *et al.*, 2008). Contudo, utilizam-se algoritmos estatísticos de classificação (classificadores). Dependendo do algoritmo utilizado no procedimento, a classificação é dita supervisionada ou não-supervisionada (Perumal and Bhaskaran, 2010; Meneses and Almeida, 2012; Sathya and Abraham, 2013). A classificação supervisionada parte de um certo conhecimento da zona de estudo (van Engelen and Hoos, 2020), adquirido por experiência própria e por trabalhos de campo. É pertinente que se comece pela interpretação geológica e pela topográfica da região com fim de identificar a geomorfologia dos alvos.

A classificação supervisionada englobou as seguintes finalidades:

- decidir quais as classes a separar na imagem;
- selecionar os pixeis representativos para cada classe;
- definir a legenda e marcação das áreas de treino;
- criar assinaturas espectrais;
- classificar a imagem;
- apresentar e avaliar os resultados.

8.2. Correção Atmosférica das imagens

Após o download das imagens, as mesmas foram importadas para o software QGIS, no qual foram executadas as operações necessárias à sua correção atmosférica com base no método Dark Objection Subtraction (DOS-1) desenvolvido por Chavez (Chavez, 1988, 1996), onde somente o processo de difusão atmosférica é corrigido na imagem com o objetivo de reduzir os efeitos de dispersão atmosférica, bem como melhorarr o contraste e reduzir os erros sobre os dados-imagem utilizados. É um exemplo de método empírico de correção atmosférica que deve ser utilizado apenas quando não for possível utilizar métodos físicos (Gaida *et al.*, 2020).

Para as imagens ASTER (2005) e Landsat 8 OLI (2018), os dados usados foram extraídos de (Gemusse *et al.*, 2018). Também foram analisadas imagens do Landsat 5 TM (1989) e Sentinel 2 A (2019/10/10). As etapas de processamento das imagens foram realizadas na interface Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) no QGIS (Congedo, 2016).

Tabela 23: Fontes das imagens.

Dados	**Fonte**
Landsat	https://glovis.usgs.gov// https://earthexplorer.usgs.gov/
Sentinel 2	https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home/
	https://earthexplorer.usgs.gov/
TERRA-ASTER	https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/aster
	https://earthexplorer.usgs.gov/

Tabela 24: Características técnicas dos sensores remotos utilizados. Fonte: (Sabins, 1999; Roy *et al.*, 2014; SUHET, 2015)

	Largura da faixa (km)	***Bandas***	***Rotulo (label)***	***Comprimentos de onda (μm)***	**(**Distância de Amostragem no Solo**) *Resolução espacial (m)***	***Resolução radiométrica***	***Resolução temporal (dias)***	***Orbita***	***Descrição***
Landsat 5 (TM) ***Tematic Mapper***	**185**	*B1*	*Azul*	*0.45-0.52*	*30*	*16*		*Circular quase polar (sol síncrona*	*Visível*
		B2	*Verde*	*0.52-0.60*	*30*				*Próximo ao infravermelho*
		B3	*Vermelho*	*0.63-0.69*	*30*				*Infravermelho de ondas curtas*
		B4	*NIR*	*0.76-0.90*	*30*				*Infravermelho de onda longa ou IR térmico*
		B5	*SWIR*	*1.55-1.75*	*30*				*Infravermelho de ondas curtas*
		B6	*TIR*	*10.41-12.5*	*120*				
		B7	*SWIR*	*2.08-2.35*	*30*				
	Largura da faixa	***Bandas***	***Rotulo (label)***	***Comprimentos de onda (μm)***	***Resolução espacial (m)***	***Resolução radiométrica***	***Resolução temporal (dias)***	***Orbita***	***Descrição***

Landsat 8	185	*B1*	*Ultra Azul*	*0.435 –0.451*	*30*		*16*		
		B2	*Azul*	*0.452–0.512*	*30*				
		B3	*Verde*	*0.533–0.590*	*30*				
		B4	*Vermelho*	*0.636–0.673*	*30*				
		B5	*NIR*	*0.851–0.879*	*30*			*Heliossincrona*	*Próximo ao infravermelho*
		B6	*(SWIR) 1*	*1.566–1.651*	*30*				*Infravermelho de ondas curtas*
		B7	*(SWIR) 2*	*2.107–2.294*	*30*				*Infravermelho de ondas curtas*
		B8	*Pancromático*	*0.503–0.676*	*15*				
		B9	*Cirrus*	*1.363–1.384*	*30*				
		B10	*(TIRS) 1*	*10.60–11.19*	*100 * (30)*				
		B11	*(TIRS) 2*	*11.50–12.51*	*100 * (30)*				
ASTER	***Largura da faixa***	***Bandas***	***Rotulo (label)***	***Comprimentos de onda (μm)***	***Resolução espacial (m)***	***Resolução radiométrica***	***Resolução temporal (dias)***	***Orbita***	***Descrição***
	60	*B1*	*VNIR_B1*	*0.520–0.60*	*15*				*Visível, verde e amarelo*
		B2	*VNIR_B2*	*0.630–0.690*	*15*				

		B3N	*VNIR_B3N*	*0.760–0.860*	*15*				*Próximo ao infravermelho*
		B3B	*VNIR_B3B*	*0.760–0.860*	*15*				
		B4	*SWIR_B4*	*1.600–1.700*	*30*				
		B5	*SWIR_B5*	*2.145–2.185*	*30*	*8 bits por píxel*			*Infravermelho de ondas curtas*
		B6	*SWIR_B6*	*2.185–2.225*	*30*		*16*	*Polar e heliossincrona*	
		B7	*SWIR_B7*	*2.235–2.285*	*30*				
		B8	*SWIR_B8*	*2.295–2.365*	*30*				
		B9	*SWIR_B9*	*2.360–2.430*	*30*				
		B10	*TIR_B10*	*8.125–8.475*	*90*				
		B11	*TIR_B11*	*8.475–8.825*	*90*				
		B12	*TIR_B12*	*8.925–9.275*	*90*	*12 bits por píxel*			Infravermelho de onda longa ou IR térmico
		B13	*TIR_B13*	*10.250–10.950*	*90*				
		B14	*TIR_B14*	*10.950–11.650*	*90*				
	Largura da faixa	***Bandas***	***Rotulo (label)***	***Comprimentos de onda (µm)***	***Resolução espacial (m)***	***Resolução radiométrica***	***Resolução temporal (dias)***	***Orbita***	***Descrição***

		B1	*Coastal aerosol*	*0.443*	*60*				
		B2	*Azul*	*0.490*	*10*				
		B3	*Verde*	*0.560*	*10*				
Sentinel 2 A	*290*								***Visível***
		B4	*Vermelho*	*0.665*	*10*	*12 bits por píxel*		*Quase-polar*	
		B5	*Vegetation Red Edge*	*0.705*	*20*				
		B6	*Vegetation Red Edge*	*0.740*	*20*		*5*		
		B7	*Vegetation Red Edge*	*0.783*	*20*				
		B8	*NIR (near infrared)*	*0.842*	*10*				*Próximo ao infravermelho*
		B8A	*Narrow NIR*	*0.865*	*20*				
		B9	*Vapor de água*	*0.945*	*60*				
		B10	*SWIR (Cirrus)*	*1.375*	*60*				

	B11	*SWIR*	*1.610*	*20*	*Infravermelho de ondas curtas*
	B12	*SWIR*	*2.190*	*20*	

8.3. Análises de componentes principais (ACP)

8.3.1. ACP para minerais de lítio

A análise dos resultados consistiu na verificação das matrizes de autovetores e de correlação e no reconhecimento visual das PCs. A informação espetral de cada banda é um critério de escolha para a imagem de componente principal (Picchiotti *et al.*, 1997; Grunsky, 2002).
Algumas propostas para análise de prospeção de minerais de lítio foram extraídas de (Cardoso-Fernandes, 2018) (

Tabela 25).Foram processadas as imagens considerando duas e quatro componentes, selecionadas devido ao contraste de refletância e absorção encontrado sobre estas bandas para os diferentes minerais. O sinal e a magnitude das cargas ou valores de vetores próprios em cada PC correspondem às propriedades espetrais de materiais de superfície, como rochas, vegetação e solos (Moore and Crosta, 1989).

Tabela 25: ACP para prospeção de minerais de lítio. Fonte: (Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2019).

Satélite	**PC**
Landsat 5 TM	2,4
	1,2,4,6
ASTER	1,3
	1,3,11,14
Landsat 8	3,5
	2,3,5,11
Sentinel 2 A	3,8
	2,3,8,11

Tabela 26: ACP de bandas Landsat 5 (1989) (1,2,4,6) para pegmatitos de Marropino.

Cov.Eigenvectors	PC1	PC2	PC 3	PC4
Banda 1	-0.416112	-0.68592	-0.49894	-0.32772
Banda 2	-0.18440	-0.28143	-0.07584	**0.93863**
Banda 4	-0.309741	-0.38751	0.86160	**-0.10741**
Banda 6	-0.834809	0.54784	-0.05422	-0.004121
Componentes	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**
Accounted variance	94.31757	4.36542	1.22393	0.093064
Cumulative variance	94.317570	98.68299	99.90693	100.00

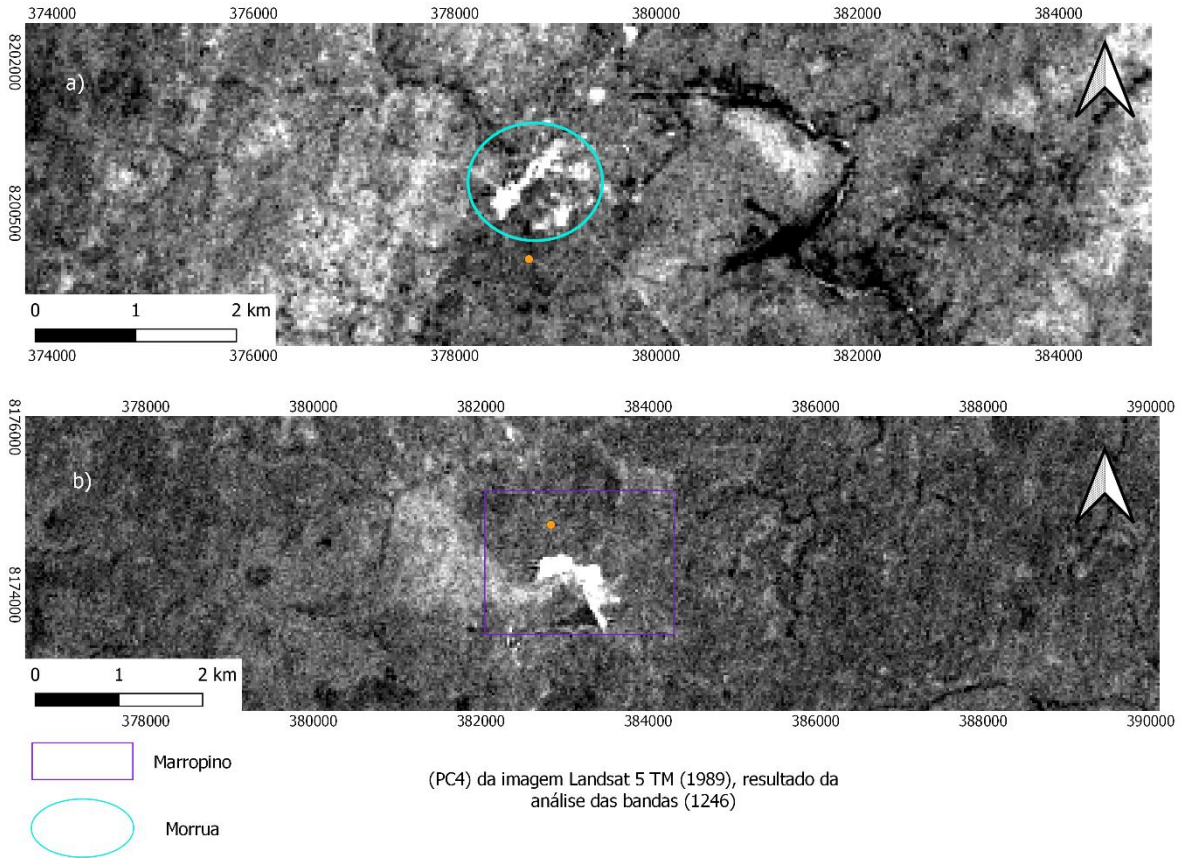


Fig. 46: Mosaico da PC4 da imagem Landsat 5 TM (1989), resultado da análise das bandas (1246); a) pegmatito de Marropino; b) Pegmatito de Morrua. As mineralizações de lítio aparecem em cor branco, pixeis brilhantes.

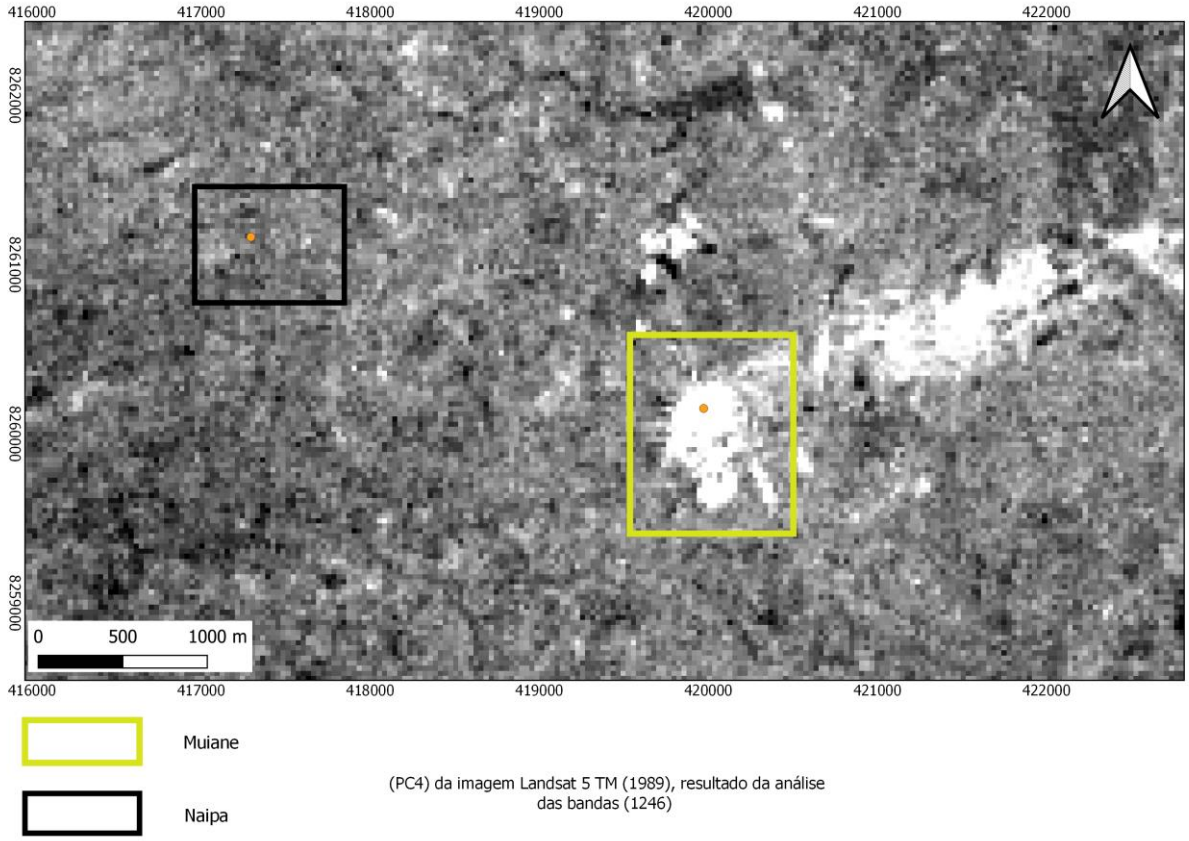


Fig. 47: PC4 da imagem Landsat 5 TM (1989), resultado da análise das bandas (1246); a) pegmatito de Muiane e Naipa. As mineralizações de lítio aparecem em cor branca, pixeis brilhantes nos pegmatitos de Muiane. O pegmatito de Naipa não apresenta resultados positivos.

Tabela 27: ACP de bandas Landsat 5 TM (2,4) para pegmatitos de Muiane, Naipa, Morrua e Marropino.

Cov.Eigenvectors	PC1	PC2
Banda 2	0.49149	**-0.87088**
Banda 4	0.87088	**0.491495**
Componentes	**C1**	**C2**
Accounted variance	97.3106	2.68935
Cumulative variance	97.3106	100.0

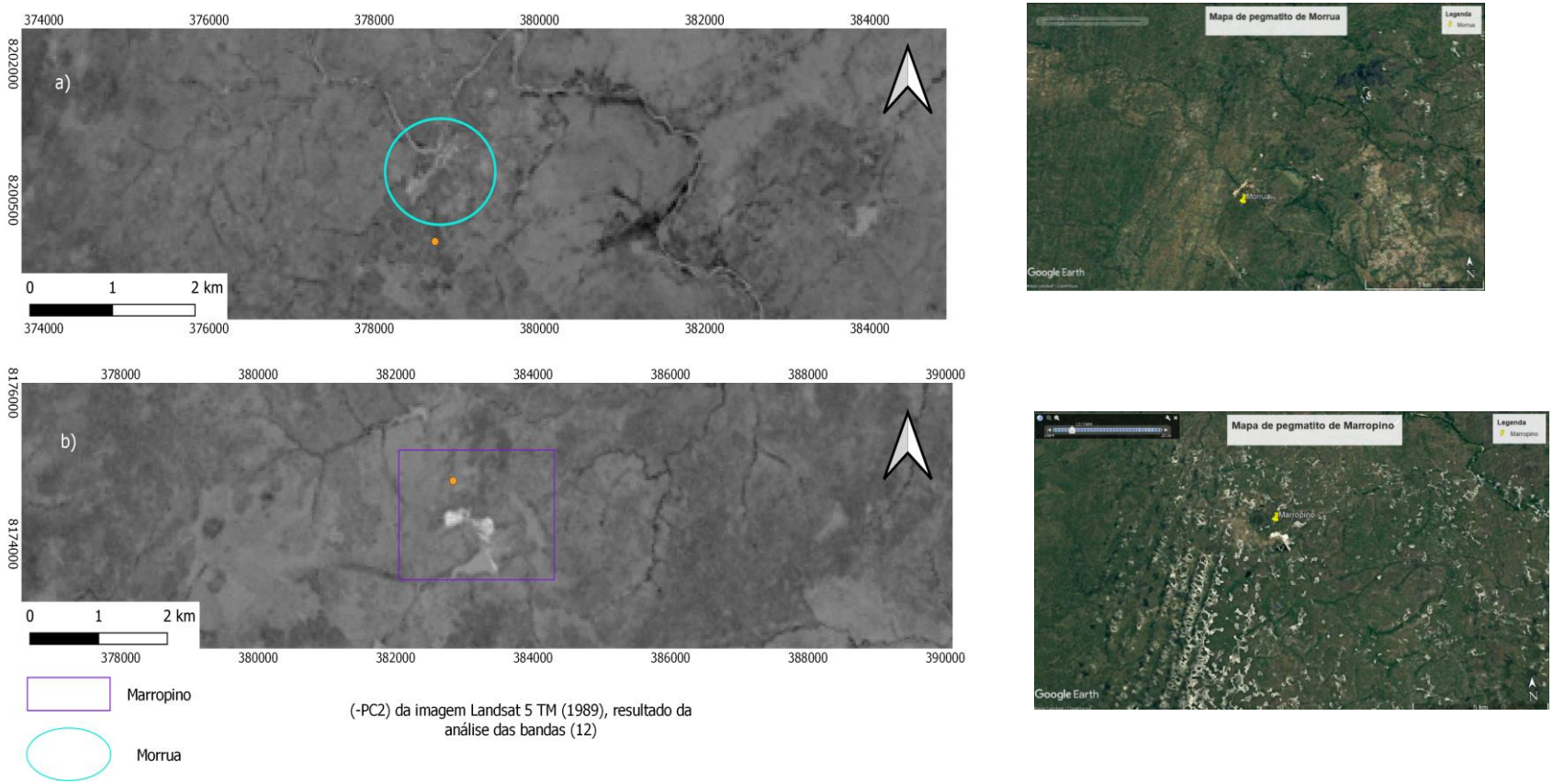


Fig. 48: Imagem Landsat 5 TM (1989). Resultado da análise das bandas (24). São apresentados os mosaicos dos pegmatitos (-PC2); a) pegmatito de Morrua; b) Pegmatito de Marropino. As mineralizações de lítio apresentam uma visualização cinza-claro

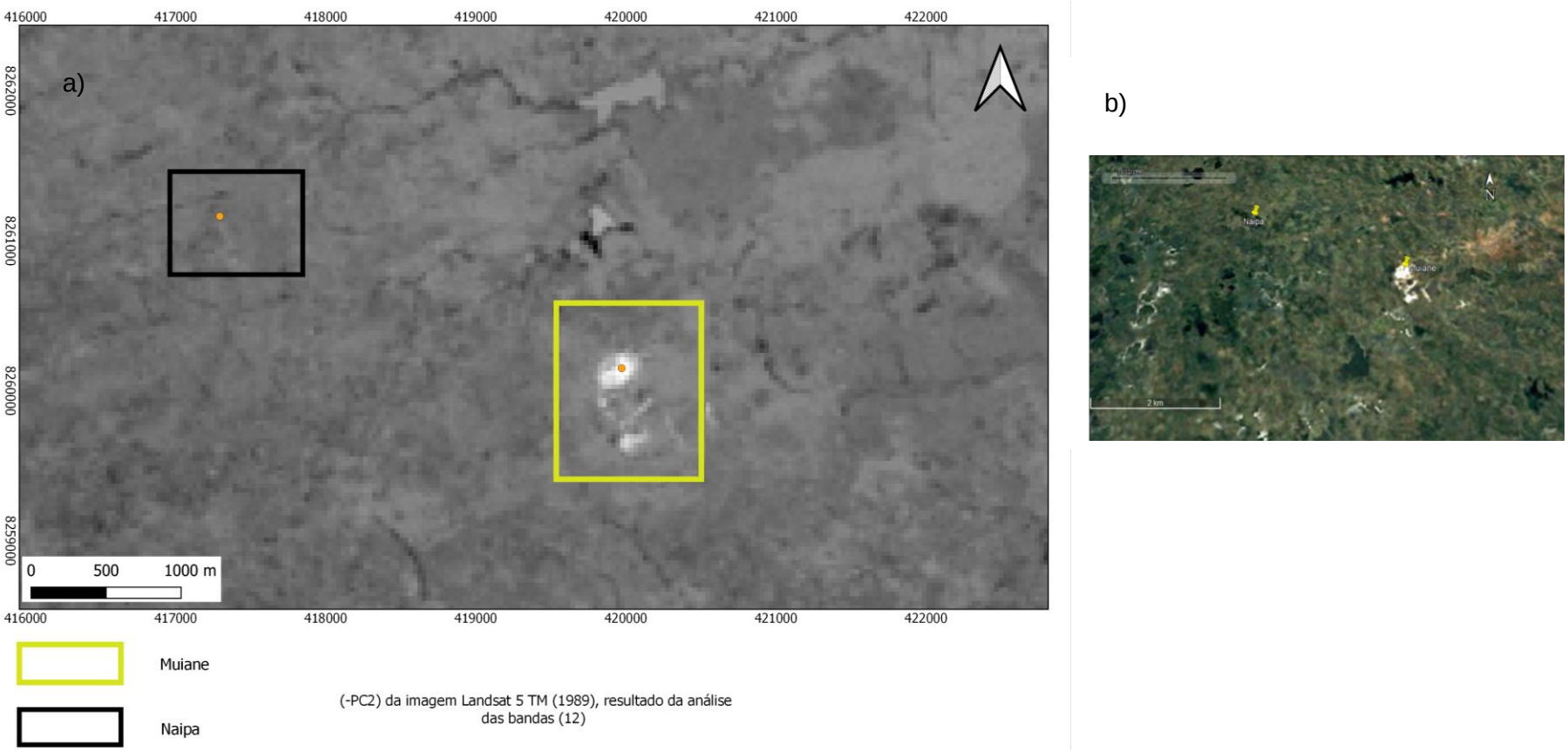
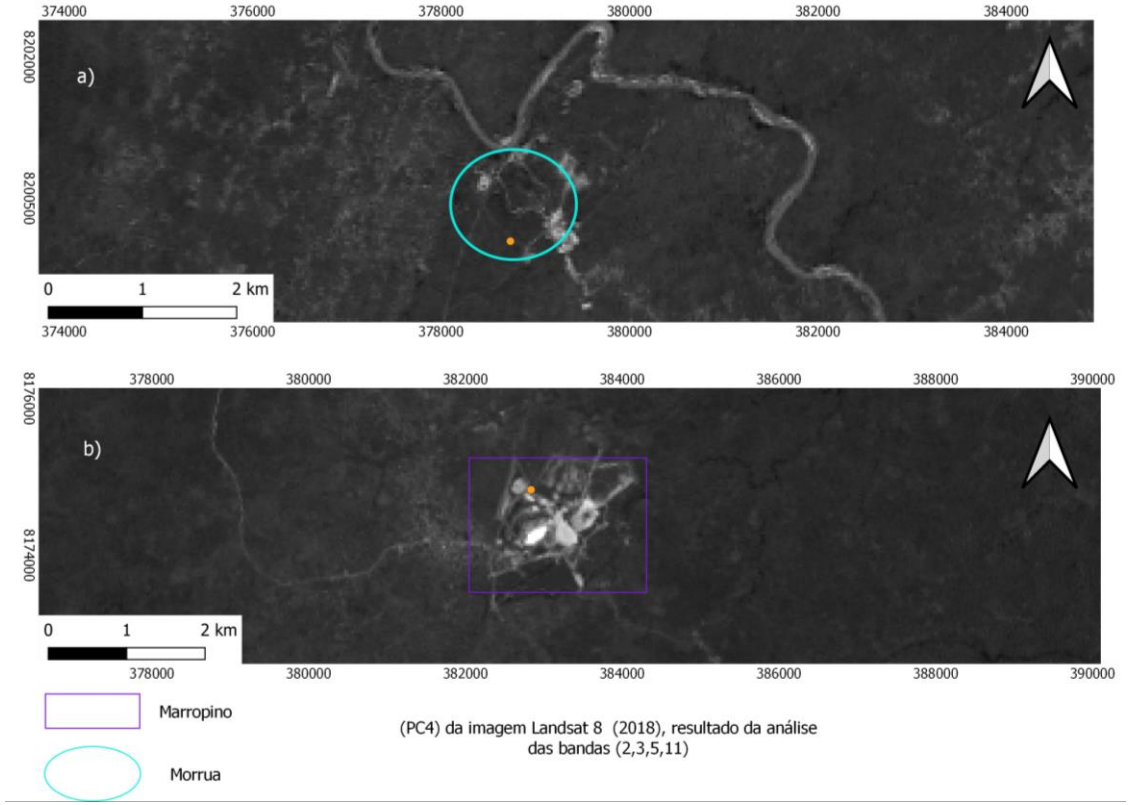


Fig. 49: Imagem Landsat 5 TM (1989). Resultado da análise das bandas (24), (-PC2); a) pegmatito de Naipa, apresentando sinal negativo; os pegmatitos não se visualizam; os pegmatitos de Muiane apresentam sinal positivo; b) Pegmatitos de Naipa e Muiane. Imagem extraída do Google Earth (1990) ilustrando o pegmatito de Naipa e Muiane

Tabela 28: ACP de bandas Landsat 8 (2018) (2,3,5,11) para pegmatitos de Marropino.

Cov.Eigenvectors	PC1	PC2	PC 3	PC4
Banda 2	-0.2812942	0.330213	0.630213	**0.643944**
Banda 3	-0.26159	0.34819	0.479339	**-0.761945**
Banda 5	-0.39160	0.689232	-0.60575	-0.068334
Banda 11	-0.836113	-0.542844	-0.078285	0.0102534
Componentes	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**
Accounted variance	97.1949852	2.51779	0.280953	0.00626851
Cumulative variance	97.194985	99.71277	99.993731	100.00



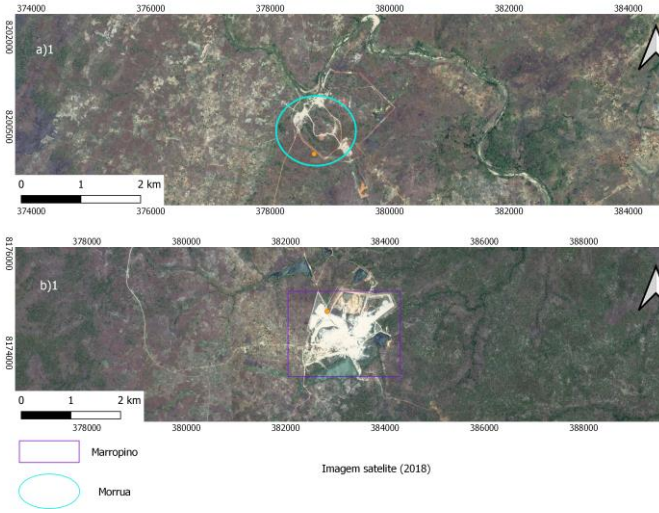


Fig. 50: (PC4) da imagem Landsat 8 (2018), resultado da análise das bandas (2,3,5,11); as áreas conhecidas em mineralizações de lítio visualizam-se a branco; a) pegmatito de Morrua; b) Pegmatito de Marropino; c)1 imagem do google satélite (2018) pegmatito de Morrua; d) 2 imagem do Google satélite (2018) - pegmatitos de Marropino.

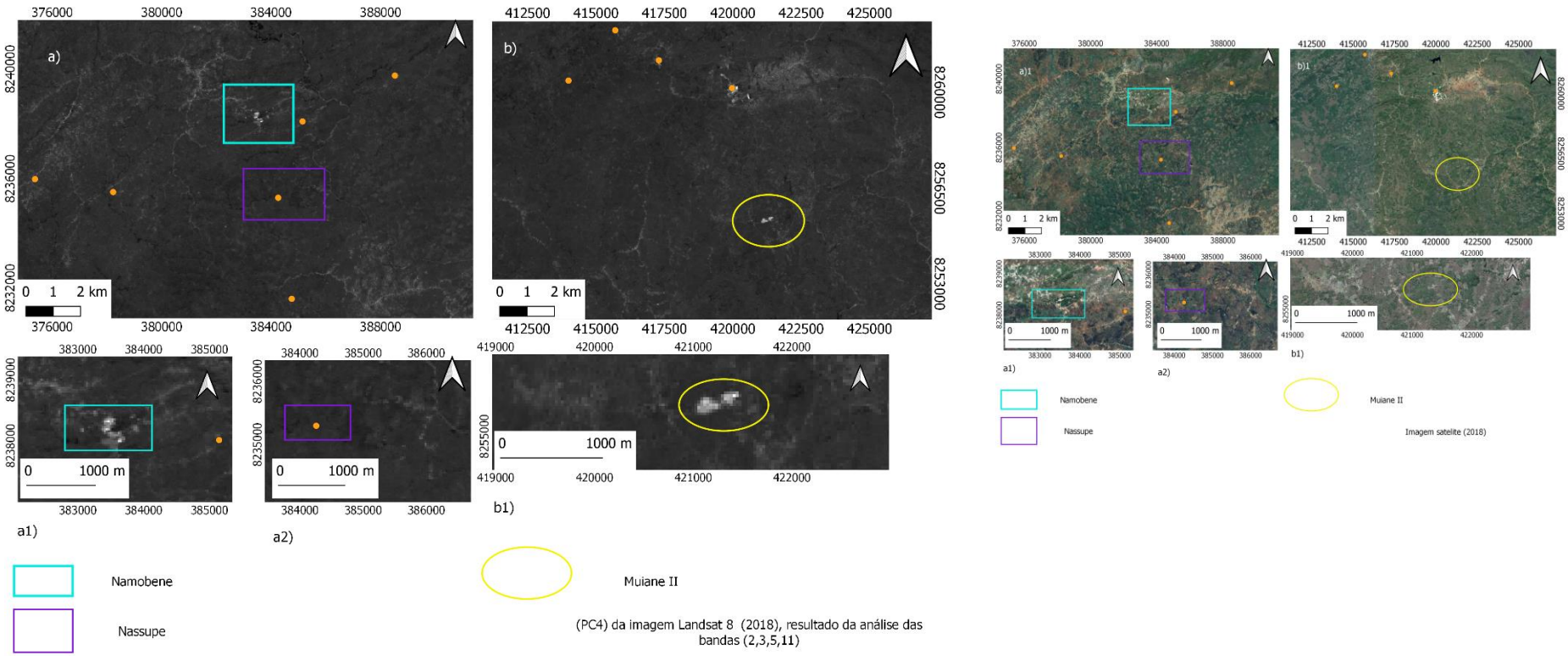
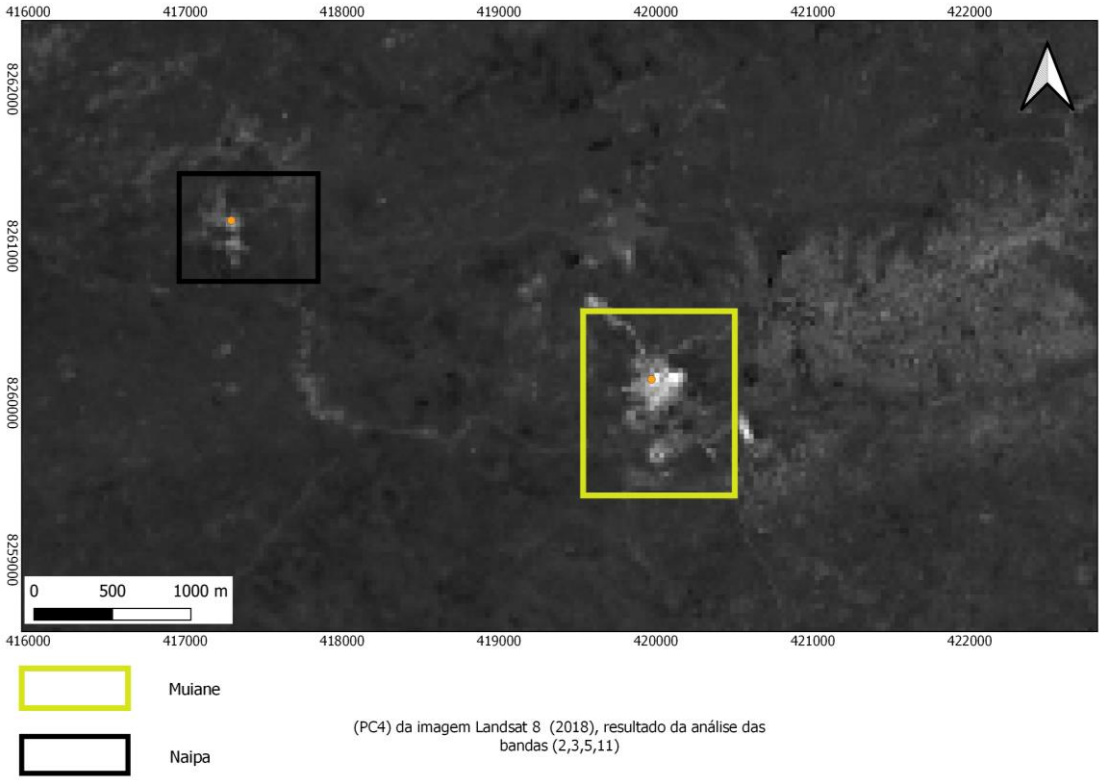


Fig. 51: Mosaico do resultado de ACP das bandas (2,3,5,11) L8, visualização de (PC4); as áreas conhecidas em mineralizações de lítio visualizam-se a branco; a) pegmatito de Namobene e Nassupe; b) pegmatito de Muiane II; c) imagem do Google satélite (2018) - pegmatitos de Namobene e Nassupe; d) imagem do Google satélite (2018) - pegmatitos de Muiane II.

a)



b)

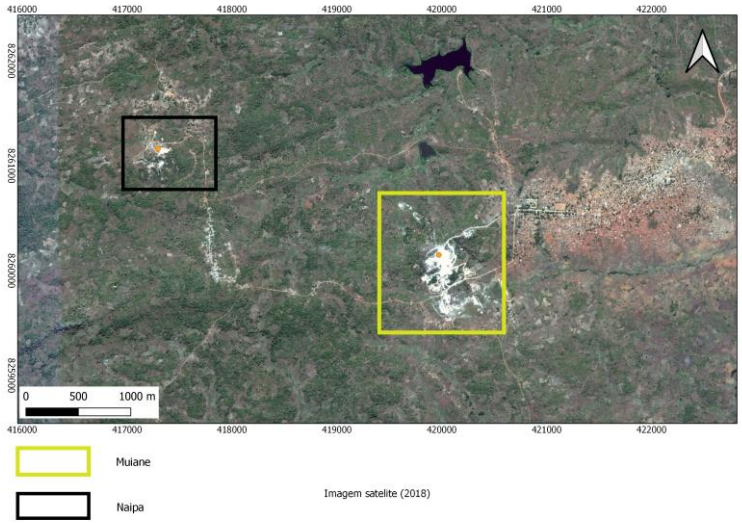


Fig. 52: ACP das bandas (2,3,5,11), visualização de (PC4); as áreas conhecidas em mineralizações de lítio visualizam-se a branco; a) pegmatito de Naipa e Muiane; b) imagem do Google satélite (2018) - pegmatitos de Naipa e Muiane

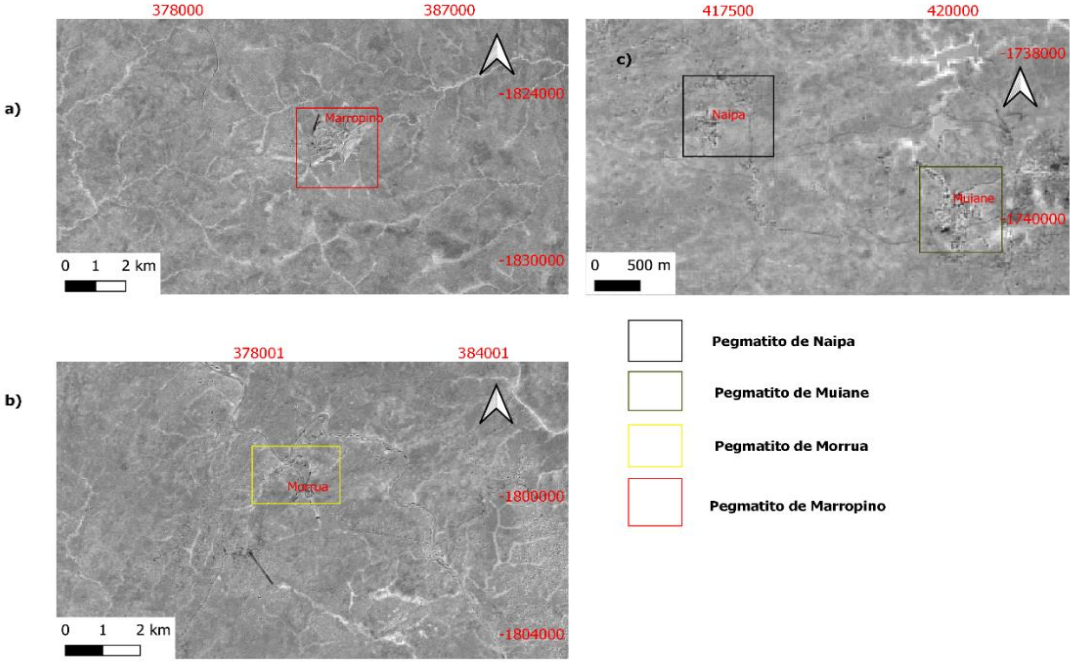


Fig. 53. Mosaico (PC2) da imagem Landsat 8 (2018) resultado da análise das bandas (3,5); a) Pegmatito de Marropino; b) Pegmatito de Morrua; c) Pegmatitos de Naipa e Muiane.

Tabela 29: ACP de bandas Landsat 8 (2018) (3,5) para pegmatitos de Muiane, Naipa, Morrua e Marropino.

Cov.Eigenvectors	PC1	PC2
Banda 3	-0.7075622	**0.7066510**
Banda 5	-0.7066510	**-0.7075622**
Componentes	**C1**	**C2**
Accounted variance	92.03795	0.475203
Cumulative variance	92.03795	100.0

Tabela 30: ACP de bandas ASTER (1,3) para Muiane e Naipa.

Cov.Eigenvectors	PC1	PC2
Banda 1	-0.99243	**0.12280**
Banda 3	-0.12280	**-0.992430**
Componentes	**C1**	**C2**
Accounted variance	89.4093	10.5906
Cumulative variance	89.40936	99.9999

No caso dos pegmatitos de Muiane, Naipa e Marropino, as duas bandas do sensor ASTER (13) são apresentadas nas (Tabela 31 e Tabela 32). As PC2s apresentam pixeis brilhantes, coincidentemente nas mineralizações de lítio.

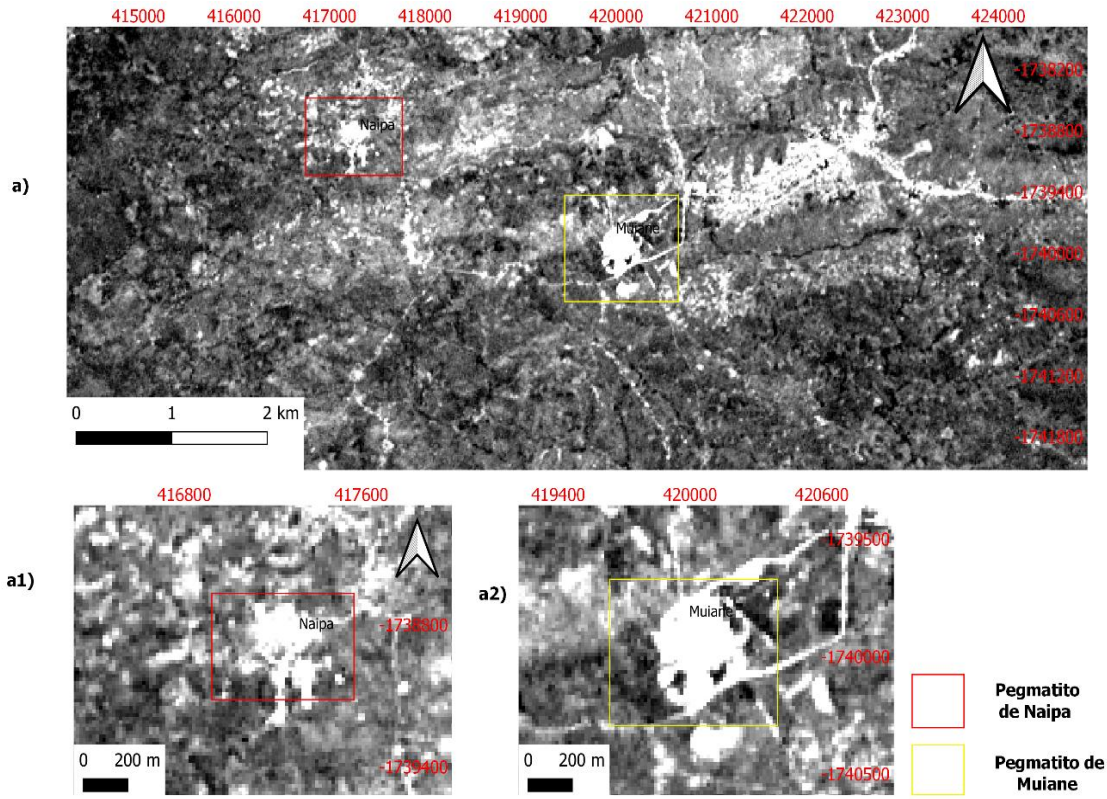


Fig. 54: Imagem ASTER (2005) seleção de PCA; a) PC2, visualização dos pegmatitos de Muiane e Naipa com o branco associado às mineralizações de lítio; a1) detalhes do pegmatito de Naipa; a2) detalhe do pegmatito de Muiane.

Tabela 31: ACP de bandas ASTER (1,3) para pegmatitos de Marropino.

Cov.Eigenvectors	PC1	PC2
Banda 1	0.98708	**0.16021**
Banda 3	0.16021	**-0.98708**
Componentes	**C1**	**C2**
Accounted variance	91.84892	8.15107
Cumulative variance	91.848	100.0

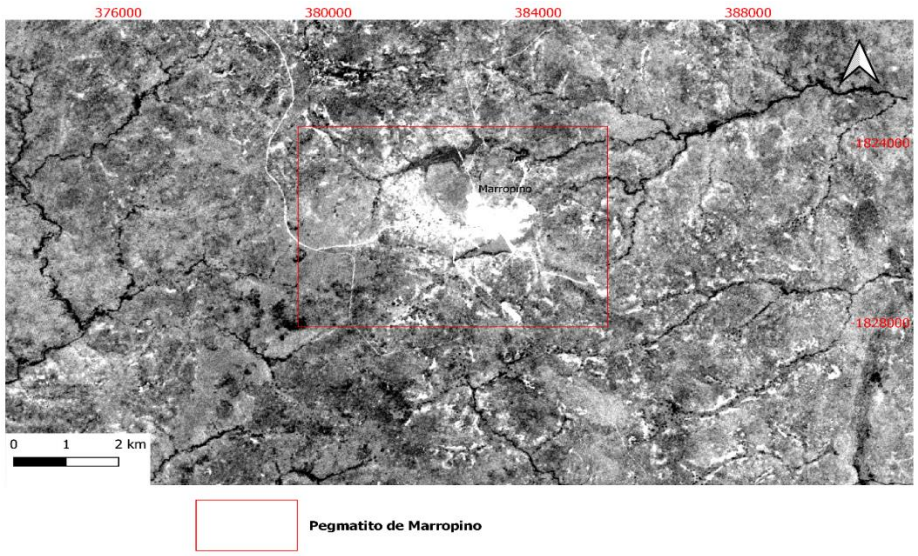


Fig. 55: Imagem ASTER (2005) PC2; é visível em branco o pegmatito de Marropino, área com mineralizações de lítio;

Tabela 32: ACP de bandas ASTER (1,3,11,14) para Muiane e Naipa.

Cov.Eigenvectors	PC1	PC2	PC 3	PC4
Banda 1	-0.00243	0.00605	-0.120988	**-0.233131**
Banda 3	0.00257	0.00375	-0.992641	**0.99802**
Banda 11	-0.68738	-0.72627	-0.004790	-0.00216
Banda 14	-0.72628	0.68736	-0.00142	-0.005804
Componentes	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**
Accounted variance	97.8055	2.15925	0.032654	0.0025035
Cumulative variance	97.8055	99.9648	99.99749	100.0

Na PC4, são visíveis pixeis brilhantes que representam mineralizações de lítio já conhecidas.

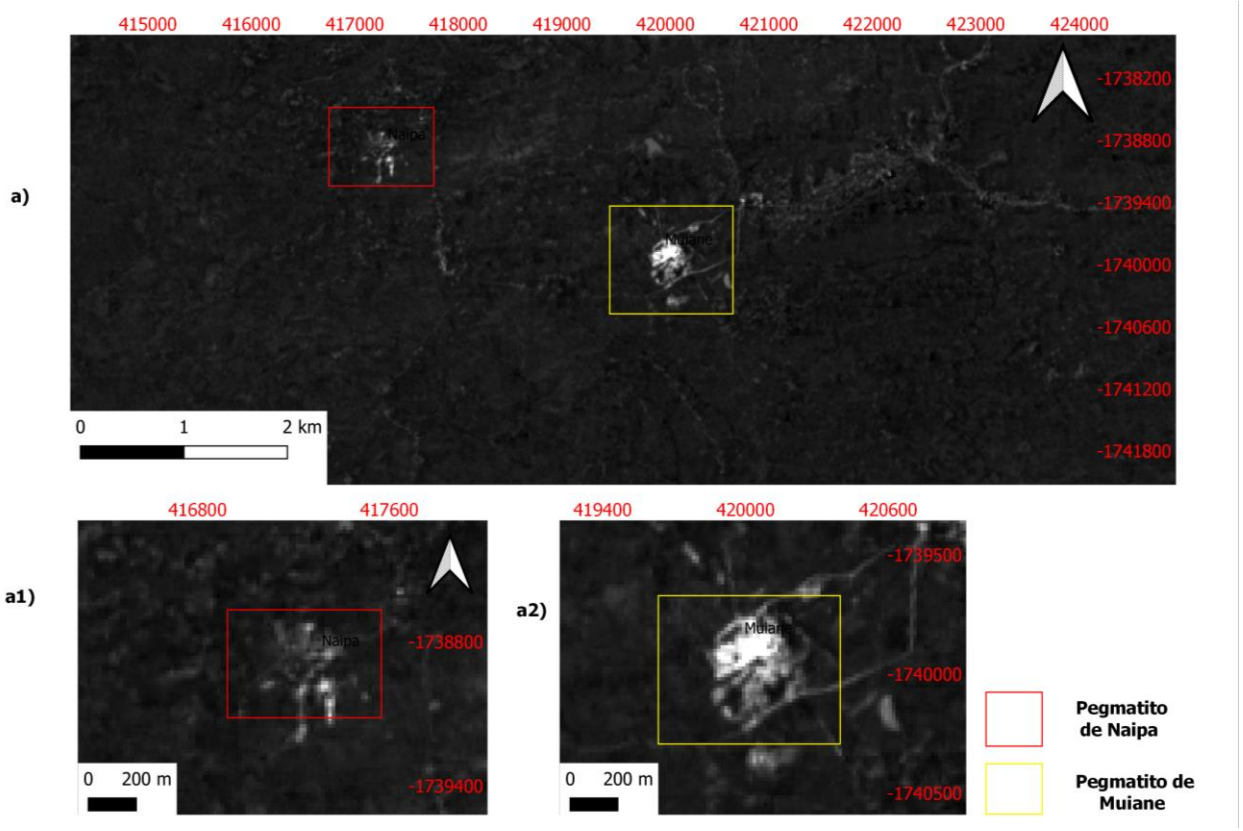


Fig. 56: Imagem ASTER (2005) seleção de PCA (-PC4), das bandas (1,3,11,14); a) Pegmatitos de Muiane e Naipa (a branco visualizam-se as mineralizações conhecidas); a1) Pegmatitos de Naipa, com ocorrências de mineralizações de lepidolites; a2) Pegmatitos de Muiane, com ocorrências de mineralizações de lítio; b) imagem extraída no Google Earth (2005) ilustrando os pegmatitos de Muiane e Naipa.

Tabela 33: ACP de bandas Sentinel 2 A (38) para Muiane e Naipa.

Cov.Eigenvectors	PC1	PC2
Banda 3	-0.9567368	0.29095
Banda 8	-0.29095	-0.95673
Componentes	**C1**	**C2**
Accounted variance	91.38405	8.61594
Cumulative variance	91.3840	100.0

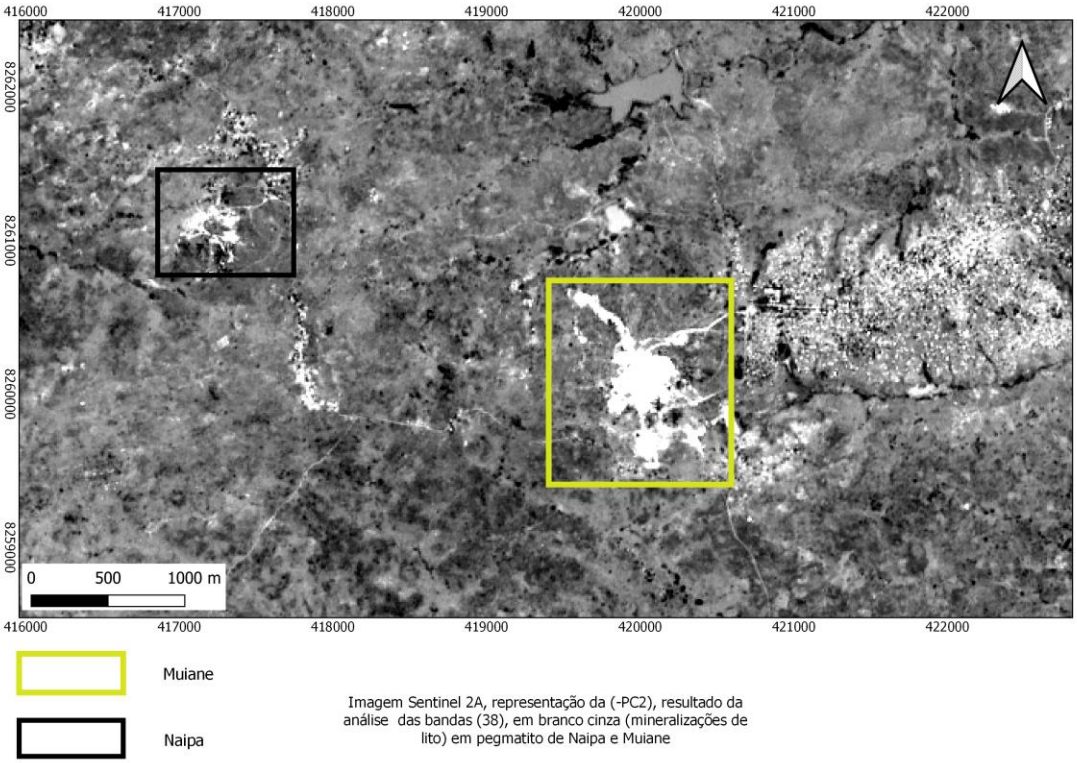


Fig. 57: Imagem Sentinel 2 A (2019) seleção de PCA (-PC2), das bandas (3,8) - pegmatitos de Muiane e Naipa (a branco visualizem-se as mineralizações conhecidas).

Tabela 34: ACP de bandas Sentinel 2 A (38) para Muiane II.

Cov.Eigenvectors	PC1	PC2 (*-1)
Banda 3	-0.4684382	**0.8834962**
Banda 8	0.883496	**0.468438**
Componentes	**C1**	**C2**
Accounted variance	99.1751036	0.824896
Cumulative variance	99.1751036	99.99999

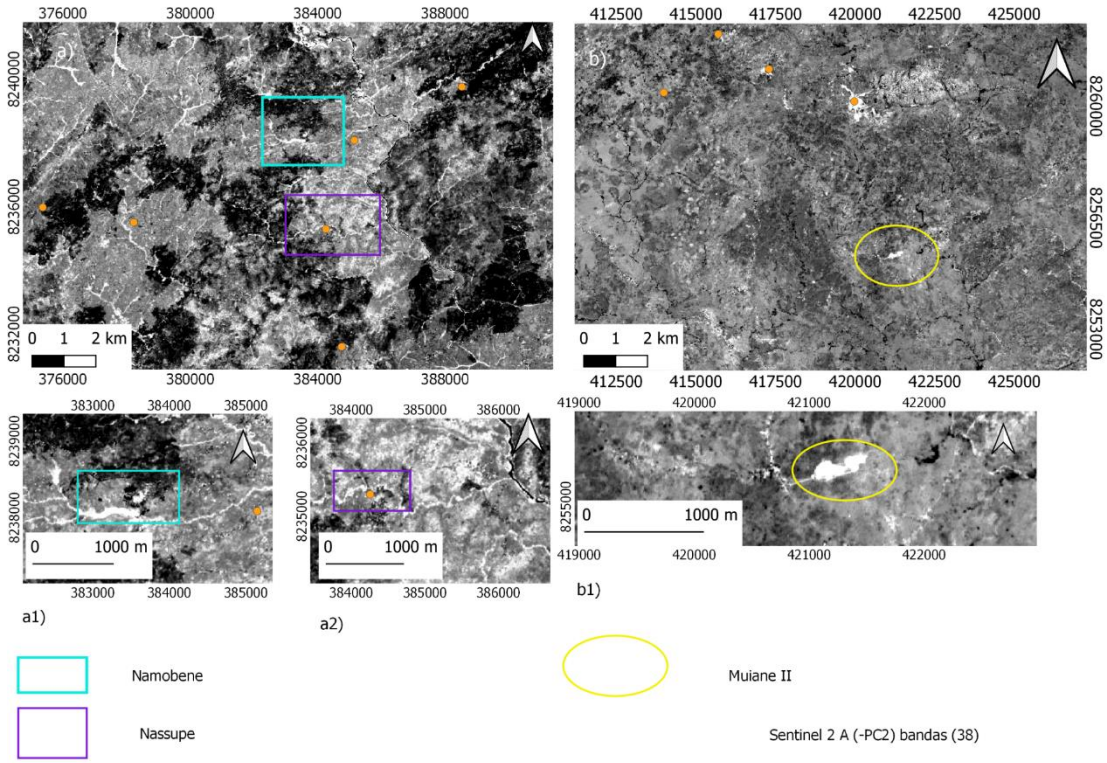


Fig. 58: Mosaico do resultado da ACP das bandas (3,8) Sentinel 2 A; visualização de (-PC2); as áreas conhecidas em mineralizações de lítio visualizam-se a branco; a1) pegmatitos de Namobene; a2) pegmatitos de Nassupe; b1) novos campos de prospeção designados por pegmatitos de Muiane II.

8.3.2. ACP para outros minerais

Dadas as caraterísticas climatológicas da região em estudo e a abundância de minerais de alteração (alunite, ilite, caulinite, esmectite e montmorilonite), foram analisadas outras bandas das imagens (ASTER e Landsat 8) (Tabela 35). Para a imagem ASTER utilizada para identificação de caulinos, a PC4 mostrou pixeis com maiores contrastes espetral entre as bandas (4 e 6). O caulino possui alta refletância nas bandas 4 e 7 que se absorve fortemente nas bandas 1 e 6 (Cŕosta *et al.*, 2003). Os dados estatísticos para os pegmatitos de Morrua e Marropino que se encontram na (Tabela 36) mostram que a PC4 coincide com a afirmação de (Cŕosta *et al.*, 2003), no entanto, havendo divergência nas cargas: a banda 6 tem alta correlação negativa (-0.753) e banda 7 apresenta alta correlação positiva (0.652). A (Fig. 60) mostra a visualização dos pegmatitos de Morrua e Marropino produzida a partir das bandas (1-4-6-7) da imagem ASTER. As outras PCs foram ignoradas porque apresentam valores insignificantes, comparando com a PC4, os minerais de alteração conhecidos, refletindo no vermelho. Para a análise da imagem Landsat 8 das bandas (2,5,67), (Niyeh and Jafarirad, 2016) sugerem uma análise para óxidos de ferro na PC4 (-0.717738, da banda 6 e 0.60632, da banda 7) (vide a Fig. 61).

Tabela 35: ACP para prospeção de outros minerais.

Satélite	Bandas	Mineral	Fonte
ASTER	1,4,6,7	Caulino	Cŕosta et al., 2003
Landsat 5 TM	1, 4, 5, 7	Minerais hidratados	Loughlin, 1991
Landsat 8	2,5,6,7	Óxidos de ferro	Niyeh e Jafarirad, 2016
Sentinel 2 A	2, 8A, 11, 12	Minerais hidrotermais	Hu et al., 2018a

Tabela 36: ACP de bandas ASTER (1,4,6,7) para Marropino e Morrua.

Cov.Eigenvectors	PC1	PC2	PC 3	PC4
Banda 1	-0.001157	0.00077208	0.999697	0.024564
Banda 4	0.735879	-0.672372	-0.000593	0.079971
Banda 6	0.486047	0.4423177	0.018736	**-0.753499**
Banda 7	0.471420	0.5935224	-0.015936	**0.652103**
Componentes	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**
Accounted variance	88.054044	8.99400	2.32965017	0.622298
Cumulative variance	88.05404	97.048051	99.99749	100.0

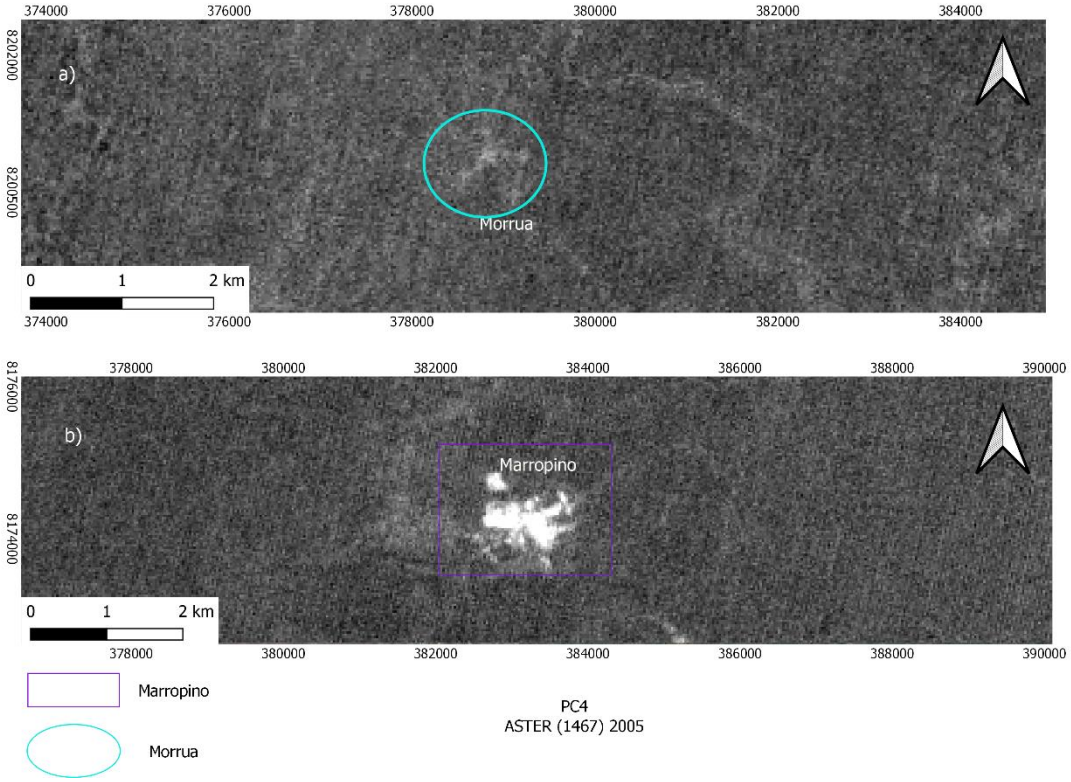


Fig. 59: PC4 da análise das bandas (1467) ASTER (2005).

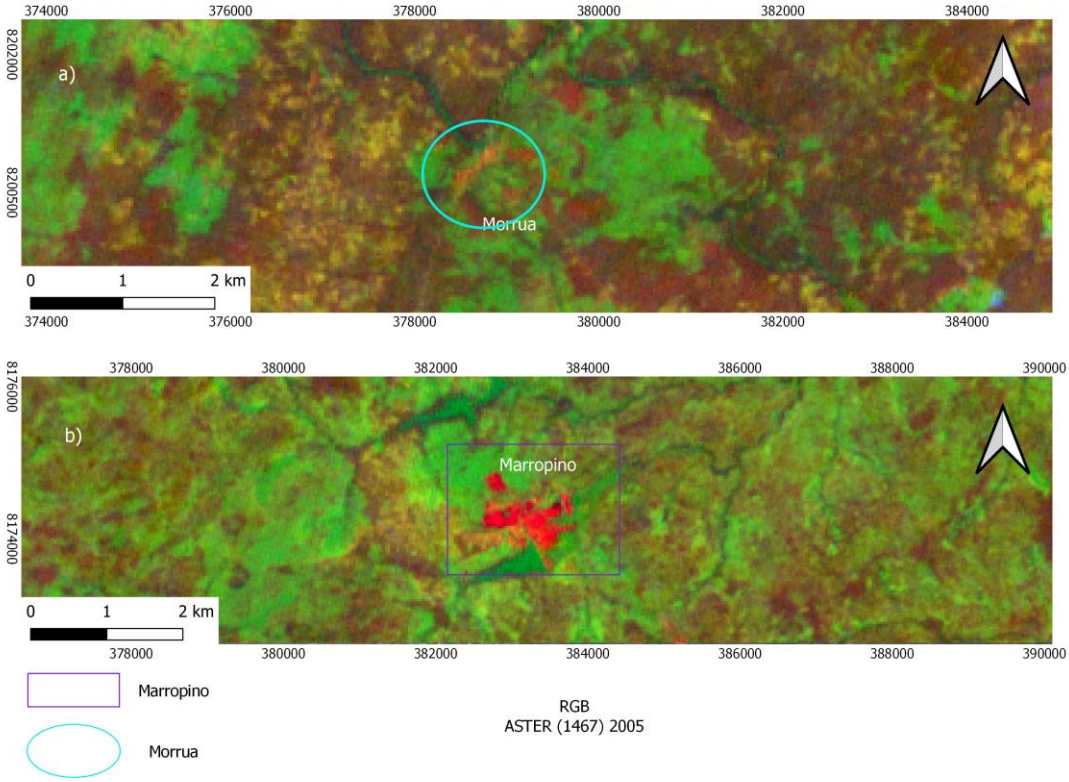


Fig. 60: Combinação (PCs 1467).

Tabela 37: ACP de bandas Landsat 8 (2,5,6,7) para Muiane e Naipa.

Cov.Eigenvectors	PC1	PC2	PC 3	PC4
Banda 2	0.06083	-0.05249	-0.10601	0.99111
Banda 5	0.41602	0.74931	-0.51359	-0.04078
Banda 6	0.75191	0.03483	0.65782	0.02605
Banda 7	0.50778	-0.65920	-0.54059	-0.12390
Componentes	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**
Accounted variance	75.8830	21.3864	2.28040	0.45010
Cumulative variance	75.8830	97.2694	99.54989	100.0

Nas (Fig. 61 e Fig. 62) são apresentados mapas de zonas de alteração hidrotermal dos pegmatitos de Naipa e Muiane. Na imagem RGB são identificados em cor amarelo carregado as áreas com potencialidades em óxidos argilíticos, filiticos e de ferro, respetivamente o branco nas PC1, PC2 e PC4.

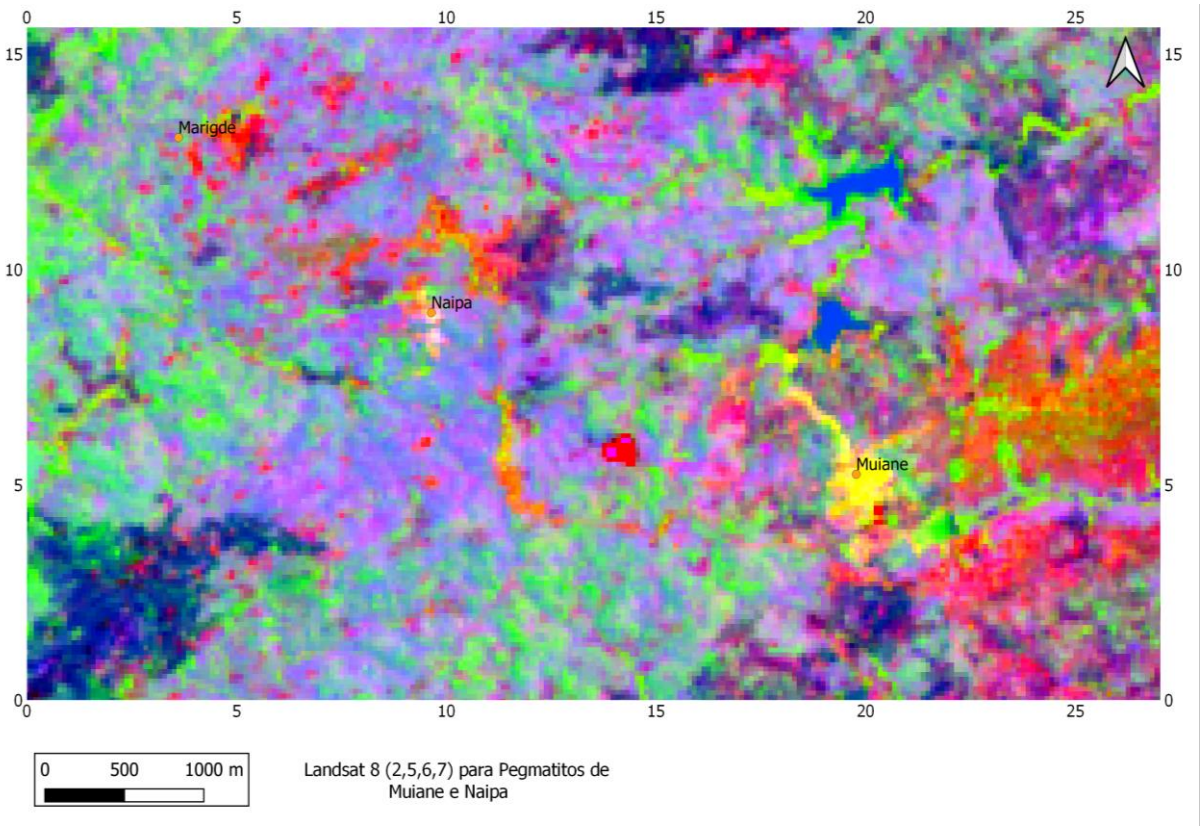


Fig. 61: Combinação (PCs 2,5,6,7).

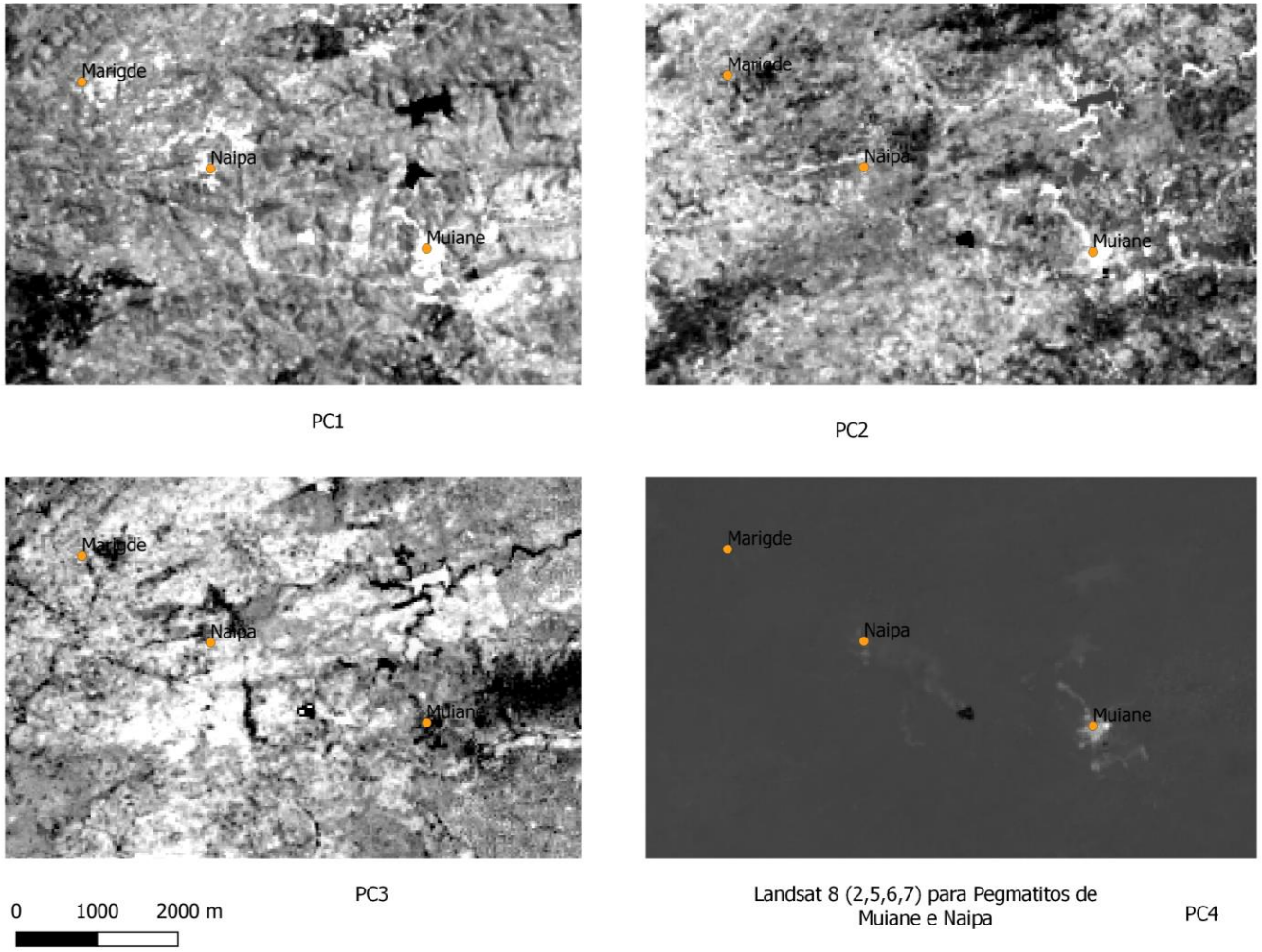


Fig. 62: PC1,2,3,4 da análise das bandas (2,5,6,7) Landsat 8 (2018).

Em todas imagens de satélites foram aplicadas duas abordagens:

- Técnica de análise PCA, onde foram adaptadas as técnicas de Crosta, na qual a PCA é empregue a um subgrupo de quatro bandas (Moore and Crosta, 1989);
- Técnica proposta por Chavez & Kwarteng (1989), onde a PCA é aplicado a um subconjunto de duas bandas. Cada um desses métodos, foi aplicado aos três sensores a fim de mapear ferro férrico, minerais contendo hidroxilo e minerais contendo lítio (Chavez and Kwarteng, 1989; Cardoso-Fernandes, 2018).

8.4. Índice de Vegetação

Foram utilizadas as bandas 3 e 4 do satélite Landsat 5 sensor TM (1989), ou seja, (Banda 4 – Banda 3) / (Banda 4 + Banda 3), e as bandas 4 e 5 do Sensor OLI (2019), isto é, (Banda 5 – Banda 4) / (Banda 5 + Banda 4), que correspondem ao infravermelho e vermelho, respetivamente.

Foram criadas máscaras a partir do resultado do NDVI (Landsat 8), com objetivo de diminuir a variabilidade espectral, onde a máscara atribui o valor 0 para água. Normalmente, para regiões, o NDVI é maior que 0,2 (valor que indica a presença de cobertura vegetal) (Weier and Herring, 2000) (Fig. 63).

Os resultados que correspondem aos valores positivos para o índice são indicativos da presença de vegetação. As áreas com a cor variando entre os tons castanhos e verde são indicativos de vegetação muito densa, que é característico da região de Alto Ligonha. São notórios corpos de água entre Muiane e Naipa, Morrua, Marropino e Nuaparra, de acordo com este índice.

A partir das (Fig. *64*, Fig. 65 e Fig. 66), observa-se a refletância na área em estudo para o ano de 1989. Verificam-se os corpos de água (em tom vermelho) e a vegetação que é muito intensa, comparando com a imagem de 2019.

À medida que a concentração de vegetação aumenta, os valores de NDVI tornam-se mais altos. Áreas com vegetação densa, húmida e desenvolvida apresentam valores de NDVI próximos ou iguais a 1 (Jarlan *et al.*, 2008; Almeida *et al.*, 2014). Os valores mais elevados (próximos de 1) poderiam ser classificados como vegetação densa e desenvolvida (Poelking *et al.*, 2007; Viana *et al.*, 2017). A área em estudo apresenta diversificação vegetativa e uma reserva próximo ao local (reserva de Gilé).

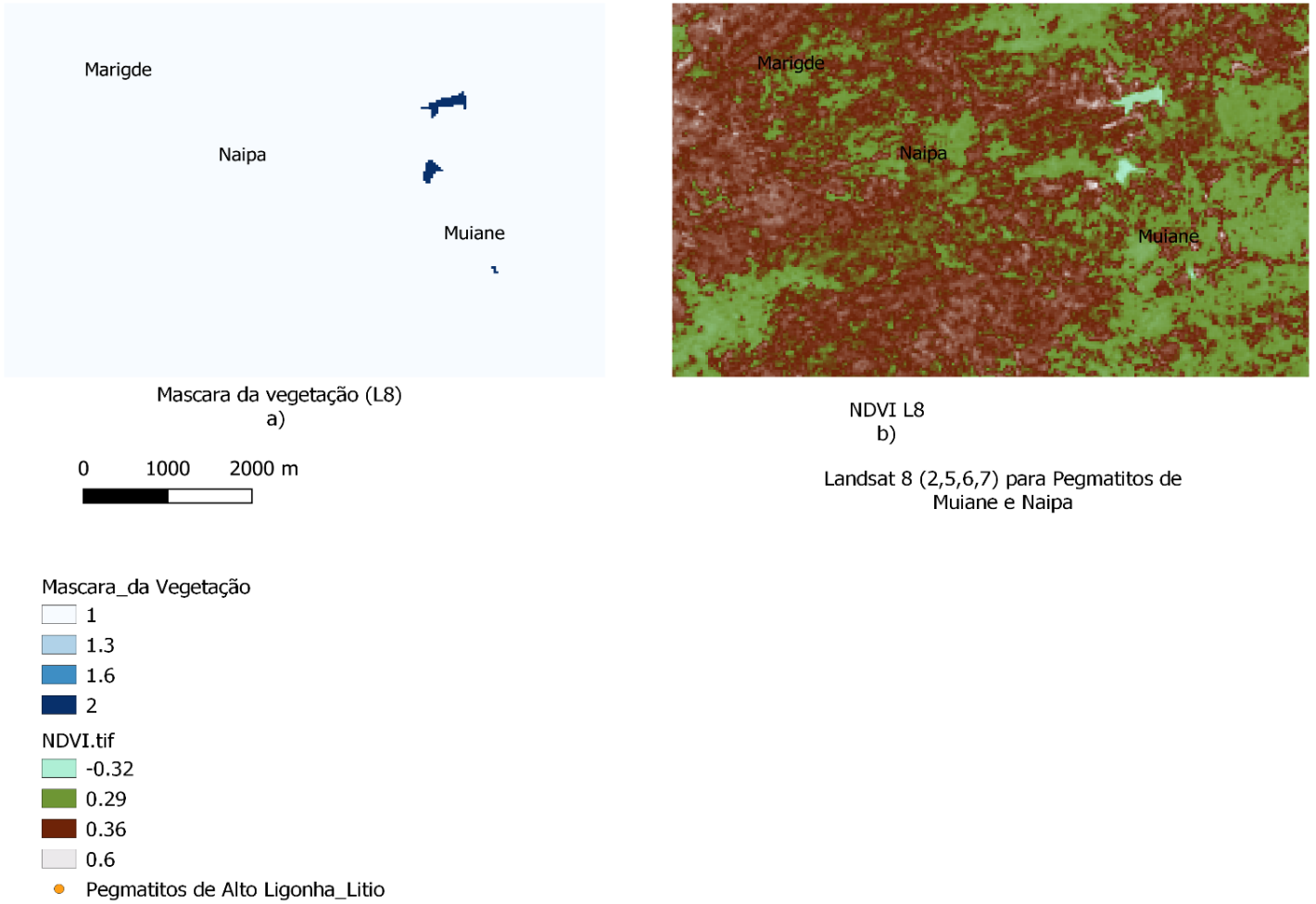


Fig. 63: NDVI e Máscara de Vegetação de L8 dos pegmatitos de Naipa e Muiane.

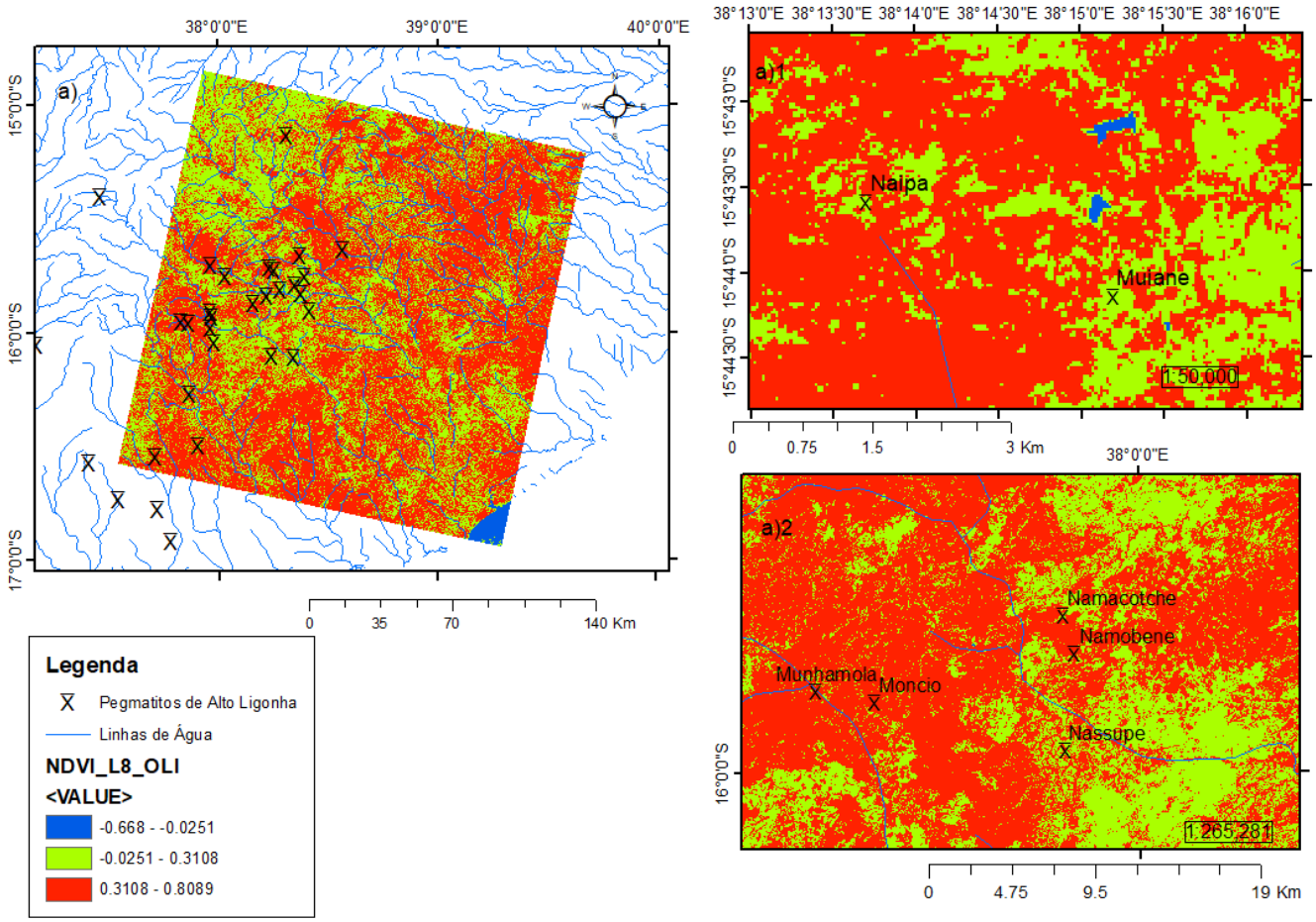


Fig. 64: NDVI de L8 dos pegmatitos, a)1. Naipa e Muiane e a)2. Namobene e Nassupe, entre outros

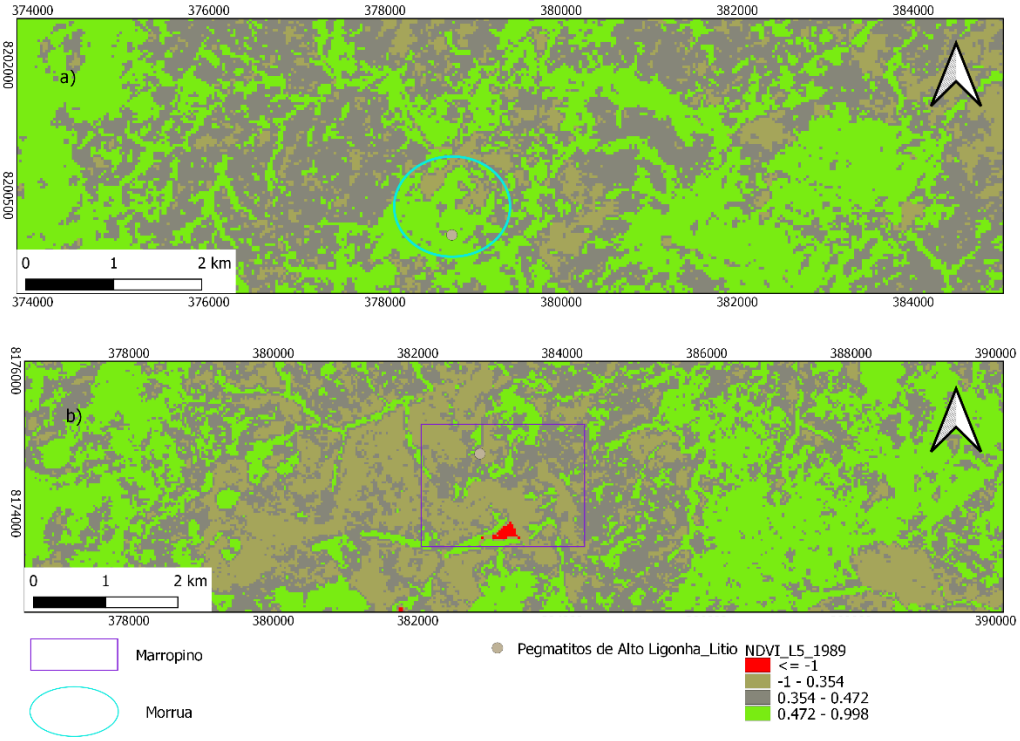


Fig. 65: NDVI da imagem Landsat 5 TM (1989) nos pegmatitos de Morrua e Marropino.

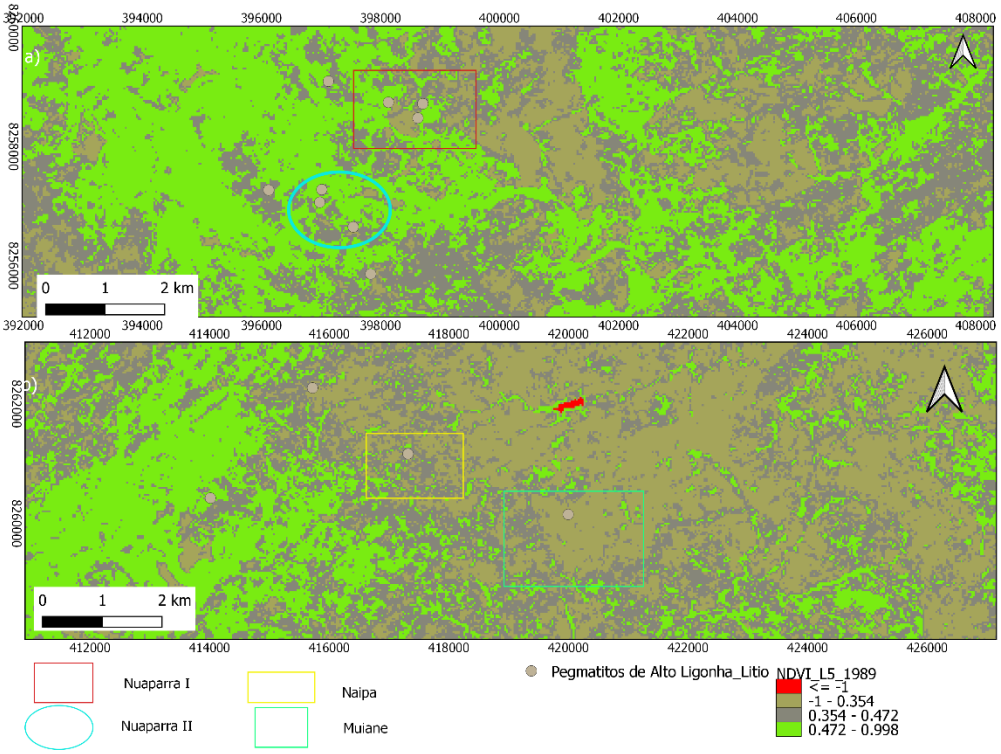


Fig. 66: NDVI da imagem Landsat 5 TM (1989) nos pegmatitos de Nuaparra, Naipa e Muiane.

De acordo com os resultados do NDVI, é possível notar que a região se encontra com muita cobertura de vegetação, e é possível visualizar as porções mais húmidas, que na coloração hipotética, o vermelho (≤=-1) delimita os corpos de água, as cores verdes (0,354-0,998) representam a vegetação, não expondo os pegmatitos.

8.5. Combinação de bandas

Neste ponto foram usadas imagem do sensor ASTER, Landsat 5 e 8 e por último uma imagem Sentinel 2A. A combinação de três bandas representa as regiões do vermelho, verde e azul do espetro visível (RGB) e permite obter imagens compósitas, com informação variada, para além da habitual fotointerpretação de imagens, que pode ser adaptada ao tipo de análise desejado (Patra *et al.*, 2006; Amorim, 2015; Lowe *et al.*, 2017). Nas aplicações geológicas, o uso da técnica de combinação de bandas constitui uma excelente opção para a prospeção de alvos geológicos com interesses na pesquisa de minerais. A (Tabela 38) apresenta alguns índices testados e propostas desse trabalho.

Tabela 38: Índices minerais para o sensor ASTER, satélite Landsat, usando combinações de bandas.

ASTER		
RGB	**Alvos**	**Fonte**
5-1-14	Minerais de lítio	(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019)
2-1-13	Minerais de lítio	(Cardoso-Fernandes et al., 2019;)
4-9-2	Minerais de lítio	(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019)
13-57	REE	(Cŕosta *et al.*, 2003)
10-11-12	Silicatos, sulfatos e carbonatos	(Chikambwe, 2002)
(2/7;5/6;5/7)	Distinção litologica	Proposta
2-7-12	Silicatos	Proposta
9-8-2	Minerais de lítio	Proposta
4-13-14	Silicatos	Proposta
Landsat 8 OLI		
RGB	**Alvos**	**Fonte**
2-3-4	Silicatos	Proposta
2-3-7	Minerais de Lítio	Proposta
7-6-3	Minerais de Lítio	Proposta
(2/7;5/6;5/7)	Distinção litologica	Proposta
2-5-7	Minerais de ferro e argilas	(Pour and Hashim, 2015)
3-2-7	Minerais de Lítio	(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019)

7-3-11	Minerais de Lítio	(Cardoso-Fernandes et al., 2019;)
3-2-11	Minerais de Lítio	(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019)
5-6-7	Contrastes litologicos	(Pour and Hashim, 2015)
6-7-4	Contrastes litologicos	(Mwaniki *et al.*, 2015)
	Landsat 5	**Fonte**
2-1-6	Minerais de Lítio	(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019)
7-2-6	Minerais de Lítio	(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019)
3-2-7	Minerais de Lítio	Proposta
2-4-7	Minerais de Lítio	Proposta
	Sentinel 2	
RGB	**Alvos**	**Fonte**
3-2-12	Minerais de Lítio	(Cardoso-Fernandes et al., 2019)
2-4-11	Minerais de Lítio	Proposta
2-7-12	Minerais de Lítio	Proposta

8.5.1. Sensor ASTER

Para a prospeção dos minerais alvos (minerais de lítio), foram testadas as combinações sugeridas por (Cardoso-Fernandes, 2018; Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019), combinações 2-1-13 (Fig. 67) e 5-1-14 (Fig. 68). Os minerais de lítio nas áreas de treino (Muiane e Naipa) e outras ocorrências de pegmatitos são destacadas nas cores amarelas. Esta combinação tem menos interferência da água e aparece com coloração preta. Como sugestões de combinação para prospeção de minerais de lítio, foram propostas as combinações de (9-8-2; 2-7-12; e 4-13-14). Para a primeira proposta de combinação das bandas 9-8-2 (Fig. 70), detalhe de pegmatitos de Nuaparra I e Nuaparra II, as mineralizações de lítio aparecem a azul-claro e esbranquiçado, e a água a preto (detalhado em (Tabela 38). Ao contrário de (Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019), que dividiram as combinações RBG em dois conjuntos, tendo a primeira fase testando o SWIR, a banda visível e a térmica, respetivamente, e o segundo conjunto considera duas bandas visíveis e uma banda térmica, a proposta foi do SWIR-VNIR e VNIR-SWIR-TIR e SWIR-TIR, que permitiu a identificação de uma ampla gama de informações necessárias para a prospeção geológica em Alto Ligonha.

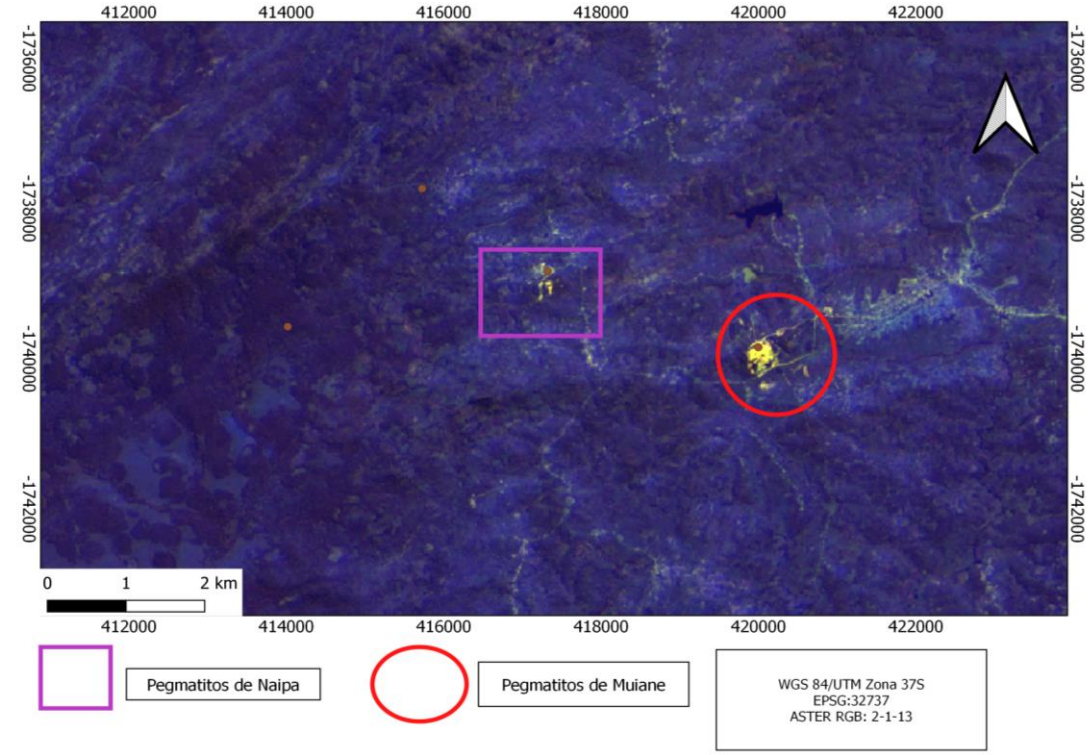


Fig. 67:Combinação de bandas 2-1-13 (ASTER, 2005): pegmatitos de Muiane e Naipa; as áreas com mineralizações em lítio aparecem a amarelo carregado; os corpos de água aparecem a preto.

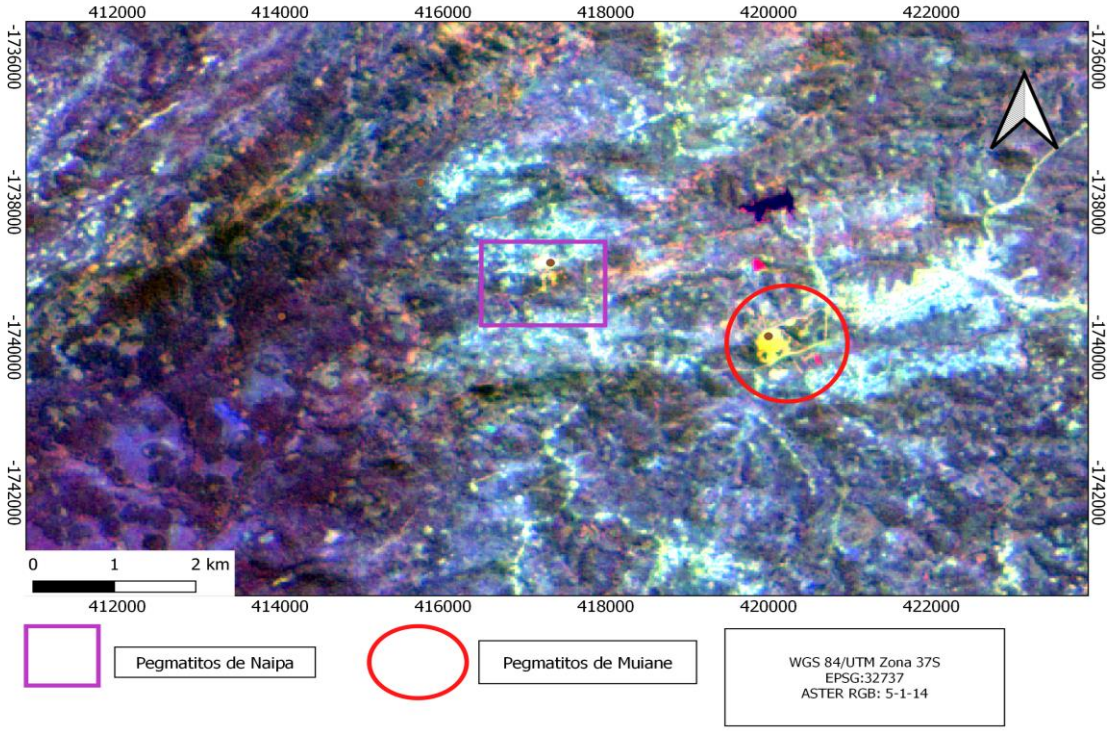


Fig. 68: Combinação (5-1-14) das bandas do sensor ASTER, 2005; detalhe de pegmatitos de Naipa e Muiane; as mineralizações de lítio aparecem a amarelo e água a preto.

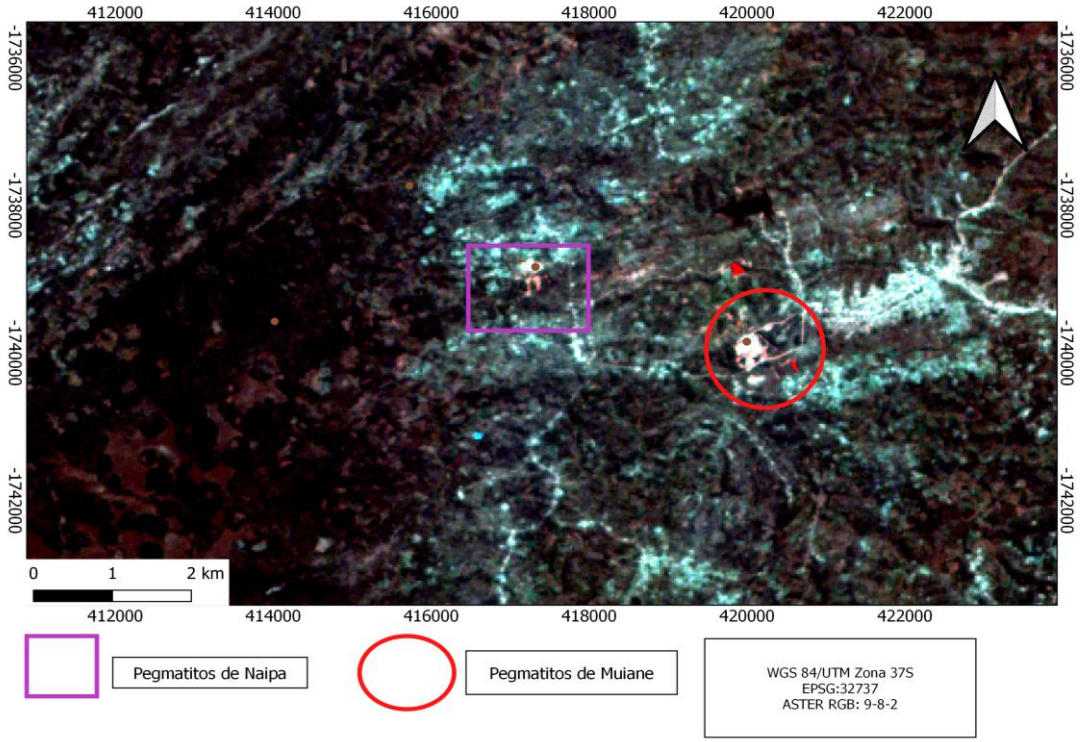


Fig. 69: Combinação (9-8-2) das bandas do sensor ASTER, 2005; detalhe de pegmatitos de Naipa e Muiane; as mineralizações de lítio aparecem a amarelo esbranquiçado e a água a preto

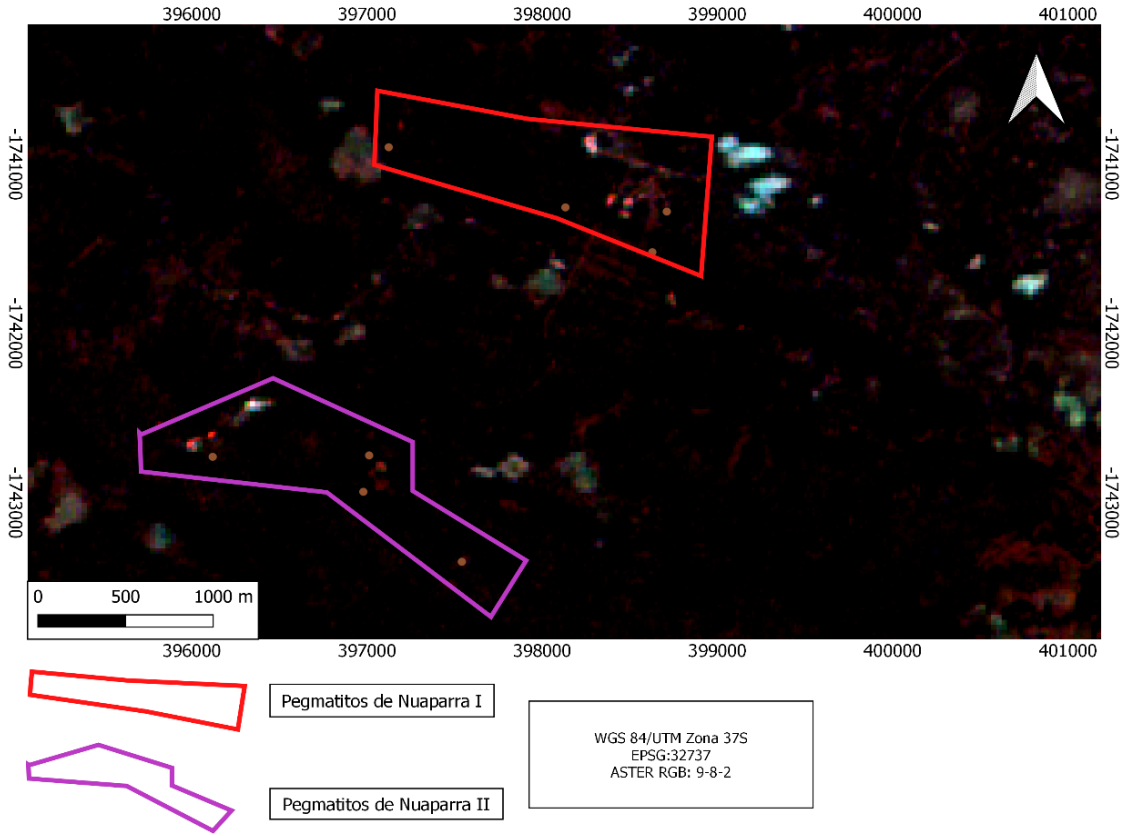


Fig. 70:Combinação (9-8-2) das bandas do sensor ASTER, 2005; detalhe de pegmatitos de Nuaparra I e Nuaparra II; as mineralizações de lítio aparecem a amarelo esbranquiçado e a água a preto.

As propostas feitas em combinações de bandas, com destaque para as mineralizações de lítio, foram analisadas com dados com resolução espetral do visível, passando pelo infravermelho próximo (VNIR), até o infravermelho de ondas curtas (SWIR), no intervalo de 350 a 2500 nm e resolução espectral de 3 nm (em 700 nm), 8,5 nm (em 1.400 nm) e 6,5 nm (em 2.500 nm). Por fim, para silicatos, de modo geral, usou-se uma combinação entre o visível e as bandas termais, tendo resultados positivos, permitindo a visualização regional das estruturas geológicas.

8.5.2. Landsat 8

Para o Satélite Landsat 8 testaram-se as seguintes combinações de bandas para prospeção de minerais de lítio (3-2-7, 3-2-11 e 7-3-11), sugeridas por (Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019) (Fig. 71 a Fig. 73). Como propostas, foram sugeridas combinações (2-3-4) para identificar os minerais silicatados (Fig. 74 a Fig. 76), e minerais de lítio (7-6-3) (Fig. 77 e Fig. 78). As propostas têm um sinal positivo.

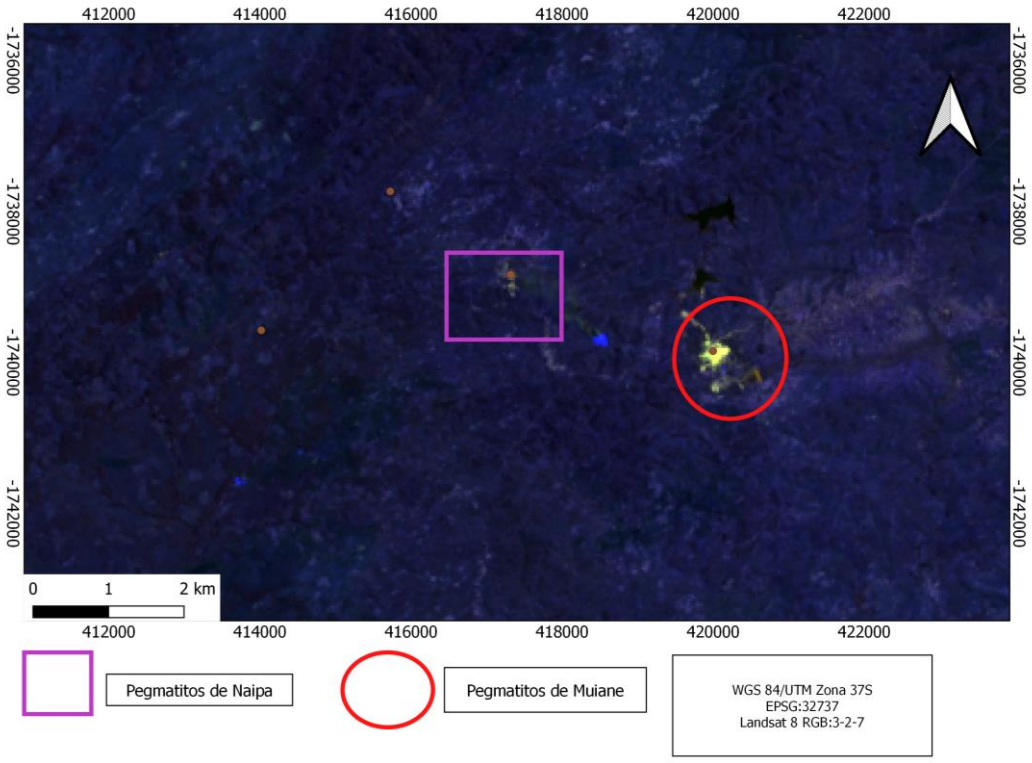


Fig. 71: Combinação RGB (3-2-7) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Naipa e Muiane.

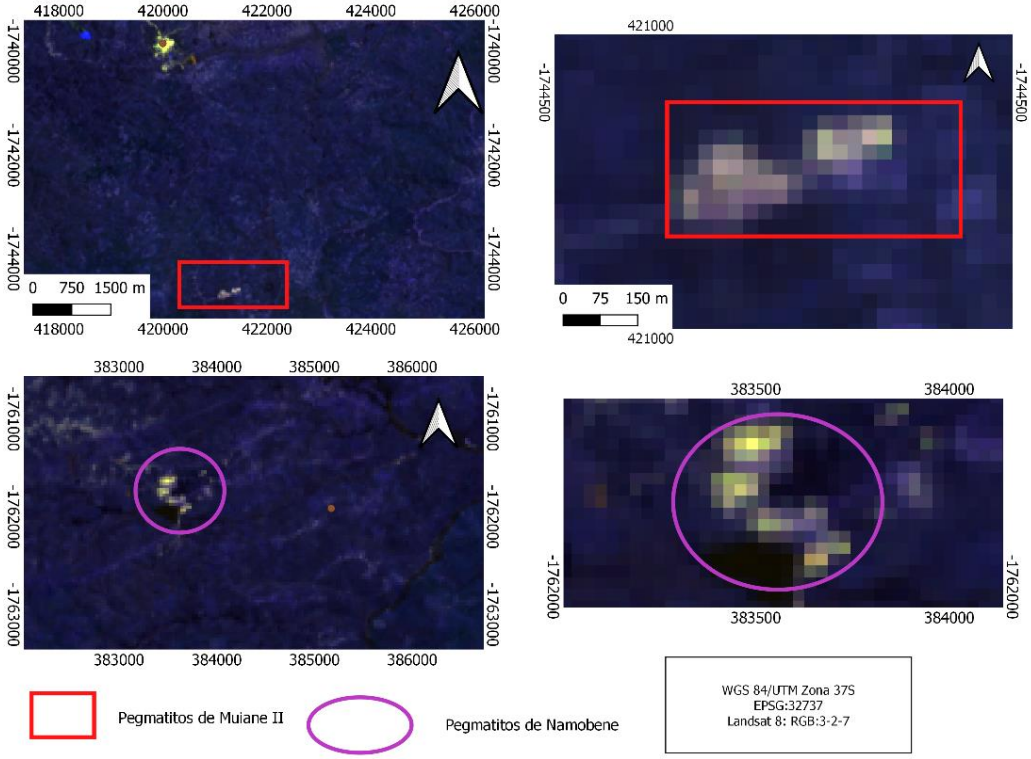


Fig. 72: Combinação RGB (3-2-7) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Muiane II e Namobene.

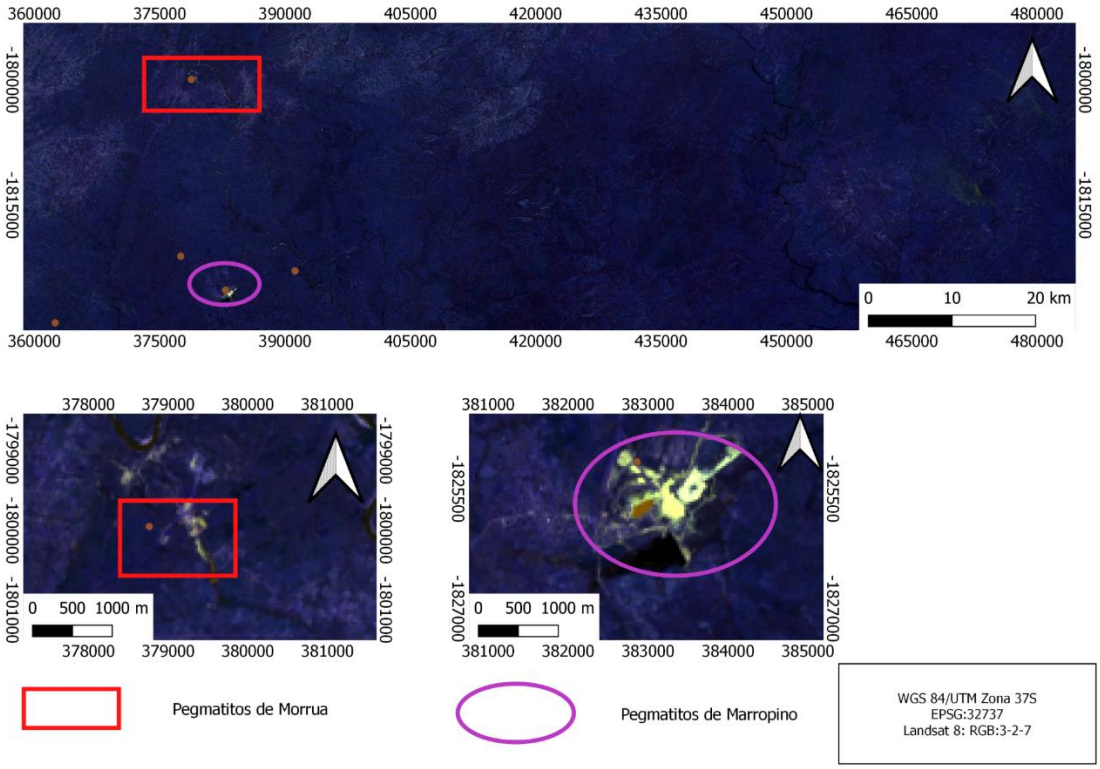


Fig. 73: Combinação RGB (3-2-7) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Morrua e Marropino.

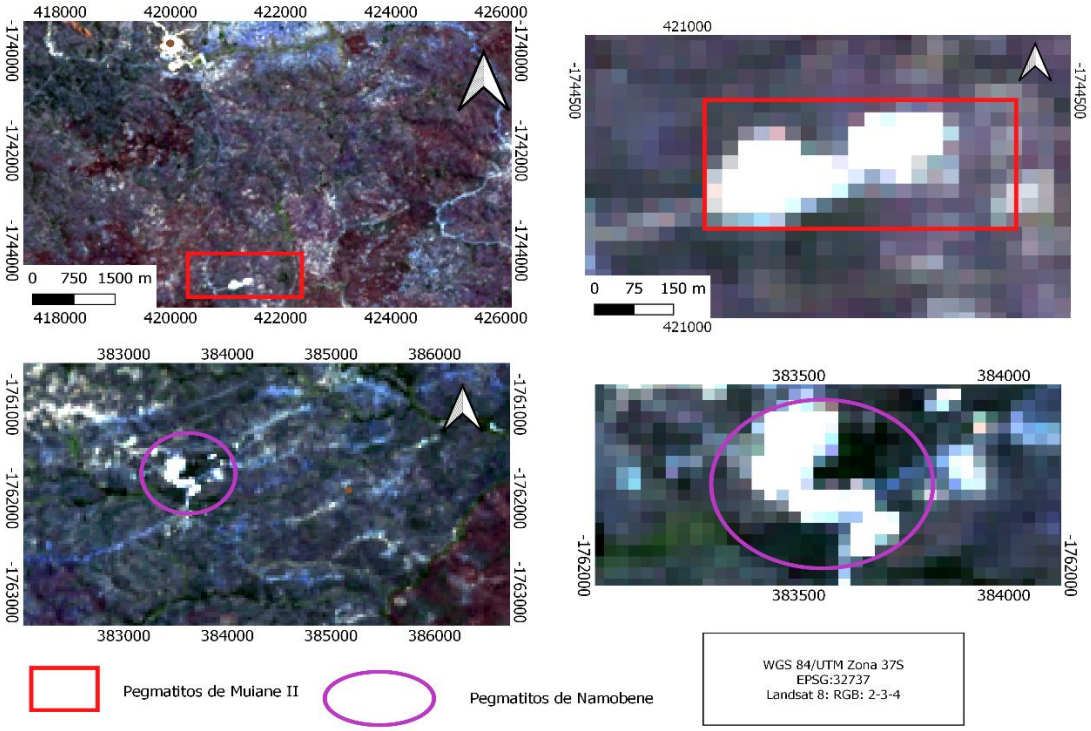


Fig. 74: Combinação RGB (2-3-4) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Muiane II e Namobene.

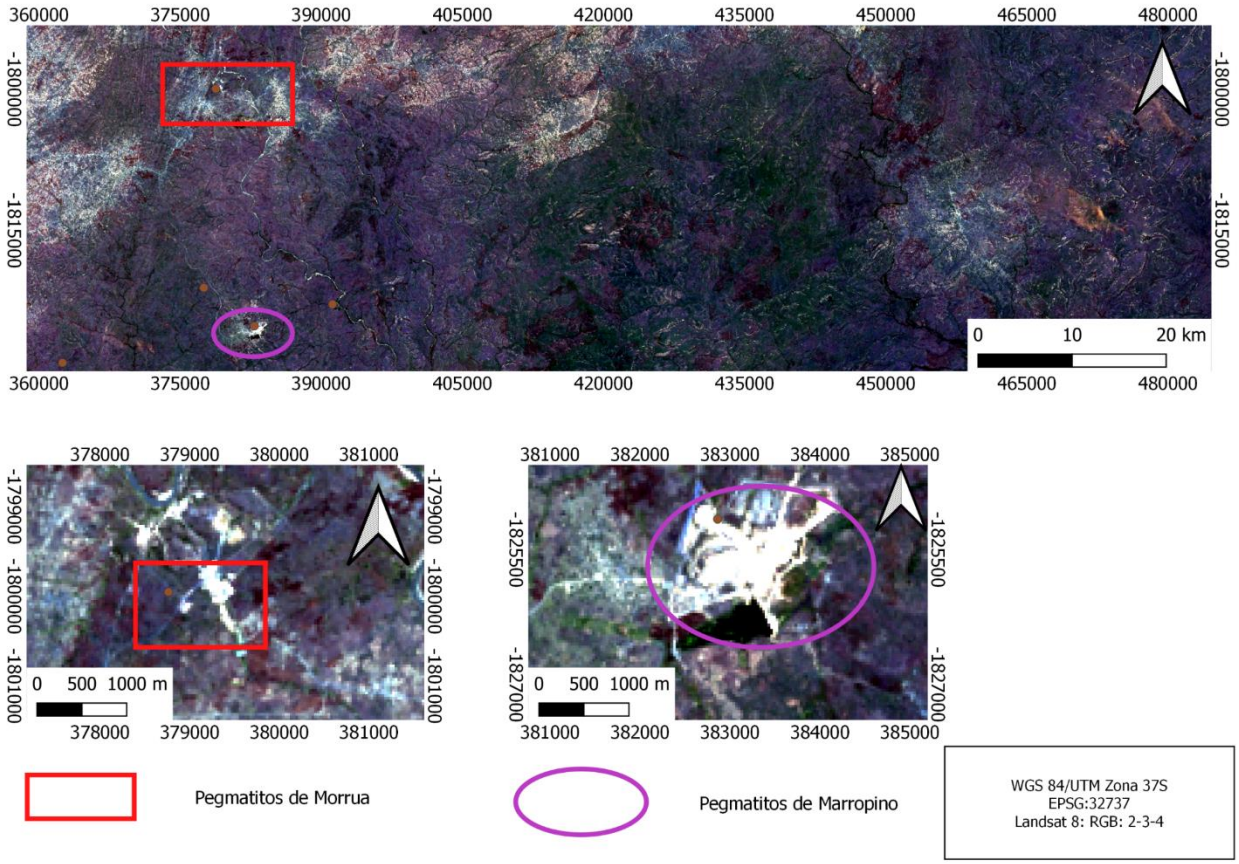


Fig. 75: Combinação RGB (2-3-4) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Morrua e Marropino.

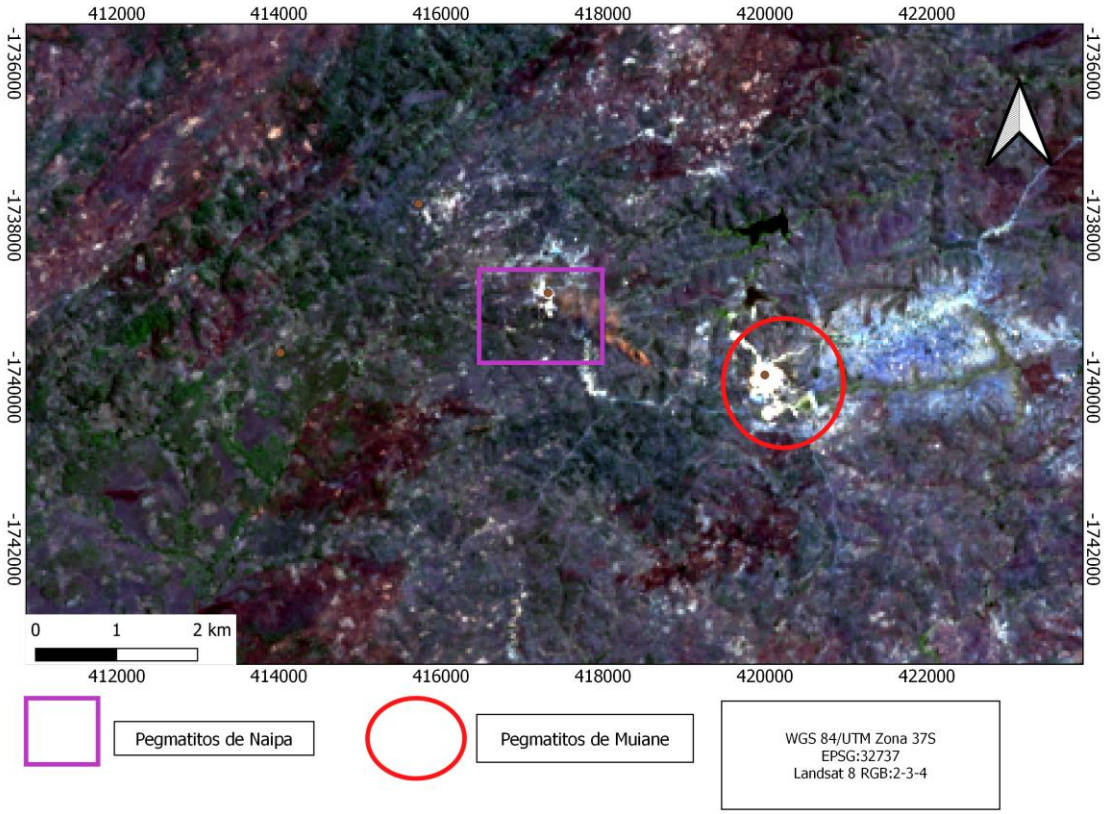


Fig. 76: Combinação RGB (2-3-4) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Naipa e Muiane.

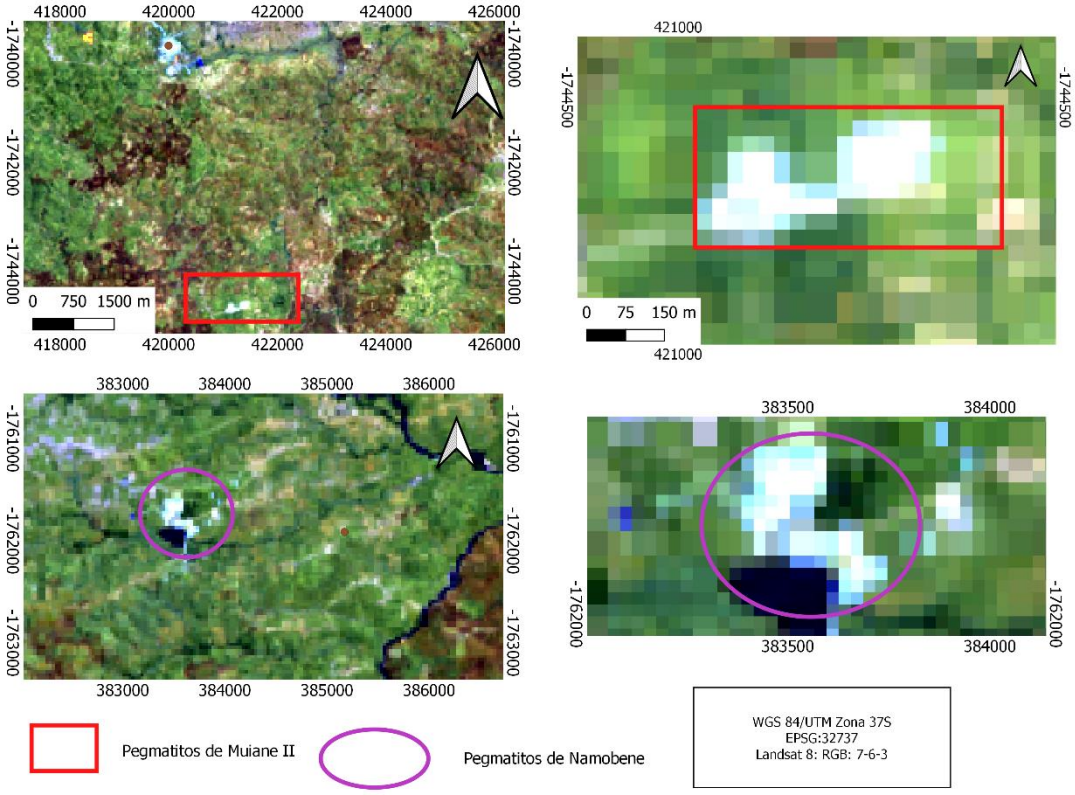


Fig. 77: Combinação RGB (7-6-3) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Muiane II e Namobene.

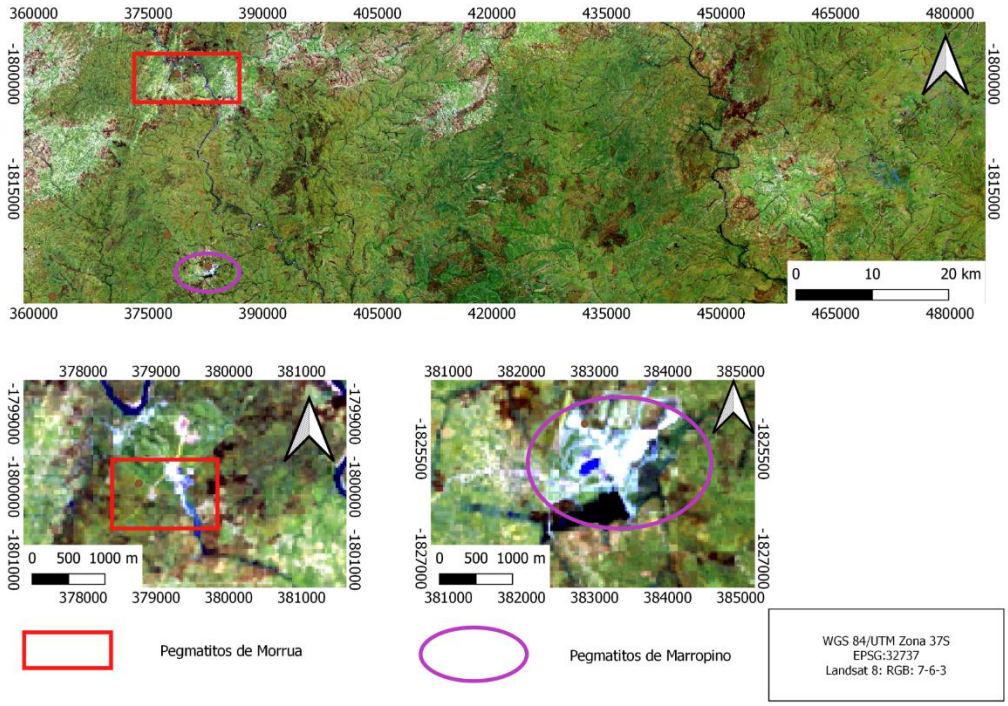


Fig. 78:Combinação RGB (7-6-3) da imagem Landsat 8; pegmatitos de Morrua e Marropino.

8.5.3. Landsat 5 TM

Para o Landsat 5, as combinações de bandas consistiram em testar trabalhos com finalidades em prospeção de minerais de lítio, como os sugeridos por (Cardoso-Fernandes, 2018; Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019), que sugere combinações RGB, 7-2-6 (Fig. 79 e Fig. 80), obtendo um sinal positivo. Apesar da data de aquisição da imagem ser de 1989, os pegmatitos de Naipa, Muiane, Marropino e Morrua apresentaram uma coloração amarela. Como proposta foram utilizadas as seguintes combinações (3-2-7 e 2-4-7).

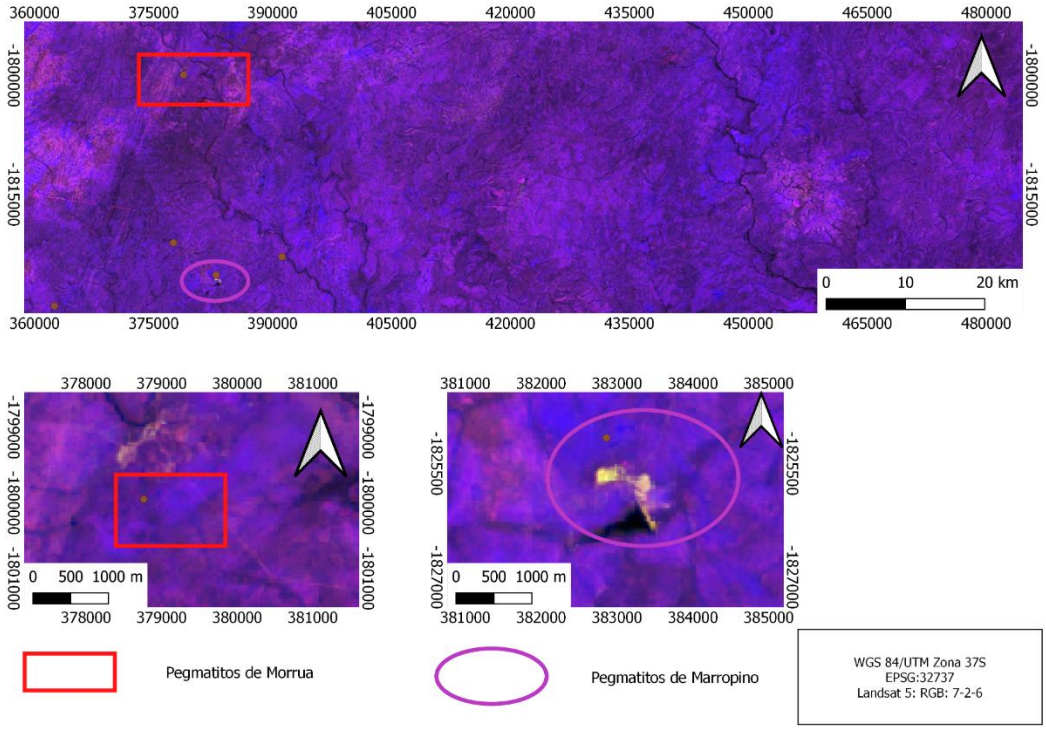


Fig. 79: Combinação RGB (7-2-6) da imagem Landsat 5 pegmatitos de Morrua e Marropino.

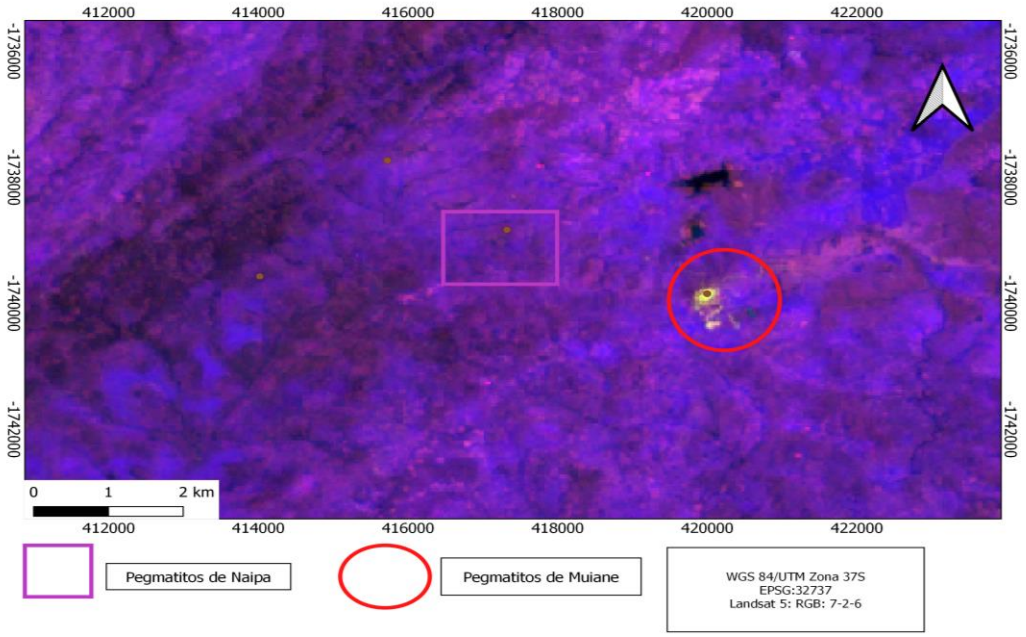


Fig. 80: Combinação RGB (7-2-6) da imagem Landsat 5 pegmatitos de Naipa e Muiane.

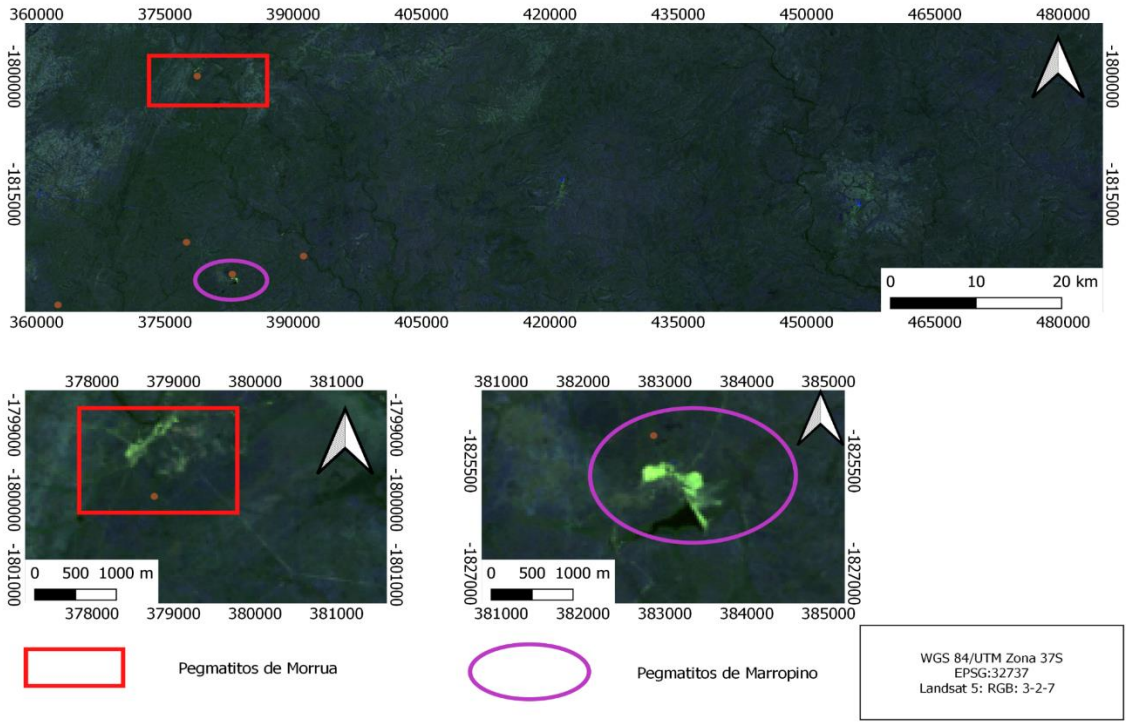


Fig. 81:Combinação RGB (3-2-7) da imagem Landsat 5; pegmatitos de Morrua e Marropino.

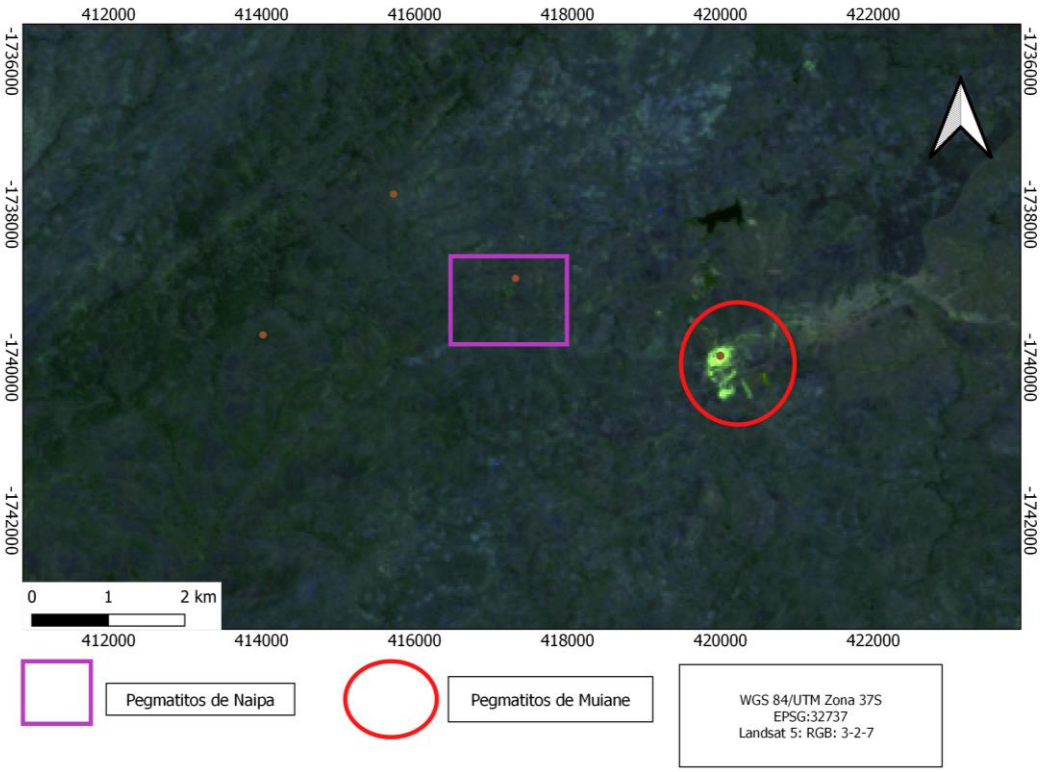


Fig. 82:Combinação RGB (3-2-7) da imagem Landsat 5; pegmatitos de Naipa e Muiane.

8.5.4. Sentinel 2

O quarto conjunto de combinações foi analisado a partir do Sensor MSI (Multiespectral Instrument). Para uma melhor visualização de mineralizações de lítio, foi proposto RGB (2-11-12 e 3-11-12), a primeira destacando o azul, SWIR 1 e 2, e a segunda o verde, SWIR 1 e 2, sendo um sensor sem as bandas na região TIR. Os comprimentos de onda 1610 nm e 2190 nm, com uma resolução de 20 m, permitem um destaque dos pegmatitos de Alto Ligonha apresentando detalhe em novos alvos, como os pegmatitos de Namobene, Nassupe e Muiane II (Fig. 83). Foi testada a combinação (3-2-12) proposta por (Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2019) (Fig. 84 a Fig. 86).

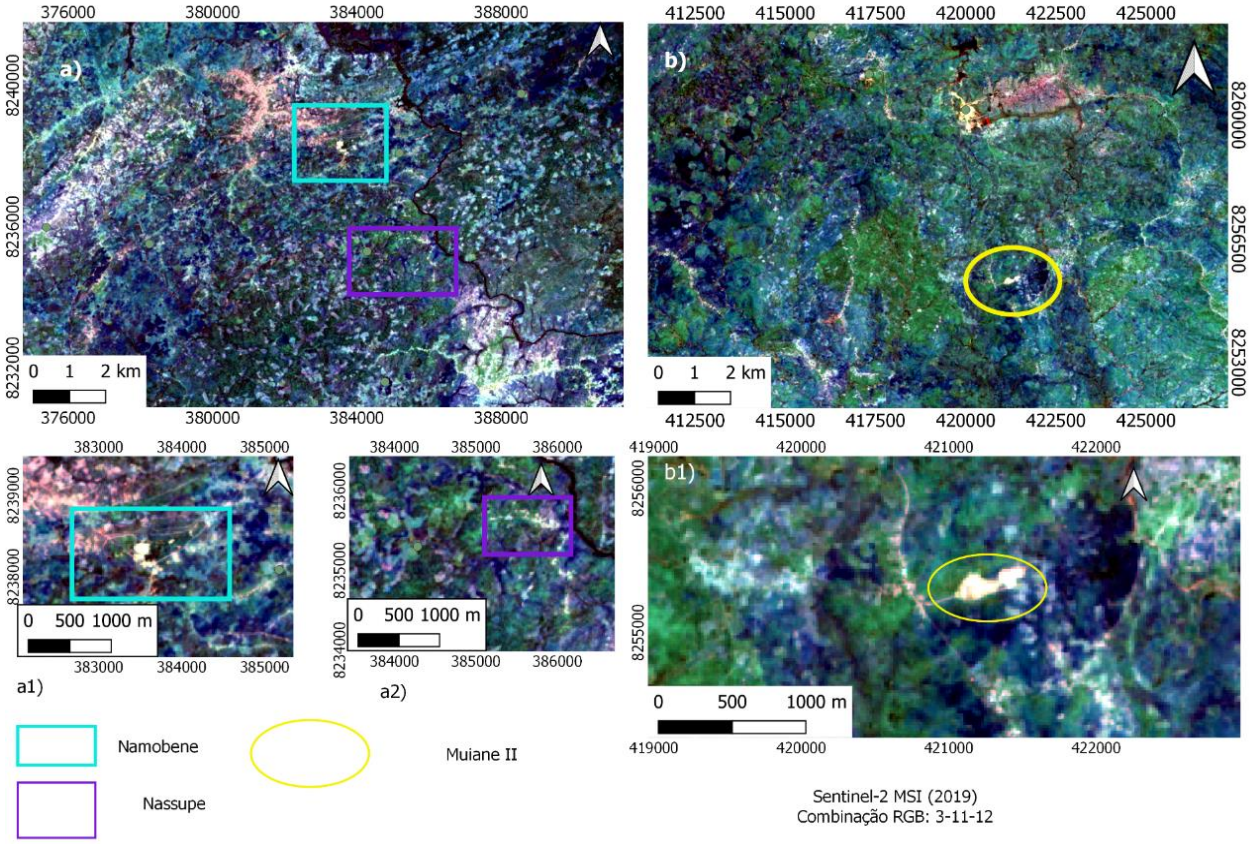


Fig. 83: Combinação RGB (3-11-12) da imagem Sentinel 2 para pegmatitos de Namobene, Nassupe e Muiane II.

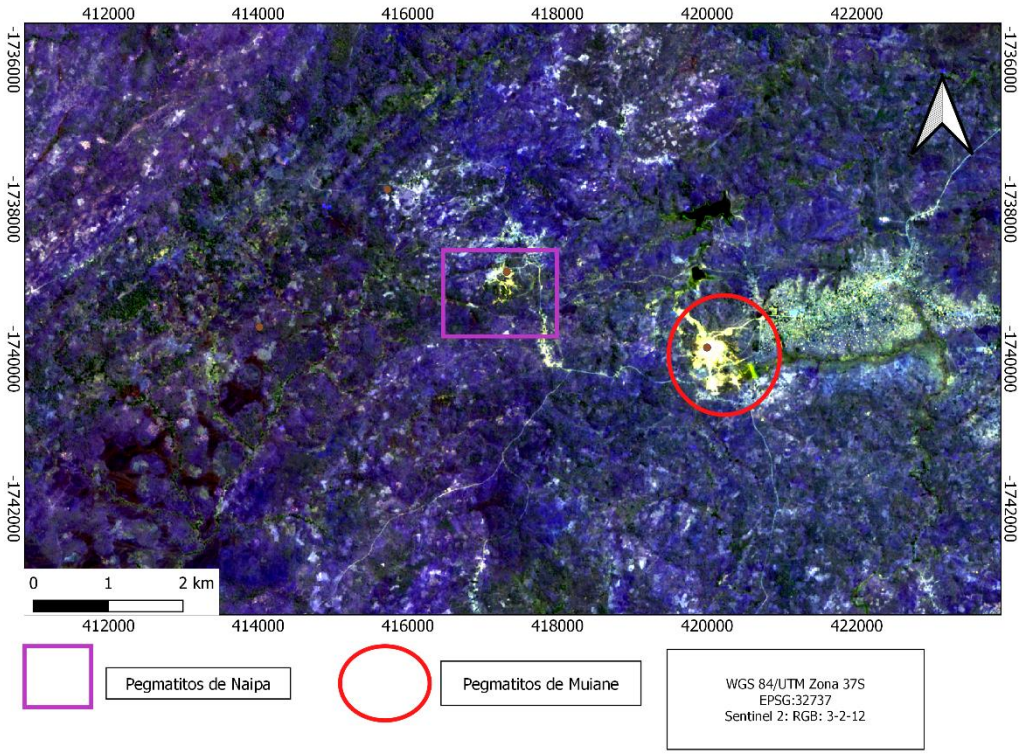


Fig. 84:Combinação RGB (3-2-12) da imagem Sentinel 2, para pegmatitos de Naipa e Muiane.

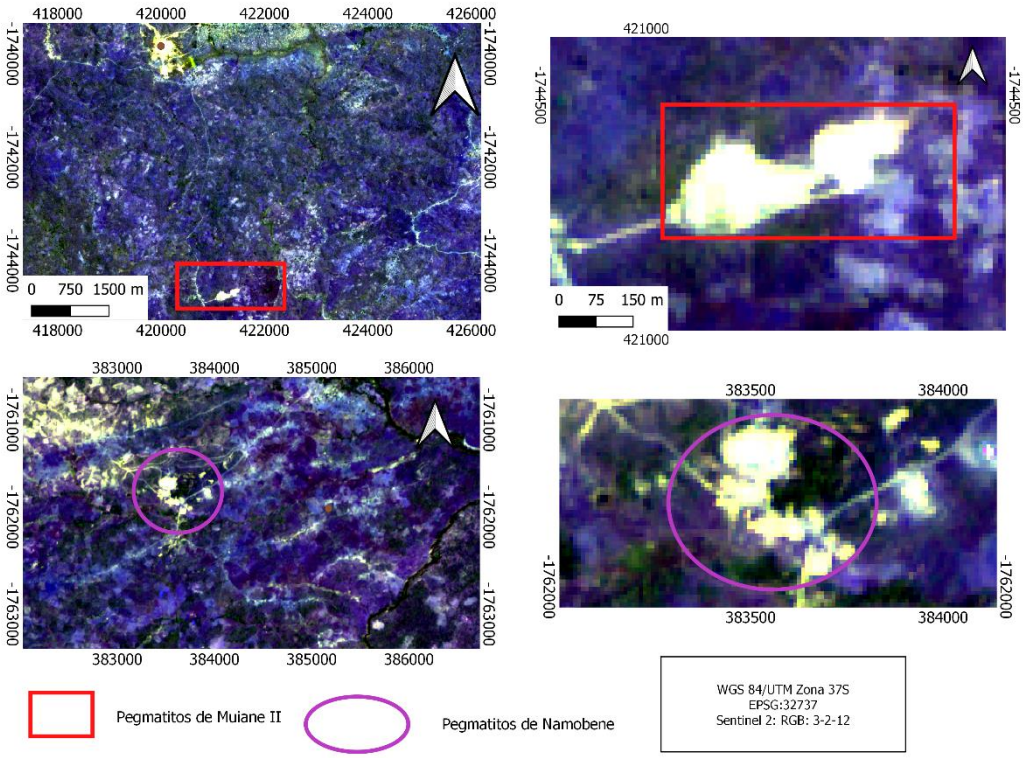


Fig. 85:Combinação RGB (3-2-12) da imagem Sentinel 2 para pegmatitos de Muiane II e Namobene.

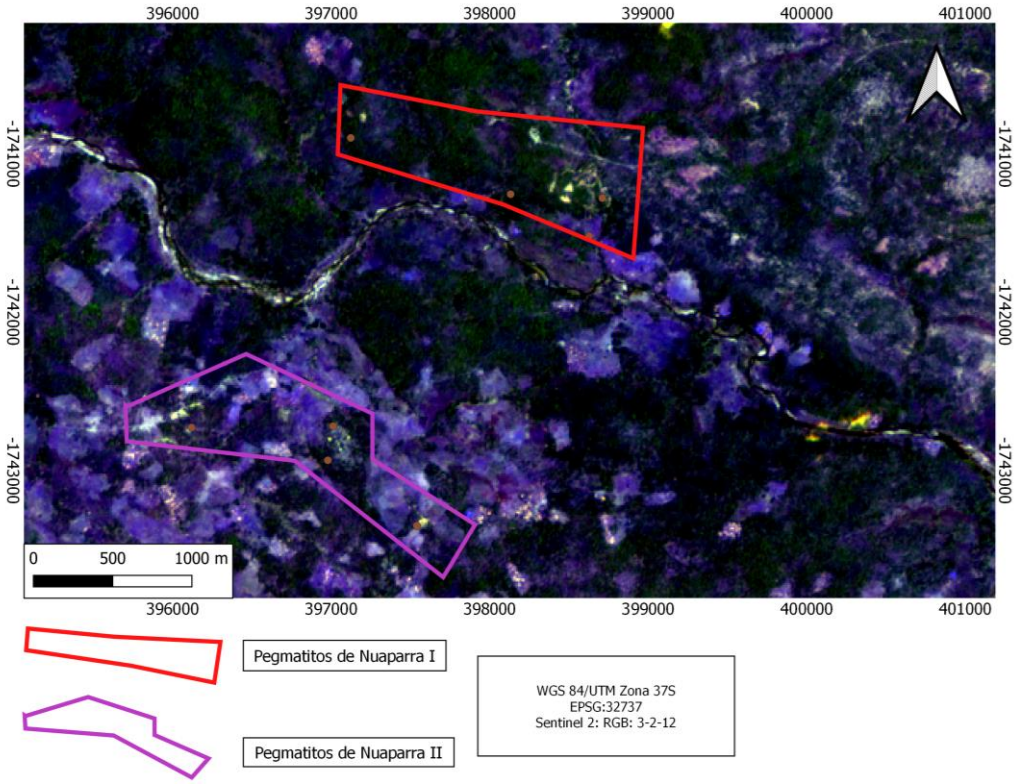


Fig. 86: Combinação RGB (3-2-12) da imagem Sentinel 2 para pegmatitos de Nuaparra I e Nuaparra II.

Os resultados das combinações RGB, foram obtidos a partir de imagens ASTER, Landsat 5 e 8, e Sentinel 2. As primeiras propostas (ASTER) foi do SWIR-VNIR e VNIR-SWIR-TIR e SWIR-TIR, que permitiram a identificação de uma ampla gama de informações necessárias para a prospeção geológica em Alto Ligonha, apresentando excelentes resultados em ambos os conjuntos. Podemos observar nas combinações a partir de imagens Landsat e Sentinel, a deteção de pegmatitos alvos e novos alvos.

Embora das dificuldades de interpretação causadas pela mistura de sinais de diversos minerais explorados nesta região, as combinações RGB têm-se mostrado uma técnica competente para a identificação de pegmatitos diversos, incluindo de lítio.

8.6. Razão de bandas

Nas aplicações geológicas, o uso desta técnica constitui numa excelente opção para a prospeção de alvos geológicos com interesse de pesquisa mineral (Sabins, 1999; Kujjo, 2010; Meneses and Almeida, 2012; Elsayed Zeinelabdein *et al.*, 2020). Esta técnica permite estabelecer diferenças existentes no comportamento espetral de diferentes alvos, pois, em bandas originais, apenas diferenças grosseiras são observadas. É usada em situações em que uma banda espetral é inversamente proporcional a outra banda (Walsh, 2002). As imagens podem identificar dois conjuntos de minerais (Sabins, 1999) ou mais, por exemplo, minerais de alteração hidrotermal, minerais de ferro e de argila, etc. Esta técnica aritmética reduz os efeitos de sombra causados pela topografia (Sabins, 1999; Zhang *et al.*, 2016), para além de destacar os elementos específicos da imagem e as respetivas diferenças temporais (Walsh, 2002). A seleção das bandas é decidida com base no conhecimento que o utilizador tem acerca do padrão de refletância do alvo de interesse (Meneses and Almeida, 2012). As razões de bandas aqui utilizadas foram selecionadas entre as várias opções sugeridas por outros autores, como é ilustrado na (Tabela 39), onde são apresentados alguns índices de minerais usados nas razões de bandas, assim como algumas propostas do trabalho. No comportamento espetral dos alvos de interesse, para a aplicação da razão, as bandas são selecionadas visando os seus valores máximos e mínimos de refletância, a fim de que se expressem os gradientes da curva espetral dos objetos de interesse, proporcionando o realce destes alvos.

Tabela 39: Índices minerais para os Satélites Landsat 5 e 8, Terra-ASTER e Sentinel 2.

	Landsat 8	
Razão	**Alvos**	**Fonte**
1/7	Depositos de Aluminio	(Walsh, 2002)
3/2	Goethite, halloysite	(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019)
7/5	Argilas	(Walsh, 2002)
3/1	Hematite	(Walsh, 2002)
3/5	Espodumena	(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019)
4/7	Lepidolite, ambligonite, cookeite, montebrasite	(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019)
6/7	Alunite e argilas	(Sabins, 1999); (Pour and Hashim, 2015)
3/11	Minerais de Lítio	**Proposta**
	ASTER	
Razão	**Alvos**	**Fonte**
3/4	Minerais de argila e limonites	(Lipton, 1997)
(5+7)/6	Muscovite, caulino e ilite	(Rowan and Mars, 2003; Kruse *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2016)
4/6	Montebrasite	
7/6	Lepidolites	(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019)
1/3	Espodumena	(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2019)
7/5	Caulinites	(Kalinowski and Oliver, 2004a)
14/12	Rochas silicatadas	(Kalinowski and Oliver, 2004a)
3/5	Minerais de ferro e de argilas	(Sabins, 1999)

1/6	Minerais de Lítio	**Proposta**
2/5	Minerais de alteração	**Proposta**
2/6	Minerais de Lítio	**Proposta**
9/11	Minerais de Lítio	**Proposta**

Landsat 5

Razão	**Alvos**	**Fonte**
2/4	Espodumena	(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019)
3/7	Lepidolites, cookeite, ambligonite, montebrasite	(Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019)
5/7	Minerais de argila e alunite	(Sabins, 1999; Pournamdari *et al.*, 2014)
7/6	Minerais de argila	**Proposta**
4/7	Minerais de Lítio	**Proposta**

Sentinel 2 A

Razão	Alvos	**Fonte**
3/8	Espodumena	Cardoso-Fernandes et al., 2019
4/12	Lepidolite	Cardoso-Fernandes et al., 2019
8/12	Minerais de Lítio	**Proposta**
7/11	Minerais de Lítio	**Proposta**

8.6.1. Landsat 8

Neste ponto foram selecionadas as opções sugeridas por (Cardoso-Fernandes, 2018; Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2019), vide (Tabela 39), no que concerne à prospeção de minerais de lítio, sendo a razão de (3/5) para espodumenas (Fig. 87 e Fig. 88), sendo que a mesma razão (3/5) do sensor OLI (2018) para prospeção de minerais de lítio (espodumenas) (Fig. 89) considerada uma resposta positiva de novos halos de prospeção, pois, o pegmatito de Namobene, situado no grupo de Namacotche, campo de Alto Mólocué e pegmatito de Nassupe, na região de Mutala e Muiane II (designação pelos autores, devido à aproximação com o pegmatito de Muiane), ambos apresentam a coloração cinza claro, muito intenso, significando que são mineralizações de lítio. Segundo (Gomes *et al.*, 2008), existe a lepidolização maciça e co-precipitação de petalite de baixa temperatura e ocorrência ocasional em paragéneses LCT mais tardias de Namobene, região de Mutala. Como proposta de prospeção de minerais de lítio (espodumena), testou-se a razão 3/11 (0.525 - 0.600 µm e 11.50 - 12.50 µm). Nota-se nas (Fig. 88 e Fig. 89) a possibilidade em se destacar os alvos pegmatíticos ao mesmo tempo, mostrando ser bastante eficiente para o objeto que se pretende.

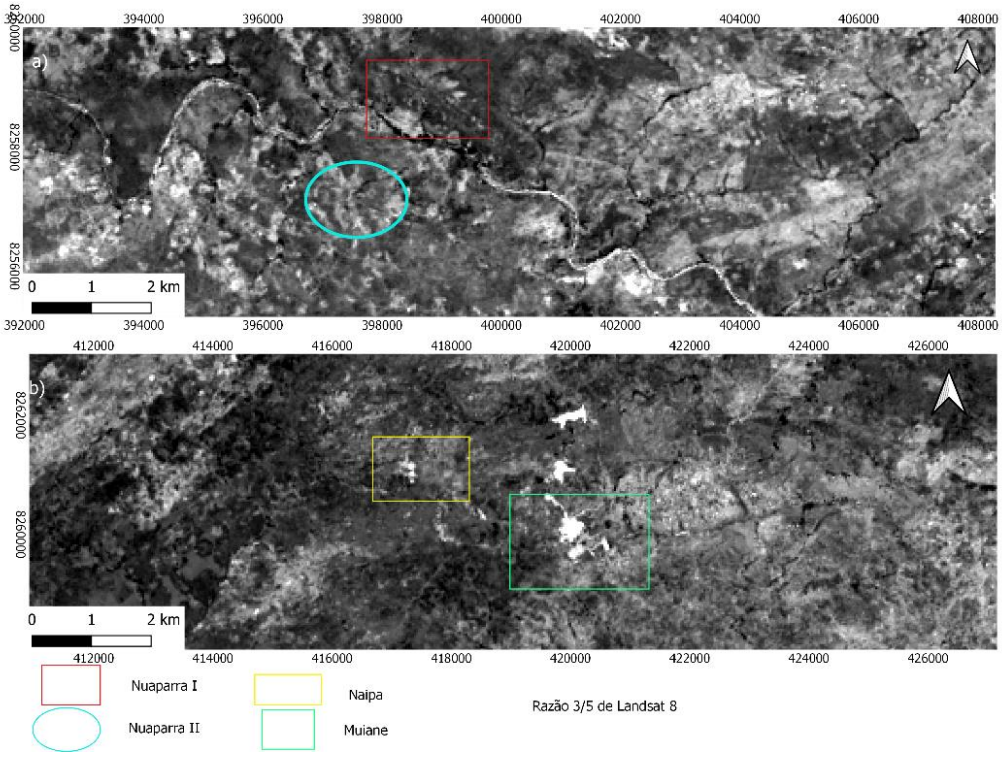


Fig. 87: Razão (3/5) do sensor OLI (2018) para prospeção de minerais de lítio (espodumenas); a) pegmatitos de Nuaparra I e II, ilustrando respostas negativas; b) pegmatitos de Muiane e Naipa; as mineralizações de lítio aparecem com sinais positivos.

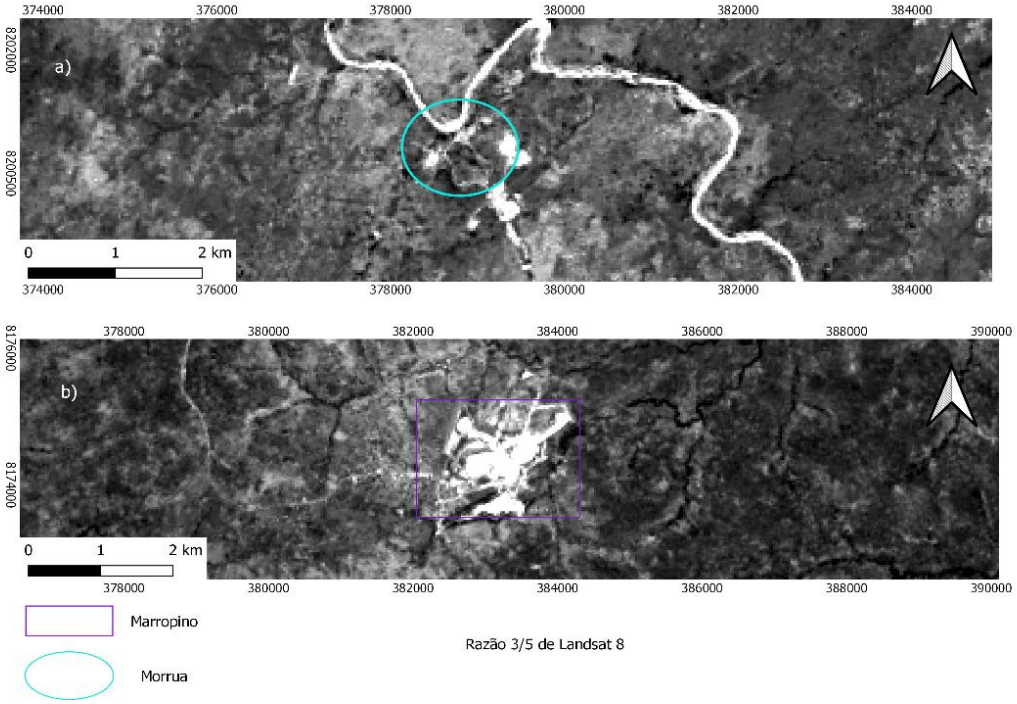


Fig. 88: Razão (3/5) do sensor OLI (2018) para prospeção de minerais de lítio (espodumenas); a) pegmatitos de Marropino; b) pegmatito de Morrua; as mineralizações de lítio aparecem com sinais positivos.

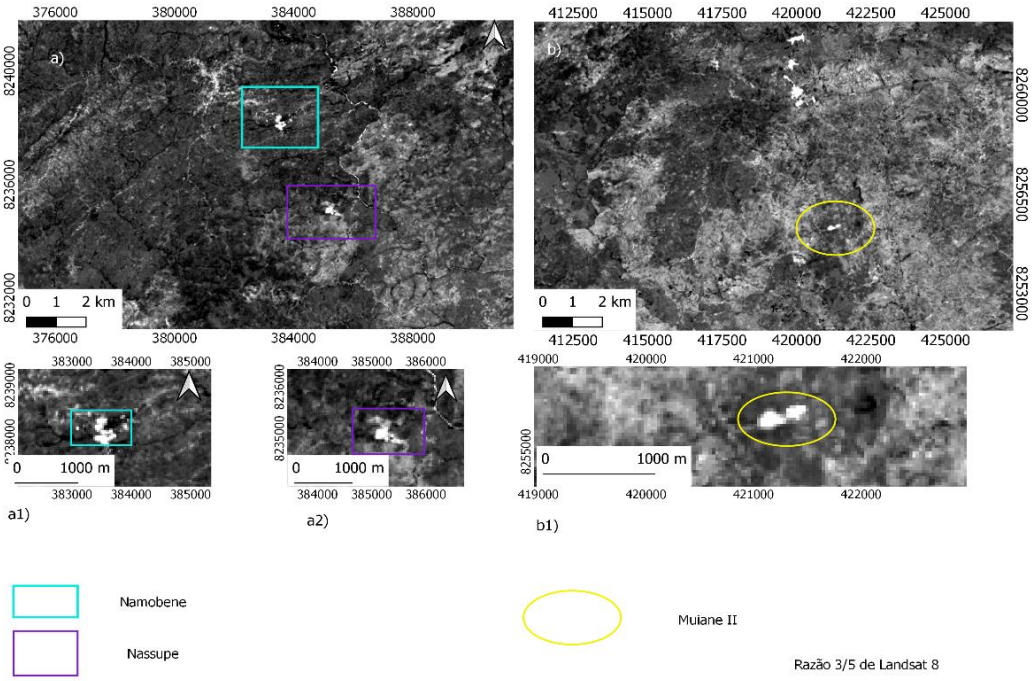


Fig. 89: Razão (3/5) do sensor OLI (2018) para prospeção de minerais de lítio (espodumenas); respostas em outros pegmatitos; a) Pegmatitos de Namobene e Nassupe; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara, muito intensa; a1) detalhe do pegmatito de Namobene; a2) detalhe do pegmatito de Nassupe; b) e b1) Pegmatito de Muiane II.

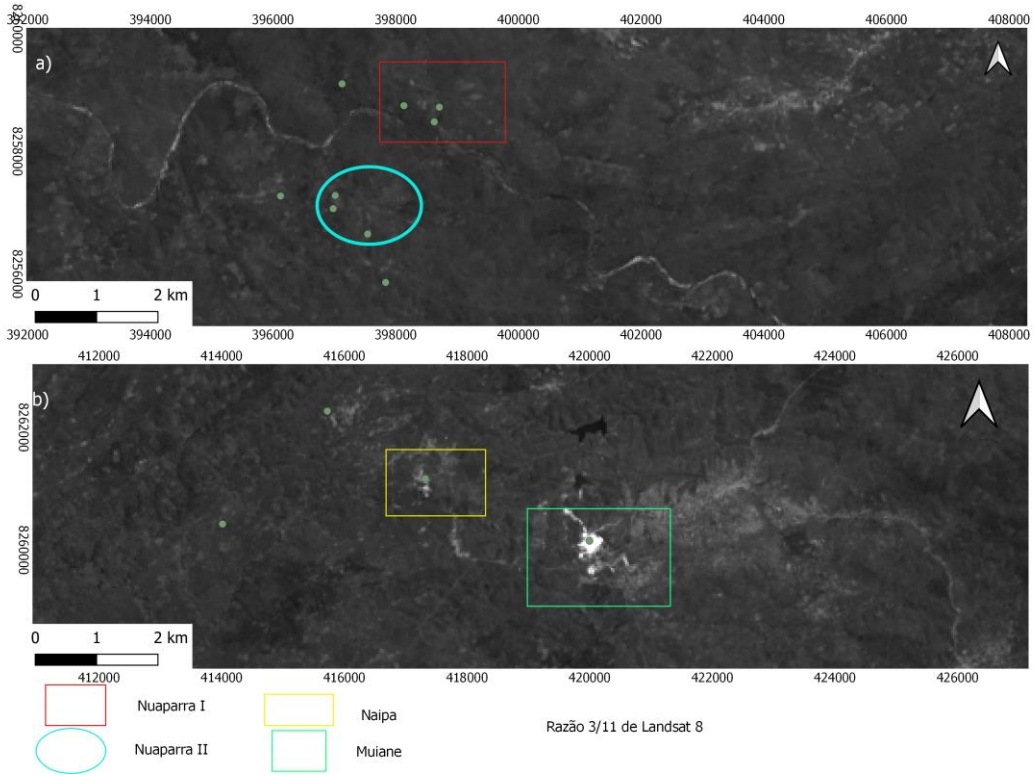


Fig. 90: Razão (3/11) satélite Landsat 8 (2018) para prospeção de minerais de lítio (espodumenas); a) pegmatitos de Nuaparra I e II ilustrando respostas são negativas; b) pegmatitos de Muiane e Naipa; as mineralizações de lítio aparecem com sinais positivos.

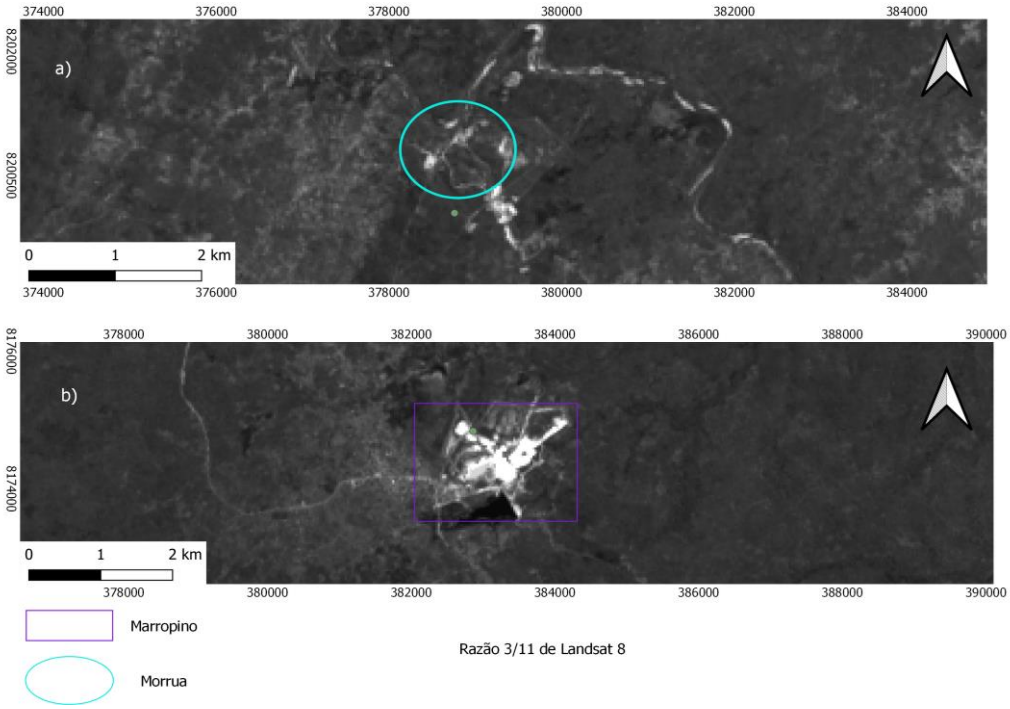


Fig. 91: Razão (3/11) do satélite Landsat 8 (2018) para prospeção de minerais de lítio (espodumenas); a) pegmatitos de Marropino; b) pegmatito de Morrua; as mineralizações de lítio aparecem com sinais positivos.

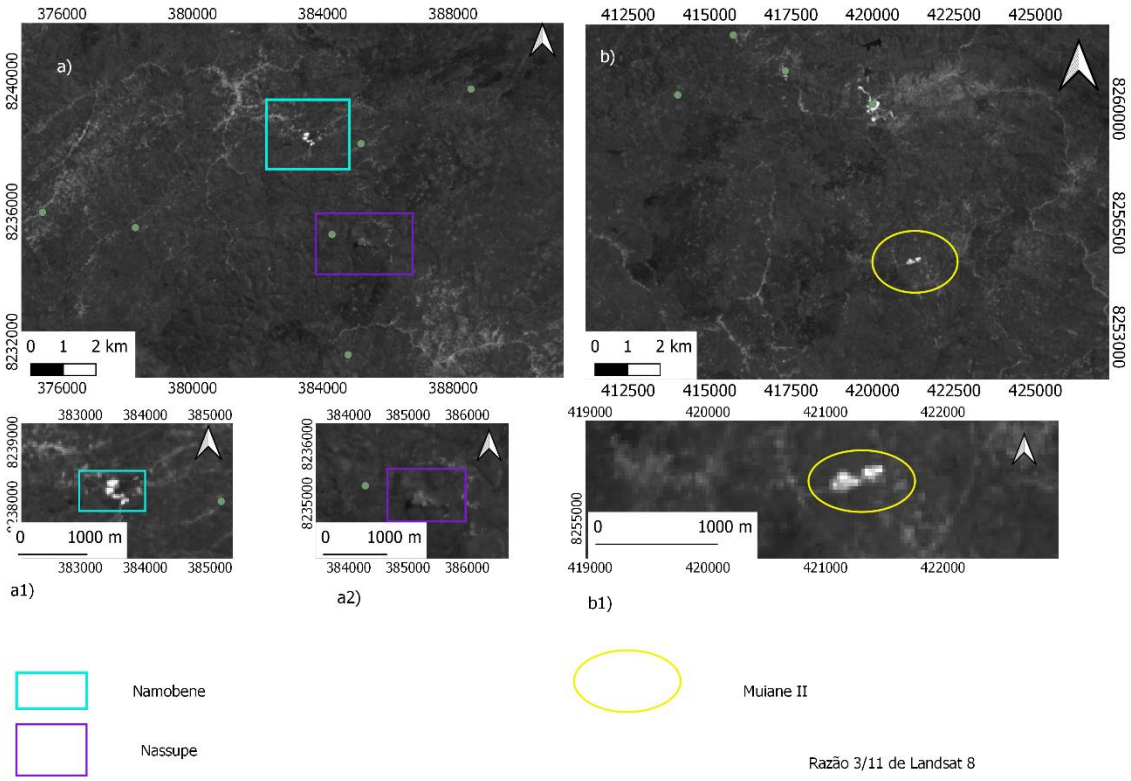


Fig. 92: Proposta da Razão (3/11) do satélite Landsat 8 (2018) para prospeção de minerais de lítio (espodumenas); respostas em outros pegmatitos; a) Pegmatitos de Namobene e Nassupe; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara, muito intensa; a1) detalhe do pegmatito de Namobene; a2) detalhe do pegmatito de Nassupe; b) e b1) Pegmatito de Muiane.

8.6.2. Sensor ASTER

Para as imagens do sensor ASTER foi testada a razão de bandas (14/12) para rochas silicatadas, incluindo para minerais argilosos (Kalinowski and Oliver, 2004b), (vide o apêndice I), uma vez que fortes bandas de hidróxidos encontram-se nos comprimentos de onda 1,4 e 2,2 µm sendo típicas de refletância de caulinite, com a ausência apreciável de água retida resultando em apenas uma fraca banda em 1,9 µm. A presença de uma pequena quantidade do ião ferroso resulta numa sutil banda próxima a 1 µm na caulinite, enquanto o ião ferroso numa coordenação 6 na montmorilonite resulta numa forte banda em 1 µm (Epiphanio *et al.*, 1992). No caso específico para prospeção de minerais de lítio foram usados os índices proposto por (Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2019) (Tabela 39), a razão 1/3 (espodumena) e 7/6 (lepidolite). O sensor ASTER detetou todos os pegmatitos em cuja

mineralogia se conhece minerais de lítio. Os pegmatitos de Nuaparra I e Nuaparra II são identificáveis nesta razão, mas apresentam um sinal fraco comparando com os pegmatitos de Naipa e Muiane, que apresentam um sinal positivo (Fig. 93). Os pegmatitos referidos são visualizados em imagem satélite (Fig. 94). Para os pegmatitos de Marropino, a razão 1/3 mostrou um sinal bastante positivo em relação aos pegmatitos de Morrua, dependendo do fator extensão (Fig. 95 e Fig. 96). A (Fig. 97) ilustra o realce do "density slice" da razão 1/3 para prospeção de espodumenas, do sensor ASTER, onde: a) Pegmatito de Marropino; b) pegmatito de Morrua; c) Pegmatitos de Muiane e Naipa; a1) histograma da imagem ASTER, pegmatitos de Morrua e Marropino; e c1) histograma da imagem ASTER, pegmatitos de Muiane e Naipa. As áreas com tom amarelo e vermelho correspondem aos pegmatitos com altos índices de refletância de superfície. As razões de bandas do sensor do ASTER, como propostas de trabalho, foram (1/6, 2/5, 2/6 e 9/11.) As três primeiras foram utilizados para a identificação de minerais de lítio, e a quarta para minerais de alteração (Fig.98 e Fig.99). As razões de bandas para identificação de halos de alteração hidrotermal podem ser feitas com a banda 4 deste sensor (1,7 – 1,8 nm), tipicamente onde os materiais geológicos não alterados exibem alta refletância, e com uma das cinco bandas existentes para a identificação de minerais de alteração hidrotermal: bandas 5 (2,145 – 2,185 μm), 6 (2,185 – 2,225 μm), 7 (2,235 – 2,285 μm), 8 (2,295 – 2,3659 μm) e 9 (2,360 – 2,430 μm) (Meneses and Almeida, 2012; Testa *et al.*, 2018).

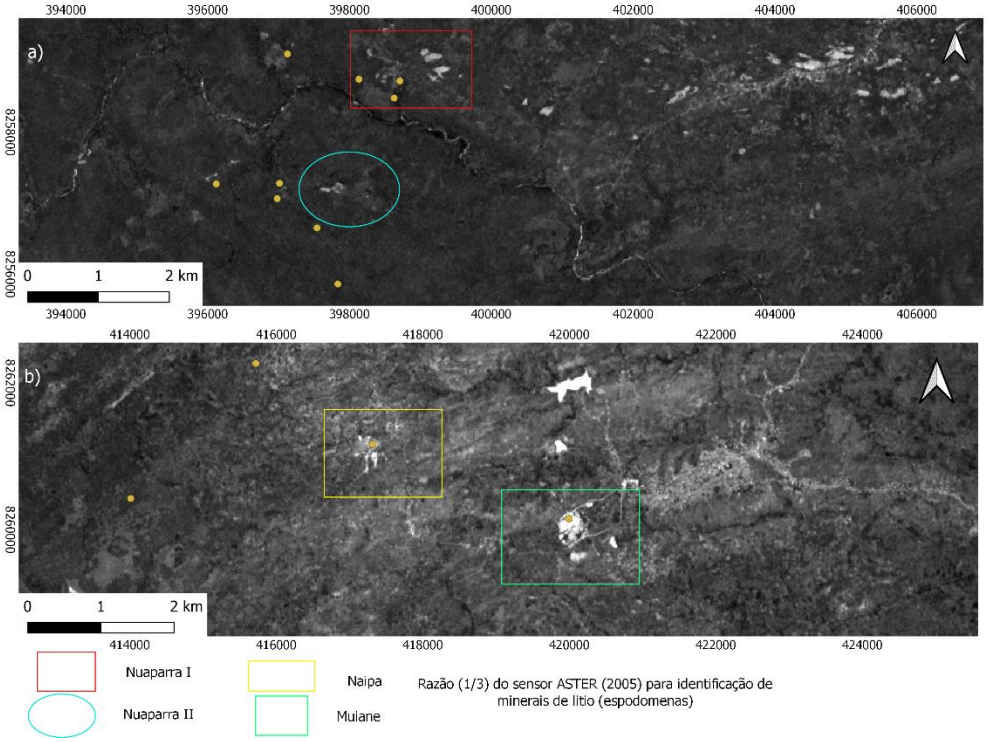


Fig. 93: Razão (1/3) do sensor ASTER (2005) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); a) Pegmatitos de Nuaparra I e II; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara não muito intensa; b) Pegmatitos de Naipa e Muiane, ricos em mineralizações de lítio; os pegmatitos aparecem a cinza-claro e os corpos de água em branco.

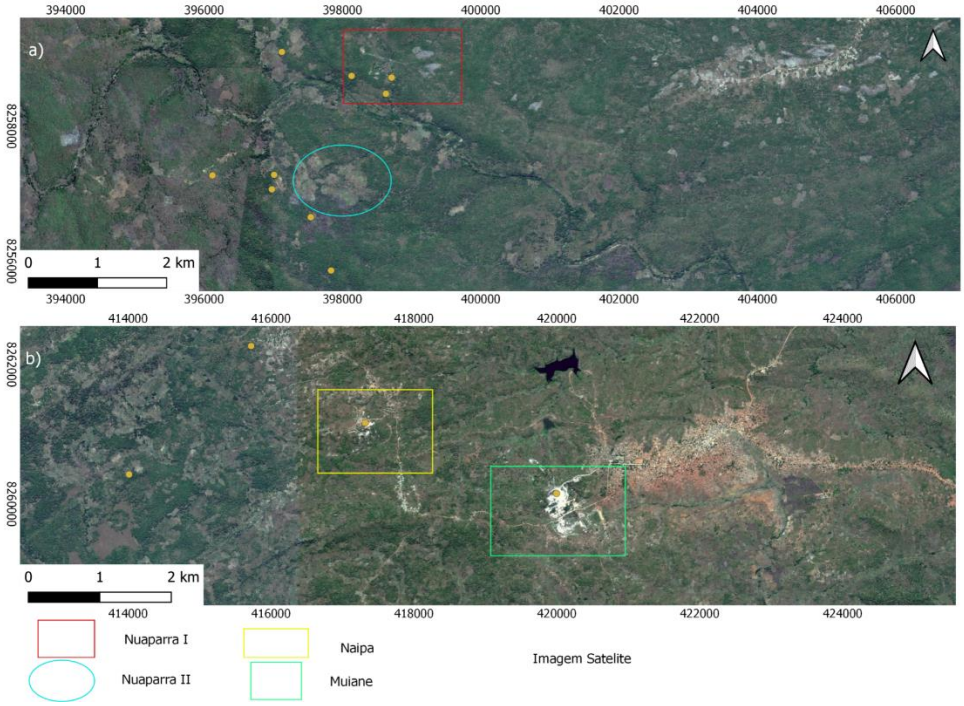


Fig. 94: Imagem satélite identificando os pegmatitos de Nuaparra I e II, Naipa e Muiane.

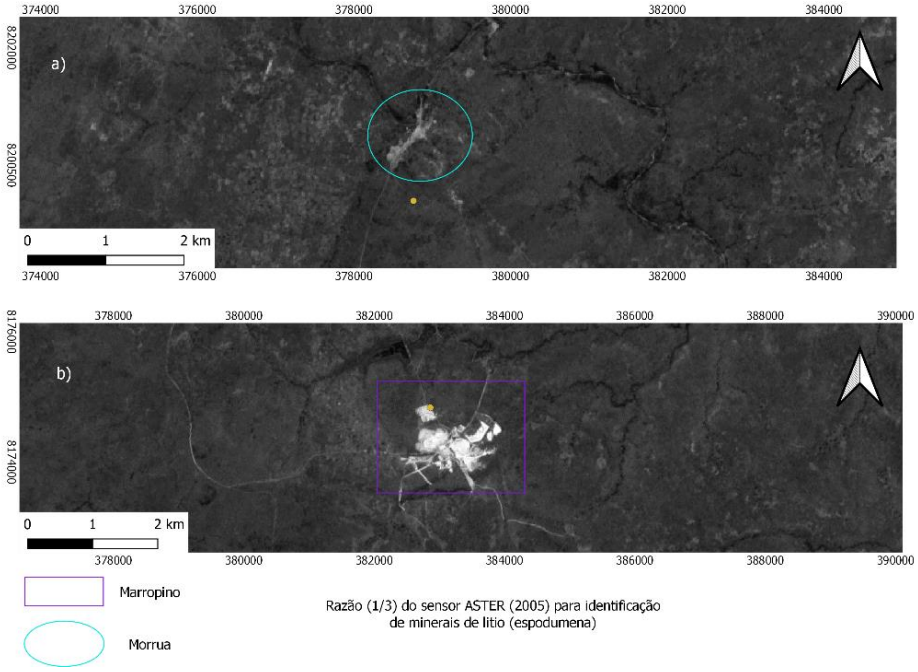


Fig. 95: Razão (1/3) do sensor ASTER (2005) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); a) Pegmatitos de Morrua; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara; b) Pegmatitos de Marropino ricos em mineralizações de lítio.

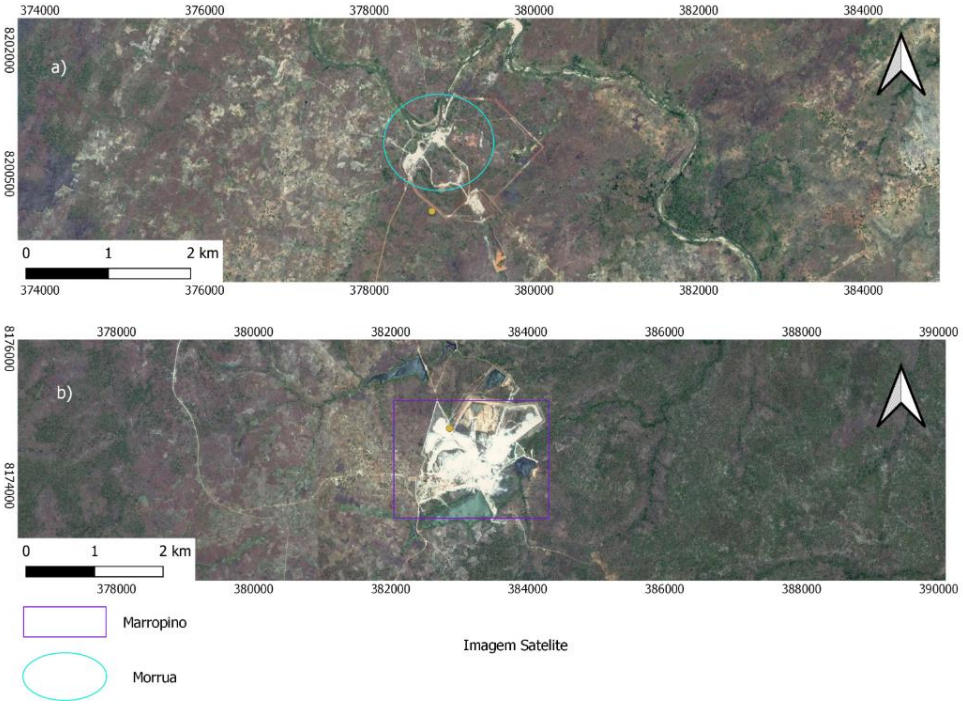


Fig. 96: Imagem satélite identificando os pegmatitos de Marropino e Morrua.

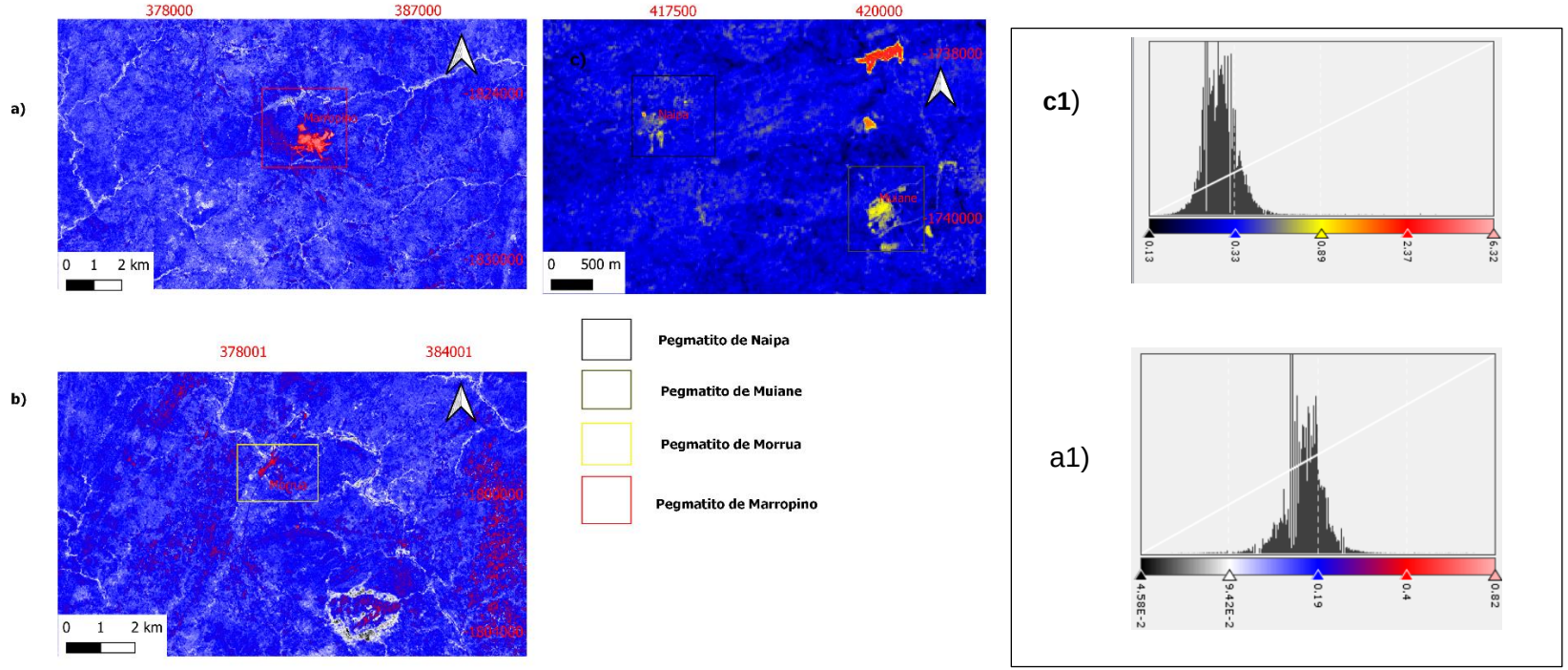


Fig. 97: “Density slice” da razão (1,3) para prospeção de espodumenas do sensor ASTER; a) Pegmatito de Marropino; b) pegmatito de Morrua; c) Pegmatitos de Muiane e Naipa; a1) histograma da imagem ASTER (13) - pegmatitos de Morrua e Marropino; c1) histograma da imagem ASTER (13) - pegmatitos de Muiane e Naipa.

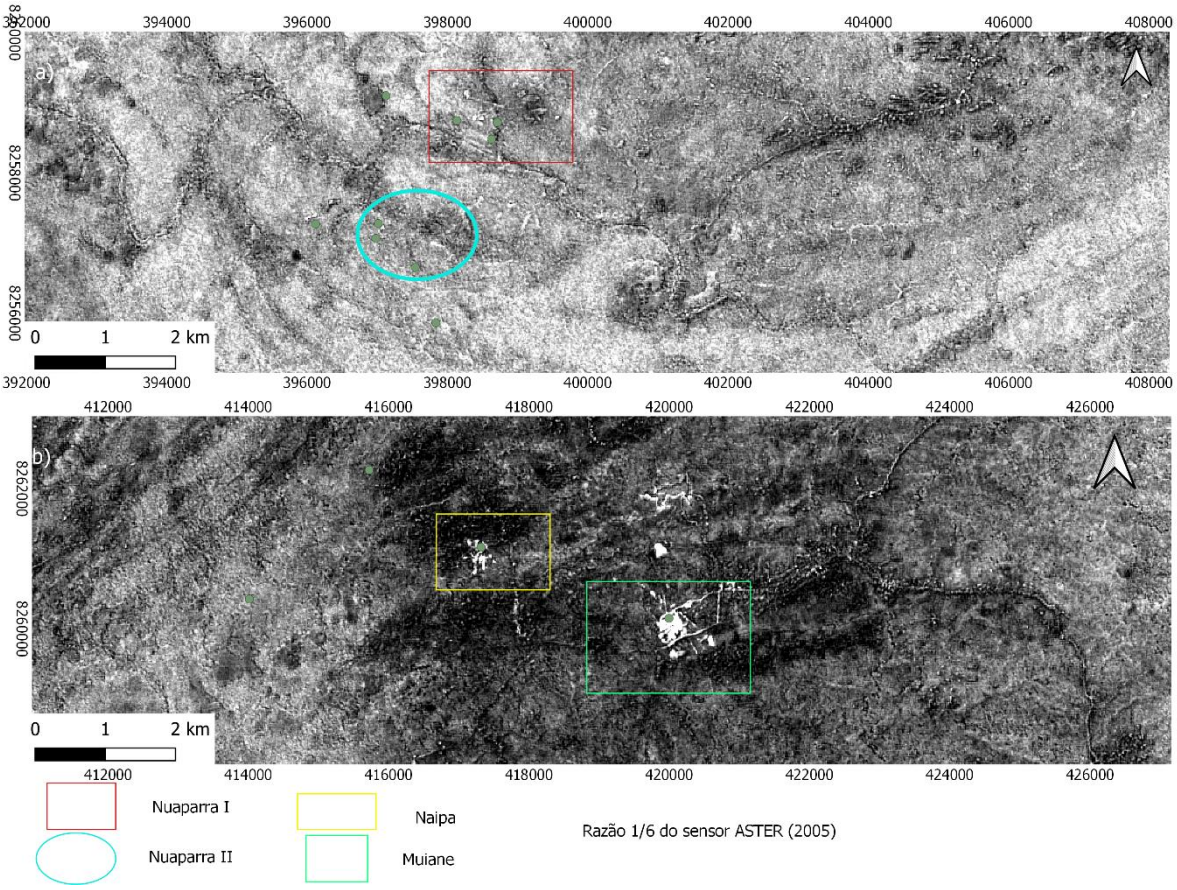


Fig.98:Razão (1/6) do sensor ASTER (2005) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); a) Pegmatitos de Nuaparra I e II; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara, não muito intensa; b) Pegmatitos de Naipa e Muiane, ricos em mineralizações de lítio; os pegmatitos aparecem a cinza-claro e os corpos de água a branco

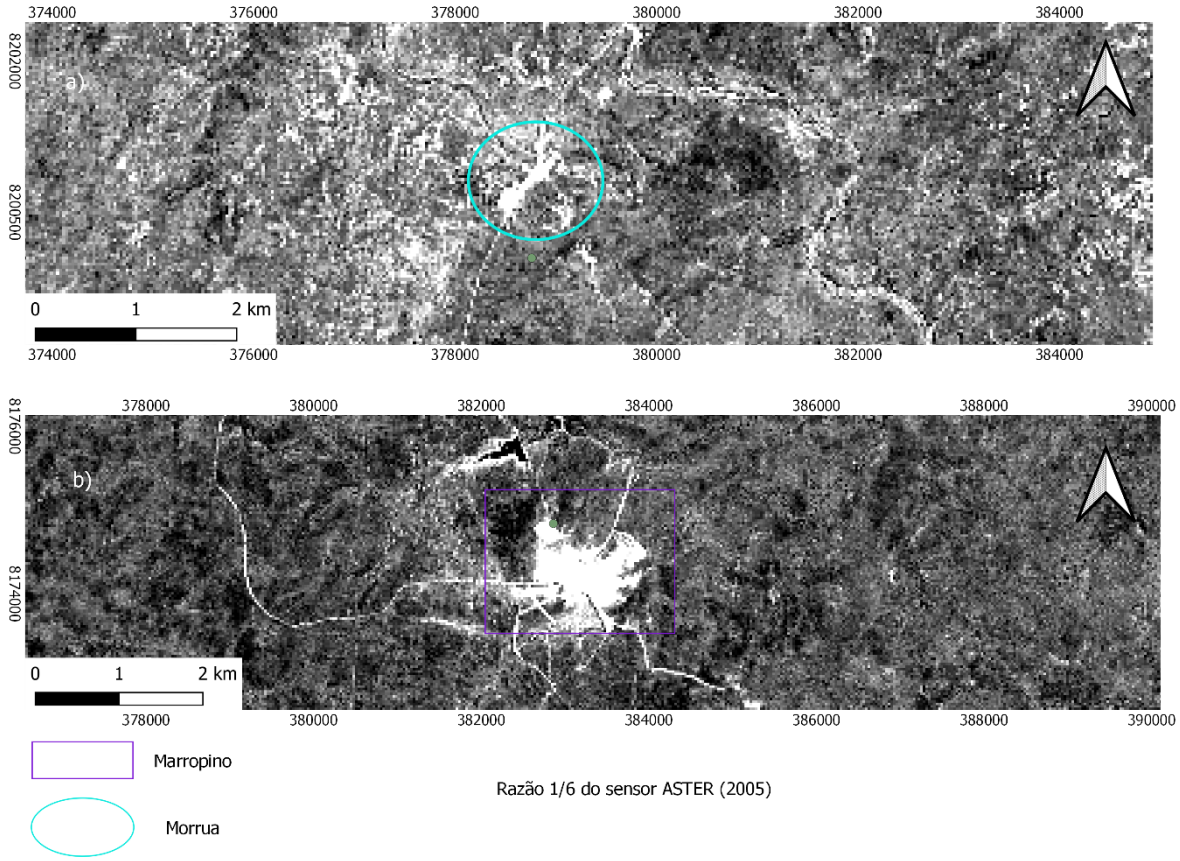


Fig.99: Razão (1/6) do sensor ASTER (2005) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); a) Pegmatitos de Morrua, as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara muito intensa; b) Pegmatitos Marropino, ricos em mineralizações de lítio; os pegmatitos aparecem a cinza-claro e os corpos de água a preto.

8.6.3. Landsat 5 TM

As razões de bandas usadas para identificar os minerais de lítio considerando o sensor TM foram (2/4, e 3/7) para espodumenas e lepidolites, cookeite, ambligonite, montebrasite, respetivamente) e (7/6) para minerais de argila. Uma vez que as áreas de prospeção apresentam altos índices de minerais alterados, ambas tiveram resultados aceitáveis nas deteções em ocorrências conhecidas.

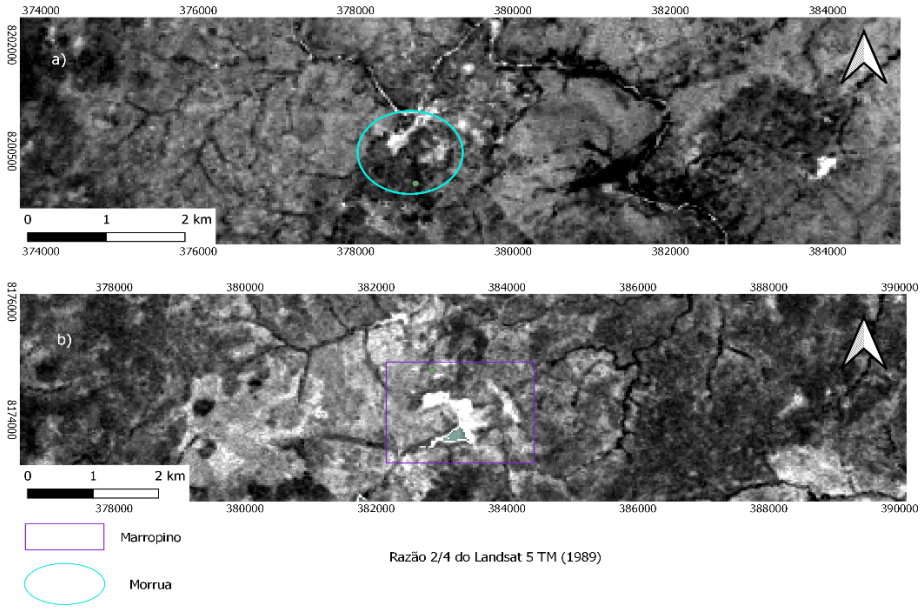


Fig.100: Razão (2/4) do sensor TM (1989) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); a) Pegmatitos de Morrua; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara muito intensa; b) Pegmatitos de Marropino, ricos em mineralizações de lítio; os pegmatitos aparecem a cinza-claro e os corpos de água a preto.

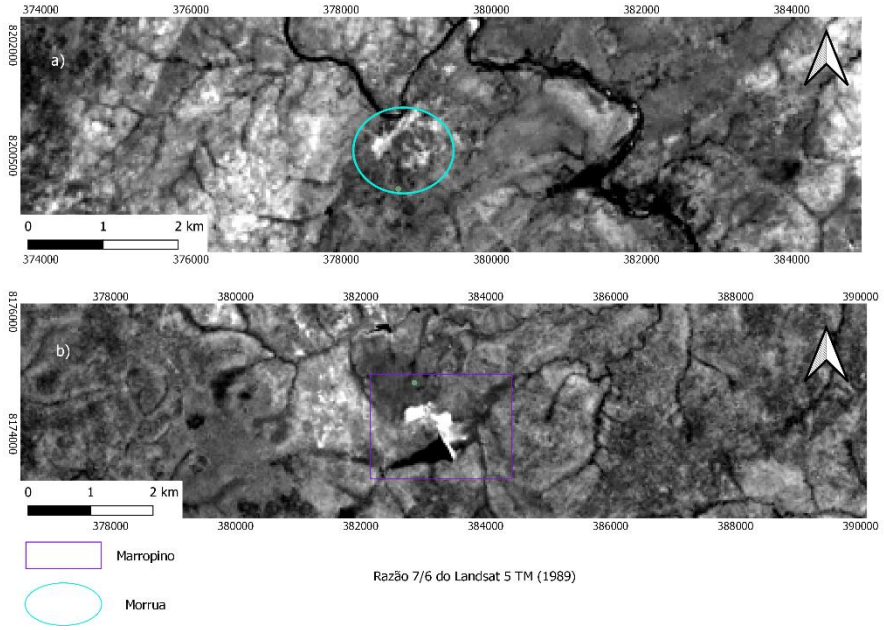


Fig. 101: Razão (7/6) do sensor TM (1989) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); a) Pegmatitos de Morrua; as mineralizações de lítio aparecem aa cor cinza-clara muito intensa; b) Pegmatitos de Marropino, ricos em mineralizações de lítio; os pegmatitos aparecem a cinza-claro e os corpos de água em preto.

8.6.4. Sentinel 2

Para as imagens Sentinel 2 A foram analisadas as razões sugeridas por (Cardoso-Fernandes *et al.*, 2019) (3/8) para a identificação de espodumena (Fig. 102-Fig. 106). Como propostas de prospeção, foram sugeridas as razões (8/12 e 7/11) para minerais de lítio.

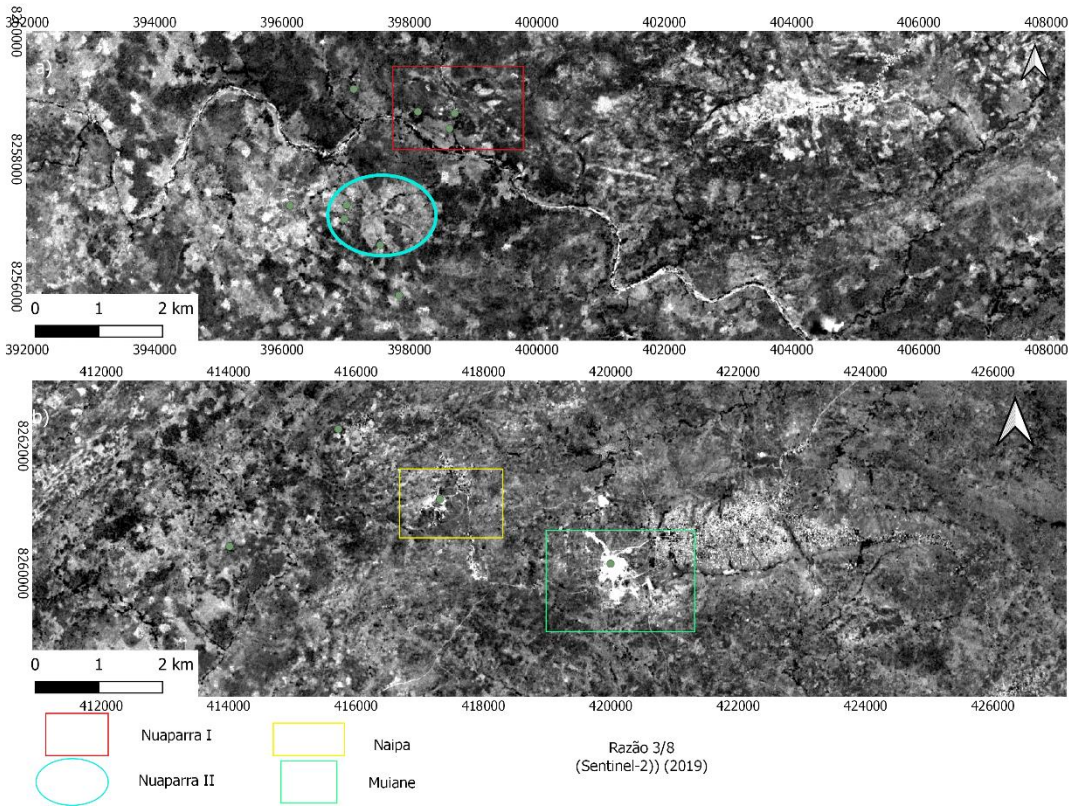


Fig. 102: Razão (3/8) do sensor MSI (2019) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); Pegmatitos de Muiane e Naipa; as mineralizações de lítio aparecem aa cor cinza-claro muito intensa, apresentando um sinal positivo; Pegmatitos de Nuaparra I e Nuaparra II; as mineralizações não são visíveis apresentando um sinal negativo.

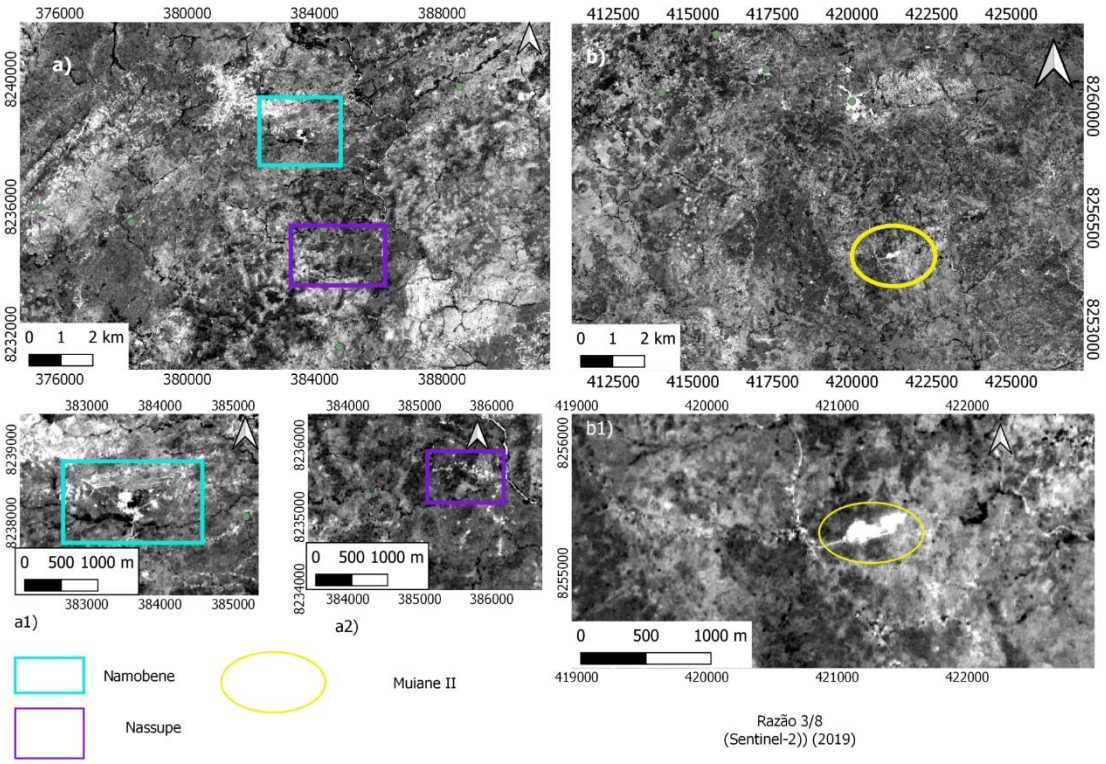


Fig. 103: Razão (3/8) do sensor MSI (2019) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); Pegmatitos de Muiane II, Namobene e Nassupe; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara muito intensa apresentando um sinal positivo.

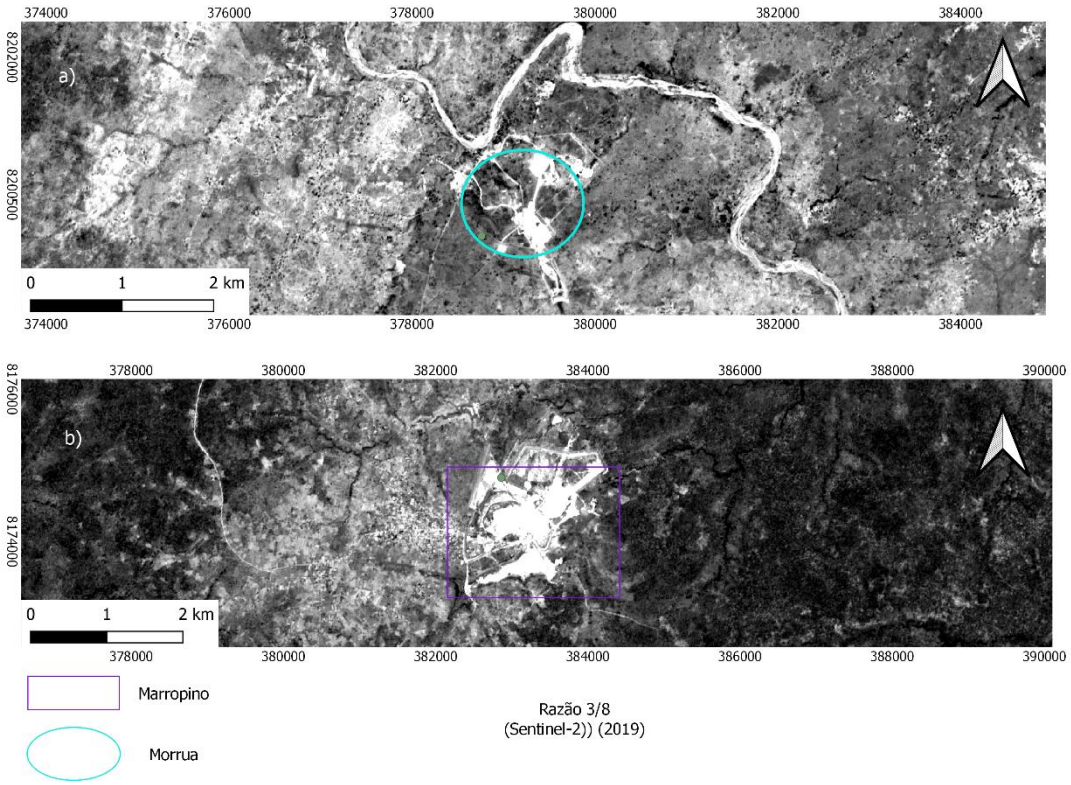


Fig. 104: Razão (3/8) do sensor MSI (2019) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); Pegmatitos de Morrua e Marropino; ambas as minas apresentam mineralizações de lítio e aparecem a cor cinza-clara muito intensa apresentando um sinal positivo.

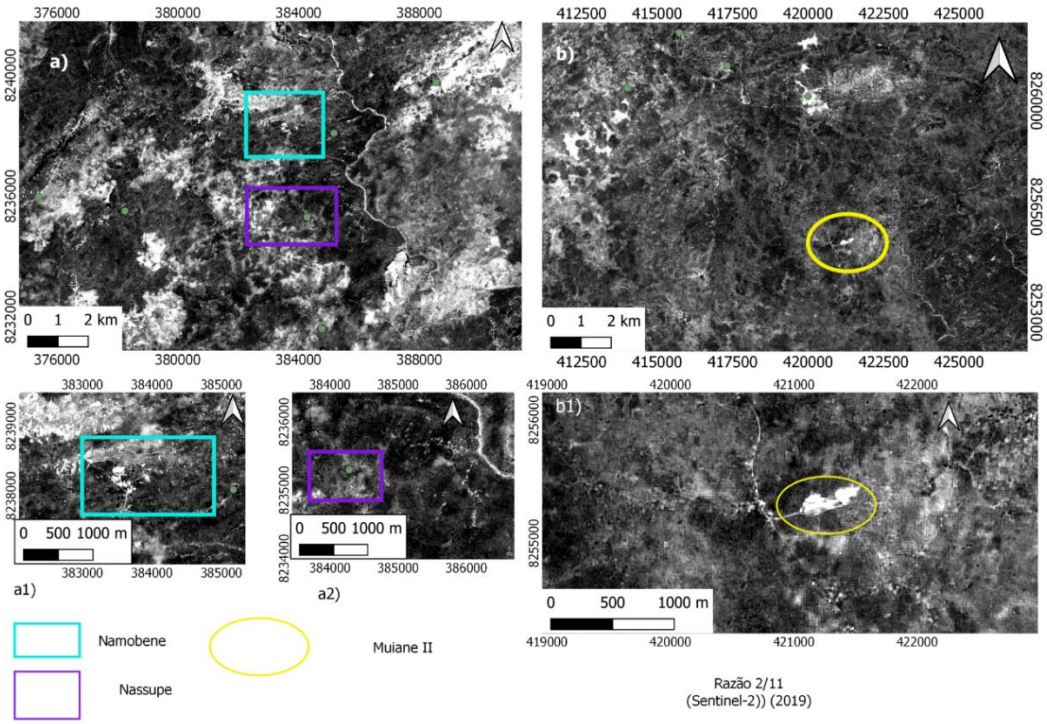


Fig. 105: Razão (2/11) do sensor MSI (2019) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); pegmatitos de Muiane II, Namobene e Nassupe; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara muito intensa apresentando um sinal positivo.

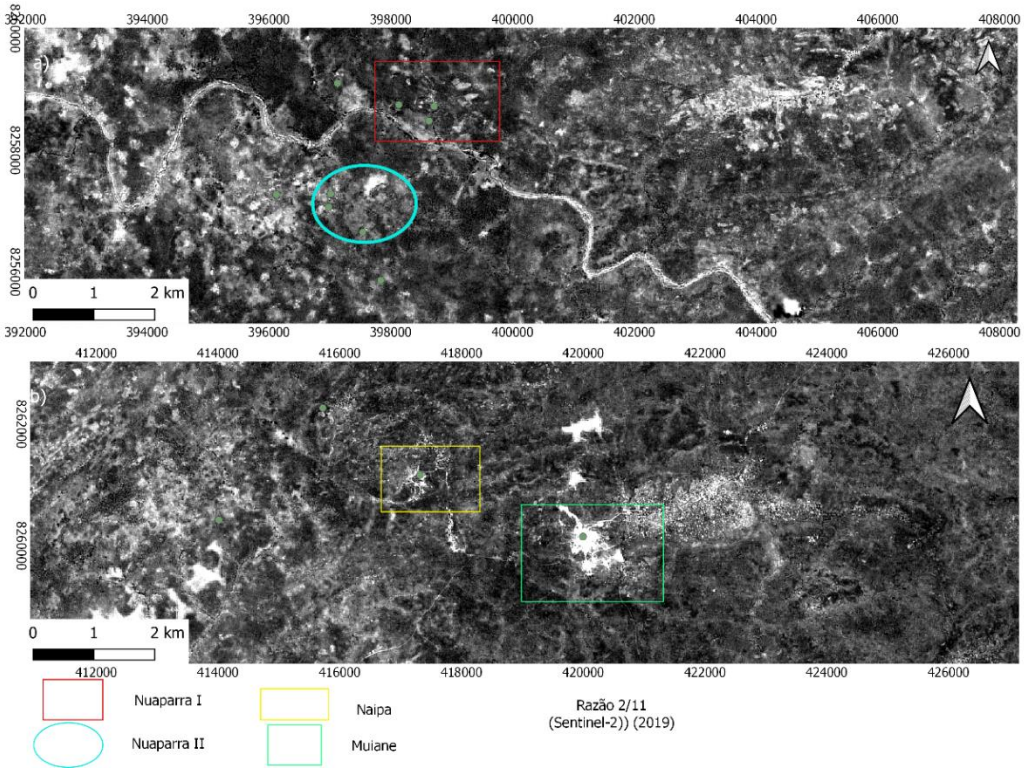


Fig. 106: Razão (2/11) do sensor MSI (2019) para prospeção de minerais de lítio (Espodumenas); Pegmatitos de Muiane e Naipa; as mineralizações de lítio aparecem a cor cinza-clara muito intensa apresentando um sinal positivo; pegmatitos de Nuaparra I e Nuaparra II; as mineralizações são pouco visíveis, principalmente Nuaparra II, apresentando um sinal positivo

Os resultados das proporções 2/11 (dos comprimentos do Visível e SWIR) com uma resolução espacial de 10 m e 20 m/píxel são enfatizados pelas áreas brilhantes onde se concentram diferentes tipos de óxidos e hidróxidos ou concentrações anómalas de outros compostos. Nos três sensores há uma clara diferença de composição entre os pegmatitos. Dependendo da extensão, alguns apresentam uma menor refletância.
Nas imagens do Landsat 5, a refletância dos pegmatitos foi menor, comparando com as Landsat 8, ASTER e Sentinel 2. De um modo geral, os pegmatitos de Muiane, Marropino e Morrua apresentam alta refletância, localizando-se no domínio LCT.

8.7. Caraterização Espectral

A caraterização espectral qualitativa consistiu na divulgação de análise de 6 amostras (Tabela 40) de um lote de 18 amostras provenientes da região de Alto Ligonha (Muiane e Naipa), a partir do Espetroradiómetro de refletância, fabricado pela Analytical Spectral Devices (ASD) (ASD INC FIELDSPEC® 4), com um alcance de deteção de 350nm-2500 nm (VNIR, SWIR). Para cada amostra analisada, foi necessário realizar a média dos 5 espectros, a partir de um acumulado de 485 espectros das amostras de Muiane e 180 espectros das amostras de Naipa (vide a Tabela 4 -Tabela 7). Os espectros foram produzidos a partir do ENVI 4.8 e o Spectragryph- optical spectroscopy software.

As descrições espectrais das 6 amostras dos minerais estudados são:

As turmalinas visualizam-se na região do SWIR (Vide a Fig 107-Fig 108), duas feições de absorção maiores próximas a 2200 nm e 2300 nm, e uma feição menor próxima a 2240-2250 nm, por vezes em torno de 1430 nm e outra de menor intensidade próxima a 1570 nm, coincidindo com as abordagens de (Clark *et al.*, 1990; Silva, 2009), por vezes com caraterísticas semelhantes do caulinos (Ghosh, 1978). A variedade de turmalina identificada foi a schorlite (turmalina preta).

A lepidolite em análise (vide a Fig 109), mostra absorções entre 1400 nm a 2200 nm, apresentando caraterísticas semelhantes da moscovite, com uma banda próxima de 1400 nm devido a presença de OH- e banda muito fraca a 1900 nm, indicando que uma pequena quantidade de água incluída é presente. Outras bandas de absorção ocorrem próximo de 2200 nm, 2350 nm e 2437 nm e bandas fracas a 1330 nm devido à combinação de OH na

sua composição, tais como todos os filossilicatos, e exibindo maioritariamente feições de absorções na região do SWIR (hidroxilo) (Hunt *et al.*, 1973; Hunt and Ashley, 1979). Na faixa do SWIR, todas as feições espectrais são originadas exclusivamente por transições vibracionais relacionadas à presença dos iões OH-, CO_3-, H_2O) (vide a Tabela 41) (Hunt *et al.*, 1973; Hunt and Ashley, 1979; Gaffey, 1985; Gupta, 2017).

A análise espectroscópica da cunzite (gema de espodumena, uma piroxena e principal fonte de lítio), amostra com o código (KN), mostra absorções desde 530nm, 1980nm e 2320nm (Fig 110). Apresentando uma queda acentuado na faixa do visível (azul), com evidencias de água (1400-1900 nm), e à combinação com OH, próximo dos 2200 nm (Hunt *et al.*, 1973; Clark *et al.*, 1993). Estas caraterísticas podem ser devidas às ocorrências de caulinos, no local em que fora recolhido as amostras, sendo depositados em microestruturas.

As moscovites (amostra com o código MM), caraterizadas por uma acentuada feição de absorção espectral que varia de posição entre 1400nm e 2228 nm e pelas duas absorções também intensas que ocorrem entre 2340 nm e 2430 nm, relacionadas à ligação molecular Al- OH (Fig 111). Observa-se uma absorção menos acentuada nos 1850 nm, devido à presença de água.

A amostra com o código FM1 (microclina e albite), antes designadas por cleavelandite, não apresentam feições diagnósticas na região 350-2500 nm (vide a Fig 112) pelo que a maioria das feições identificadas dizem respeito a impurezas, tendo aspectos da ortóclase que desenvolve feições características quando contém amónio na sua composição. Uma análise rápida da amostra FM02 (vide a Fig 113) evidencia uma feição da água muito arredondada provavelmente indicando que existem inclusões fluídas. Já a amostra FM04 (vide a Fig 114) mostra feições típicas do grupo da kandite, possivelmente kaolinite ou halloysite, mas só dá para ter a certeza depois de remover o contínuo dos espectros.

No geral, a albite exibe caraterísticas espetrais especificas no VNIR e SWIR, apresentando absorção nas faixas espetrais entre os 1730-2140 nm.

Tabela 40: Composições químicas dos principais minerais caracterizados espectralmente.

Mineral	**Composição química**	**Código da amostra**
Cunzite	$LiAl\ (SiO_3)_2$	KN
Lepidolite	$K\ (Li,\ Al,Rb)_2(Al,Si)_4O10(F,\ OH)$	LN-LM
Cleavelandite (albite)	$Na\ (AlSi_3O_8)$	FM
Turmalina (Schorl)	$NaFe^{2+}{}_3Al_6Si_6O_{18}(BO_3)_3(OH)_4$	PN1
Moscovite	$KAl_2(Si_3Al)\ O_{10}(OH,F)_2.$	MM

Tabela 41: Principais bandas de absorção relacionadas à presença de iões ou moléculas em minerais

Íões/moléculas	**Principais bandas de absorção (µm)**	**Fonte**
Mg-OH	~2,200-2,300	(Hunt and Ashley, 1979; Gupta, 2017)
OH	~1,400, ~1,550 e ~1,750-1,850	(Gupta, 2017)
H_2O	~1,400 e ~1,900	(Gupta, 2017)
Al-OH	~2,160-2,220	(Hunt and Ashley, 1979; Gupta, 2017)
CO_3	~,870; 1,990 e 2,155, 2,300-2,350	(Gupta, 2017)
Fe-OH	~2,230-2,295	(Gupta, 2017)
Fe-Mg	0.9-1.5	(Gaffey, 1985; Gupta, 2017)

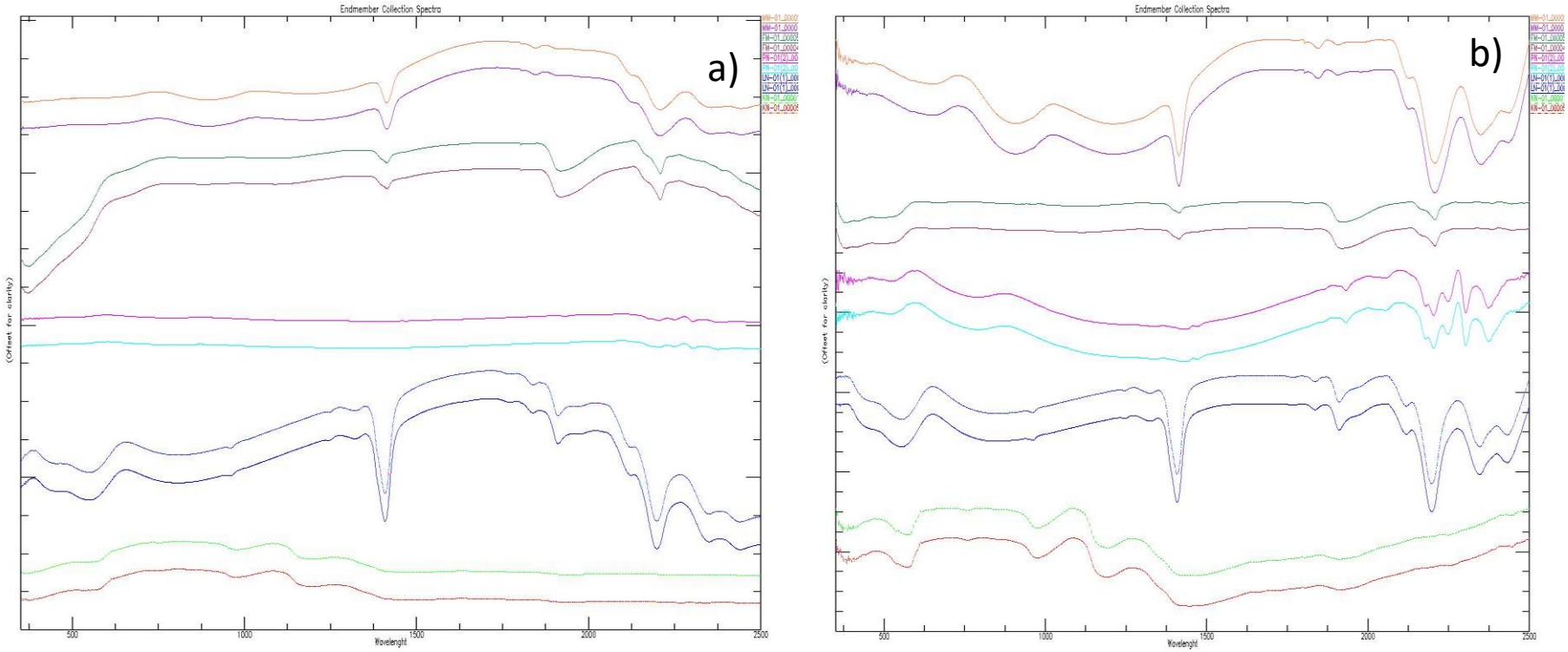


Fig 107: Assinaturas espectrais das amostras de minerais analisados (a), com as respetivas curvas de refletância com o continuo removido (b), produzidas a partir do ENVI.

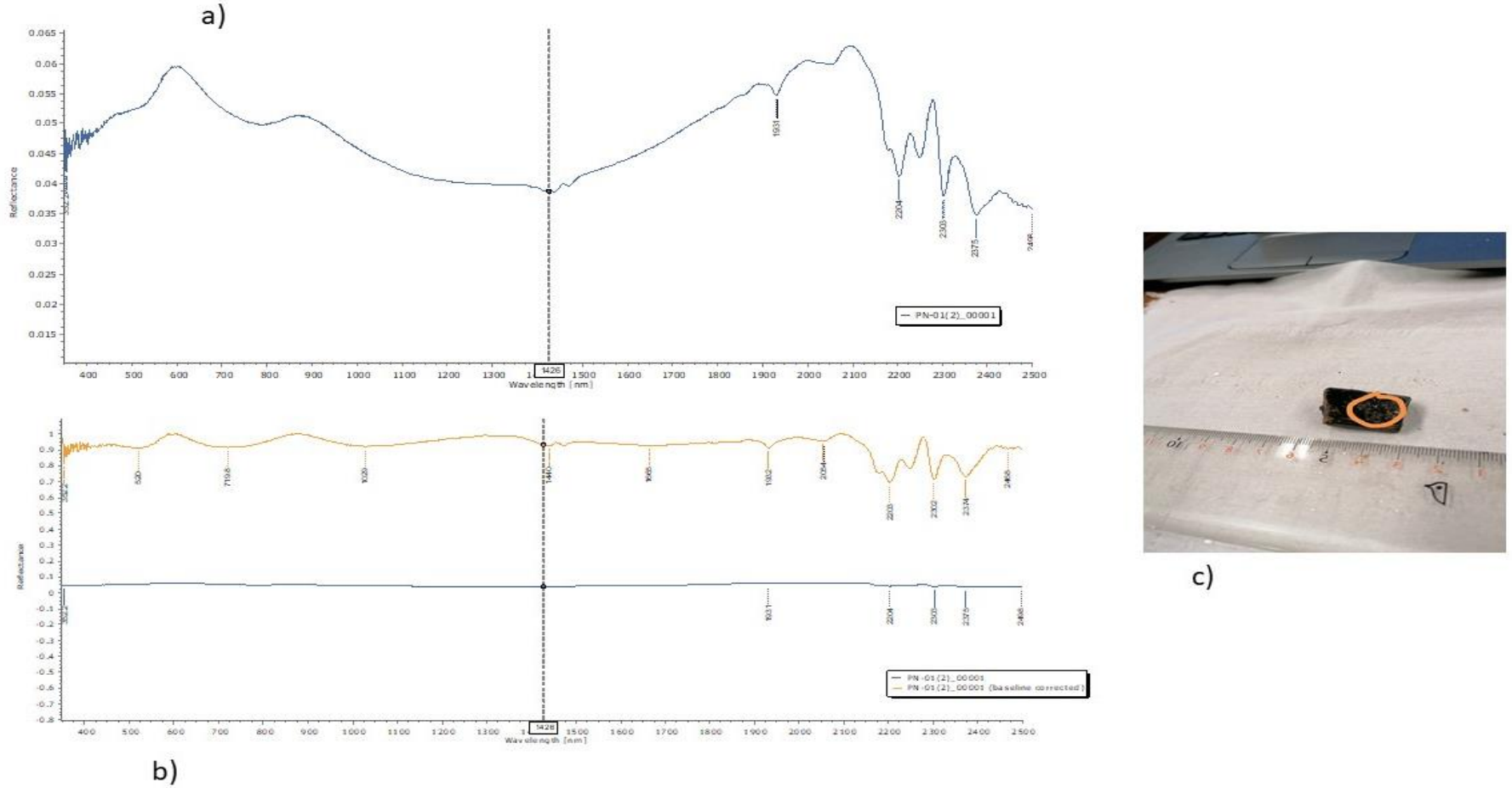


Fig 108: Espectro de refletância da amostra com o código PN1(2), onde a) o espectro normal da turmalina; b) espectro da turmalina com base na linha de base (basiline adaptive); c) amostra de mão da turmalina preta.

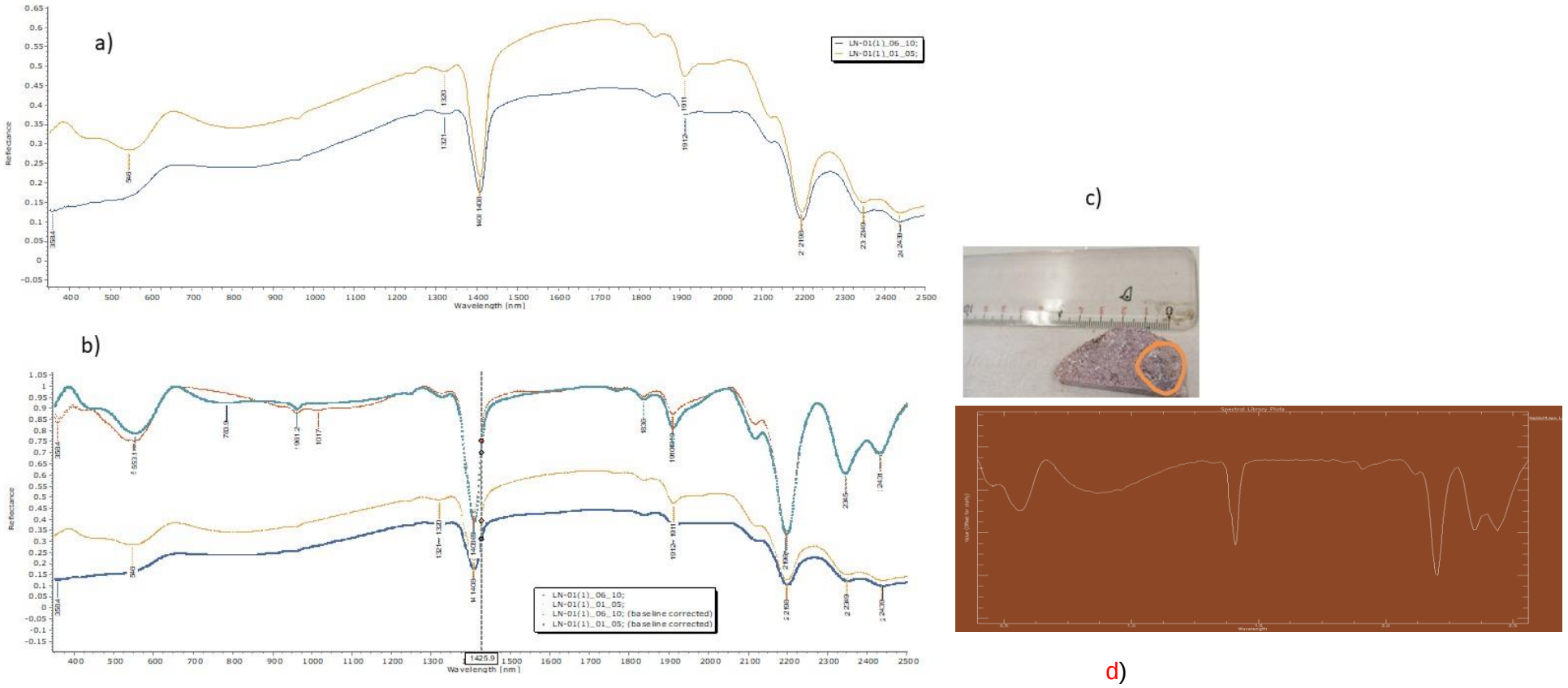


Fig 109: Espectro de refletância da amostra com o código LN1, onde a) o espectro normal da lepidolite; b) espectro da lepidolite com base na linha de base (basiline adaptive); c) amostra de mão da lepidolite; d) linha de remoção do Continuo da lepidolite, extraído na biblioteca da USGS (Clark et al., 2007)

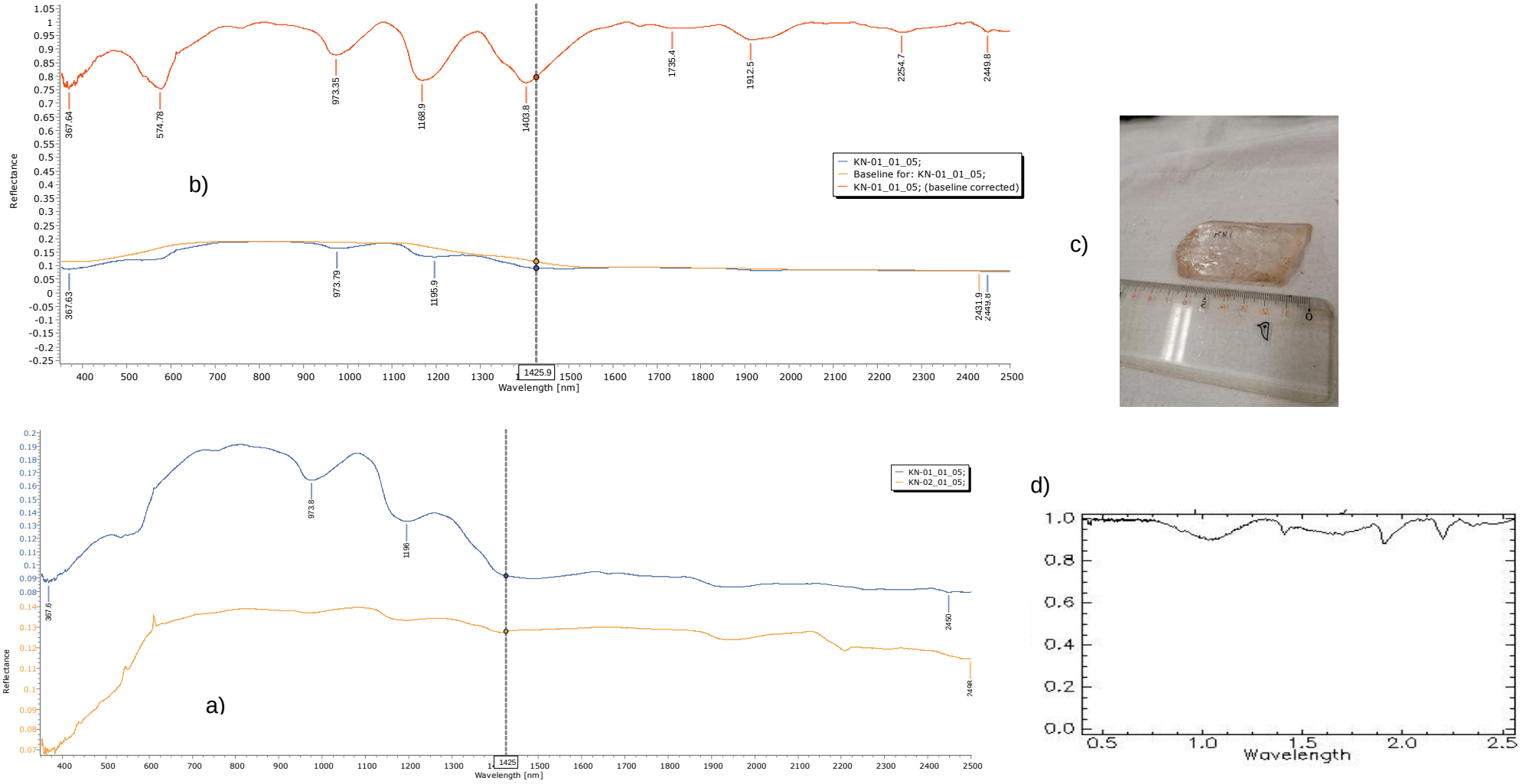


Fig 110:Espectro de refletância da amostra com o código KN, onde a) o espectro normal da cunzite; b) espectro da cunzite com base na linha de base (basiline adaptive); c) amostra de mão da cunzite, d) Espetro da espodumena, com a Linha de remoção do Continuo, extraído na biblioteca espectral da USGS.

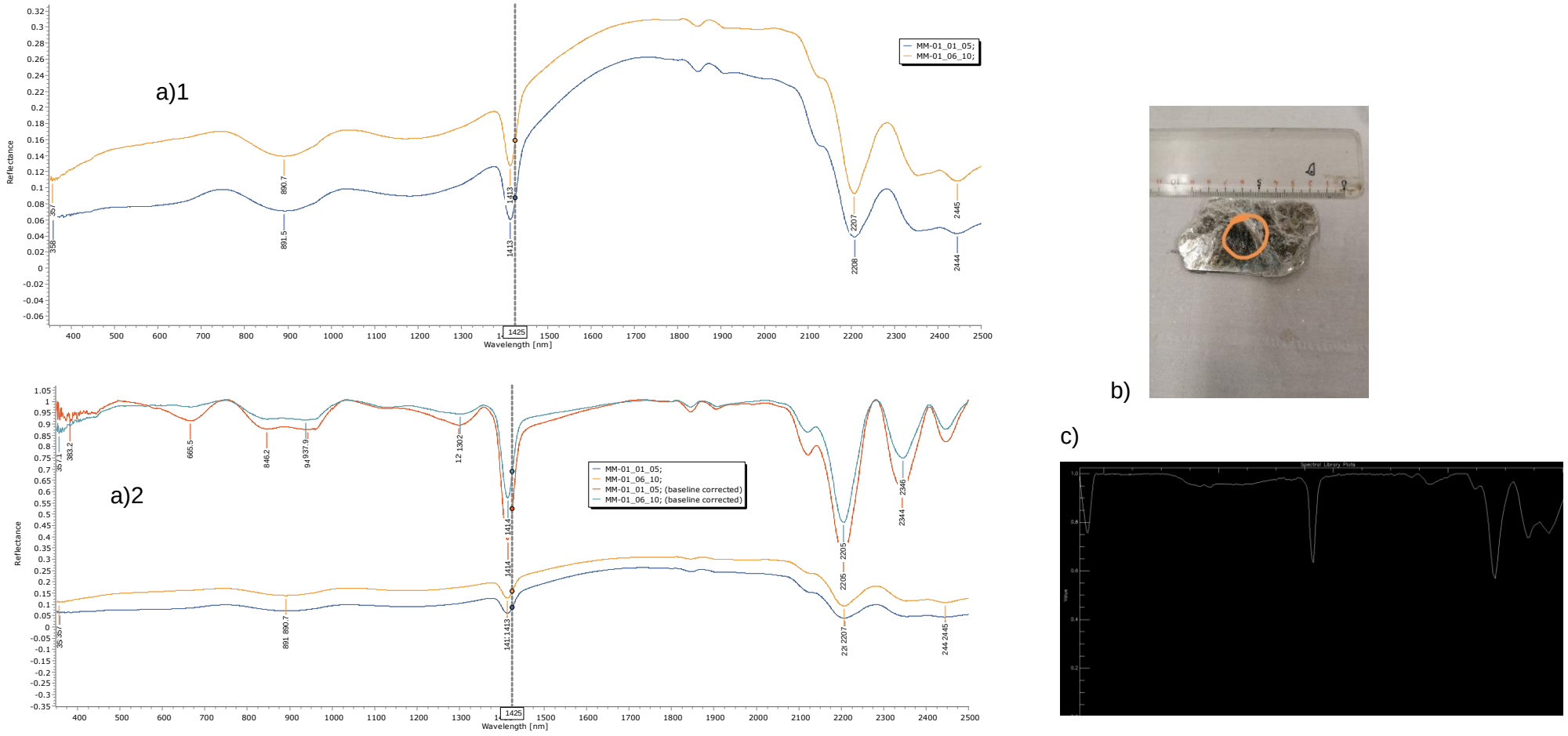
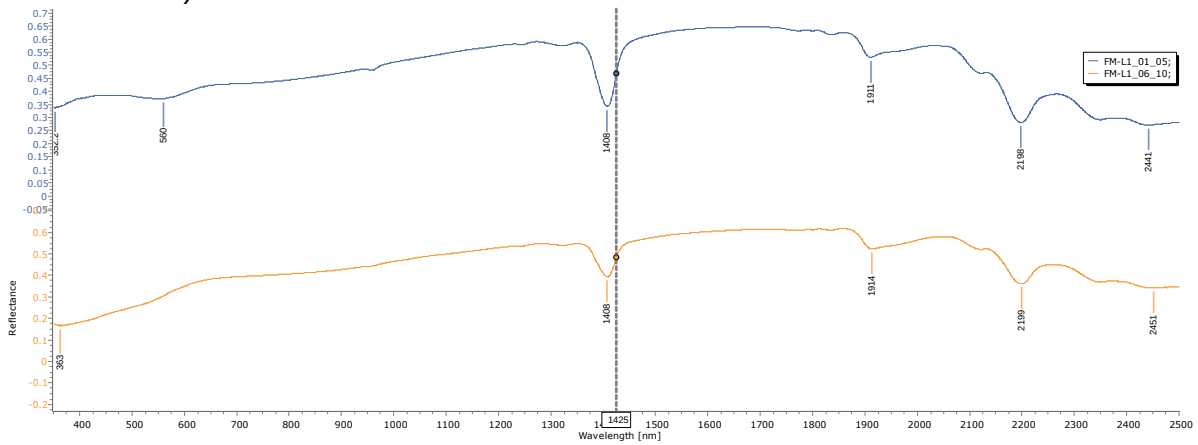


Fig 111: Espectro de refletância da amostra com o código MM, onde a)1 o espectro normal da moscovite; a)2 espectro da moscovite com base na linha de base (basiline adaptive); b) amostra de mão da moscovite; c) Linha de remoção do Continuo da moscovite, extraído na biblioteca da USGS (Kokaly; et al., 2017)

a)



b)



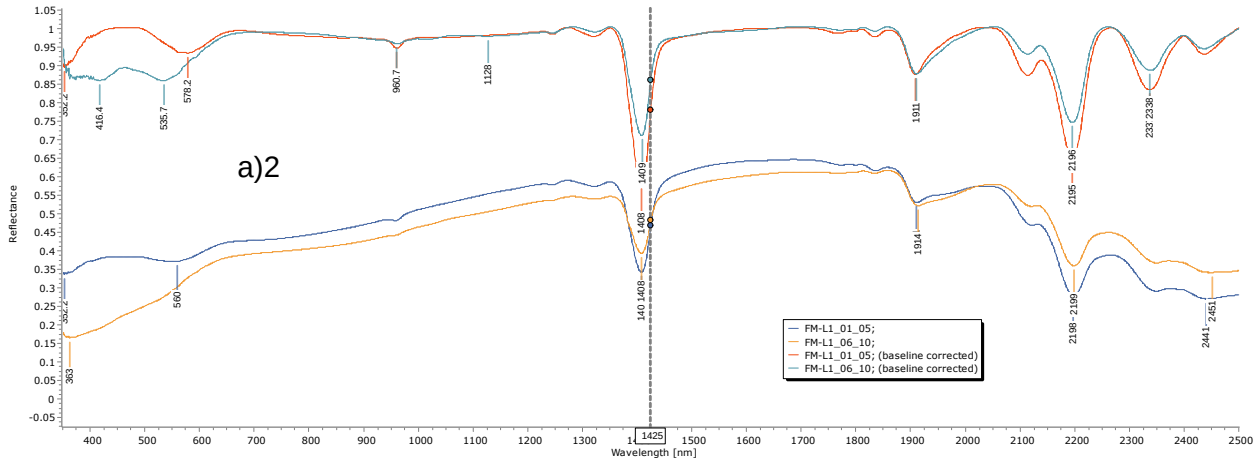
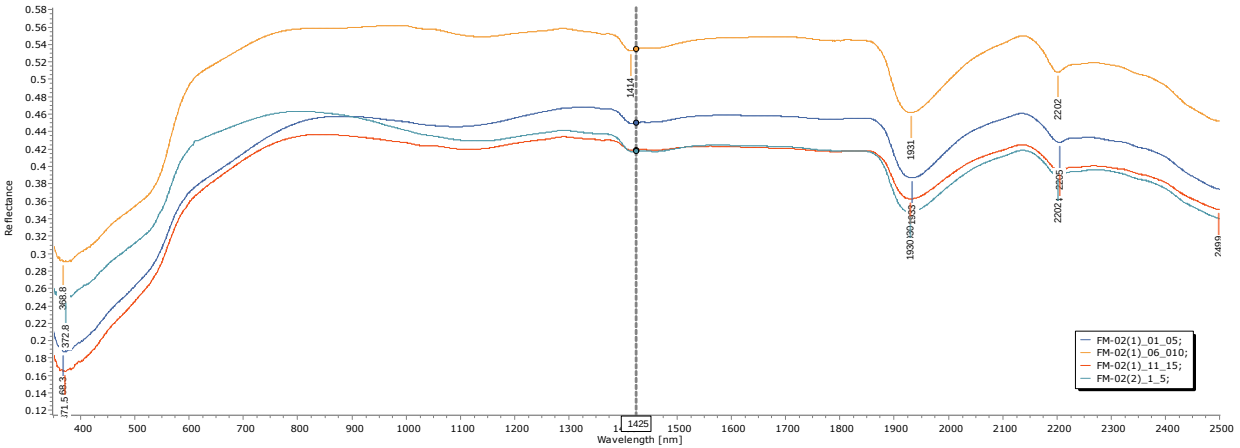


Fig 112:Espectro de refletância da amostra com o código FM1, onde a)1 o espectro normal da albite; a)2 espectro da albite com base na linha de base (basiline adaptive); b) amostra de mão da albite.

a)1



b)



a)2

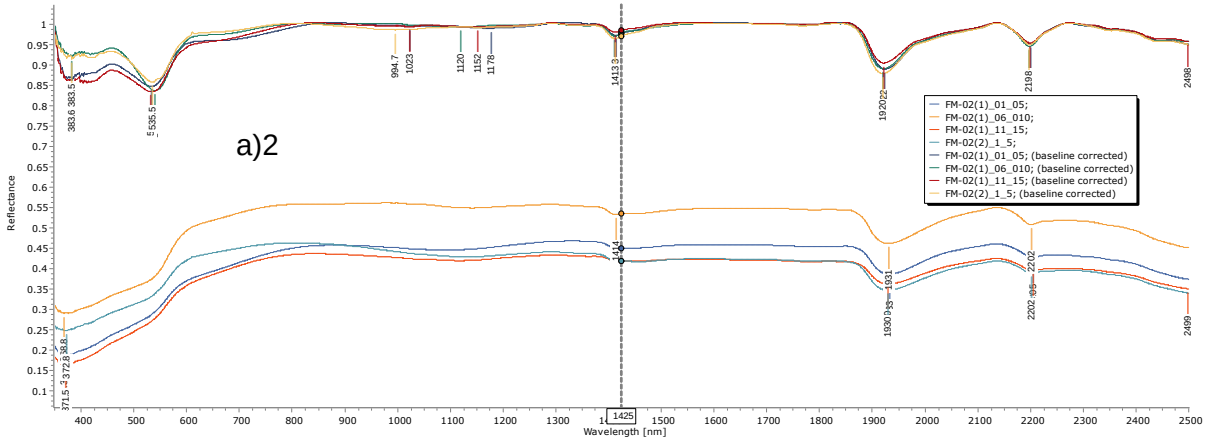


Fig 113: Espectro de refletância da amostra com o código FM2, onde a)1 o espectro normal da albite; a)2 espectro da albite com base na linha de base (basiline adaptive); b) amostra de mão da albite.

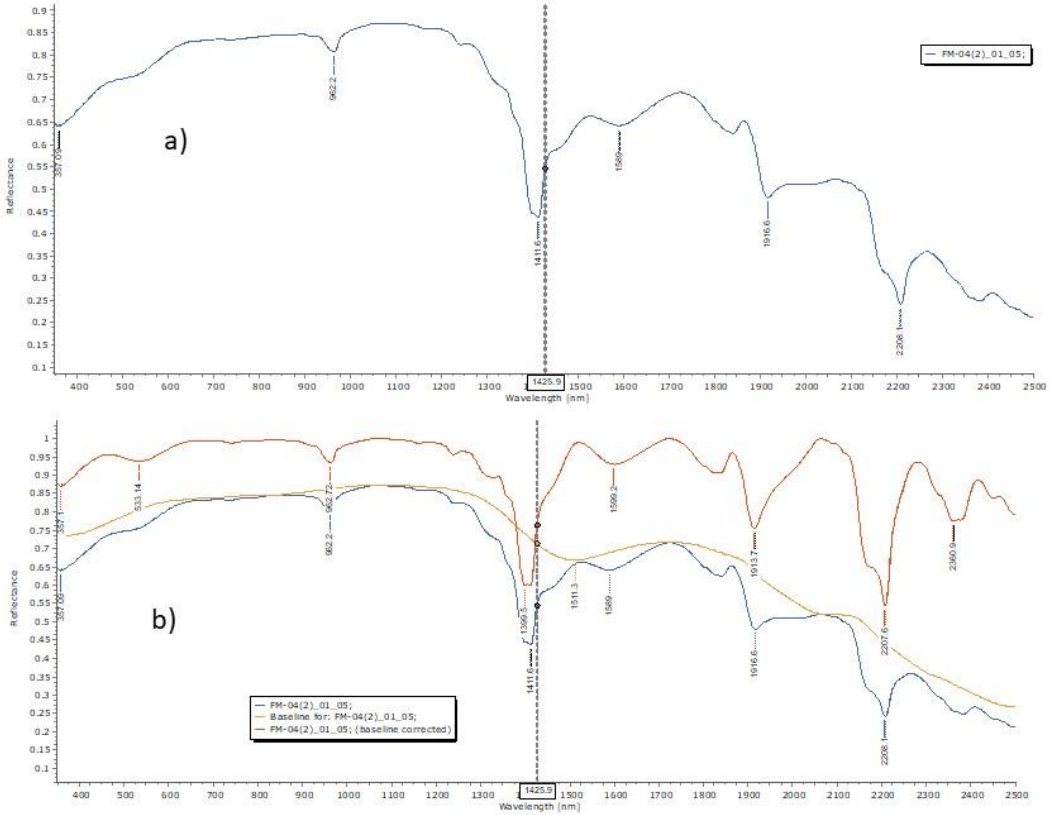


Fig 114: Espectro de refletância da amostra com o código FM4, onde a)1 o espectro normal da albite; a)2 espectro da albite com base na linha de base (basiline adaptive); b) amostra de mão da albite

8.8. Algoritmos de classificação supervisionada e Machine Learning

Para a classificação dos pegmatitos (Muiane, Naipa, Marropino e Morrua) foi criado um ficheiro de amostras de treino para cada data, com apenas cinco classes, que são: pegmatitos, que correspondem à fusão de diversos pegmatitos, utilizados na zona piloto de cada data; águas interiores, que correspondem a lagoas e espaços de acumulação de poços de água; solos expostos (solos nus ou desprotegidos); zona habitacional que corresponde a áreas com construções e habitacionais, algumas precárias; e por último a vegetação, que corresponde a arbórea e herbácea, isto para o para SCP; e quatro classes para o ENVI, sendo as seguintes classes (pegmatitos, vegetação, águas interiores, solos expostos-zona habitacional) havendo uma junção entre zona habitacional e solos expostos.

A classificação foi realizada utilizando a imagem compósita cortada resultante do clip das áreas onde se encontram localizadas os pegmatitos, recorrendo aos seguintes algoritmos de classificação supervisionada: Distância mínima (MinD) e Spectral Angle Mapper (SAM), Maxverossimilhança (Maxver), e SVM. Foram utilizados para a zona de treino (pegmatitos de Muiane), obtendo-se uma imagem final classificada primeiro com a MinD, e seguidamente os outros algoritmos. O procedimento foi seguidamente repetido para as restantes datas. Os resultados da classificação dos pegmatitos são seguidamente apresentados.

8.8.1. Sentinel 2 A (Pegmatitos de Muiane e Naipa)

Para a imagem (T37LDC_20191005T071739, EPSG:32737 - WGS 84 / UTM zone 37S) foram usados dois softwares diferentes. Para os algoritmos (Maxver e SVM) foi usado o ENVI. Para os algoritmos (MinD e SAM) foi usado o QGIS (SCP). Para o algoritmo SVM, foram analisadas quatro classes (pegmatitos, águas interiores, solos expostos junto às zonas de habitação e, por fim, as florestas) e obteve-se 933 pixeis para os pegmatitos, 414 pixeis para águas interiores, 1034 pixeis como solos expostos e zonas de habitação, e por fim 2873 pixeis para florestas. As estatísticas de precisão da classificação estão resumidas na (

Tabela 43) (Fig. *115*). A exatidão geral (overall accuracy- OA) da classificação foi 99,45% e o Coeficiente Kappa foi de 0,99.

Para o algoritmo Maxver, usou-se as mesmas classes que se usou no SVM, e obteve-se 1365 pixeis para os pegmatitos, 341 pixeis para águas interiores, 1093 pixeis como solos expostos e zonas de habitação, e por fim 2164 pixeis para florestas. A exatidão geral (AO) e o índice Kappa foram 0,98 e 98,7% (Tabela *44*) (Fig. 116), respetivamente.

Existem vários trabalhos que comparam os resultados do algoritmo SVM e Maxver, por exemplo (Mondal *et al.*, 2012; Deilmai *et al.*, 2014), em que o método SVM fornece melhores resultados que o Maxver. O índice Kappa permitiu comparar as matrizes dos classificadores de acordo com o Congalton e Green.(Congalton and Green, 2009)

Foram aplicadas outras técnicas de deteção remota (Fig 118 e Fig 119) com objetivo de diferenciar os pegmatitos das outras classes, sendo destacadas as assinaturas espetrais. O processo de classificação seleciona e atribui a identificação da classe com uma assinatura espetral mais próxima de cada píxel individual dentro de uma imagem. O processo de classificação atribuirá a classe de melhor ajuste, como os pegmatitos, e água, e uma classificação incorreta de pixeis entre a zona habitacional e solos expostos.

Para o algoritmo (MinD) foram analisadas cinco classes (pegmatitos, águas interiores, solos expostos, zonas de habitação e por fim as florestas) e obteve-se 1292 pixeis para os pegmatitos, 5427 pixeis para águas interiores, 3245 pixeis como solos expostos e zonas de habitação 58923, e por fim 875110 pixeis para vegetação. Tendo como precisão global 96.7% e índice Kappa 0.8, como nível de concordância, sendo quase perfeito (Fig. 117)(Tabela 46). Para o algoritmo SAM foram analisadas as mesmas classes propostas no Maxver (pegmatitos, águas interiores, solos expostos, zonas de habitação e por fim as florestas) e obteve-se 1849 pixeis para os pegmatitos, 960 pixeis para águas interiores, 652026 pixeis como solos expostos e zonas de habitação 11827, e por fim 191304 pixeis para vegetação. Obteve-se como precisão global 81.9% e índice Kappa 0.6, ou seja, um nível de concordancia moderado (Fig. 120) (Tabela 47).

Tabela 42: Valores de precisão global, índice Kappa da imagem Sentinel 2 A (Pegmatitos de Muiane e Naipa).

Algoritmos	**Precisão global**	**Índice Kappa**	**Nível de concordância**
MinD	96.7793	0.8	Quase perfeito
SAM	81.8973	0.6	Moderado
Maxver	99.8930	0.9	Perfeito
SVM	99.99	0.9	Perfeito

Tabela 43: Matriz de confusão para a imagem Sentinel 2 A (SVM) (Pegmatitos de Muiane e Naipa).

Class	Ground Truth (Píxeis)				
	Pegmatitos	Águas interiores	Solos expostos e zonas de habitação	Floresta	Total
Unclassified	0	0	0	0	0
Pegmatitos	933	0	8	0	941
Águas interiores	0	414	0	0	414
Solos nus e zonas de habitação	16	0	1034	0	1050
Floresta	0	0	5	2873	2878
Total	946	414	1047	2873	5283

Class	Ground Truth (Percent)				
	Pegmatitos	Águas interiores	Solos expostos e zonas de habitação	Floresta	Total
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pegmatitos	98.31	0.00	0.76	0.00	17.81
Águas interiores	0.00	100.00	0.00	0.00	7.84
Solos nus e zonas de habitação	1.69	0.00	98.76	0.00	19.88
Floresta	0	0	0.48	100.00	54.48
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)			
	Comissão	Omissão	Prod. Acc	User Acc
Pegmatitos	0.85	1.69	98.31	99.15
Águas interiores	0.00	0.00	100.00	100.00
Solos nus e zonas de habitação	1.52	1.24	98.76	98.48
Floresta	0.17	0.00	100.00	99.83

Tabela 44: Matriz de confusão para a imagem Sentinel 2 A (Maximoverssimelhança)

Class	Ground Truth (Píxeis)				
	Pegmatitos	Águas interiores	Solos expostos e zonas de habitação	Floresta	Total
Unclassified	0	0	0	0	0
Pegmatitos	1365	1	7	1	1374
Águas interiores	0	341	5	0	346
Solos nus e zonas de habitação	0	44	1093	7	1144
Floresta	0	0	0	2164	2164
Total	1365	386	1105	2172	5028

Tabela 45: Matriz de confusão para a imagem Sentinel 2 A (Maxima verssimelhança)

Class	Ground Truth (Percent)				
	Pegmatitos	Águas interiores	Solos expostos e zonas de habitação	Floresta	Total
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pegmatitos	100.00	0.26	0.63	0.05	27.33
Águas interiores	0.00	88.34	0.45	0.00	6.88
Solos nus e zonas de habitação	0.00	11.40	98.91	0.32	22.75
Floresta	0.00	0.00	0.00	99.63	43.04
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)			
	Comissão	Omissão	Prod. Acc	User Acc
Pegmatitos	0.66	0.00	100.00	99.34
Águas interiores	1.45	11.66	88.34	98.55
Solos nus e zonas de habitação	4.46	1.09	98.91	95.54
Floresta	0.00	0.37	99.63	100.00

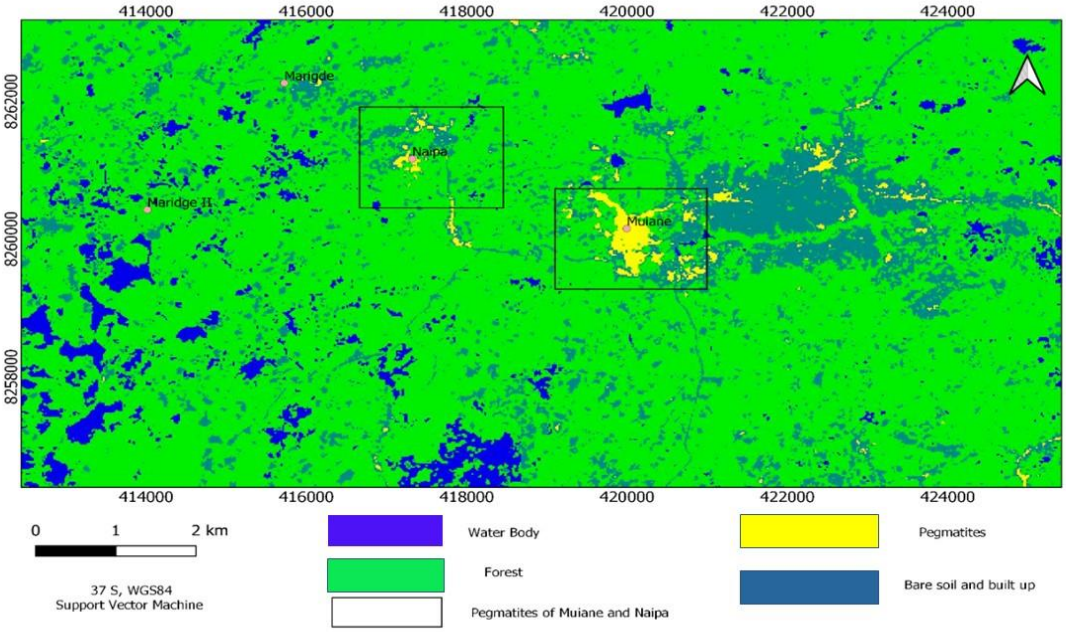


Fig. 115: Classificação da imagem Sentinel 2 A (SVM) no pegmatito de Muiane e Naipa

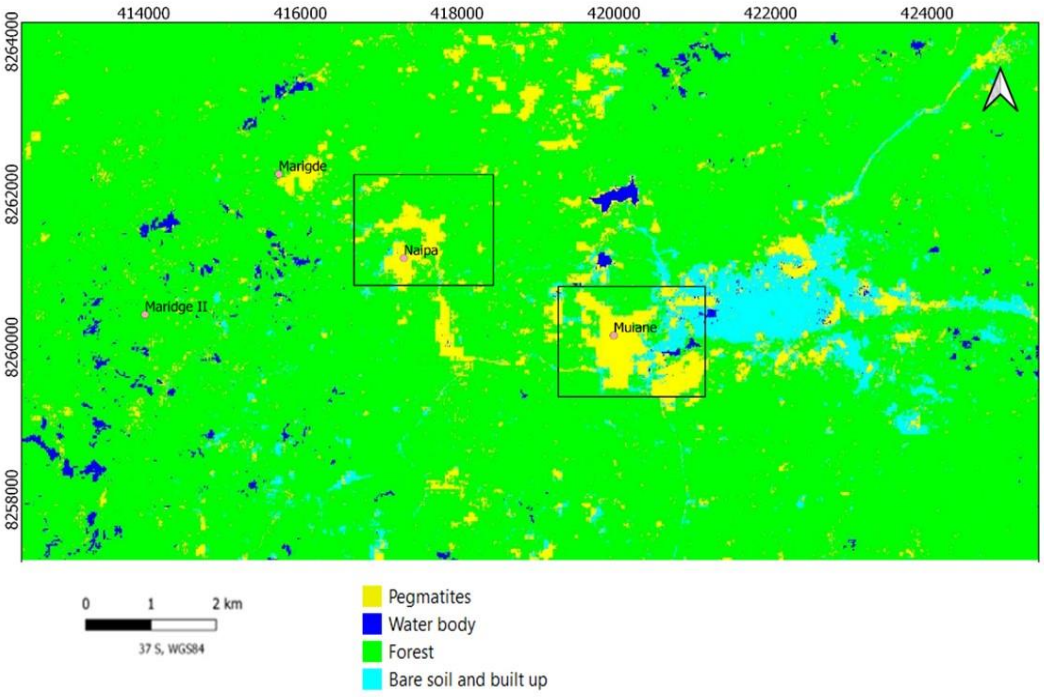


Fig. 116: Classificação da imagem Sentinel 2 A (Maxver) no pegmatito de Muiane e Naipa.

Tabela 46: Matriz de confusão para a imagem Sentinel 2 A (MinD) (Pegmatitos de Muiane e Naipa).

Classes	PG	AI	SE	ZH	VG	Total
Pegmatitos	1292	0	122	0	0	1414
Águas interiores	0	5427	0	0	1922	7349
Solos expostos	0	0	3245	0	0	3245
Zona habitacional	0	0	2786	58923	0	61709
Vegetação	0	0	2	98783	875110	973895
Total	1292	5427	6155	157706	877032	1047612
Precisão do Produtor (PA) %	100.0000	100.0000	52.7214	37.3626	99.7809	
Precisão do Utilizador (UA)%	91.3720	73.8468	100.0000	95.4853	89.8567	
Kappa hat	0.9136	0.7371	1.0000	0.9469	0.3771	
Precisão global	90.1094					
Kappa hat classification	0.5352					

Tabela 47: Matriz de confusão para a imagem Sentinel 2 A (SAM) (Pegmatitos de Muiane e Naipa).

Classes	PG	AI	SE	ZH	VG	Total
Pegmatitos	1849	8	0	207	14	2078
Águas interiores	5	960	0	0	0	965
Solos expostos	0	0	652026	24	0	652050
Zona habitacional	0	0	5676	11827	0	17503
Vegetação	14	1	167408	16289	191304	375016
Total	1868	969	825110	28347	191318	1047612
Precisão do Produtor (PA) %	98.9829	99.0712	79.0229	41.7222	99.9927	
Precisão do Utilizador (UA)%	88.9798	99.4819	99.9963	67.5713	51.0122	
Kappa hat	0.8896	0.9948	0.9998	0.6667	0.4007	
Precisão global	81.8973					
indice Kappa	0.5922					

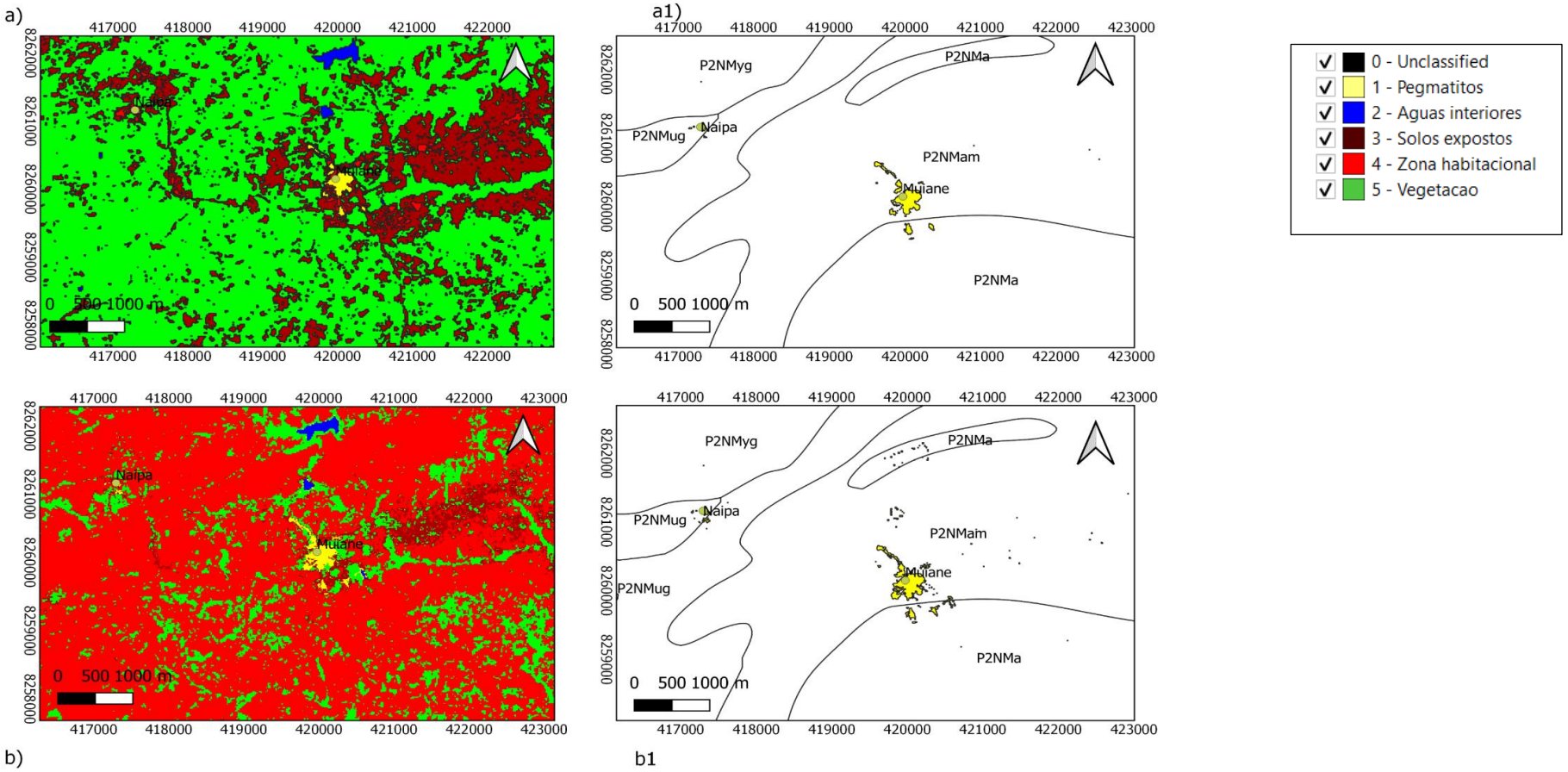


Fig. 117: Classificação da imagem Sentinel 2 (2019) no pegmatito de Muiane (zona de treino); a) resultado usando o algoritmo MinD; a1) integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa; b) resultado usando o algoritmo SAM; b1) integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa.

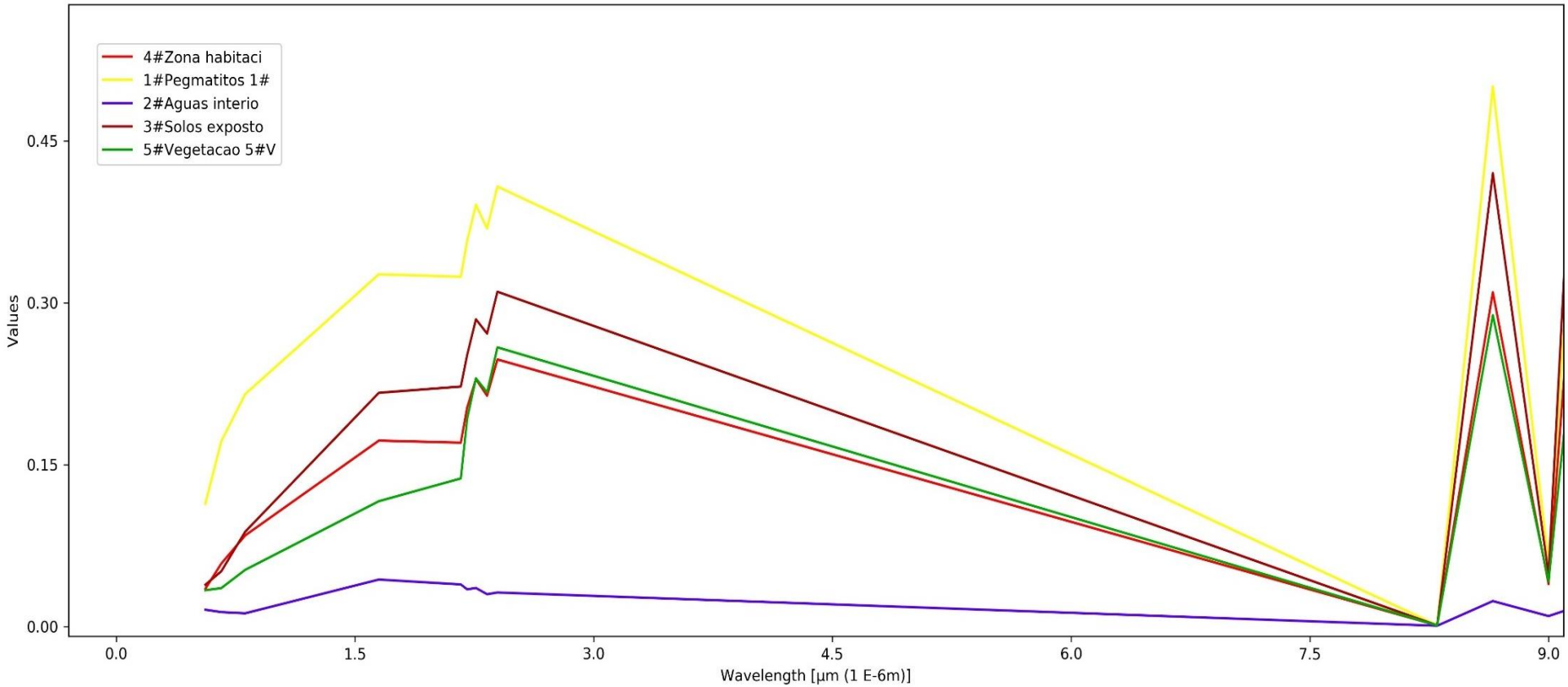


Fig 118: Curva espetral das amostras retiradas em Muiane e Naipa; imagem Sentinel 2 (2019).

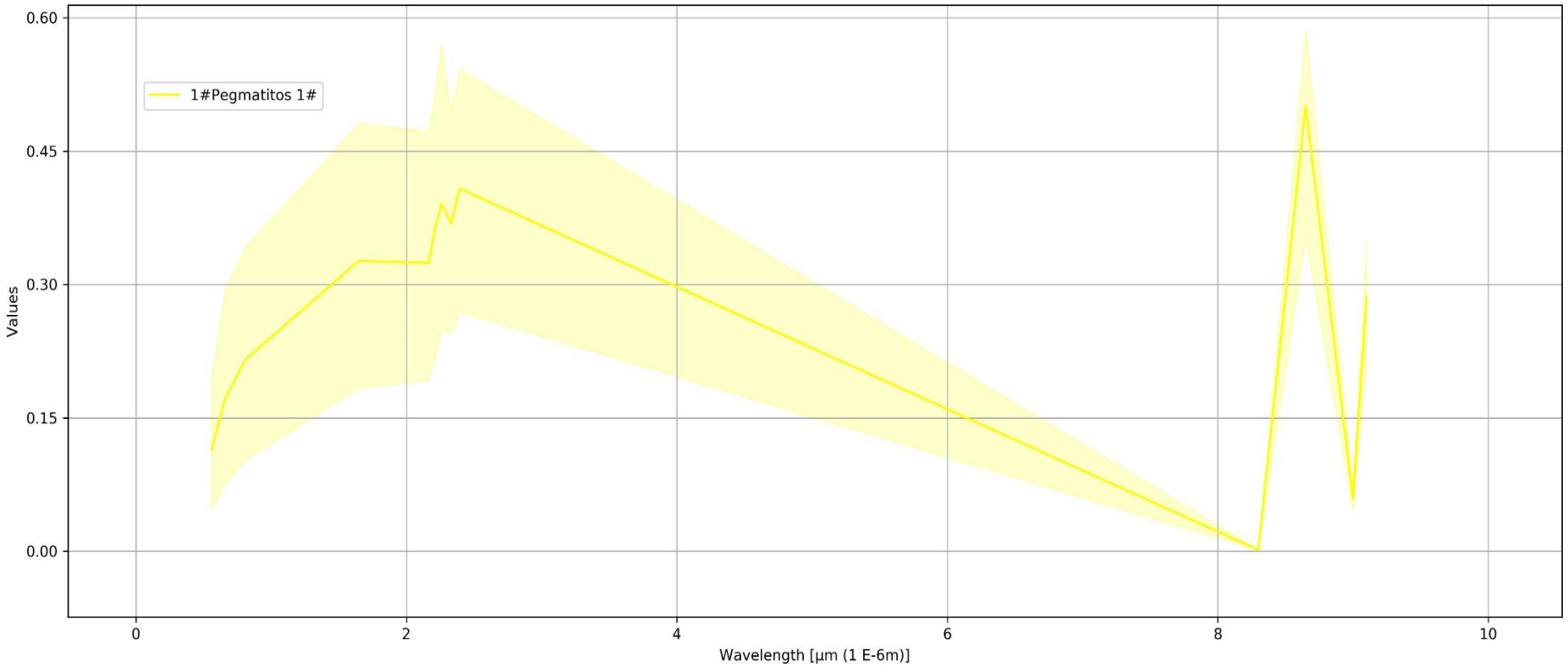


Fig 119: Curva espetral dos pegmatitos de Muiane e Naipa; imagem Sentinel 2 (2019).

8.8.2. Landsat 8 (Pegmatitos de Muiane e Naipa)

Na primeira classificação da imagem Landsat 8, a partir do algoritmo MinD para os pegmatitos de Muiane e Naipa, foram considerados 67 pixeis para os pegmatitos, 550 pixeis para águas interiores, 605 pixeis para solos expostos, 13157 pixeis para zona habitacional, e 98658 pixeis para a vegetação, sendo razoáveis para o uso de treino (Tabela 50). Foi testado o outro algoritmo (SAM) para a mesma área, e considerados 131 pixeis para os pegmatitos, 129 pixeis para águas interiores, 30212 pixeis para solos expostos, 7210 pixeis para habitação e 47147 pixeis para a vegetação (Tabela 49).

Na (Tabela 48), podem ser visualizados os resultados da precisão global, índice Kappa (Landsat 8 OLI, pegmatitos de Muiane e Naipa). Dos dois algoritmos utilizados, obteve-se um índice de precisão global superior a 70%, sendo: MinD (97%), e SAM (73%), com precisão global, a partir do SCP (QGIS) (Fig. 120), enquanto o Maxver e SVM foram analisadas a partir do ENVI (apêndice III C). (Landis and Koch, 1977a) sugerem que valores do índice Kappa acima de 0,8 indicam que o nível de precisão de uma classificação é excelente, ou seja, se aproxima muito da “verdade terrestre”. Sendo assim, dos algoritmos estudados, os que atingiram estes níveis de exatidão foram SVM (0.9953) e o Maxver (0.9985).

As curvas espetrais (Fig *121* e Fig *122*) foram realizadas com o objetivo de diferenciar o pegmatito das outras classes, sendo destacada as assinaturas espetrais de cada classe. O processo de classificação seleciona e atribui a identificação da classe com uma assinatura espetral mais próxima da de cada píxel individual dentro de uma imagem. Novamente, o processo de classificação atribuirá a classe de melhor ajuste, como os pegmatitos e água, e uma classificação incorreta de pixeis entre a zona habitacional e solos expostos.

Tabela 48: Valores de precisão global, índice Kappa da imagem Landsat 8 OLI (Pegmatitos de Muiane e Naipa).

Algoritmos	**Precisão global**	**Índice Kappa**	Nível de concordância
MinD	96.9609	0.8749	Excelente
SAM	72.7646	0.5928	Boa
Maxver	99.8930	0.9985	Excelente
SVM	99.7151	0.9953	Excelente

Tabela 49: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 OLI (SAM) (Pegmatitos de Muiane e Naipa).

Classes	PG	AI	SE	ZH	VG	Total
Pegmatitos	131	3	0	2	0	136
Águas interiores	0	129	0	0	0	129
Solos expostos	0	0	30212	28827	682	59721
Zona habitacional	4	0	1349	7210	94	8657
Vegetação	7	0	0	783	47147	47937
Total	142	132	31561	36822	47923	116580
Precisão do Produtor (PA) %	92.2535	97.7273	95.7257	19.5807	98.3807	
Precisão do Utilizador (UA)%	96.3235	100.0000	50.5886	83.2852	98.3520	
Kappa hat	0.9632	1.0000	0.3225	0.7557	0.9720	
Precisão global	72.7646					
Indice Kappa	0.5928					

Tabela 50: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 OLI (MinD) (Pegmatitos de Muiane e Naipa).

Classes	PG	AI	SE	ZH	VG	Total
Pegmatitos	67	0	0	0	0	67
Águas interiores	0	550	0	0	228	778
Solos expostos	2	0	605	0	0	607
Zona habitacional	0	0	125	13157	239	13521
Vegetação	0	0	0	2949	98658	101607
Total	69	550	730	16106	99125	116580
Precisão do Produtor (PA) %	97.1014	100.0000	82.8767	81.6901	99.5289	
Precisão do Utilizador (UA)%	100.0000	70.6941	99.6705	97.3079	97.0976	
Kappa hat	1.0000	0.7056	0.9967	0.9688	0.8062	
Precisão global	96.9609					
Indice Kappa	0.8749					

Tabela 51:Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 (SVM) (Pegmatitos de Muiane e Naipa).

Classes	PG	AI	SE	VG	Total
Pegmatitos	357	0	2	0	359
Águas interiores	0	144	0	0	144
Solos expostos e habitação	2	0	564	0	566
Vegetação	2	0	1	1385	1388
Total	361	144	567	1385	2457
Classes	**PG**	**AI**	**SE**	**VG**	**Total**
Pegmatitos	98.89	0	0	0	14.61
Águas interiores	0	100	0	0	5.86
Solos expostos e habitação	0.55	0	99.47	0	23.04
Vegetação	0.55	0	0.18	100	56.49
Total	100	100	100	100	100

Ground Truth (Percent)

Classes	**Comissão (%)**	**Omissão (%)**	**Producer's User's Accuracy**	**User Acc**
Pegmatitos	0.56	1.11	98.89	99.44
Águas interiores	0	0	100	100
Solos expostos e habitação	0.35	0.53	99.47	99.65
Vegetação	0.22	0	100	99.78

Ground Truth (Percent)

Tabela 52: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 (Maxver) (Pegmatitos de Muiane e Naipa).

Classes	PG	AI	SE	VG	Total
Pegmatitos	519	0	3	0	522
Águas interiores	0	394	0	0	394
Solos expostos e habitação	0	0	673	0	673
Vegetação	0	0	0	1214	1214
Total	519	394	676	1214	2803
Classes	**PG**	**AI**	**SE**	**VG**	**Total**
Pegmatitos	100	0	0.44	0	18.62
Águas interiores	0	100	0	0	14.06
Solos expostos e habitação	0	0	99.56	0	24.01
Vegetação	0	0	0	100	43.31
Total	100	100	100	100	100

Ground Truth (Percent)

Classes	**Comissão (%)**	**Omissão (%)**	**Producer's User's Accuracy**	**User Acc**
Pegmatitos	0.57	0	100	99.43
Águas interiores	0	0	100	100
Solos expostos e habitação	0	0.44	99.56	100
Vegetação	0	0	100	100

Ground Truth (Percent)

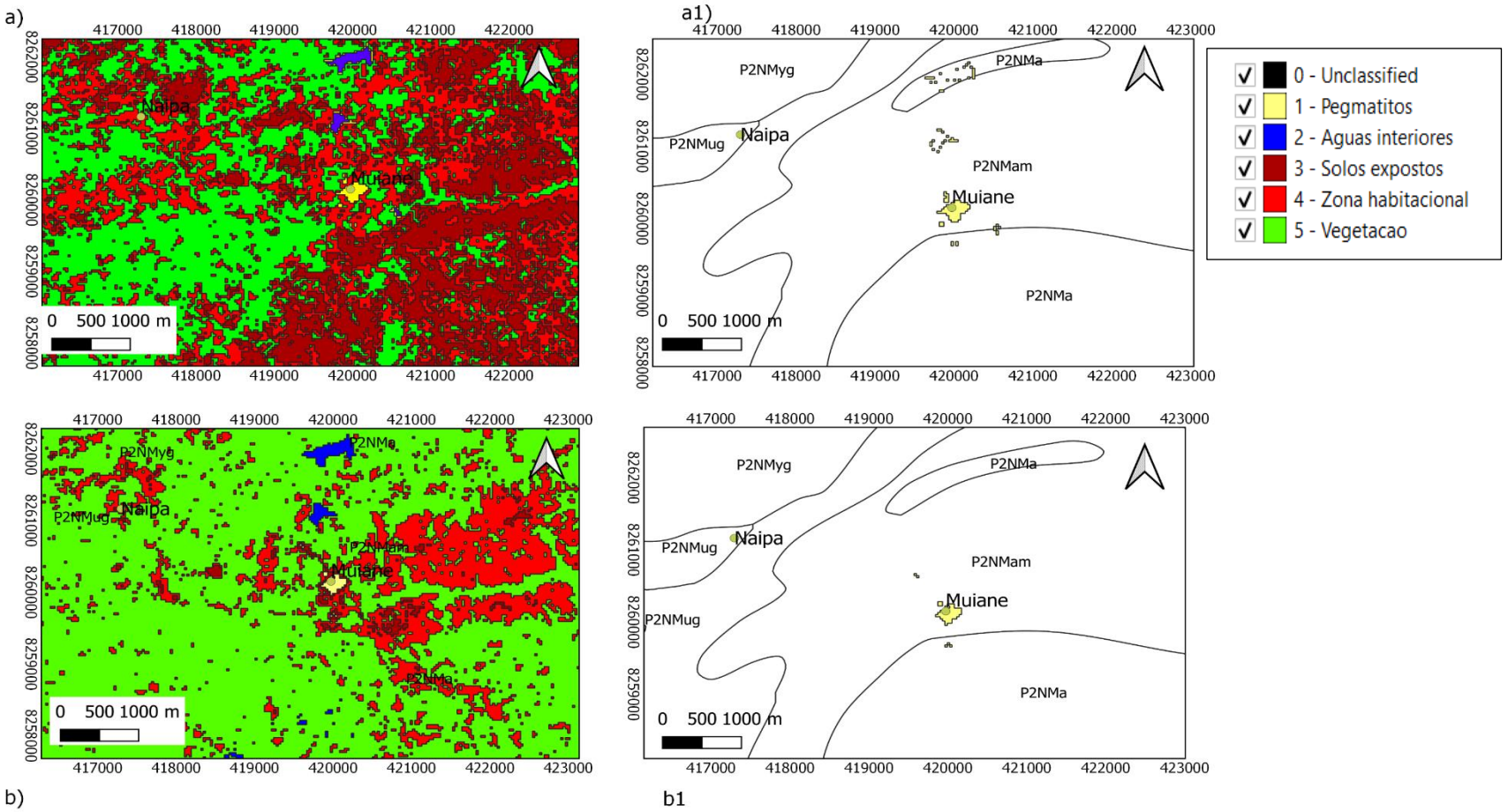


Fig. 120: Classificação da imagem Landsat 8 OLI (2019) no pegmatito de Muiane (zona de treino); a) resultado usando o algoritmo SAM; a1) integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa; b) resultado usando o algoritmo MinD; b1) integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa.

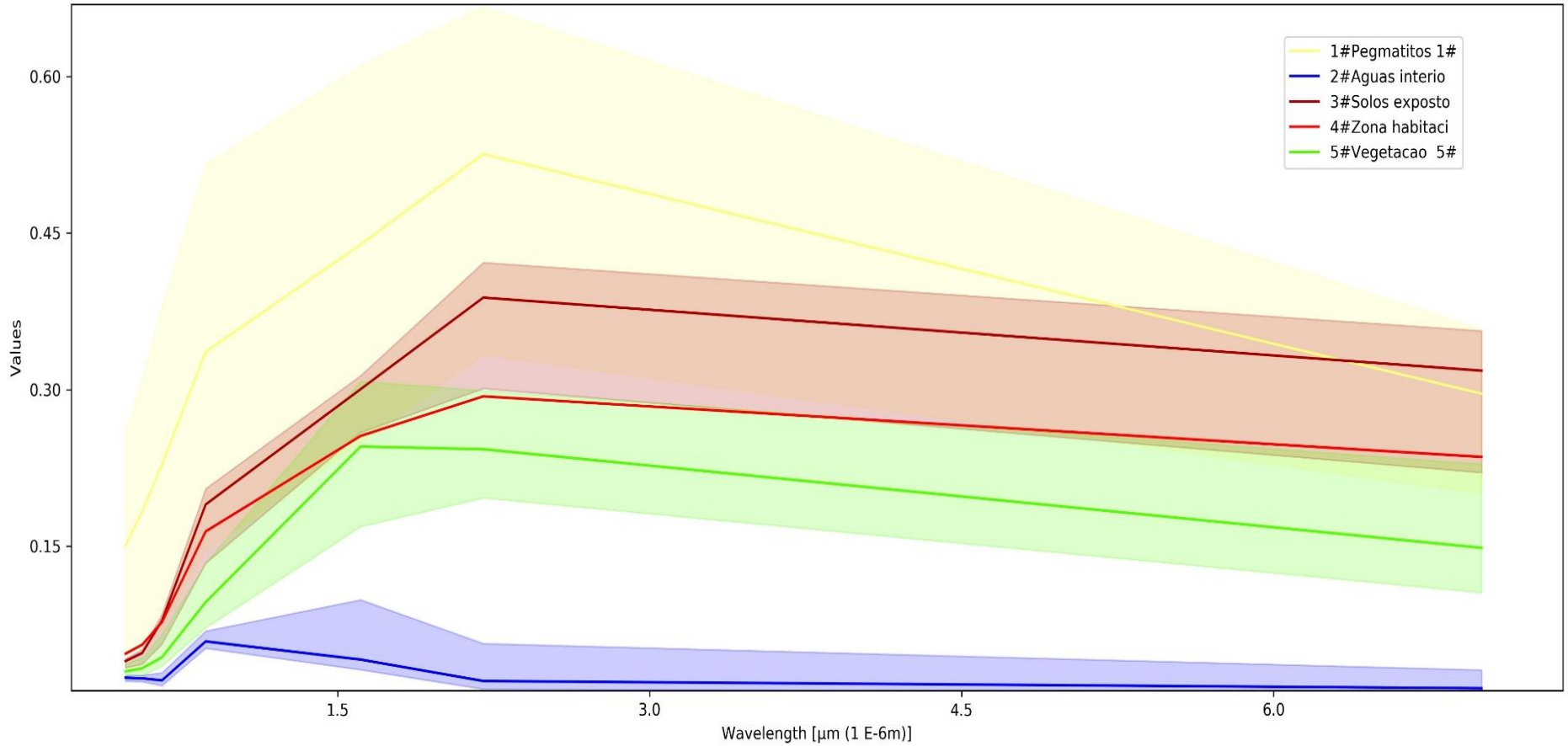


Fig 121: Curva espetral das amostras retiradas em Muiane e Naipa, imagem Landsat 8 OLI (2019).

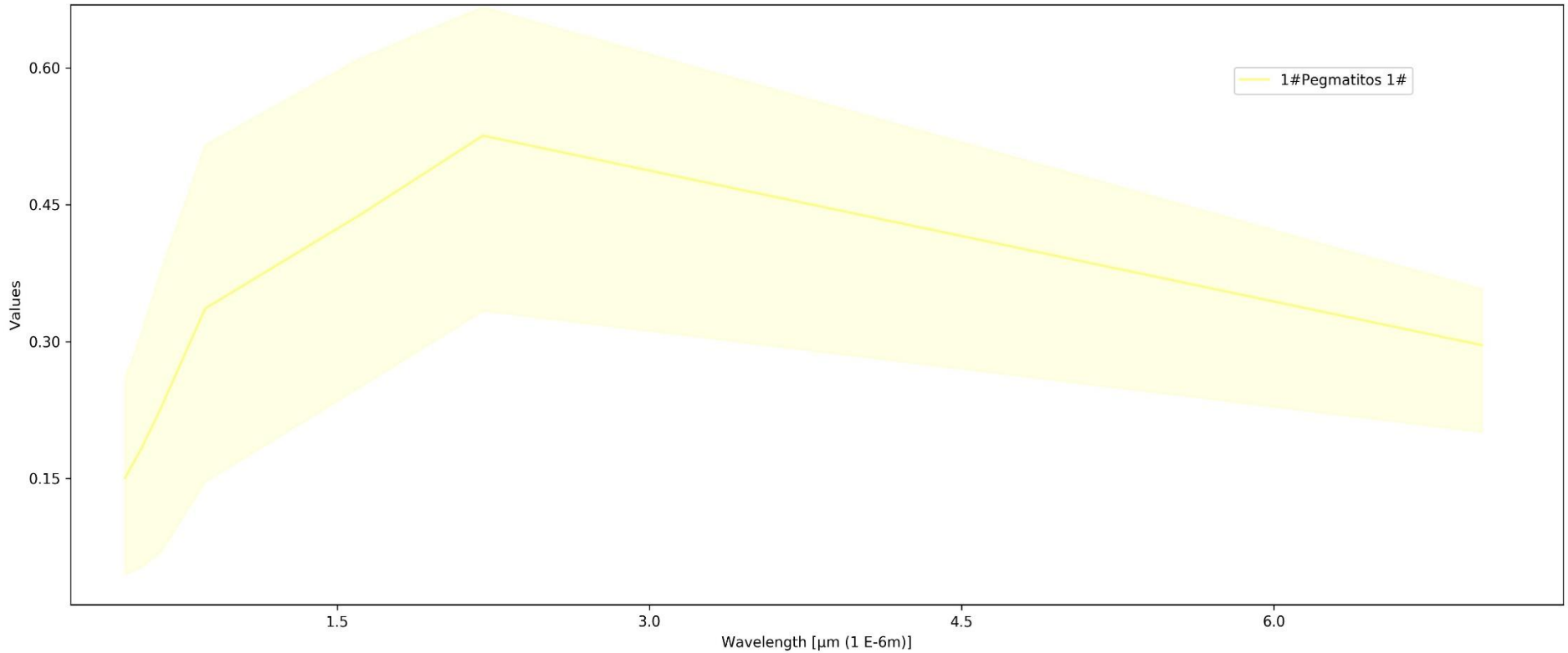


Fig 122: Curva espetral dos pegmatitos de Muiane e Naipa, imagem Landsat 8 OLI (2019).

8.8.3. Landsat 8 (Pegmatitos de Marropino)

Na análise feita com o algoritmo MinD para os pegmatitos Marropino, foram considerados 358 pixeis para os pegmatitos, 1369 pixeis para águas interiores, 510 pixeis para solos expostos, 3964 pixeis para zona habitacional, e 359570 pixeis para a vegetação, sendo razoáveis para o uso de treinamento (Tabela 54). Foi, igualmente, testado o algoritmo SAM, para a mesma área, e foram considerados 557 pixeis para os pegmatitos, 465 pixeis para águas interiores, 45135 pixeis para solos expostos, 3722 pixeis para habitação e 201618 pixeis para a vegetação (Tabela 55).

Na (Tabela 53) podem ser visualizados os resultados da precisão global, índice Kappa (Landsat 8 OLI, pegmatitos de Muiane e Naipa), dos dois algoritmos utilizados. Obtiveram-se índices de precisão global superiores a 70%, sendo: MinD (97%), e SVM (73%), com precisão global, a partir do SCP (QGIS) (Fig. 123), enquanto Maxver (93% e 0.9) e SVM (96% e 0.9) analisados em ENVI. (Landis and Koch, 1977a) sugerem que valores do índice Kappa acima de 0,7 indicam que o nível de precisão de uma classificação é perfeito, ou seja, se aproxima muito da “verdade terrestre”. Sendo assim, dos algoritmos estudados, os que atingiram estes níveis de exatidão foram o SAM (0.32) e o MinD (0.72).

Tabela 53: Valores de precisão global, índice Kappa da imagem Landsat 8 OLI (Pegmatito de Marropino).

Algoritmos	**Precisão global**	**Índice Kappa**	**Níveis de concordância**
MinD	98.7108	0.7202	Perfeito
SAM	67.8716	0.3269	Razoável
Maxver	93.4053	0.8927	Quase perfeito
SVM	95.8034	0.9274	Quase perfeito

Tabela 54: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 OLI (MinD) (Pegmatitos de Marropino).

Classes	PG	AI	SE	ZH	VG	Total
Pegmatitos	358	0	3	0	0	361
Águas interiores	0	1369	0	0	15	1384
Solos expostos	58	0	510	119	0	687
Zona habitacional	1	0	1	3964	4473	8439
Vegetação	0	93	0	14	359570	359677
Total	417	1462	514	4097	364058	370548
Precisão do Produtor (PA) %	85.8513	93.6389	99.2218	96.7537	98.7672	
Precisão do Utilizador (UA)%	99.1690	98.9162	74.2358	46.9724	99.9703	
Kappa hat	0.9917	0.9891	0.7420	0.4638	0.9830	
Precisão global	98.7108					
Indice Kappa	0.7202					

Tabela 55: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 OLI (SAM) (Pegmatitos de Marropino).

Classes	PG	AI	SE	ZH	VG	Total
Pegmatitos	557	603	0	169	6	1335
Águas interiores	0	465	0	0	0	465
Solos expostos	0	0	45135	86	0	45221
Zona habitacional	0	26	1157	3722	1661	6566
Vegetação	0	0	115332	11	201618	316961
Total	557	1094	161624	3988	203285	370548
Precisão do Produtor (PA) %	100.0000	42.5046	27.9259	93.3300	99.1800	
Precisão do Utilizador (UA)%	41.7228	100.0000	99.8098	56.6860	63.6097	
Kappa hat	0.4164	1.0000	0.9966	0.5621	0.1938	
Precisão global	67.8716					
Indice Kappa	0.3269					

Tabela 56: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 (SVM) (Pegmatitos de Marropino).

Classes	PG	AI	SE	VG	Total
Pegmatitos	467	0	23	0	490
Águas interiores	0	57	0	0	57
Solos expostos e habitação	12	0	49	0	61
Vegetação	0	0	0	226	226
Total	479	57	72	226	834

Classes	PG	AI	SE	VG	Total
Pegmatitos	97.49	0	31.94	0.00	58.75
Águas interiores	0.00	100	0	0.09	6.83
Solos expostos e habitação	2.51	0	68.06	0.00	7.31
Vegetação	0	0	0	100	27.10
Total	100	100	100	100	100

Ground Truth (Percent)

Classes	Comissão (%)	Omissão (%)	Producer's User's Accuracy	User Acc
Pegmatitos	4.69	2.51	97.49	95.31
Águas interiores	0	0	100	100
Solos expostos e habitação	19.67	31.94	68.06	80.33
Vegetação	0	0	100	100

Ground Truth (Percent)

Tabela 57: Matriz de confusão para a imagem Landsat 8 (Maxver) (Pegmatitos de Marropino).

Classes	**PG**	**AI**	**SE**	**VG**	**Total**
Pegmatitos	426	0	1	1	428
Águas interiores	0	57	0	0	57
Solos expostos e habitação	53	0	71	0	124
Vegetação	0	0	0	225	225
Total	479	57	72	226	834

Classes	**PG**	**AI**	**SE**	**VG**	**Total**
Pegmatitos	88.94	0	1.39	0.00	51.32
Águas interiores	0	100	0	0.44	6.83
Solos expostos e habitação	11.06	0	98.61	0.00	14.87
Vegetação	0	0	0	99.56	26.98
Total	100	100	100	100	100

Ground Truth (Percent)

Classes	**Comissão (%)**	**Omissão (%)**	**Producer's User's Accuracy**	**User Acc**
Pegmatitos	0.47	11.06	88.94	99.53
Águas interiores	0	0	100	100
Solos expostos e habitação	42.74	1.39	98.61	57.26
Vegetação	0	0.44	99.56	100

Ground Truth (Percent)

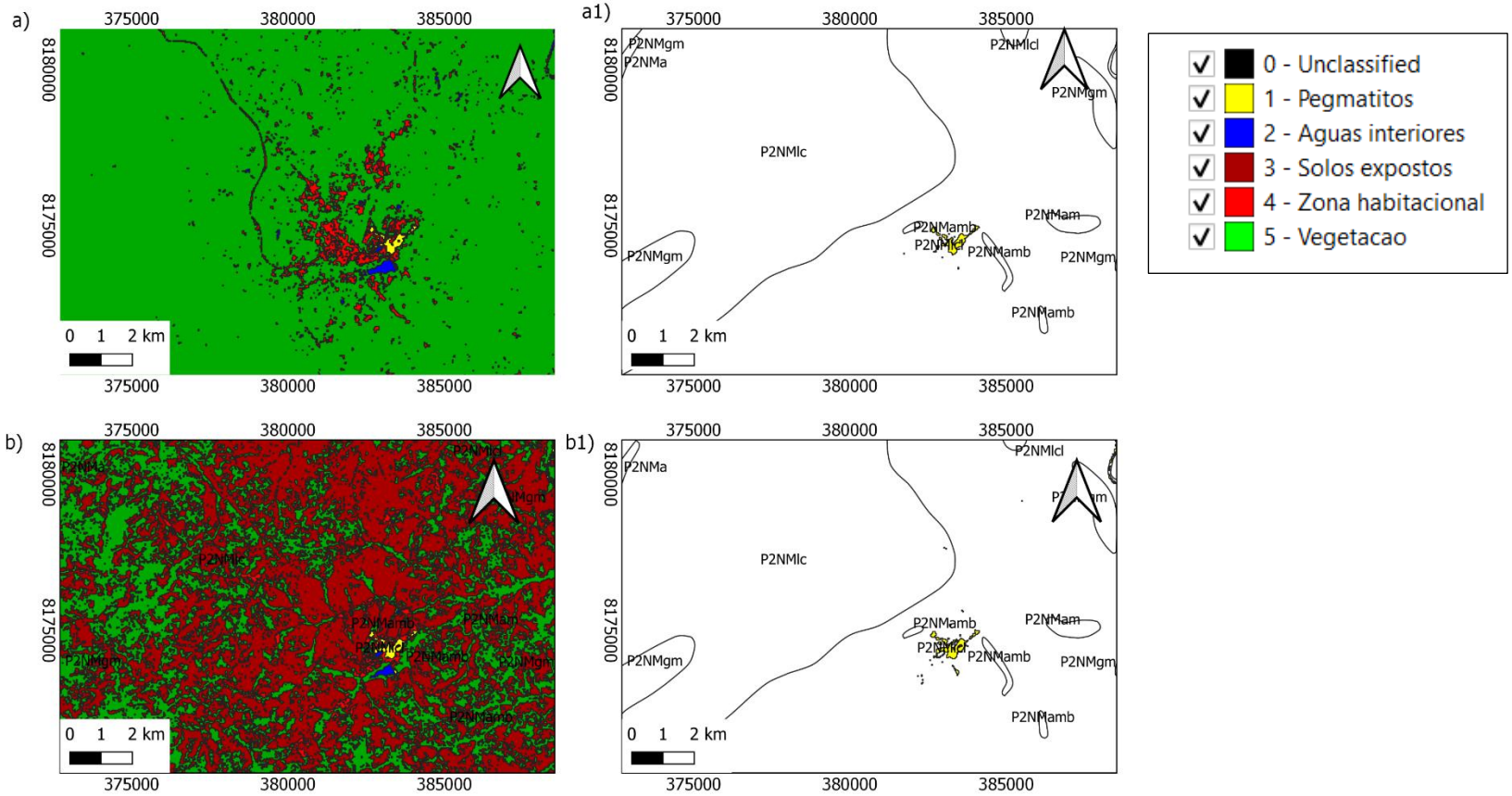


Fig. 123: Classificação da imagem Landsat 8 OLI (2019) no pegmatito de Marropino; a) resultado usando o algoritmo MinD; a1) integração da litologia e pegmatitos de Marropino; b) resultado usando o algoritmo SAM; b1) integração da litologia e pegmatitos de Marropino.

8.8.4. ASTER (Pegmatitos de Muiane e Naipa)

Os valores de precisão ilustrados na (Tabela 58) resultaram duma análise feita em diferentes programas de classificação. Para o SVM e Maxver foi usado o software ENVI, (4.8), e para os algoritmos MinD, e SAM foi usado o SCP (6.0). A (Tabela 58) acima mencionada revela a robustez do ENVI por apresentar os valores de Precisão Global e Índice Kappa, com altos níveis de concordância. A classe principal nas análises são os pegmatitos (PG). Para o algoritmo SAM foram aplicados os parâmetros Kernel Type-Radial Basis Function, Gramma in Kernel Function (0,125), penalty parameter (100) e classification probability threshold (0,1). Foram classificados 687 pixeis, com precisão do consumidor (UA) (97%) e produtor (PA) (92%) (Fig. 128). Para o MinD (PG), apresentam 256 pixeis, 100 (PA), 95,5 % de UA, kappa 1, significando que os pegmatitos foram perfeitamente identificados (Tabela 60) (Fig. 128). Para o algoritmo Maxver, a classe PG apresentou 356 pixeis, com uma comissão (0,84%) e omissão (3%), UA (97%) e 99,16 % (PA), como ilustra a (Tabela 61).

Para o algoritmo SVM, a classe PG apresentou 359 pixeis, com comissão (1,10%), e omissão (2,18%), 97,82% (UA), e 99,16 % (PA), detalhados na (Tabela 62 e Fig. *131*). Os espetros são apresentados na (Fig 124) produzidos a partir do ENVI, e somente duas classes de argilas de Muiane (Fig *125*).

Tabela 58: Valores de precisão global, índice Kappa da imagem ASTER (Pegmatito de Muiane e Naipa).

Algoritmos	**Precisão global**	**Índice Kappa**	**Níveis de concordância**
MinD	95.5462	0.5	Moderado
SAM	81.0438	0.5	Moderado
SVM	99.1369	0.9	Quase perfeito
Maxver	99.1342	0.9	Quase perfeito

Tabela 59: Matriz de confusão para a imagem ASTER (SAM) (Pegmatitos de Muiane e Naipa).

Classes	PG	AI	SE	ZH	VG	Total
Pegmatitos	687	0	14	6	0	707
Águas interiores	4	325	0	10	0	339
Solos expostos	0	0	215054	1128	0	216182
Zona habitacional	0	0	22355	7833	0	30188
Vegetação	55	0	371414	26	1464887	1836382
Total	746	325	608837	9003	1464887	
Precisão do Produtor (PA) %	92.0912	100.0000	35.3221	87.0043	100.0000	
Precisão do Utilizador (UA)%	97.1711	95.8702	99.4782	25.9474	79.7703	
Kappa hat	0.9717	0.9587	0.9926	0.2563	0.3189	
Precisão global	81.0438					
Indice Kappa	0.4586					

Tabela 60: Matriz de confusão para a imagem ASTER (MinD) (Pegmatitos de Muiane e Naipa*).*

Classes	**PG**	**AI**	**SE**	**ZH**	**VG**	**Total**
Pegmatitos	256	0	12	0	0	268
Águas interiores	0	833	0	0	1384	2217
Solos expostos	0	0	11357	1782	0	13139
Zona habitacional	0	0	8309	37791	0	46100
Vegetação	0	0	8646	72675	1940753	2022074
Total	256	833	28324	112248	1942137	2083810
Precisão do Produtor (PA) %	100.0000	100.0000	40.0967	33.6674	99.9287	
Precisão do Utilizador (UA)%	95.5224	37.5733	86.4373	81.9761	95.9783	
Kappa hat	1.0000	0.9552	0.3755	0.8625	0.8095	
Precisão global	95.5462					
Indice Kappa	0.5278					

Tabela 61: Matriz de confusão para a imagem ASTER (Maxver). Pegmatitos de Muiane e Naipa.

Classes	PG	AI	SE	VG	Total
Pegmatitos	356	0	3	0	359
Águas interiores	0	342	0	0	342
Solos expostos e habitação	3	0	654	0	657
Vegetação	8	9	0	1060	1075
Total	367	349	657	1060	2433

Classes	**PG**	**AI**	**SE**	**VG**	**Total**
Pegmatitos	97.00	0.00	0.46	0.00	14.76
Águas interiores	0.00	97.99	0.00	0.00	14.06
Solos expostos e habitação	0.82	0.00	99.54	0.00	27.00
Vegetação	2.18	2.01	0.00	100.00	44.18
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ground Truth (Percent)

Classes	**Comissão (%)**	**Omissão (%)**	**Producer's User's Accuracy**	**User Acc**
Pegmatitos	0.84	3.00	97.00	99.16
Águas interiores	0.00	2.01	97.99	100.00
Solos expostos e habitação	0.46	0.46	99.54	99.54
Vegetação	1.40	0.00	100.00	98.60

Ground Truth (Percent)

Tabela 62: Matriz de confusão para a imagem ASTER (SVM) (Pegmatitos de Muiane e Naipa).

Classes	PG	AI	SE	VG	Total
Pegmatitos	359	0	3	1	363
Águas interiores	0	340	0	0	342
Solos expostos e habitação	2	0	654	0	657
Vegetação	6	7	0	1060	1075
Total	367	349	657	1060	2433

Classes	PG	AI	SE	VG	Total
Pegmatitos	97.82	0.00	0.46	0.00	14.92
Águas interiores	0.00	97.42	0.00	0.09	13.97
Solos expostos e habitação	0.54	0.00	99.54	0.00	26.96
Vegetação	1.63	2.58	0.00	99.91	44.14
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ground Truth (Percent)

Classes	Comissão (%)	Omissão (%)	Producer's User's Accuracy	User Acc
Pegmatitos	1.10	2.18	97.82	99.16
Águas interiores	0.00	2.58	97.42	100.00
Solos expostos e habitação	0.30	0.46	99.54	99.54
Vegetação	1.40	0.09	99.91	98.60

Ground Truth (Percent)

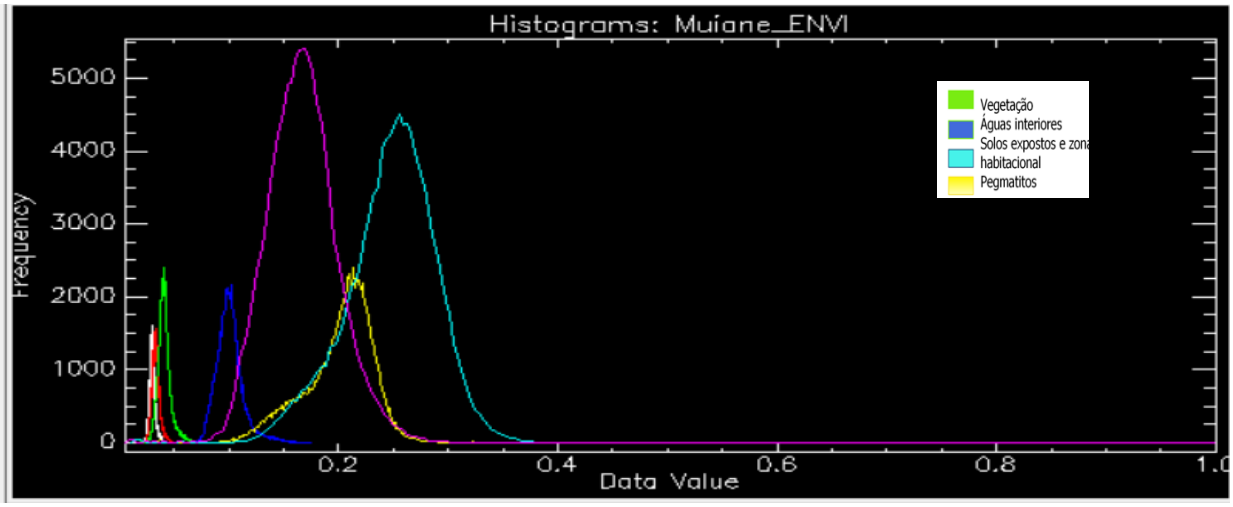


Fig 124: Histograma espectral das classes dos pegmatitos de Muiane com base nas imagens ASTER.

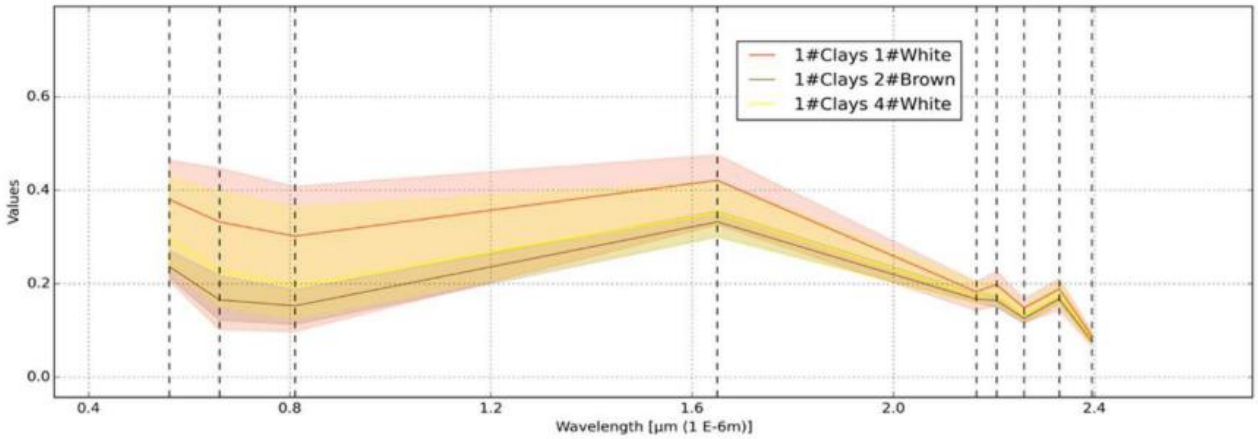


Fig 125: Assinaturas espectrais dos pegmatitos de Muiane e Naipa (ASTER) extraído de (Gemusse et al., 2018)

8.8.5. ASTER (Pegmatitos de Marropino e Morrua)

Para a classificação destes dois pegmatitos (Morrua e Marropino), foi feita a análise no SCP proposta por (Congedo, 2017), tendo os resultados de exatidão global e índice kappa dos algoritmos (MinD e SAM) (Tabela 63), e com um nível de concordância perfeita. Para o algoritmo MinD, foram analisadas cinco classes (pegmatitos, águas interiores, solos expostos e zonas de habitação e por fim a vegetação) e obteve-se 428 pixeis para os pegmatitos, 782 pixeis para águas interiores, 17952 pixeis como solos expostos e zonas de habitação com 4465 pixeis, e por fim 1190068 pixeis para vegetação, as imagens se encontram em (Fig. 126,Fig. 127 e Fig. 128).

Tabela 63: Valores de precisão global, índice Kappa da imagem ASTER (Pegmatito de Marropino).

Algoritmos	**Precisão global**	**Índice Kappa**	**Níveis de concordância**
MinD	65.8006	0.5010	Perfeito
SAM	71.0296	0.5666	Perfeito

Tabela 64: Matriz de confusão para a imagem ASTER (SAM) (Pegmatitos de Marropino e Morrua).

Classes	PG	AI	SE	ZH	VG	Total
Pegmatitos	35669	27699	0	98408	244	162020
Águas interiores	2	23795	162997	10	0	186804
Solos expostos	9841	705792	348666	423059	221041	1708399
Zona habitacional	17462	36675	47110	15195	0	116442
Vegetação	534	49631	0	164488	782680	997333
Total	63508	843592	558773	701160	1003965	
Precisão do Produtor (PA) %	56.1646	2.8207	62.3985	2.1671	77.9589	
Precisão do Utilizador (UA)%	22.0152	12.7379	20.4089	13.0494	78.4773	
Kappa hat	0.2128	0.0034	0.1326	0.0302	0.7474	
Precisão global	71.0296					
Indice Kappa	0.5666					

Tabela 65: Matriz de confusão para a imagem ASTER (MinD) (Pegmatitos de Marropino e Morrua).

Classes	PG	AI	SE	ZH	VG	Total
Pegmatitos	428	0	0	0	0	428
Águas interiores	0	782	124441	0	173451	298674
Solos expostos	175	0	17952	51363	0	69490
Zona habitacional	5	0	1604261	3607	4465	1612338
Vegetação	0	796	360703	0	828569	1190068
Total	608	1578	2107357	54970	1006485	
Precisão do Produtor (PA) %	70.3947	49.5564	0.8519	6.5618	82.3230	
Precisão do Utilizador (UA)%	100.0000	0.2618	25.8339	0.2237	69.6237	
Kappa hat	1.0000	0.0024	-0.0760	-0.0059	0.6433	
Precisão global	65.8006					
Indice Kappa	0.5010					

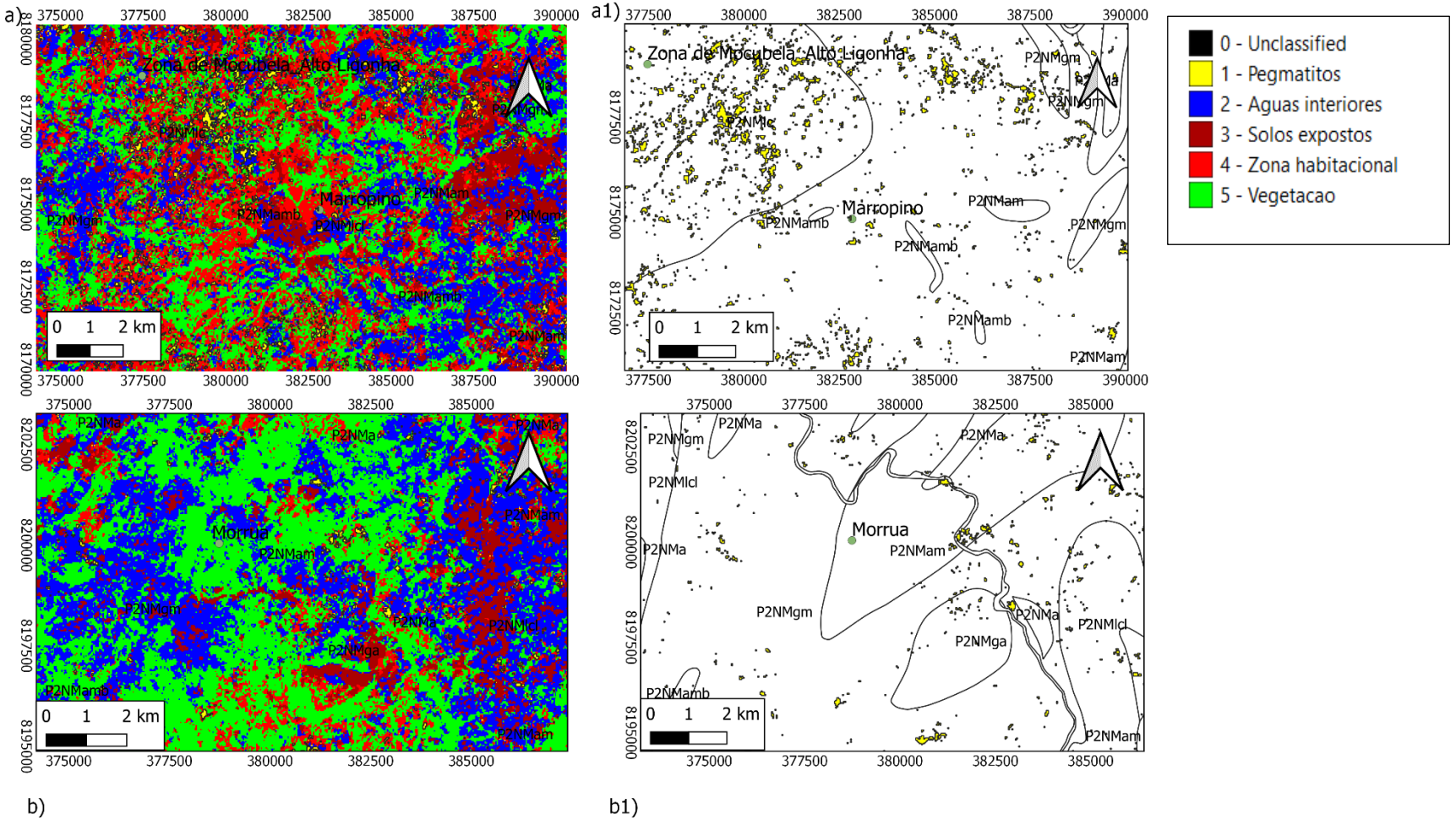


Fig. 126: Classificação da imagem ASTER (2005) no pegmatito de Marropino e Morrua; a) resultado usando o algoritmo SAM; a1) integração da litologia e pegmatitos de Marropino; b) resultado usando o algoritmo SAM; b1) integração da litologia e pegmatitos de Morrua.

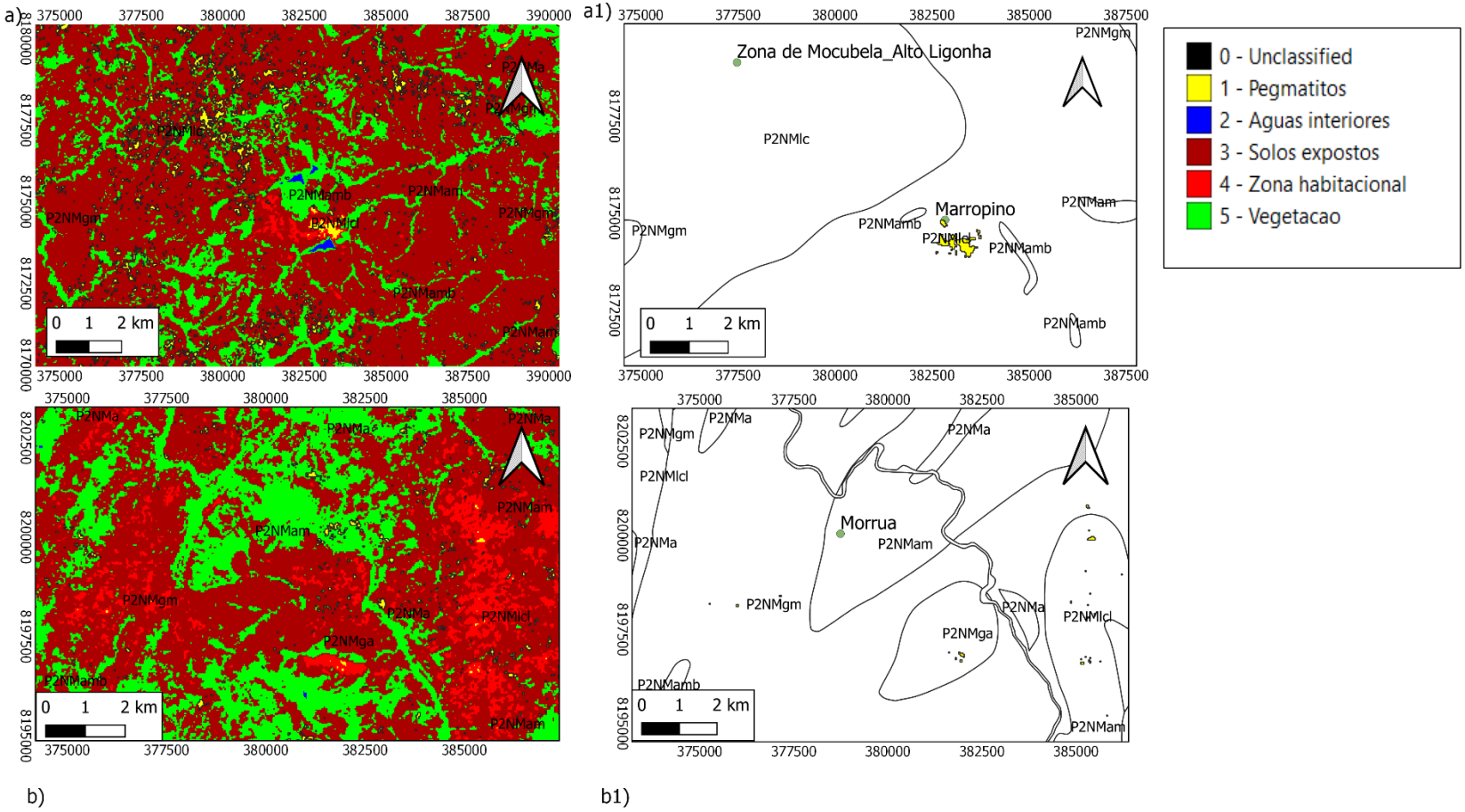


Fig. 127: Classificação da imagem ASTER (2005) no pegmatito de Marropino e Morrua; a) resultado usando o algoritmo MinD; a1) integração da litologia e pegmatitos de Marropino; b) resultado usando o algoritmo MinD; b1) integração da litologia e pegmatitos de Morrua.

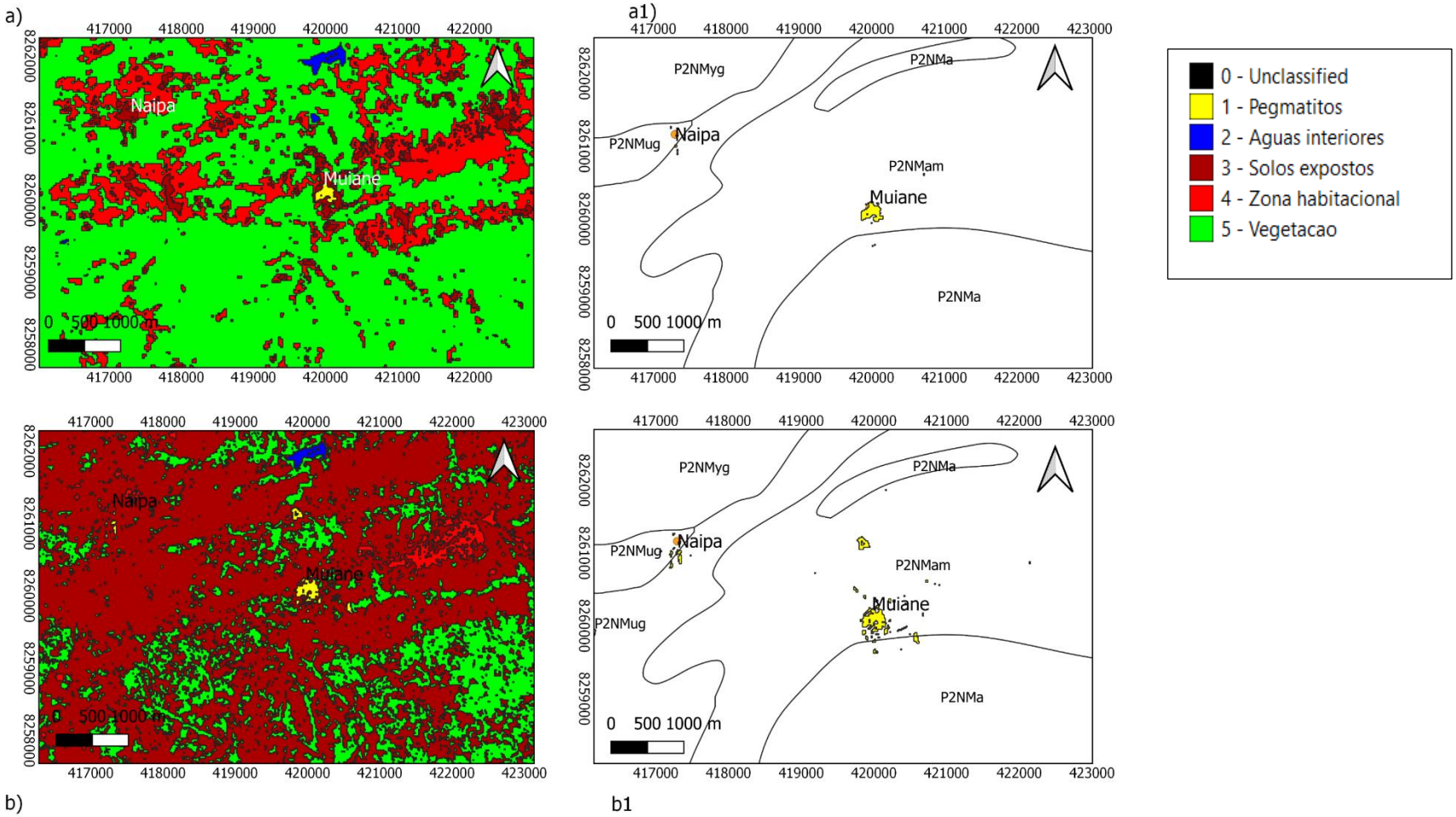


Fig. 128: Classificação da imagem ASTER (2005) nos pegmatitos de Muiane e Naipa; a) resultado usando o algoritmo MinD; a1) integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa; b) resultado usando o algoritmo SAM; b1) integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa.

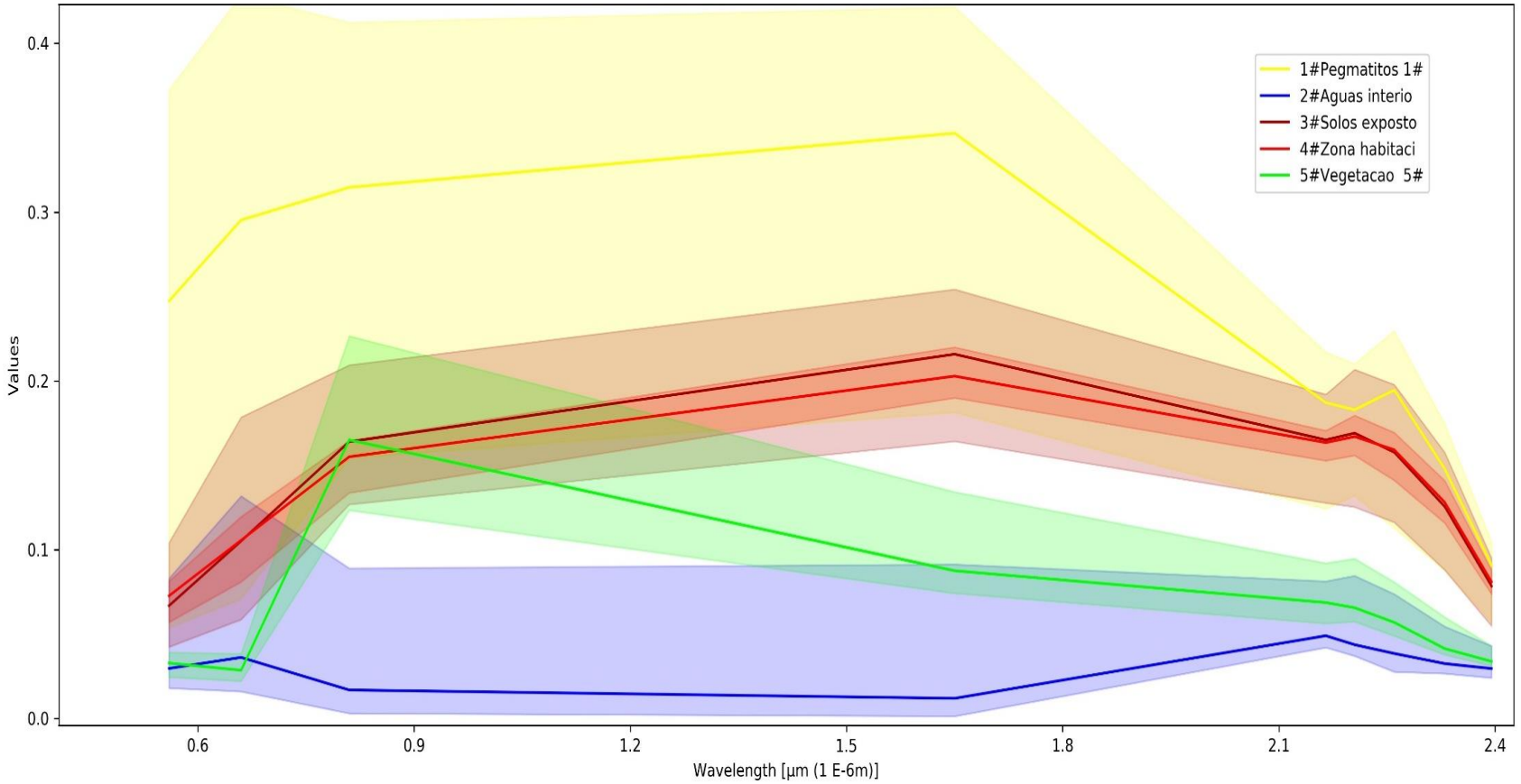


Fig 129:Assinatura espetral das amostras retiradas em Muiane e Naipa, imagem ASTER (2005).

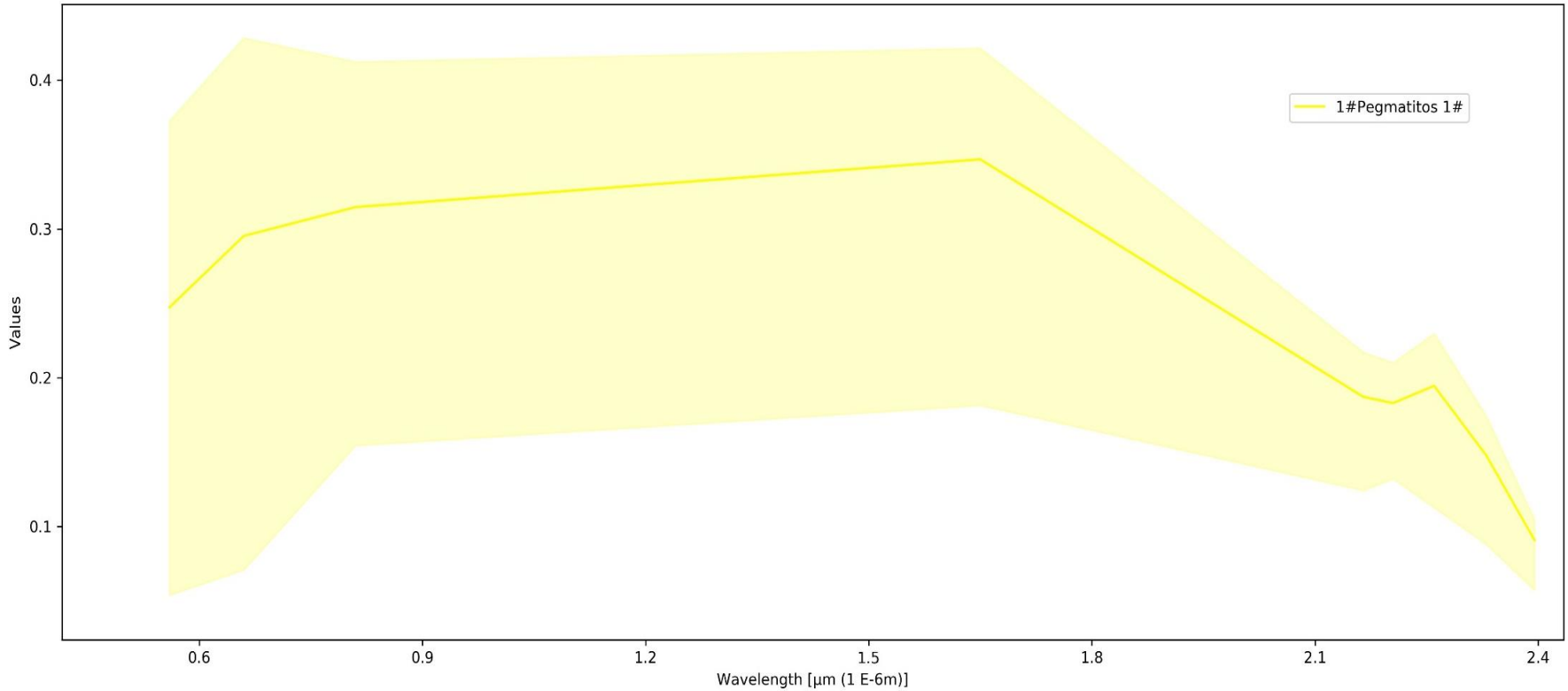


Fig 130:Assinatura espetral dos pegmatitos de Muiane e Naipa, imagem ASTER (2005).

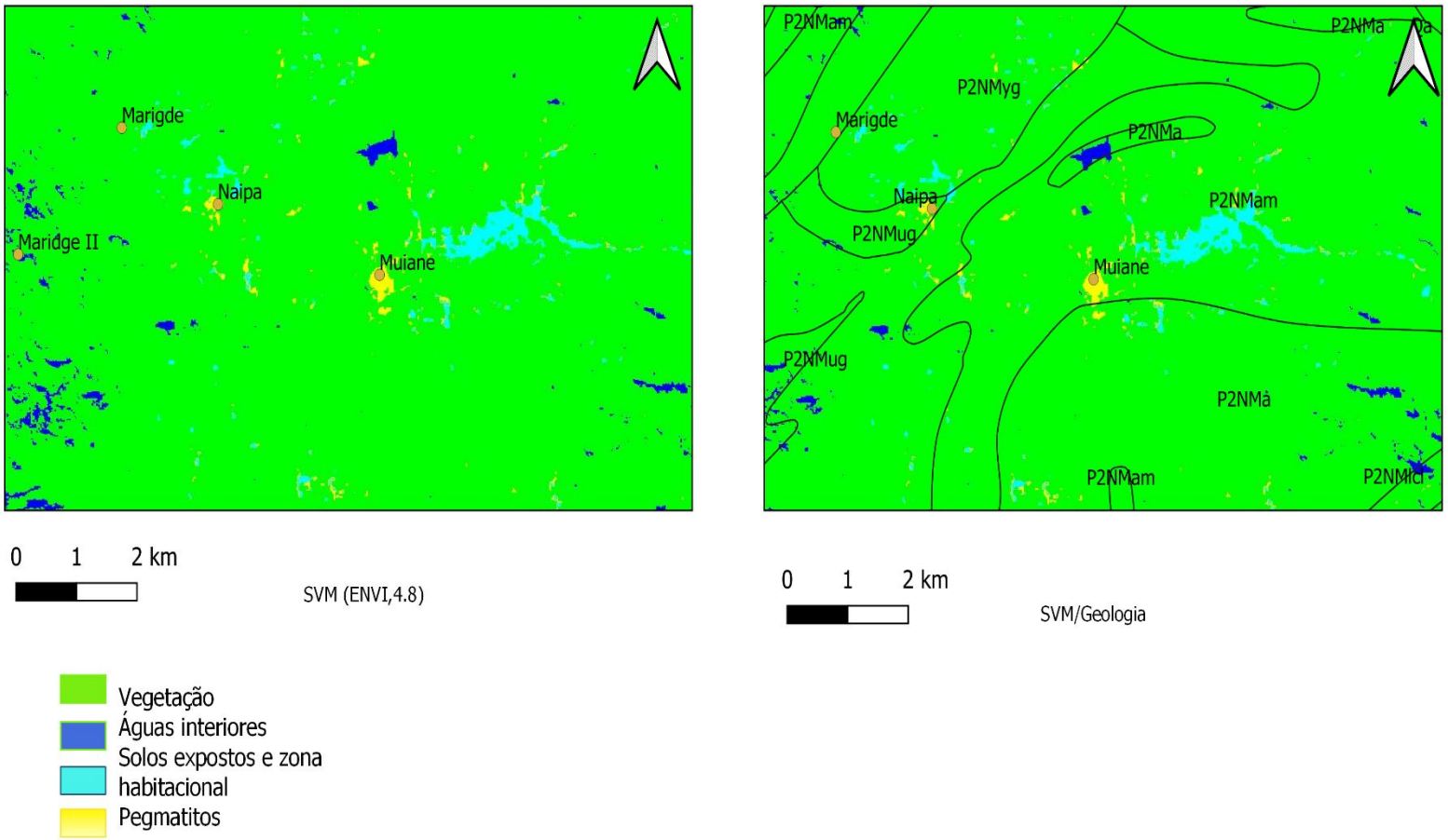


Fig. 131: Classificação da imagem ASTER (2005) nos pegmatitos de Muiane e Naipa, resultado do algoritmo SVM.

Entretanto, o algoritmo da Máxima Verossimilhança exigiu a utilização de uma grande quantidade de amostras representativas. A escolha inadequada das amostras causa confusão nas distribuições de probabilidade das classes, aumentando as taxas de erro na classificação. O algoritmo da Distância Mínima comportou-se de forma adequada aos testes realizados apresentado um resultado médio, e de baixo custo de implementação. A sua estrutura de funcionamento permitiu treinar e classificar imagens com uma precisão razoável. Porém, sua desvantagem em alguns casos é não possuir informações suficientes sobre a forma da distribuição das classes e dos resultados a partir do SVM foi considerada muito boa, o que demostrou uma minimização de erros pelo algoritmo, permitindo que a classificação e identificação dos pegmatitos seja realizada de forma mais operacional com menor esforço em edição matricial.

8.9. Segmentação e Classificação em GEE-Big-Data

O resultado do método OBIA (Object Based Image Analysis) com uma segmentação de multiresolução utilizando-se as seis bandas espectrais da imagem OLI, cujo parâmetros foram definidos a partir da comparação visual da melhor relação entre o tamanho das regiões e sua homogeneidade (scale 50, shape 0.1, compactness 0.5 e a classificação (cf. Fig. 132). A classificação por OBIA obteve os seguintes resultados: o Kappa hat classification (0.87) e exatidão global (96.96), com um nível de concordância muito bom, de acordo com os princípios de (Landis and Koch, 1977b; Richards and Jia, 1986).

No caso de CART Algorithm (PA=100 %, UA= 100 %, AO= 97% and K=0,96) (Tabela 68). Enquanto o GMO Max Entropy Algorithm (PA=100 %, UA= 94 %, AO= 83.5% and K=0,93) (Tabela 69), ambos os resultados possuem o nível de concordância muito bom. Os pegmatitos a partir do OBIA na (Fig. 132) têm a coloração branca cinza, no resultado da combinação de bandas, enquanto para a classificação se apresenta em cor amarela. A técnica OBIA depende do intérprete e, logicamente, demandou esforço de tempo muito maior para determinar parâmetros de discriminação entre as classes.

Tabela 66: Matriz de Confusão OBIA, Muiane-Naipa (Ecognition)

Classes	PG	WB	BU	VG	Total
Pegmatitos	67	0	0	0	67
Corpos de água	0	550	0	228	778
Zona habitacional e solos expostos	2	0	605	0	607
Vegetação	0	0	0	9865	9865
Total	69	550	605	10093	11317
Precisão do Produtor (PA) %	97.1014	100.0000	82.8767	81.6901	99.5289
Precisão do Utilizador (UA)%	100.0000	70.6941	99.6705	97.3079	97.0976
Precisão global	96.9609				
Indice Kappa	0.8749				

Tabela 67: Matriz de Confusão OBIA, Muiane-Naipa (Ecognition)

Classes	PG	WB	BS	VG	BU	Total
Pegmatitos	100	0	0	0	0	100
Corpos de água	0	100	0	0	0	100
Solos expostos	0	0	86.96	0	13.04	100
Vegetação			0	100	0	100
Zona de habitação	0	0	0	3.57	96.43	100
Total	100	100	86.96	103.57	109.47	500
Precisão do Produtor (PA) %	100	100	100	96.55	88.08	
Precisaão do Utilizador (UA)%	100	100	86.96.	100	96.43	
Precisaão global	97.01					
Indice Kappa	0.96					

Tabela 68: Matriz de Confusão (CART Algorithm, Muiane-Naipa)

Classes	PG	WB	BS	VG	BU	Total
Pegmatitos	94	0	0	0	5.56	99.56
Corpos de água	0	100	0	0	0	100
Solos expostos	0	0	52.17	0	0	52.17
Vegetação			0	95.12	0	95.12
Zona de habitação	0	0	17.86	17.86	95.12	130.84
Total	94	100	70.03	112.98	100.68	477.69
Precisão do Produtor (PA) %	100	100	74.29	84.19	94.47	
Precisaão do Utilizador (UA)%	94.41	100	100	100	72.69	
Precisaão global	83.53					
Indice Kappa	0.93					

Tabela 69: Matriz de confusão (GMO Max Entropy Algorithm, Muiane-Naipa)

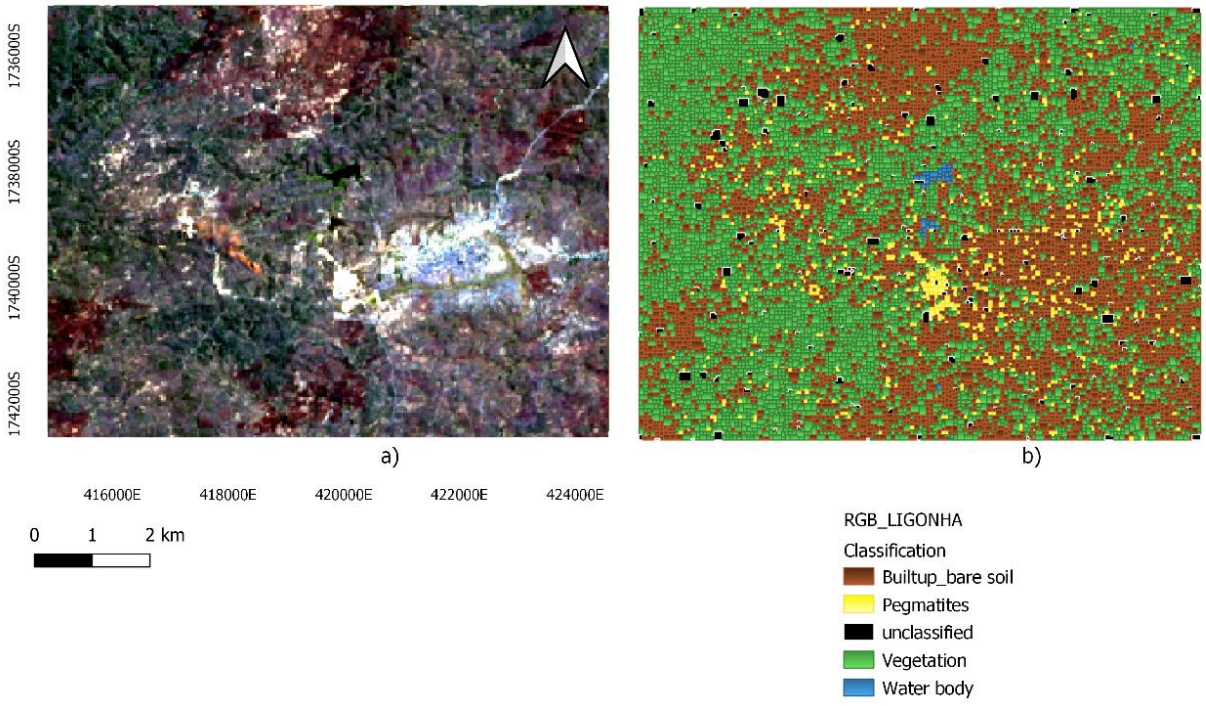


Fig. 132: a) Composição de bandas R6G5B4 e b) Classificação e segmentação por multiresulução nos parâmetros da imagem a partir do ECOGNITION

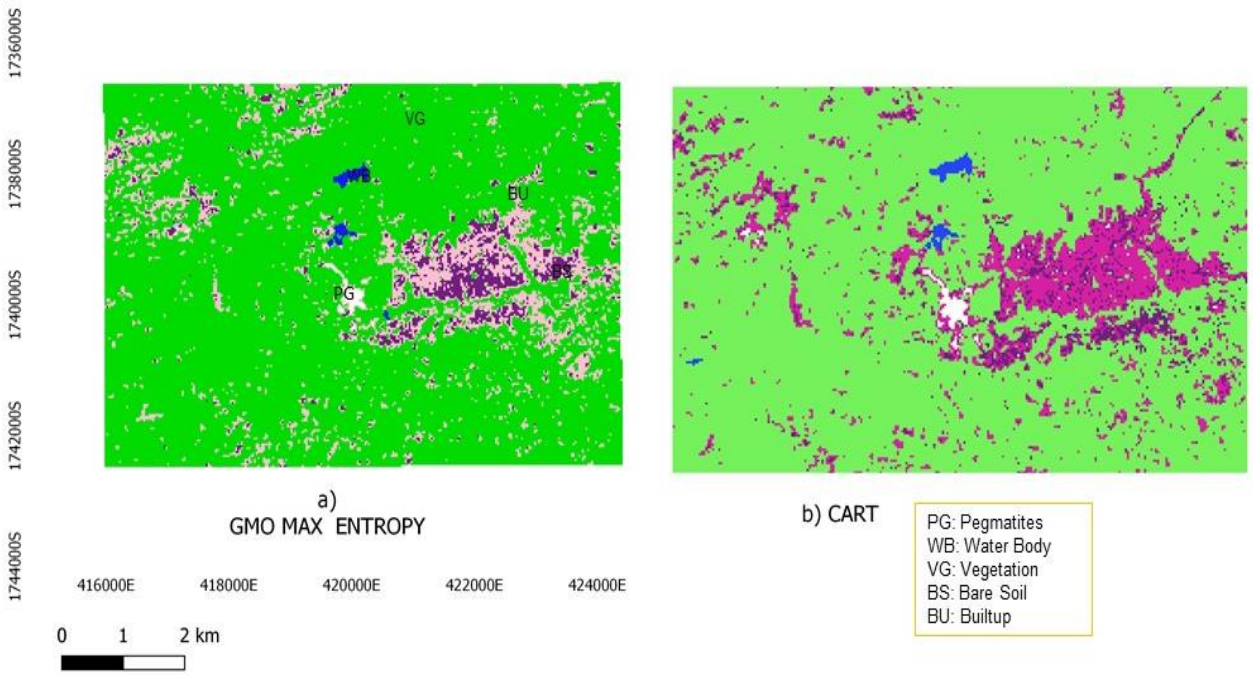


Fig. 133: Mapa de classificação, a) GMO Max Entropy Algorithm; b) CART Algorithm

No método OBIA procedeu-se à segmentação da imagem por objectos com o software eCognition 8.0, altamente dependente do utilizador. Isto exigiu um esforço de tempo muito maior para determinar os parâmetros de diferenciação entre as classes. O GEE mostrou um desempenho em termos de precisão geral, e pressupõe-se que seja devido à correção atmosférica e restauração das imagens Landsat, sendo obtida a classe dos pegmatitos, a precisão do produtor, foi de 100% nos algoritmos testados no GEE.

8.10. Relação dos pegmatitos clássicos com ocorrência de lítio

Por último, foi feita uma análise espacial com o intuito de se validar a ocorrência de minerais de lítio em pegmatitos e bacias com potencial económico. Tendo por base os dados geoquímicos divulgados pela (Aquater, 1983), onde o valor de fundo regional para o lítio corresponde a ppm (partes por milhão). O limiar da anomalia para o lítio foi de Li >100 ppm para os pegmatitos de Marropino e Morrua e Li<100 ppm para os pegmatitos de Muiane, Naipa, Nassupe, Namobene e Nuaparra I e II (Fig. 134). Posteriormente, foram feitos cruzamentos entre os teores em lítio e os pegmatitos da base de dados, todos eles com informações da sua mineralização.

Segundo (Gomes *et al.*, 2008), nas feições LCT ocorrem corpos de grandes dimensões com possanças aflorantes, decamétricas. As altitudes pouco inclinadas são frequentes e as massas indiferenciadas totais em cada jazigo individual >100 Kt (os corpos verdadeiramente LCT são muito grandes (ex.: Namivo > 759 Kt). Poderão existir corpos e unidades não aflorantes com massas significativamente maiores, marcado carácter berilífero, ocorrência de ganite e granada em unidades de bordadura, teor médio de Ta < 200 ppm, Li culminante < 10230 ppm, Cs culminante < 2112 ppm (corpos com lepidolite ± espodumena) e Ta culminante < 834 ppm.

Em algumas análises feitas por (Gomes, 2003; Gomes *et al.*, 2008) percebeu-se que o pegmatito de Namacotche lavra numa massa de culminação evolutiva de uma sequência LCT, situada numa geometria “pull-a-part” e na terminação apical de um corpo filoniano N30-40ºE. Em Namobene foi verificada a lepidolitização maciça e co-precipitação de petalite de baixa temperatura - ocorrência ocasional em paragéneses LCT mais tardias. O pegmatito de Marropino é caraterizado pelo tipo espodumena-microclina-albite, zonado, complexo e irregular (Council for Geoscience, 2007). Outro pegmatito rico em lítio é o de Morrua, constituído mineralogicamente pela petalite e espodumena (Barros and Vicente, 1963). Ambos os pegmatitos são antigas e novas explorações de gemas de berilo, feldspatos, tantalites, microlites, ouro, turmalinas, quartzo, topázio, amazonites, polucites, granadas, columbites, espodumena (cunzite), lepidolites.

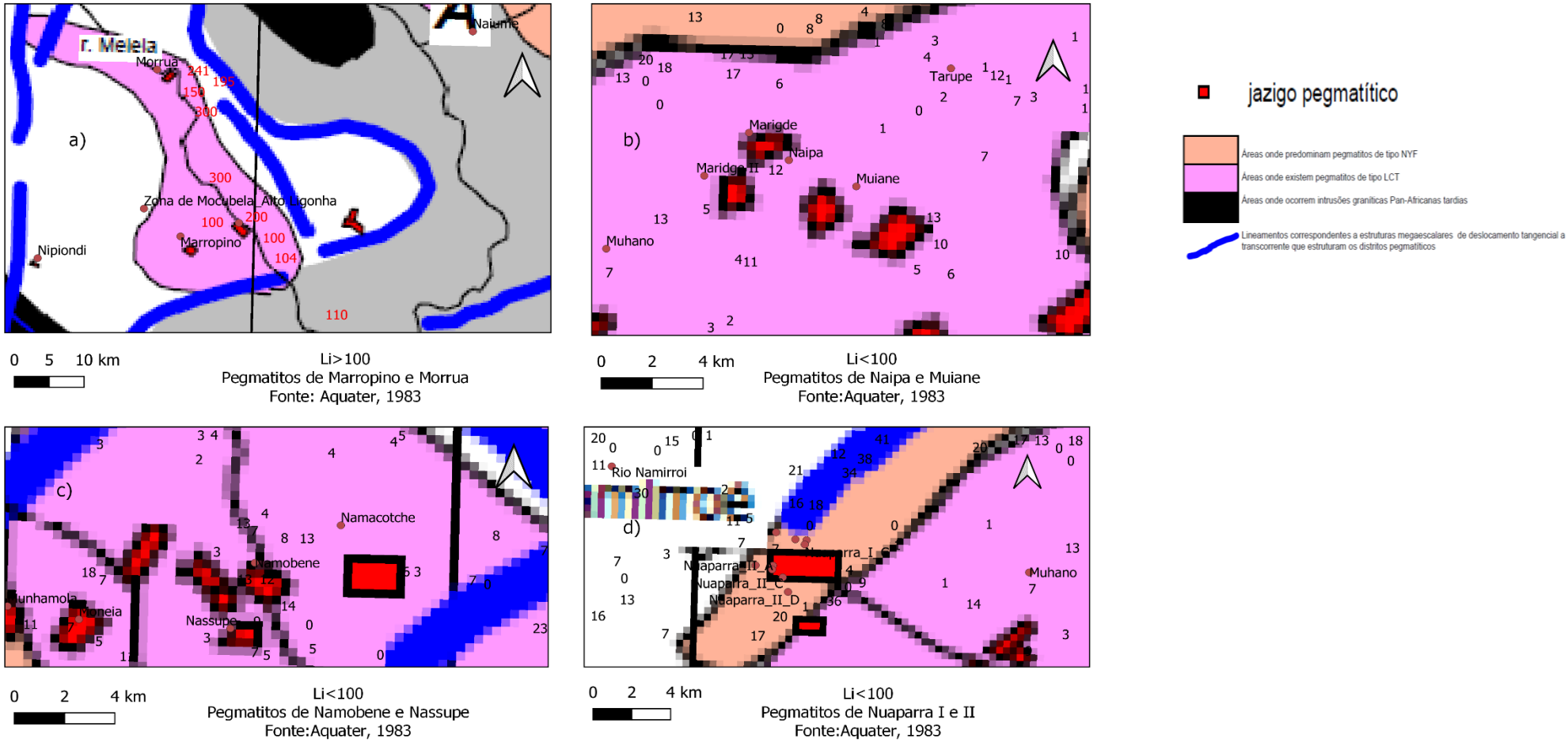


Fig. 134: Relação entre as estruturas metalogenéticas de Alto Ligonha e Ocorrências de Lítio; a) Pegmatitos de Marropino e Morrua; b) Pegmatitos de Muiane e Naipa; c) Pegmatitos de Nassupe e Namobene; d) Pegmatitos de Nuaparra I e Nuaparra II. Fonte: adaptado de (Aquater, 1983; Gomes *et al.*, 2008)

IX. Conclusões e Recomendações

A finalidade geral deste trabalho é de contribuir na prospeção geológica dos filões pegmatíticos com minerais de lítio em Alto Ligonha (Moçambique), através da utilização de análises de técnicas de deteção remota, identificando assinaturas espetrais no terreno e do uso de imagens do sensor ASTER, Landsat (5 e 8), e Sentinel 2 (MSI), que possam indicar a presença de pegmatitos mineralizados. Cinco técnicas de deteção remota foram aplicadas (NDVI, ACP, RGB, Razão de bandas, classificação supervisionada de imagens e Machine Learning). Todas as técnicas provaram ser eficazes para o reconhecimento de novos e antigos alvos de mineralizações.

O NDVI demonstrou um alto desempenho na identificação e quantificação das classes de cobertura vegetal predominantes na região. Recomenda-se antes de trabalhos de Prospeção e Pesquisa, que se faça um trabalho com base no NDVI, e que se façam pesquisas avançadas em outros índices de vegetação, por exemplo, o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (Soil--Adjusted Vegetation Index – SAVI), e o Índice de Área Foliar (IAF), por sensores que possuem melhor resolução espectral e espacial, com objetivo de obter uma melhor classificação da cobertura vegetal, uma vez que a região de Alto Ligonha se carateriza por apresentar diferentes tipos de vegetação.

O ACP provou ser as uma das técnicas mais eficazes para o reconhecimento de áreas mineralizadas nas zonas de estudo selecionadas (Muiane, Naipa, Marropino, Morrua, exceto Nuaparra).

As razões de banda provaram ser a técnica menos eficaz para identificar minerais de lítio. Em relação às imagens Sentinel 2 A, ASTER e Landsat-8, estas apresentaram os melhores resultados para todas as técnicas utilizadas. O Landsat-5 teve fraco resultado para os pegmatitos de menor extensão, como Nuaparra, Nassupe e Namobene.

A combinação RGB (2-11-12/ 3-11-12), das imagens Sentinel 2 A, permitiu uma visualização de novos alvos como pegmatitos de Namobene, Nassupe e Muiane II. As imagens Sentinel 2 mostraram resultados eficazes na identificação de minerais de lítio, apesar da inexistência de bandas térmicas.

Os minerais escolhidos como objeto de demostração a partir do espetroradiómetro, foram os seguintes: LM (lepidolite), MM (moscovite), KN (cunzite), FM (feldspatos), e PN1 (turmalinas), possibilitando a identificação das principais fases e com reconhecimentos, segundo as suas assinaturas espectrais caraterísticas, extraída nas bibliotecas, exceto a cunzite, que em nenhuma biblioteca aparece.

A técnica de classificação de imagens ASTER, Landsat 5 TM, Landsat 8 e Sentinel 2 A, dos métodos de classificação espectral SAM, MinD, Maxver e SVM, permitiram identificar o zonamento de todos os afloramentos de pegmatitos estudados, contudo, permitem extrair diversas informações biofísicas.

Os pegmatitos da região são do tipo granítico, na sua maioria (LCT). Estes penetraram em rochas metamórficas (filitos cloriticos e gnaisses com anfíbolas e biotites de idades kiberianas).

Recomenda-se aplicar e testar técnicas que integrem dados geofísicos e geoquímicos e de deteção remota (imagens óticas e de micro-ondas) que possam adicionar informações ao conhecimento geológico atual da região, principalmente em áreas muito alteradas e com pouca exposição de afloramentos rochosos.

Recomenda-se um estudo pela DNG na identificação dos prováveis depósitos minerais, e a elaboração de cartas grandes deste trabalho a fim de estarem disponíveis para consulta.

9.1. Contribuições da tese

i. As técnicas de prospeção de pegmatitos utilizadas nesse trabalho comportam-se de forma ágil e flexível para a classificação de imagens de satélite, podendo ser aplicada em diferentes afloramentos;
ii. Determinação das técnicas mais eficientes e precisas para a classificação de imagens para uso e cobertura do solo em áreas de ocorrência de pegmatitos;
iii. Publicação da tese e de artigos científicos;
iv. Investimentos em Moçambique na área de Mineralogia Industrial.

9.2. Trabalhos futuros

a) Desenvolver um processo de padronização de imagens de diferentes satélites, com diferentes resoluções e Distâncias de amostragens no solo (GSD), para que seja possível aumentar a serie histórica dos pegmatitos de Alto Ligonha;
b) Realizar automatização dos plugins (módulos) de tratamento de imagens;
c) Realizar novos estudos comparativos com diferentes técnicas de classificação supervisionada de imagens e machine learning a partir das CNNs para a Prospecção de Pegmatitos;

X. Referências Bibliográficas

Abdullah, A.A., Oskierski, H.C., Altarawneh, M., Senanayake, G., Lumpkin, G., and Dlugogorski, B.Z. (2019) Phase transformation mechanism of spodumene during its calcination. *Minerals Engineering*, **140**.

Aboelkhair, H., Ninomiya, Y., Watanabe, Y., and Sato, I. (2010) Processing and interpretation of ASTER TIR data for mapping of rare-metal-enriched albite granitoids in the Central Eastern Desert of Egypt. *Journal of African Earth Sciences*. .

Ademir Marques, J., Rossa, P., Horota, R., Brum, D., de Souza, E., Aires, A., Kupssinskü, L., Veronez, M., Junior, L.G., and Cazarin, C. (2019) Improving spatial resolution of LANDSAT spectral bands from a single RGB image using artificial neural network. *2019 13th International Conference on Sensing Technology (ICST) (ICST2019)*.

Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Lhissou, R., Maacha, L., Azmi, M., Zouhair, M., and Bachaoui, E.M. (2017) Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas. *Advances in Space Research*, **60**, 2355–2367. COSPAR.

Afonso, R. (1980) Contribuicao da detecao remota para o conhecimento geologico em Mocambique. *Garcia de Orta, Serie Geológica*, **4 (1–2)**, 11.

Afonso, R. and Marques, J. (1993) *Recursos Minerais da República de Moçambique, contribuição para o seu conhecimento.* P. in.: 1st edition. Instituto de Investigação Científica Tropical, Lisboa e Direcção Nacional de Geologia, Maputo, 149 pp.

Afonso, R., Marques, J., and Ferrara, M. (1998) *Geologia de Moçambique_Evoluçao Geologica de Moçambique.* P. in.: Instituto de Investigação Científica Tropical, Lisboa e Direcção Nacional de Geologia, Lisboa/Maputo, 100 pp.

Afonso, R.S. (1976) A Geologia de Moçambique-Notícia Explicativa da Carta Geológica de Moçambique 1:2000000. Direcção de Serviços de Geologia e Minas, República Popular de Moçambique;p., Maputo.

Almeida, J.B., Moreira, A.A., Fernandes, F.H.S., Almeida, R.P. de, and Nery, C.V.M. (2014) O sensoriamento remoto aplicado ao estudo da desertificação na região semiárida do norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geomática*, **2**, 31.

Amorim, A. (2015) Detecção Remota e geoprocessamento automático no estudo da evolução da margens estuarinas (Estuário do Tejo). 154.

Aquater. (1983) *Carta dos indícios não conhecidos Pesquisas e Minas 1:50000, Folha Mutala 1537 D4*. Maputo, Moçambique, 549 pp.

Barros, R. (1963) Classificação dos pegmatitos da Zambézia (Moçambique). *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal XXII*, **XXII**, 299–305.

Barros, R. and Vicente, C. (1963) *Estudo dos campos pegmatiticos da Zambezia relatorio da mossão de estudos em Moçambique campanha de 1963*. 133 pp.

Barton, C.D. and Karathanasis, A.D. (2002) Clay minerals in Rattan Lal. *Encyclopedia of Soil Science*, 187–192.

Bedini, E. (2017) The use of hyperspectral remote sensing for mineral exploration: a review. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, **7**, 189–211.

Beleites, C. (2020) Fitting Baselines to Spectra. Trieste, Italia.

Bishop, C. (2006) *Pattern Recognition and Machine Learning*. P. in: *Information Science and Statistics*. Springer, New York, 758 pp.

Boleo, J.. (1950) *Geografia Física de Moçambique*. P. in.: 1st edition. Imprensa Nacional Lisboa, Lisboa.

Bolouki, S.M., Ramazi, H.R., Maghsoudi, A., Beiranvand Pour, A., and Sohrabi, G. (2019) A Remote Sensing-Based Application of Bayesian Networks for Epithermal Gold Potential Mapping in Ahar-Arasbaran Area, NW Iran. *Remote Sensing*, **12**, 105.

Borges, A. and Nunes, A. (1949) *Geologia e Jazigos Minerais do Alto Molócuè*. Lourenço Marques, 100 pp.

Boswell, J., Lowe, H., Adorati, K., Ray, S.D., and Rust, C. (2019) Lithium. P. in: *Side Effects of Drugs Annual*.

Bradley, D.C., McCauley, A.D., and Stillings, L.M. (2010) Mineral-Deposit Model for Lithium-Cesium- Tantalum Pegmatites Mineral Deposit Models for Resource Assessment Scientific Investigations Report 2010–5070–O.

Bradley, D.C., Stillings, L., Jaskula, B., Munk, L., and McCauley, A. (2017) *Lithium, Chapter K of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. P. in: *Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. 1st edition. Virginia, 34 pp.

Braga, M.A.S., Gomes, C.L., Duplay, J., and Paquet, H. (2008) Clay minerals in the Namacotche Pegmatite Group from Zambezia Province, Mozambique: main constituents of late-stage secondary paragenesis. *Clay Minerals*, **43**, 597–613.

Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., and Stone, C. (2000) *Classification and Regression Trees*. P. in.: CHAPMAN & HALUCRC, Florida, 366 pp.

Brown, T., Idoine, N., Raycraft, E., Shaw, R., Hobbs, S., Everett, P., Deady, E., and Bide, T. (2018) *World mineral production 2012-2016*. P. in.: British Geological Survey, 97 pp.

Buchanan, M.E. (1981) Methods of data collection. *AORN Journal*, **33**.

Buerger, M.J. (1954) The stuffed derivatives of the silica structures. *American Mineralogist*, **39**, 600–614.

Cadoppi, P., Costa, M., and Sacchi, R. (1987) A cross section of Namama Thrust belt (Mozambique). *Journal of African Earth Sciences*, **6**, 493–504.

Calvin, W.M., Littlefield, E.F., and Kratt, C. (2015) Remote sensing of geothermal-related minerals for resource exploration in Nevada. *Geothermics*, **53**, 517–526.

Cardoso-Fernandes, J. (2018) Remote sensing applied to the Bajoca lithiniferous area. Universidade do Porto, 199 pp.

Cardoso-Fernandes, J., Teodoro, A.C., and Lima, A. (2019) Remote sensing data in lithium (Li) exploration: A new approach for the detection of Li-bearing pegmatites. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **76**, 10–25. Elsevier.

Cardoso-Fernandes, J., Teodoro, A.C., Lima, A., Perrotta, M., and Roda-Robles, E. (2020) Detecting Lithium (Li) Mineralizations from Space: Current Research and Future Perspectives. *Applied Sciences 2020, Vol. 10, Page 1785*, **10**, 1785.

Carmelo, A., Barbosa, I., and Campos, J. (2009) Mapeamento estrutural e litológico a partir de imagens ASTER (TIR) para a região da bacia do Rio Preto (DF, GO, MG). *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 3167–3171.

Carranza, E.J.M. and Hale, M. (2002) Mineral imaging with Landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrane. *International Journal of Remote Sensing*, **23**, 4827–4852. Taylor & Francis.

Carvalho, A. (2011) *Dicionário de Geologia*. P. in.: 1º. Ancora, Lisboa, 486 pp.

Castro, A. and Amaral, A. (2017) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for evaluation of forest fires in the summer of 2016 in Portugal. Universidade do Porto, 64 pp.

Cerny, P. (1972) The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba; VII, Eucryptite. *The Canadian Mineralogist*, **11**, 708–713.

Cerny, P. (1991) Rare-element granitic pegmatites. Part II: regional to global environments and petrogenesis. *Geoscience Canada*. .

Cerny, P. and Ercit, T.S. (1985) Some recent advances in the mineralogy and geochemistry of Nb and Ta in rare-element granitic pegmatites. *Bulletin de Mineralogie*, **108**, 499–532.

Cerny, P. and Ercit, T.S. (2005) The Classification of Granitic Pegmatites Revisited. *The Canadian Mineralogist*, **43**, 2005–2026.

Cerny, P., Meintzer, R.E., and Anderson, A.J. (1985) Extreme fractionation in rare-element

granitic pegmatites: selected examples of data and mechanisms. *Canadian Mineralogist*, **23**, 381–421.

Černý, P. (1991) Rare-element Granitic Pegmatites. Part II: Regional to Global Environments and Petrogenesis. *Geoscience Canada*, **18**.

Chavez, P. (1996) Image-based atmospheric corrections revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.*, **62(9)**, 1025-1036.

Chavez, P. and Kwarteng, A. (1989) Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis (PCA). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **55**, 339–348.

Chavez, P.S. (1988) An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, **24**, 459–479.

Chikambwe, E.M. (2002) GIS-based predictive mapping for aquamarine-bearing pegmatites , Lundazi area , northeast Zambia . *Geo-Information Science*.

Clark, R.N. (1999) *Spectroscopy of Rocks and Minerals and Principles of Spectroscopy. Manual of Remote Sensing*. P. in: *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*. 3–58 pp.

Clark, R.N. and Roush, T.L. (1984) Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 6329–6340.

Clark, R.N., King, T.V. V, Klejwa, M., Swayze, G.A., and Vergo, N. (1990) High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research*, **95**.

Clark, R.N., Swayze, G.A., Gallagher, A.J., King, T.V. V., and Calvin, W.M. (1993) The U.S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1 : 0.2 to 3.0 μm. *U.S. Geological Survey Open File Report 93-592*, **1**, 1326.

Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Kokaly, R.F., Sutley, S.J., Dalton, J.B., McDougal, R.R., and Gent, C.A. (2003) Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems. *Journal of Geophysical Research E: Planets*, **108**, 44.

Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R.A., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Kokaly, R.F., and Sutley, S.J. (2007) *USGS Digital Spectral Library splib06a*. Reston, VA.

Cofré, R., Herzog, R., Corcoran, D., and Rosas, F.E. (2019) A comparison of the maximum entropy principle across biological spatial scales. *Entropy*, **21**, 1–20.

Congalton, R. and Green, K. (2009) *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. P. in: *The Photogrammetric Record*. 2nd edition. 210 pp.

Congalton, R.G. (1991) A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely

Sensed Data. *REMOTE SENS. ENVIRON.*, **37**, 35–46.

Congedo, L. (2016) Semi-Automatic Classification Plugin Documentation.

Congedo, L. (2017) Semi-Automatic Classification Plugin Documentation Versión 6.2.0.1 Luca Congedo.

Correia Neves, J. and Lopes Nunes, J. (1966) Geochemistry of the Pegmatitic Field of Alto--Ligonha (Mozambique--PEA) I. Distribution of K, Rb, Ca and Sr in Feldspars and their geochemical significance. *Rev.Estudos Gerais Univ.*, **3**, 30.

Çorumluoğlu, O. and Vural, A. (2013) PCA of Landsat Band Ratio Images for Capturing Kula Basalts in Turkey. P. 651 in: *Proceedings of the Second International Conference on Water, Energy and the Environment*. Kusadası, Turkey.

Cossu, R., Petitdidier, M., Linford, J., Badoux, V., Fusco, L., Gotab, B., Hluchy, L., Lecca, G., Murgia, F., Plevier, C., Renard, P., Schwichtenberg, H., de Cerff, W.S., Tran, V., and Vetois, G. (2010) A roadmap for a dedicated Earth Science Grid platform. *Earth Science Informatics*, **3**, 135–148.

Council for Geoscience. (2007) Map Explanation: Sheets 1537 Alto Molócuè, 1538 Murrupula, 1539 Nampula, 1540 Mogincual, 1637 Errego, 1638 Gilé and 1639–40 Angoche, Ministério dos Recuursos Minerais e Energia. Mozambique and Council for Geoscience, Pretoria, South Africa, Maputo.

Cracknell, A.P. and Hayes, L.W.B. (2007) *Introduction to remote sensing*. P. in.: Taylor & Francis, London; New York.

Cronwright, M. (2005a) A review of the rare-element pegmatite's of the Alto Ligonha Pegmatite Province, northern Mozambique and exploration guideline. Rhodes University, 20–38 pp.

Cronwright, M.S.C. (2005b) A review of the rare-element pegmatite's of the Alto Ligonha Pegmatite Province, northern Mozambique. 168 pp.

Cŕosta, A.P., De Souza Filho, C.R., Azevedo, F., and Brodie, C. (2003) Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, **24**, 4233–4240.

Crowley, J.K., Brickey, D.W., and Rowan, L.C. (1989) Airborne imaging spectrometer data of the Ruby Mountains, Montana: Mineral discrimination using relative absorption band-depth images. *Remote Sensing of Environment*, **29**, 121–134.

Cruz, Z. and Ribeiro, G. (2008) Ensaios de Segmentação e Classificação Digital de Unidade de Conservação Ambiental Estudo de Caso : Parque Nacional da Serra dos Órgãos. P. 9 in: *II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias Da Geoinformação*. Recife.

Cudahy, T. (2016) Mineral Mapping for Exploration : An Australian Journey of Evolving Spectral Sensing Technologies and Industry Collaboration. *geosciences*, **6**, 52.

Dana, E.S. and W.F. (2008) *Manual de Mineralogia*. P. in.: 4th edition. Enlarged and revised, 24th printing 1966, New York.

Deer, A.., Howie, A., and Zussman, J. (2010) *'Minerais Constituintes das Rochas. Uma introdução'*. P. in.: 4th edition. Fundação Caloust Gulbenkian.

Deilmai, B., Ahmad, B., and Zabihi, H. (2014) Comparison of two classification methods (MLC and SVM) to extract land use and land cover in Johor Malaysia. *7th IGRSM International Remote Sensing & GIS Conference and Exhibition*, **20**, 7.

Dessemond, C., Lajoie-Leroux, F., Soucy, G., Laroche, N., and Magnan, J. (2019) Spodumene : The Lithium Market , Resources and Processes. *Minerals*, **9**, 17.

Deutsche Bank. (2016) Annual Report 2016. *American journal of pharmaceutical education*, **80**, S9.

DeVries, P.M.R., Viégas, F., Wattenberg, M., and Meade, B.J. (2018) Deep learning of aftershock patterns following large earthquakes. *Nature*, **560**, 632–634. Springer US.

Dias, P., Gomes, C., Guimarães, F., and Marques, J. (2006) Estilos contrastantes da mineralização bismutífera–equilíbrio e evolução na Província Pegmatítica da Zambézia, Moçambique. *Actas do VII Congresso Nacional de Geologia*, 1161–1164.

DiCarlo, J.J., Zoccolan, D., and Rust, N.C. (2012) How does the brain solve visual object recognition? *Neuron*, **73**, 415–434. Elsevier Inc.

Diop, M., Lundell, M., Bucknall, J., Lovei, M., De Aquino, A., and Kornexl, W. (2016) *PROPOSED CREDIT FROM THE INTERNATIONAL DEVELOPMENT ASSOCIATION (US $ 15M), AND A PROPOSED GRANT FROM THE*. Maputo, Moçambique, 131 pp.

Drysdale, D.J. (1975) Hydrotermal synthesis of various spodumenes. *Amer*, **60**, 105-110.

Ducart, D.F. (2004) Caracterização da alteração hidrotermal associada às ocorrências auríferas de Los Menucos , Argentina , por meio de técnicas de sensoriamento remoto e espectroscopia de reflectância. Universidade Estadual de Campinas, 86 pp.

Dudik, M., Phillips, S.J., and Schapire, R.E. (2004) Performance guarantees for regularized maximum entropy density estimation. *Lecture Notes in Artificial Intelligence (Subseries of Lecture Notes in Computer Science)*, **3120**, 472–486.

Dymond, J.R. (1986) An lmproved Skidmoreflurner Classifier. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, **59**, 623–626.

Eberle, D.G., Daudi, E.X.F., Muiuane, E.A., and Pontavida, A.M. (2010) Mapeamento aero-geofísico de pegmatitos mineralizados na Província Pegmatítica de Alto Ligonha , no norte de Moçambique. **40**, 527–536.

Eduvirgem, R.V., Periçato, A.J., Sanches, C.C., Soares, C.R., Caraminan, L.M., and Santos, M.V. dos. (2018) Análise da temperatura aparente de superfície e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) em Lisboa, Portugal, no verão de 2017. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, **5**, 587–597.

Elsayed Zeinelabdein, K.A., El-Nadi, A.H.H., and Babiker, I.S. (2020) Prospecting for gold mineralization with the use of remote sensing and GIS technology in North Kordofan State, central Sudan. *Scientific African*, **10**, e00627. Elsevier B.V.

van Engelen, J.E. and Hoos, H.H. (2020) A survey on semi-supervised learning. *Machine Learning*, **109**, 373–440. Springer US.

Epiphanio, J., Formaggio, A., Valeriano, M., and Olibeira, J. (1992) Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo. *Inpe*, 142.

Ermrich, M. and Opper, D. (2011) *XRD for the analyst: getting acquainted with the principles*. P. in.: 95 pp.

Faracini, J.C.B. (2017) Técnicas de detecção remota na monitorização da vegetação e a contribuição da Ria Formosa no ciclo do carbono. Universidade de Algarve.

Figueiredo, G.C. and Vieira, C.A.O. (2007) Estudo do comportamento dos índices de Exatidão Global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de imagens do sensoriamento remoto. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 5755–5762.

Foody, G.M. (2002) Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, **80**, 185–201.

Fung, D., Voland, B., and Paech, H. (1990) Contribution to the geochemical study of the Nb-Ta pegmatite of Muiane, P.R. of Mozambique. *Z.geology Wiss*, **5**, 447–457.

Gaffey, S.J. (1985) Reflectance spectroscopy in the visible and near-infrared (0.35- 2.55 mu m): applications in carbonate petrology. *Geology*, **13**, 270–273.

Gaida, W., Breunig, F.M., Galvão, L.S., and Ponzoni, F.J. (2020) Correção Atmosférica em Sensoriamento Remoto: Uma Revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **13**, 229.

Ganem, K.A. (2017) Classificação da Cobertura do Solo na Caatinga a partir de Imagens do Landsat-8 e da Ferramenta Google Earth Engine: uma comparação entre dados com e sem correção atmosférica. UNiversidade de Brasilia, 202 pp.

Garrido, M.. (1992) Las Mineralizaciones de Litio Associadas a Magmatismo Acido en Extremadura Y su encuadre en la zona Centro Iberica. Universidad Complutense de Madrid, Faculdad de Ciencias Geologicas, 342 pp.

Gemusse, U. (2014) Prospecção Geológica dos pegmatitos de Mogovolas-Moma-Moçambique. Universidade de Aveiro, 131 pp.

Gemusse, U., Lima, A., and Teodoro, A. (2018) Pegmatite spectral behavior considering ASTER and Landsat 8 OLI data in Naipa and Muiane mines (Alto Ligonha, Mozambique). P. 11 in: *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications IX*. Berlin, Germany.

Gemusse, U., Lima, A., and Teodoro, A. (2019) Comparing different techniques of satellite imagery classification to mineral mapping pegmatite of Muiane and Naipa: Mozambique). 49.

Ghosh, S.N. (1978) Infra-red spectra of some selected minerals, rocks and products. *Journal of Materials Science*, **13**, 1877–1886.

Giguere, S., Boucher, T., Carey, C.J., Mahadevan, S., and Dyar, M.D. (2017) A Fully Customized Baseline Removal Framework for Spectroscopic Applications. *Applied Spectroscopy*, **71**, 1457–1470.

Goldblatt, R., Deininger, K., and Hanson, G. (2018) Utilizing publicly available satellite data for urban research: Mapping built-up land cover and land use in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Development Engineering*, **3**, 83–99. Elsevier Ltd.

Gomes, C. (1988) *Argilas: O que são e para que servem*. P. in.: Lisboa:

Gomes, C. (2003) O papel dos fenómenos de evolução tardia na génese de gemas pegmatíticas: ilações da análise paragenética em pegmatitos LCT do Alto Ligonha (Moçambique). *Recursos Geológicos e Formação, Imprensa Universitaria*, **2**, 217–228.

Gomes, C. (2009) Microlites and associated oxide minerals from Naipa pegmatites - Alto Ligonha - Zambezia - Mozambique. **19**, 167–171.

Gomes, C., Marques, J., Dias, P., and Costa, J. (2008) Análise descritiva das Unidades Portadoras de Mineralização Tantalífera em Pegmatitos do Sul da Província Zambeziana (Moçambique). P. 23 in: *2º Congresso de Engenharia de Moçambique*. Universidade do Minho, Maputo.

Gomes, L. (2010) Análise estrutural e paragénese do pegmatito de Namacotche – Zambézia, Moçambique. *Revista Electrónica de Ciências da Terra Geosciences On-line Journal*, **20.**

Gómez, D. and Montero, J. (2011) Determining the accuracy in image supervised classification problems. *Proceedings of the 7th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology, EUSFLAT 2011 and French Days on Fuzzy Logic and Applications, LFA 2011*, **1**, 342–349.

Gonçalves, A.O., Melgarejo, J.C., Alfonso, P., Amores, S., Paniagua, A., Neto, A.B., Neto, E.A., and Camprubí, A. (2019) The distribution of rare metals in the LCT pegmatites from the Giraúl Field, Angola. *Minerals*, **9**.

Gorelick, N. (2013) Google Earth Engine. P. 11997 in: *EGU General Assembly Conference Abstracts.*

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., and Moore, R. (2017) Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, **202**, 18–27. The Author(s).

Grantham, G., Ingram, A., and Cronwright, C. (2007) *Map Explanation of sheets Furancungo (1433) and Ulongue (1434)*. Maputo., Mozambique.

Grantham, G.H., Maboko, M., and Eglington, B.M. (2003) A review of the evolution of the Mozambique Belt and implications for the amalgamation and dispersal of Rodinia and Gondwana. *Geological Society, London, Special Publications*, **206**, 401–425.

Grunsky, E.C. (2002) The application of principal components analysis to multi-beam RADARSAT-1 satellite imagery: A tool for land cover and terrain mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **28**, 758–769. Taylor & Francis.

Guidici, D. and Clark, M.L. (2017) One-Dimensional Convolutional Neural Network Land-Cover Classification of Multi-Seasonal Hyperspectral Imagery in the San Francisco Bay Area , California. *Remote Sens.*, **9**, 25.

Güler, M., Yomralioğu, T., and Reis, S. (2007) Using landsat data to determine land use/land cover changes in Samsun, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, **127**, 155–167.

Gupta, R.P. (2017) *Remote Sensing Geology*. P. in: *Remote Sensing Geology*. 3rd edition. Springer, 1–428 pp.

Hamunyela, E., Rosca, S., Mirt, A., Engle, E., Herold, M., Gieseke, F., and Verbesselt, J. (2020) Implementation of BFASTmonitor Algorithm on Google Earth Engine to support large-area and sub-annual change monitoring using earth observation data. *Remote Sensing*, **12**, 16.

Han, T. and Nelson, J. (2015) Mapping hydrothermally altered rocks with Landsat 8 imagery: A case study in the KSM and Snowfield zones, northwestern British Columbia. *British Columbia Geological Survey Paper*, **2005**–**1**, 103–112.

Hartzer, F. and Manhiça, V. (2008) Carta geológica : [Moçambique]. República de Moçambique, Ministério dos Recursos Minerais, Direcção Nacional de Geologia, [Maputo].

Haykin, S. (2008) *Neural Networks and Learning Machines*. P. in: *Pearson Prentice Hall New Jersey USA 936 PLinks*. 906 pp.

Hess, K.R., Abbruzzese, M.C., Lenzi, R., Raber, M.N., and Abbruzzese, J.L. (1999) Classification and regression tree analysis of 1000 consecutive patients with unknown primary carcinoma. *Clinical Cancer Research*, **5**, 3403–3410.

Hess, T., Matt, C., and Benlian, A. (2016) *Options for Formulating a Digital Transformation Strategy MIS Quarterly Executive*. London, 39 pp.

Hewson, R., Mshiu, E., Hecker, C., van der Werff, H., van Ruitenbeek, F., Alkema, D., and van der Meer, F. (2020) The application of day and night time ASTER satellite imagery for geothermal and mineral mapping in East Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **85**, 101991.

Hu, B., Xu, Y., Wan, B., Wu, X., and Yi, G. (2018a) Hydrothermally altered mineral mapping using synthetic application of Sentinel-2A MSI, ASTER and Hyperion data in the Duolong area, Tibetan Plateau, China. *Ore Geology Reviews*, **101**, 384–397. Elsevier.

Hu, H., Bai, J., Xia, G., Zhang, W., and Ma, Y. (2018b) Improved Baseline Correction Method Based on Polynomial Fitting for Raman Spectroscopy. *Photonic Sensors*, **8**, 332–340.

Huete, A., Justice, C., and Leeuwen, W. (1999) Modis Vegetation Index Algorithm Theoretical Basis. *Environmental Sciences*, 129.

Hunt, G.R. and Ashley, R.P. (1979) Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, **74**, 1613–1629.

Hunt, G.R., Salisbury, J.W., and Lenhoff, C.J. (1973) Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. VI. Additional silicates. *Modern Geology*, **4**, 85–106.

Hunting. (1985) *Gold deposits in Mozambique – Mineral Development Study, Internal report Mozambique*. Maputo, 140 pp.

Hurlbut, C.S. (1957) Bikitaite, LiAlSi2O6.H2O, a new mineral from Southern Rhodesia. *Am. Mineral*, **42**, 792–797.

INE. (2017) *Resultados Preliminares do IV Censo Geral da População e Habitação de Moçambique*. Maputo, Moçambique.

INTERGEO. (1983) *Pegmatitos de Nuaparra, Relatórios sobre os resultados da Prospecção e Pesquisa Geológica*. Moçambique, Maputo, 87 pp.

Jamal, D. and De Wit, M. (2004) U–Pb geochronology and Sm–Nd data from Lurio Belt, NE-Mozambique; significance for crustal evolution. Pp. 204–205 in.: Orle´ans, France.

Jarlan, L., Mangiarotti, S., Mougin, E., Mazzega, P., Hiernaux, P., and Dantec, V. Le. (2008) Assimilation of SPOT/VEGETATION NDVI data into a sahelian vegetation dynamics model. *Remote Sensing of Environment*, **112**, 1381–1394.

Jeppson, D.W., Ballif, J.L., Yuan, W.W., and Chou, B. (1978) Lithium Literature Review: Lithium'S Properties and Interactions. *Hanford Engineering Development Laboratory*, 1–111.

Kalinowski, A. and Oliver, S. (2004a) ASTER Mineral Index Processing Manual. *Geoscience Australia*, **Remote Sen**, 1–37.

Kalinowski, A. and Oliver, S. (2004b) ASTER Mineral Index Processing Manual. *Geoscience Australia*, **Remote Sen**, 1–37.

Kane, G., Palmer, D., Phillips, A., Kiron, D., and Buckley, N. (2015) *Strategy , not Technology , Drives Digital Transformation Becoming a digitally mature enterprise*. 29 pp.

Kati, I., Nakhcha, C., Bakhchouch, O., and Tabyaoui, H. (2018) Application of Aster and Sentinel-2A Images for Geological Mapping in Arid Regions: the Safsafate Area in the Neogen Guercif basin, Northern Morocco. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, **7**, 2782–2792.

Khan, N., Taqoob, I., Hashem, I., Inayat, Z., Ali, W., Alam, M., Shiraz, M., and Gani, A. (2014) Big Data: Survey, Technologies, Opportunities, and Challenges. *Hindawi Publishing Corporation ?e Scientific World Journal*, **18**, 18.

Khatami, R., Mountrakis, G., and Stehman, S. V. (2016) A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research. *Remote Sensing of Environment*, **177**, 89–100.

Klein, C., Dutrow, B., and Bacalau, J. (2012) *Manual de ciências dos Minerais.* P. in.: Bookman, Porto Alegre.

Klockmann, F. and Ramdohr, P. (1961) Tradado de Mineralogia. P. 738 in: (S.. Gustavo Gill, editor). Barcelona.

Knipling, B. (1970) Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sens Environ*, **1**, 155–159.

Kokaly;, R.F., Clark;, R.N., and Gregg A. Swayze, K. Eric Livo, Todd M. Hoefen, Neil C. Pearson, Richard A. Wise, William M. Benzel, Heather A. Lowers, Rhonda L. Driscoll, and A.J.K. (2017) *USGS Spectral Library Version 7*. 61 pp.

Krishnamurthy, Y. and Sreenivasan, G. (2005) Remote Sensing Technology for Exploration of Mineral Deposits with Special Reference to Bauxite and Related Minerals. P. in: *The International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium*. Nagpur.

Krizhevsky, A. and Hinton, G. (2012) Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *In Advances in Neural Information Processing Systems 25: 26th Annual Conference on Neural Information Processing Systems*, 1106–1114.

Krõner, A., Sacchi, R., Jaeckel, P., and Costa, M. (1997) Kibarian magmatism and Pan-african granulite metamorphism in Northen Mozambique: single zircon ages and regional implications. *Journal of African Earth Sciences*, **25**, 472-484.

Kruse, Fred A., A. B. Lefkoff, J. W. Boardman, K. B. Heidebrecht, A. T. Shapiro, P. J. Barloon, and A.F.H.G. (1993) Kruse_SIP_RSE93.pdf. *Remote Sens Environ*, 145–

163.

Kruse, F., Baugh, W., and Perry, S. (2015) Validation of DigitalGlobe WorldView-3 Earth imaging satellite shortwave infrared bands for mineral mapping. *Journal of Applied Remote Sensing*, **9**, 18.

Kruse, F.A. (1988) Use of airborne imaging spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern grapevine mountains, Nevada, and California. *Remote Sensing of Environment*, **24**, 31–51.

Kruse, F.A. (1993) Knowledge - based geologic mapping with imaging spectrometers. *Remote Sensing Reviews*, **8**, 3–28.

Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., and Dietz, J.B. (1993) Expert system-based mineral mapping in northern death valley, California/Nevada, using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing of Environment*, **44**, 309–336.

Kujjo, C.P. (2010) Application of remote sensing for gold exploration in the Nuba Mountains , Sudan. 1–99 pp.

Kumar, C., Chatterjee, S., Oommen, T., and Guha, A. (2020) Automated lithological mapping by integrating spectral enhancement techniques and machine learning algorithms using AVIRIS-NG hyperspectral data in Gold-bearing granite-greenstone rocks in Hutti, India. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **86**, 102006. Elsevier.

Lächelt, S. (2004) *Geology and Mineral Resources of Mozambique.* Maputo, Moçambique, 515 pp.

Lahti, S., Kallio, P., and Von Knorring, O. (1982) The Composition, Physical Properties and Occurence of Eucryptite from the Haapaluoma Pegmatite, Filand. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, **54**, 5–13.

Landis, J.R. and Koch, G.G. (1977a) An Application of Hierarchical Kappa-type Statistics in the Assessment of Majority Agreement among Multiple Observers. *Biometrics*, **33**, 363.

Landis, R.. and Koch, G. (1977b) An Application of Hierarchical Kappa-type Statistics in the Assessment of Majority Agreement among Multiple Observers Author (s): J . Richard Landis and Gary G . Koch Published by : International Biometric Society Stable URL : https://www.jstor.org/stab. *Biometrics*, **33**, 363–374.

Längkvist, M., Kiselev, A., Alirezaie, M., and Loutfi, A. (2016) Classification and Segmentation of Satellite Orthoimagery Using Convolutional Neural Networks. *Remote Sens.*, **8**, 21.

Lawrence, R.L. and Wright, A. (2001) Rule-based classification systems using classification and regression tree (CART) analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote*

Sensing, **67**, 1137–1142.

Lecun, Y., Bengio, Y., and Hinton, G. (2015) Deep learning. *Nature*, **521**, 436–444.

Lee, C., Gallagher, P., and Tu, Z. (2018) Generalizing Pooling Functions in CNNs: Mixed, Gated, and Tree" in IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, **40**, 863–875.

Li, S., Dragicevic, S., Castro, F.A., Sester, M., Winter, S., Coltekin, A., Pettit, C., Jiang, B., Haworth, J., Stein, A., and Cheng, T. (2016) Geospatial big data handling theory and methods: A review and research challenges. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **115**, 119–133.

Liew, K.Y., Khoo, L.E., and Bong, K.T. (1985) Characterisation of Bidor kaolinite and illite. *Pertanika*, **8**, 323–330.

Liland, K.H., Almøy, T., and Mevik, B. (2010) Optimal Choice of Baseline Correction for Multivariate Calibration of Spectra. *Applied Spectroscopy*, **64**, 1007–1016.

Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W. (1994) *Remote Sensing and Image Interpretation*. P. in: *Geological Magazine*. Cambridge University Press, New York., 750 pp.

Lima, A. (2000) EStrutura, Mineralogia e Génese dos Filões Aplitopegmatítos com Espodumena da Região Barroso-Alvão. Universidade do Porto, 300 pp.

Lima, A., Vieira, R., Martins, T., and Noronha, F. (2010) Minerais de lítio. Exemplo dos campos aplitopegmatíticos de Barroso- Alvão e Almendra-Barca D'alva.

Lipton, G. (1997) Spectral and microwave remote sensing: An evolution from small scale regional studies to mineral mapping and ore deposit targeting. *Proceedings of exploration 97 Fourth decennial international conference on mineral exploration*, 43–58.

Liu, T., Abd-elrahman, A., Morton, J., Wilhelm, V.L., Liu, T., Abd-elrahman, A., Morton, J., and Wilhelm, V.L. (2018) Comparing fully convolutional networks , random forest , support vector machine , and patch-based deep convolutional neural networks for object- based wetland mapping using images from small unmanned aircraft system. *GIScience & Remote Sensing*, **55**, 243–264. Taylor & Francis.

Llera, A.R., Fuertes-Fuente, M., Cepedal, A., and Martin-Izard, A. (2019) Barren and Li–Sn–Ta mineralized pegmatites from NW Spain (Central Galicia): A comparative study of their mineralogy, geochemistry, and wallrock metasomatism. *Minerals*, **9**.

London, D. (1986) Holmquistite as a guide to pegmatitic rare metal deposits. *Economic Geology*, **81**, 704–712.

London, D. (2008) Pegmatites. Book Review. *American Mineralogist*, **94**, 862–862.

Loughlin, P.. (1991) Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **57**, 1163–1169.

Loum, M., Diack, M., Ndour, N.Y.B., and Masse, D. (2016) Effect of the Continuum Removal in Predicting Soil Organic Carbon with Near Infrared Spectroscopy (NIRS) in the Senegal Sahelian Soils. *Open Journal of Soil Science*, **06**, 135–148.

Lowe, A., Harrison, N., and French, A.P. (2017) Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress. *Plant Methods*, **13**, 1–12. BioMed Central.

Macey, P.H., Miller, J., Rowe, C., Grantham, G., Siegfried, P., Armstrong, R., Kemp, J., and Bacalau, J. (2006) A new lithostratigraphic subdivision of the rocks of the Monapo Structure, NE Mozambique'. *Precambrian Research, Abstract, 21st Colloquium of African Geology,* 105–106.

Macey, P.H., Thomas, R.J., Grantham, G.H., Ingram, B.A., Jacobs, J., Armstrong, R.A., Roberts, M.P., Bingen, B., Hollick, L., de Kock, G.S., Viola, G., Bauer, W., Gonzales, E., Bjerkgård, T., Henderson, I.H.C., Sandstad, J.S., Cronwright, M.S., Harley, S., Solli, A., Nordgulen, T., Motuza, G., Daudi, E., and Manhiça, V. (2010) Mesoproterozoic geology of the Nampula Block, northern Mozambique: Tracing fragments of Mesoproterozoic crust in the heart of Gondwana. *Precambrian Research*, **182**, 124–148.

Macey, P.H., Miller, J.A., Rowe, C.D., Grantham, G.H., Siegfried, P., Armstrong, R.A., Kemp, J., and Bacalau, J. (2013) Geology of the Monapo Klippe, NE Mozambique and its significance for assembly of central Gondwana. *Precambrian Research*, **233**, 259–281. Elsevier B.V.

Madejová, J., Bujdák, J., Janek, M., and Komadel, P. (1998) Comparative FT-IR study of structural modifications during acid treatment of dioctahedral smectites and hectorite. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **54**, 1397–1406.

MAE. (2005) *Perfil do Distrito de Gilé, Província da Zambézia*. Gilé, 60 pp.

Manjate, V.A. (2015) Caracterização Geocronológica dos granitóides do Complexo de Bárue e da Suíte de Guro , Centro-Oeste de Moçambique: Implicações tectônicas e Metalogenéticas. 9–20.

Manthiram, A., Fu, Y., Chung, S.H., Zu, C., and Su, Y.S. (2014) Rechargeable lithium-sulfur batteries. *Chemical Reviews*. .

Mantovani, M., Escudero, A., Alba, M.D., and Becerro, A.I. (2009) Stability of phyllosilicates in Ca(OH)2 solution: Influence of layer nature, octahedral occupation, presence of tetrahedral Al and degree of crystallinity. *Applied Geochemistry*, **24**, 1251–1260.

Manuel, R., Brito, M., Chichorro, M., and Rosa, C. (2017) Remote Sensing for Mineral Exploration in Central Portugal. *Minerals*, **7**, 30.

Marques, J. (2017) Distribuição dos Campos Pegmatiticos em Moçambique:Sua localização, caraterização e Mineralizações. Pp. 557–558 in: *Proceedings CLME2017/VCEM 8º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia / V Congresso de Engenharia de Moçambique*. Maputo.

Martins, N. (2012) Utilização de imagens de satélite de alta resolução para extracção de elementos em ambiente urbano. Universidade de Lisboa, 89 pp.

Van Der Meer, F. (2000) Spectral curve shape matching with a continuum removed CCSM algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, **21**, 3179–3185.

Van der Meer, F.D., van der Werff, H.M.A., and van Ruitenbeek, F.J.A. (2017) Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sensing of Environment*, **148**, 124–133.

Melcher, F., Graupner, T., Henjes-Kunst, F., Oberthür, T., Sitnikova, M., Gäbler, E., Gerdes, A., Brätz, H., Davis, D., and Dewaele, S. (2008) Analytical fingerprint of columbite-tantalite (coltan) mineralisation in pegmatites - Focus on Africa. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series*, 615–624.

Meldahl, P., Heggland, R., Bril, B., and De Groot, P. (2001) Identifying faults and gas chimneys using multiattributes and neural networks. *Leading Edge (Tulsa, OK)*, **20**, 5.

Mendes, D., Perrota, M., Costa, M., and Paes, V. (2017) Mapeamento espectral para identificação de assinaturas espectrais de minerais de lítio em imagens ASTER (NE/MG). Pp. 5273–5280 in: *Anais Do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* (INPE, editor). São Paulo.

Mendonça, C., Andrade, A., and Neto, M. (2018) USO DA IoT , BIG DATA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NAS CAPACIDADES DINÂMICAS. *Pensamento Contempporaneo em Administração*, **12**, 131–151.

Meneses, P. and Almeida, T. (2012) *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. P. in.: Brasilia, 276 pp.

Menges, F. (2019) Spectragryph-optical spectroscopy software -. <https://www.effemm2.de/spectragryph/down.html>.

Meshram, P., Pandey, B.D., and Mankhand, T.R. (2014) Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review. *Hydrometallurgy*, **150**, 192–208.

Miller, J.A., Faber, C., Rowe, C.D., Macey, P.H., and du Plessis, A. (2013) Eastward transport of the Monapo Klippe, Mozambique determined from field kinematics and computed tomography and implications for late tectonics in central Gondwana. *Precambrian Research*, **237**, 101–115. Elsevier B.V.

Minghelli, A., Spagnoli, J., Lei, M., Chami, M., and Charmasson, S. (2020) Shoreline

extraction from worldview2 satellite data in the presence of foam pixels using multispectral classification method. *Remote Sensing*, **12**, 1–17.

Mohr, S.H., Mudd, G.M., and Giurco, D. (2012) Lithium resources and production: Critical assessment and global projections. *Minerals*, **2**, 65–84.

Mondal, A., Kundu, S., Chandniha, S.K., Shukla, R., and Mishra, P.K. (2012) Comparison of Support Vector Machine and Maximum Likelihood Classification Technique using Satellite Imagery. *journal of Remote Sensing and GIS*, **1**, 116–123.

Moore, F., Rastmanesh, F., Asadi, H., and Modabberi, S. (2008) Mapping mineralogical alteration using principal-component analysis and matched filter processing in the Takab area, north-west Iran, from ASTER data. *International Journal of Remote Sensing*, **29**, 2851–2867.

Moore, J. and Crosta, A. (1989) Enhancement of Landsat thematic mapper imagery for residual soil mapping in SW Minais Gerais state, Brazil: a prospecting case history in Greenstone belt terrain. Pp. 1173–87. in: *Proceedings of the Seventh ERIM Thematic Conference*. Remote sensing for Exploration Geology, Brazil.

Mrose, M.E. (1953) a-eucryptite problem. *Am. Mineral*, **38**, 353.

Dos Muchangos, A. (1999) *Moçambique: Paisagens e Regiões Naturais.* P. in.: Autor. Maputo. Moçambique, 163 pp.

Mwaniki, M.W., Moeller, M.S., and Schellmann, G. (2015) A comparison of Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) in mapping geology and visualising lineaments: A case study of central region Kenya. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, **40**, 897–903.

Nascimento, R.F.F., Alcântara, E.H., Kampel, M., Stech, J.L., Novo, E.M.L.M., and Fonseca, L.M.G. (2009) O algoritmo SVM: avaliação da separação ótima de classes em imagens CCD-CBERS-2. *XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2079–2086.

Naude, P. and Sperinck, M. (2009) *Technical Report on the Mineral Assets of Tantalum Mineração and Prospecção Limitada*. 111 pp.

Neiva, A. and Gomes, C. (2010) Geoquímica das turmalinas do grupo pegmatítico granítico Li-Cs-Ta de Naípa , Alto Ligonha , Moçambique. *VIII Congresso Nacional de Geologia*, **13**, 2–5.

Neiva, A.M.R. (2013) Micas, feldspars and columbite–tantalite minerals from the zoned granitic lepidolite-subtype pegmatite at Namivo, Alto Ligonha, Mozambique. *European Journal of Mineralogy*, **25**, 967–985.

Nelson, M., Brewer, C., and Solem, S. (2015) *Existing vegetation classification, mapping, and inventory technical guide, version 2.0*. 1–212 pp.

Nikolakopoulos, K., Lampropoulou, P., Papoulis, D., Rogkala, A., Giannakopoulou, P., and Petrounias, P. (2018) Combined Use of Remote Sensing Data, Mineralogical Analyses, Microstructure Studies and Geographic Information System for Geological Mapping of Antiparos Island (Greece). *Geosciences*, **8**, 96.

Ninomiya, Y. and Fu, B. (2016) Regional lithological mapping using ASTER-TIR data: Case study for the tibetan plateau and the surrounding area. *Geosciences (Switzerland)*, **6**.

Ninomiya, Y. and Fu, B. (2019) Thermal infrared multispectral remote sensing of lithology and mineralogy based on spectral properties of materials. *Ore Geology Reviews*, **108**, 54–72.

Niyeh, M. and Jafarirad, A. (2016) Hydrothermal Alteration Mapping Using Multispectral Satellite Images in Cenozoic Volcanic Rocks of Tafresh Area, Markazi province, Central Iran. Pp. 1826–1846 in: *5th International Conference on Research in Science And Technology*. London-UK.

Nunes, F. (1966) Maciço de Naipa. Pp. 3–270 in: *Memorias Do Instituto de Investigação Cientifica de Moçambique*. 8th edition. Ciencias Geograficas e Geologicas, Lourenço Marques.

Nunes, J.L. (2010) Aspectos Quimicos-Estruturais de Micas de Litio de Pegmatitos da Zambézia (Moçambique). *Ciências Geológicas*, **3**.

Paes, V.J.C., Santos, L.D., Tedeschi, M.F., and Betiollo, L.M. (2016) *Avaliação do potencial do lítio no Brasil: área do Médio Rio Jequitinhonha, nordeste de Minas Gerais*. P. in.: 274 pp.

Papadaki, E., Mertikas, S., and Sarris, a. (2011) Identification of Lineaments With Possible Structural Origin Using Aster Images And DEM Derived Products in Westerm Crete , Greece. *EARSeL eProceedings*, **10**, 9–26.

Patiño, J.E. (2017) Emilio Chuvieco, Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, **44**, 1171–1173. SAGE Publications Ltd STM.

Patra, S.K., Shekher, M., Solanki, S.S., Ramachandran, R., and Krishnan, R. (2006) A technique for generating natural colour images from false colour composite images. *International Journal of Remote Sensing*, **27**, 2977–2989.

Pedro, A. (1986) The Alto Ligonha Pegmatites (Mineral Exploration Guidelines).

Pekkala, Y., Lehto, T., and Mäkitie, H. (2008) *GTK Consortium Geological Surveys in Mozambique 2002-2007*. P. in: *Geological Survey of Finland, Special Paper*. 1–319 pp.

Perumal, K. and Bhaskaran, R. (2010) Supervised Classification Performance of Multispectral Images. *Journal of computing*, **2**, 124–129.

Petliak, H., Cerovski-Darriau, C., Zaliva, V., and Stock, J. (2019) Where's the rock: Using convolutional neural networks to improve land cover classification. *Remote Sensing*, **11**, 1–20.

Picchiotti, A., Casacchia, R., and Salvatori, R. (1997) Multitemporal principal component analysis of spectral and spatial features of the Venice Lagoon. *International Journal of Remote Sensing*, **18**, 183–196.

Pires de Lima, R., Bonar, A., Coronado, D.D., Marfurt, K., and Nicholson, C. (2019) Deep convolutional neural networks as a geological image classification tool. *The Sedimentary Record*, **17**, 4–9.

Platt, J. (1998) *Sequential Minimal Optimization: A Fast Algorithm for Training Support Vector Machines*. 21 pp.

Poelking, E., Lauermann, A., and Dalmolin, R. (2007) Imagens CBERS na geração de NDVI no estudo da dinamica da vegetação em periodo de estresse hidrico. *Anais XIII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianopolis*, 4145–4150.

Poormirzaee, R. and Oskouei, M.M. (2010) Use of spectral analysis for detection of alterations in ETM data, Yazd, Iran. *Applied Geomatics*, **2**, 147–154.

Pour, A. and Hashim, M. (2015) Regional hydrothermal alteration mapping using Landsat-8 data. *International Conference on Space Science and Communication, IconSpace*, **2015**-**Septe**, 199–202.

Pour, A., Hashim, M., Kuk, J., and Park, Y. (2019) Lithological and alteration mineral mapping in poorly exposed lithologies using Landsat-8 and ASTER satellite data : North-eastern Graham Land , Antarctic Peninsula. *Ore Geology Reviews*, **108**, 112–133. Elsevier.

Pournamdari, M., Hashim, M., and Pour, A.B. (2014) Application of ASTER and Landsat TM data for geological mapping of esfandagheh ophiolite complex, southern Iran. *Resource Geology*, **64**, 233–246.

Pruckner, S. (2018) Analysing Land Use Changes with Google Earth Engine: A Case Study of the Azov Sea Basin. Central European University, Budapest, 140 pp.

Prudente, V.H.R., Da Silva, B.B., Johann, J.A., Mercante, E., and Oldoni, L. V. (2017) Comparative assessment between per-pixel and object-oriented for mapping land cover and use. *Engenharia Agricola*, **37**, 1015–1027.

Ptáček, P., Opravil, T., Šoukal, F., Wasserbauer, J., Másilko, J., and Baráček, J. (2013) The influence of structure order on the kinetics of dehydroxylation of kaolinite. *Journal of the European Ceramic Society*, **33**, 2793–2799.

Quadrado, R. (1963) Ocorrência de Gahnite e de Polucite nos Pegmatitos de Alto Ligonha (Moçambique). P. in: *Separata Do Boletim Da Sociedade Geológica de Portugal. Vol*

XIV.Pp 179-190. Lisboa. 1962. Trabalhos Realizados Pelo Laboratório de Estudos Petrológicos e Paleontológicos Do Ultramar. Lisboa.

Raimbault, L. (1998) Composition of complex lepidolite-type granitic pegmatites and of constituent columbite-tantalite, Chedeville, Massif Central, France. *The Canadian Mineralogist*, **36**, 563–583.

Rajendran, S. and Nasir, S. (2013) Mapping of manganese potential areas using ASTER satellite data in parts of Sultanate of Oman. *International Journal of Geosciences and Geomatics*, **1**, 92–101.

Rajendran, S. and Nasir, S. (2019) ASTER capability in mapping of mineral resources of arid region: A review on mapping of mineral resources of the Sultanate of Oman. *Ore Geology Reviews*, **108**, 33–53. Elsevier.

Rao, B. and Mitra, A. (2015) An Approach of Mining Big Data from a very large community graph for analyzing of economic standard of communities ... Pp. 21–26 in: *International Journal of Computer Applications/International Conference on Computing, Communication and Sensor Network (CCSN 2014)*.

Rashmi, S., Addamani, S., and Ravikiran, S. (2014) Spectral Angle Mapper Algorithm for Remote Sensing Image Classification. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, **1**, 201–205.

Rawashdeh, S. Al, Saleh, B., and Hamzah, M. (2006) The use of remote sensing technology in geological investigation and mineral detection in El azraq-jordan. *CyberGeo*, **2006**, 1–22.

Rezaee, M., Mahdianpari, M., Zhang, Y., and Salehi, B. (2018) Deep Convolutional Neural Network for Complex Wetland Classification Using Optical Remote Sensing Imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **11**, 3030–3039.

Richards, J.A. and Jia, X. (1986) *Remote Sensing Digital Image Analysis.* P. in.: 4th edition. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 454 pp.

Rocha, F.J.P.S.P. (2002) *Integração de dados estatísticos na classificação de imagens de satélite*. P. in: *Tese (Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.*

Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W. (1973) Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium*, **1**, 309–317.

Rowan, L.C. and Mars, J.C. (2003) Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, **84**, 350–366.

Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., C.E., W., Allen, R.G., Anderson, M.C., Helder, D., Irons, J.R., Johnson, D.M., Kennedy, R., Scambos, T.A., Schaaf, C.B., Schott, J.R., Sheng, Y., Vermote, E.F., Belward, A.S., Bindschadler, R., Cohen, W.B., Gao, F., Hipple, J.D., Hostert, P., Huntington, J., Justice, C.O., Kilic, A., Kovalskyy, V., Lee, Z.P., Lymburner, L., Masek, J.G., McCorkel, J., Shuai, Y., Trezza, R., Vogelmann, J., Wynne, R.H., and Zhu, Z. (2014) Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, **145**, 154–172. Elsevier B.V.

Sabins, F.F. (1999) Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, **14**, 157–183.

Sadeghi, B., Khalajmasoumi, M., Afzal, P., Moarefvand, P., Yasrebi, A.B., Wetherelt, A., Foster, P., and Ziazarifi, A. (2013) Using ETM+ and ASTER sensors to identify iron occurrences in the Esfordi 1:100,000 mapping sheet of Central Iran. *Journal of African Earth Sciences*, **85**, 103–114.

Saibi, H., Bersi, M., Mia, M.B., Saadi, N.M., Bloushi, K.M.S. Al, and Avakian, R.W. (2018) Applications of Remote Sensing in Geoscience. *Recent Advances and Applications in Remote Sensing*, 25.

Salehi, S., Mielke, C., Brogaard Pedersen, C., and Dalsenni Olsen, S. (2019) Comparison of ASTER and sentinel-2 spaceborne datasets for geological mapping: A case study from North-East Greenland. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, **43**, 7.

Santos, D., Teodoro, A., Lima, A., and Cardoso-Fernandes, J. (2019) Remote sensing techniques to detect areas with potential for lithium exploration in Minas Gerais, Brazil. 50.

Sathya, R. and Abraham, A. (2013) Comparison of Supervised and Unsupervised Learning Algorithms for Pattern Classification. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, **2**.

Schetselaar, E.M., Tiainen, M., and Woldai, T. (2008) Integrated geological interpretation of remotely sensed data to support geological mapping in Mozambique. *Special Paper of the Geological Survey of Finland*, **2008**, 35–63.

Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N., Novikov, A., and Skakun, S. (2017) Exploring Google earth engine platform for big data processing: Classification of multi-temporal satellite imagery for crop mapping. *Frontiers in Earth Science*, **5**, 1–10.

Sherbinn, A., Balk, D., Yager, K., Jaiteh, M., Pozzi, F., Giri, C., and Wannebo, A. (2006) A CIESIN Thematic Guide to Social Science Applications of Remote Sensing. P. 69 in: *CIESIN Thematic Guides*. New York.

Shirmard, H., Farahbakhsh, E., Pour, A.B., Muslim, A.M., Muller, R., and Chandra, R.

(2020) Integration of Selective Dimensionality Reduction Techniques for Mineral Exploration Using ASTER Satellite Data. *Remote Sens.*, **12**, 1261.

Shoji, D., Noguchi, R., Otsuki, S., and Hino, H. (2018) Classification of volcanic ash particles using a convolutional neural network and probability. *Scientific Reports*, **8**, 1–12.

Shwartz, S. and David, S. (2014) *Understanding Machine Learning : From Theory to Algorithms*. P. in.: Cambridge, 449 pp.

Silva, M. and Santana, G. (2016) Caulinita: Estrutura cristalina, técnicas físicas e estudo de adsorção. *Scientia Amazonia*, **2**, 54–70.

Silva, S. (2009) Espectroscopia de Imageamento e Gamaespectrometria Aérea e Terrestre de Pegmatitos e Granitos da Porção Sul da Provincia Pegmatitica da Borborema, Nordeste do Brasil. Universidade Estadual de Campinas, 187 pp.

Singha, M., Dong, J., Zhang, G., and Xiao, X. (2019) High resolution paddy rice maps in cloud-prone Bangladesh and Northeast India using Sentinel-1 data. *Scientific Data*, **6**, 1–10. Springer US.

Smith, R. (1985) Maximum likelihood estimation in a class of nonregular cases. *Biometrika*, **72**, 67–90.

Sodolov, N. (1960) Distribution of alkali metals and beryllium in the minerals of one of the zonal pegmatite in the Mongolian Altai. *Geoky*, **8**, 874–885.

Sohn, Y. and Rebello, N.S. (2002) Supervised and unsupervised spectral angle classifiers. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **68**, 1271–1280.

Spencer, C.H. (1995) Remote sensing provides high-tech clues for mineral exploration. *Earth Observation Magazine*, 21–23.

Spolti, A.C. (2018) ClassiĄcação de vias através de imagens aéreas usando Deep Learning. Universidade Federal de Uberlandia, Brasil, 31 pp.

Story, M. and Congalton, R.G. (1986) Remote Sensing Brief Accuracy Assessment: A User's Perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **52**, 397–399.

Suárez, A., Jiménez, A., Castro-franco, M., and Cruz-roa, A. (2017) Clasificación y mapeo automático de coberturas del suelo en imágenes satelitales utilizando Redes Neuronales Convolucionales. *Orinoquia, Universidad de los Llanos - Villavicencio, Meta. Colombia Suplemento*, **21**, 12.

SUHET. (2015) *Sentinel-2 User Handbook*. 64 pp.

Sultan, M., Arvidson, R., Sturchio, N., and Guinsess, E. (1987) Lithological Mapping in Arid Region withLandsat Thematic Mapper Data: Meatiq Dome, Egypt. *Geological Society American Bulletin*, **99**, 748–762.

Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society*

Special Publication, **42**, 313–345.

Sun, Z., Zhao, X., Wu, M., and Wang, C. (2019) Extracting Urban Impervious Surface from WorldView-2 and Airborne LiDAR Data Using 3D Convolutional Neural Networks. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **47**, 401–412. Springer India.

Szuster, B., Chen, Q., and Borger, M. (2011) A comparison of classi fi cation techniques to support land cover and land use analysis in tropical coastal zones. *Applied Geography*, **31**, 525–532. Elsevier Ltd.

Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., and Brisco, B. (2020) Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **164**, 152–170. Elsevier.

Tayebi, M.H., Tangestani, M.H., Vincent, R.K., and Neal, D. (2014) Spectral properties and ASTER-based alteration mapping of Masahim volcano facies, SE Iran. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **287**, 40–50.

Taylor, S. (1964) Abundace of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geoch.Cosmoch*, **28**, 1273–1285.

Teertstra, D. (1991) Compositionai, Heierogeneity and Alteràtion of Polucite. Universidade de Manitoba.

Teertstra, D., Cerny, P., and Hawthorne, F. (1998) Rubidium Feldspars in Granitic Pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, **36**, 483–496.

Terroso, D. (2005) Argilas / Lamas e Águas Termais das Furnas (Açores): Avaliação das Propriedades Físicas e Químicas relevantes para a utilização em Peloterapia. 161 pp.

Testa, F., Villanueva, C., Cooke, D., and Zhang, L. (2018) Lithological and Hydrothermal Alteration Mapping of Epithermal , Porphyry and Tourmaline Breccia Districts in the Argentine Andes Using ASTER Imagery. *Remote Sens.*, **10**, 1–45.

USGS. (2019) *Mineral Commodity summaries 2019*. Virginia, 200 pp.

Vallino, J.J. and Huber, J.A. (2018) Using maximum entropy production to describe microbial biogeochemistry over time and space in a meromictic pond. *Frontiers in Environmental Science*, **6**.

Vapnik, V.N. (2000) *The Nature Of Statistical Learning Theory*. P. in.: 2nd edition. New York., 334 pp.

Vapnik, V.N. and Lerner, A. (1963) Pattern recognition using generalized portrait method. Automation and Remote Control. **24**.

Vasconcelos, L. (2014) Breve apresentação sobre os recursos geológicos de Moçambique Brief presentation of the geological resources of Mozambique. *Comunicações Geológicas*, **101**, **Espec**, 869–874.

Veiga, A. (2011) Caracterização geotécnica dos terrenos do vale tifónico Parceiros-Leiria. Coimbra, 362 pp.

Velho, J.L. (2005) *Mineralogia industrial: Princípios e aplicações.* P. in.: 1st edition. Lindel - Edições técnicas, Lda, Lisboa.

Venables, W. and Ripley, B. (2006) *Modern Applied Statistics with S-Plus*. P. in: *Statistics and Computing*. Third. Springer, New York, 508 pp.

Viana, O.H., Mercante, E., Felipetto, H., Kusminski, D., and Bleil Jr, H.G. (2017) Characterisation of the Spectral-Temporal Pattern of the Crambe Crop Using Hyperspectral Sensors. *Journal of Agricultural Science*, **9**, 220.

Viera, R. (2010) Aplitopegmatitos com elementos raros da região entre Almendra e Barca D Alva, campo aplitopegmatitico da Fregeneda-Almendra. Univerisdade do Porto, 307 pp.

Wacker, A.G. and Landgrebe, D.A. (1972) Purdue University Purdue e-Pubs LARS Technical Reports Laboratory for Applications of Remote Sensing 1-1-1972. *LARS Technical Reports*.

Walsh, M. (2002) *Remote Sensing*. P. in: *Aerial Mapping: Methods and Applications*. 1–216 pp.

Wang, S., Chen, W., Xie, S.M., Azzari, G., and Lobell, D.B. (2020a) Weakly supervised deep learning for segmentation of remote sensing imagery. *Remote Sensing*, **12**, 1–25.

Wang, W., Li, S., Hashimoto, H., Takenaka, H., Higuchi, A., Kalluri, S., and Nemani, R. (2020b) An introduction to the geostationary-nasa earth exchange (GeoNEX) Products: 1. top-of-atmosphere reflectance and brightness temperature. *Remote Sensing*, **12**, 1–20.

Warren, J.K. (2013) *Geochemistry of Evaporite Ores in an Earth-Scale Climatic and Tectonic Framework*. P. in: *Treatise on Geochemistry: Second Edition*. 2nd edition. Elsevier Ltd., 569–593 pp.

Weier, J. and Herring, D. (2000) Measuring vegetation (NDVI&EVI). *NASA Earth Obs*. .

van der Werff, H. and van der Meer, F. (2016) Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI provide data continuity for geological remote sensing. *Remote Sensing*, **8**, 16.

Wietelmann, U. and Bauer, R.J. (2003) Lithium and lithium compounds, in Ullmann's. *Encyclopedia of Industrial Chemistry, Germany.* .

Wietelmann, U. and Klett, J. (2018) 200 Years of Lithium and 100 Years of Organolithium Chemistry. *Zeitschrift fur anorganische und allgemeine Chemie*, **644**, 194–204.

Wilson, M. (2020) Adaptive baseline fitting for 1 H MR spectroscopy analysis. *Magnetic Resonance in Medicine*, 1–17.

Woolley, J.T. (1971) Reflectance and Transmittance of Light by Leaves. *Plant Physiology*, **47**, 656–662.

Wu, M., Zhou, K., Wang, Q., and Wang, J. (2019) Mapping hydrothermal zoning pattern of porphyry Cu deposit using absorption feature parameters calculated from ASTER data. *Remote Sensing*, **11**.

Xie, Y., Sha, Z., and Yu, M. (2008) Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, **1**, 9–23.

Yao, F.J. and Fu, B.H. (2017) Application of remote sensing information related to mineralization alteration and new discovery in geological prospecting work. P. 7 in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.

Zacchi, É., Silva, A., and Rolim, V. (2010) Análise integrada de dados multifonte e sua aplicação no mapeamento geológico das formações ferríferas da serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG. *Revista Brasileira de Geofisica*, **28**, 643–656.

Zadech, M., Tangestani, M., Roldan, F., and Yusta, I. (2014) Mineral Exploration and Alteration Zone Mapping Using Mixture Tuned Matched Filtering Approach on ASTER Data at the Central Part of Dehaj-Sarduiyeh Copper Belt, SE Iran. *IEEE of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **7**, 6.

Zalaky, E. and Elmonsif, A. (2016) Target Detection Using Matched Filtering Analysis of the ASTER Data for Exploration of Uranium Mineralization in the Northern Part of El-Erediya Pluton , Central Eastern Desert , Egypt. *The Arab Journal of Sciences & Research Publishing*, **2**, 120–133.

Zeng, G. (2020) On the confusion matrix in credit scoring and its analytical properties. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, **49**, 2080–2093. Taylor & Francis.

Zhang, F., Tang, X., Tong, A., Wang, B., and Wang, J. (2020) An automatic baseline correction method based on the penalized least squares method. *Sensors (Switzerland)*, **20**.

Zhang, T., Yi, G., Li, H., Wang, Z., Tang, J., Zhong, K., Li, Y., Wang, Q., and Bie, X. (2016) Integrating data of ASTER and Landsat-8 OLI (AO) for hydrothermal alteration mineral mapping in duolong porphyry cu-au deposit, Tibetan Plateau, China. *Remote Sensing*, **8**.

Zhu, X.X., Tuia, D., Mou, L., Xia, G.-S., Zhang, L., Xu, F., and Fraundorfer, F. (2017) Deep learning in remote sensing: a review. 1–60.

Ziaii, M., Carranza, E.J.M., and Ziaei, M. (2011) Application of geochemical zonality coefficients in mineral prospectivity mapping. *Computers and Geosciences*, **37**, 1935–1945.

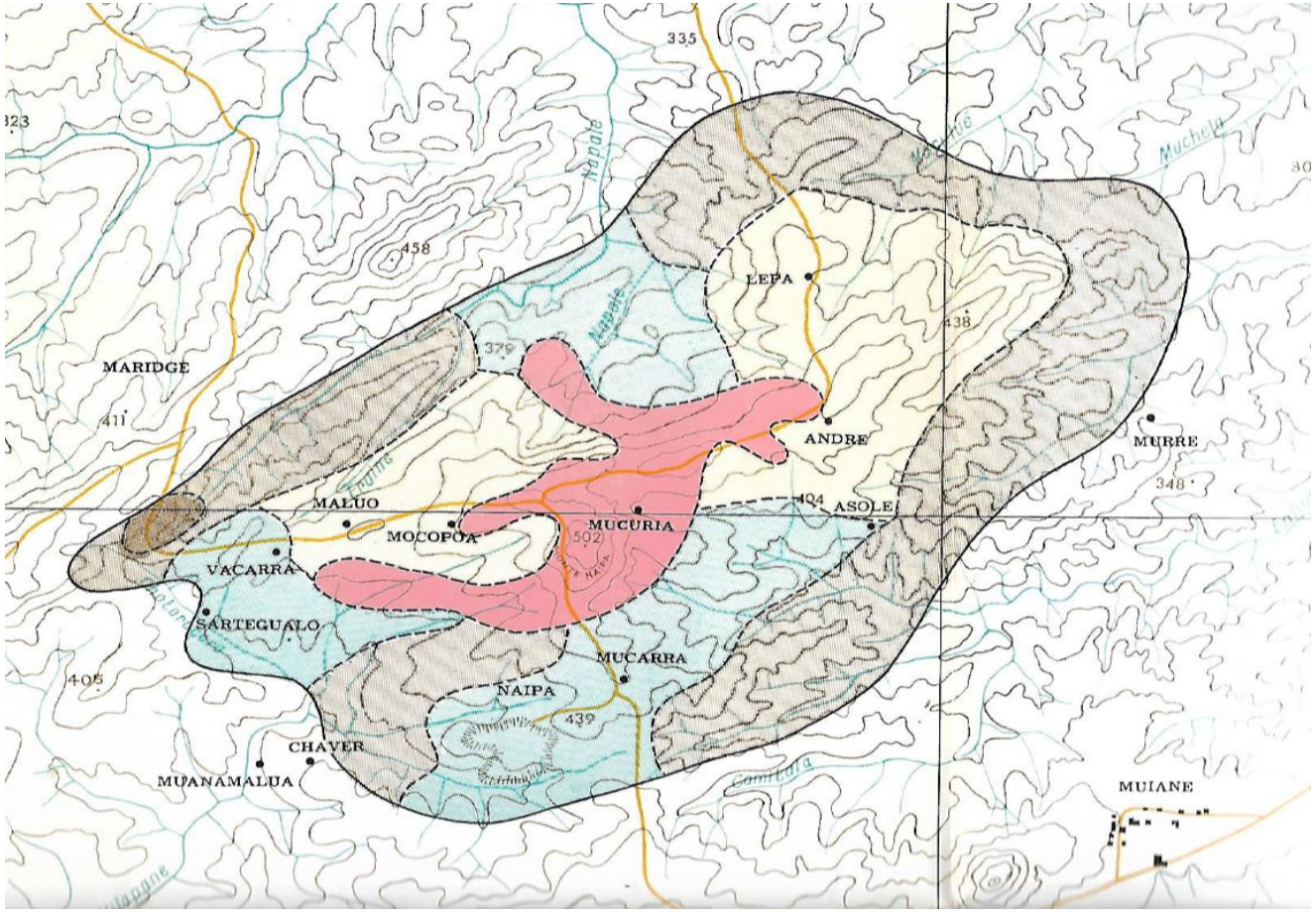
Ziaii, M., Pouyan, A., Yousefzadeh, R., and Ghiasi-freez, J. (2017) An Image Analysis-Based Methodology for Chromite Exploration through Opto-Geometric Parameters ; a Case Study of Faryab Area , SE of Iran. **1**, 97–104.

Zimmermann, R., Brandemeir, M., Andreani, L., Mhopjeni, K., and Gloaguen, R. (2016) Remote Sensing Exploration of Nb-Ta-LREE-Enriched Carbonatite (Epembe/Namibia). *Remote Sens.*, **8**, 620.

Zoheir, B., El-Wahed, M.A., Pour, A.B., and Abdelnasser, A. (2019) Orogenic gold in transpression and transtension zones: Field and remote sensing studies of the Barramiya-Mueilha sector, Egypt. *Remote Sensing*, **11**, 34.

Anexos

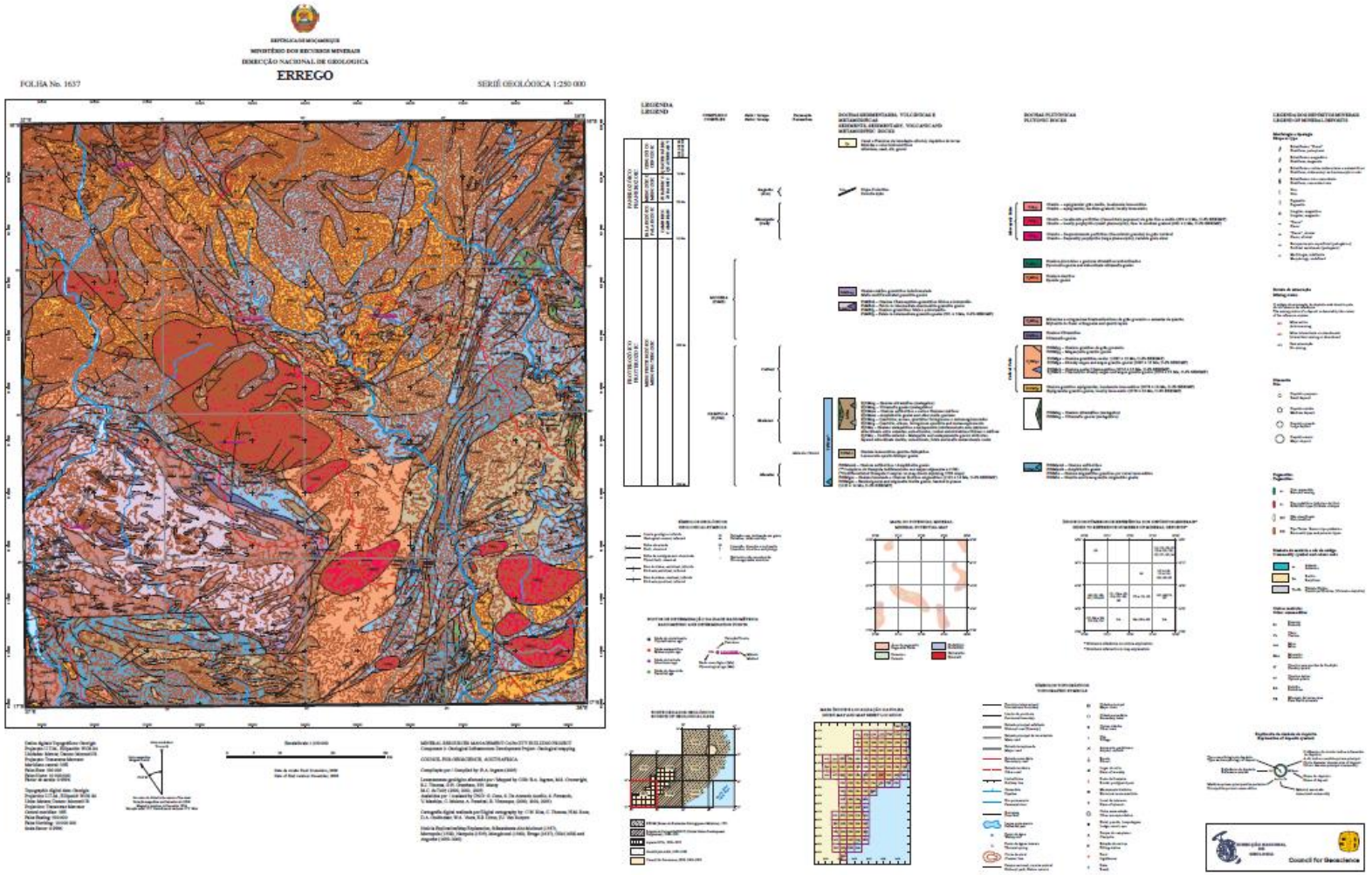
Anexo 1: Mapa de distribuição dos granitos em Naipa



Anexo 2: Estrutura do Maciço de Naipa

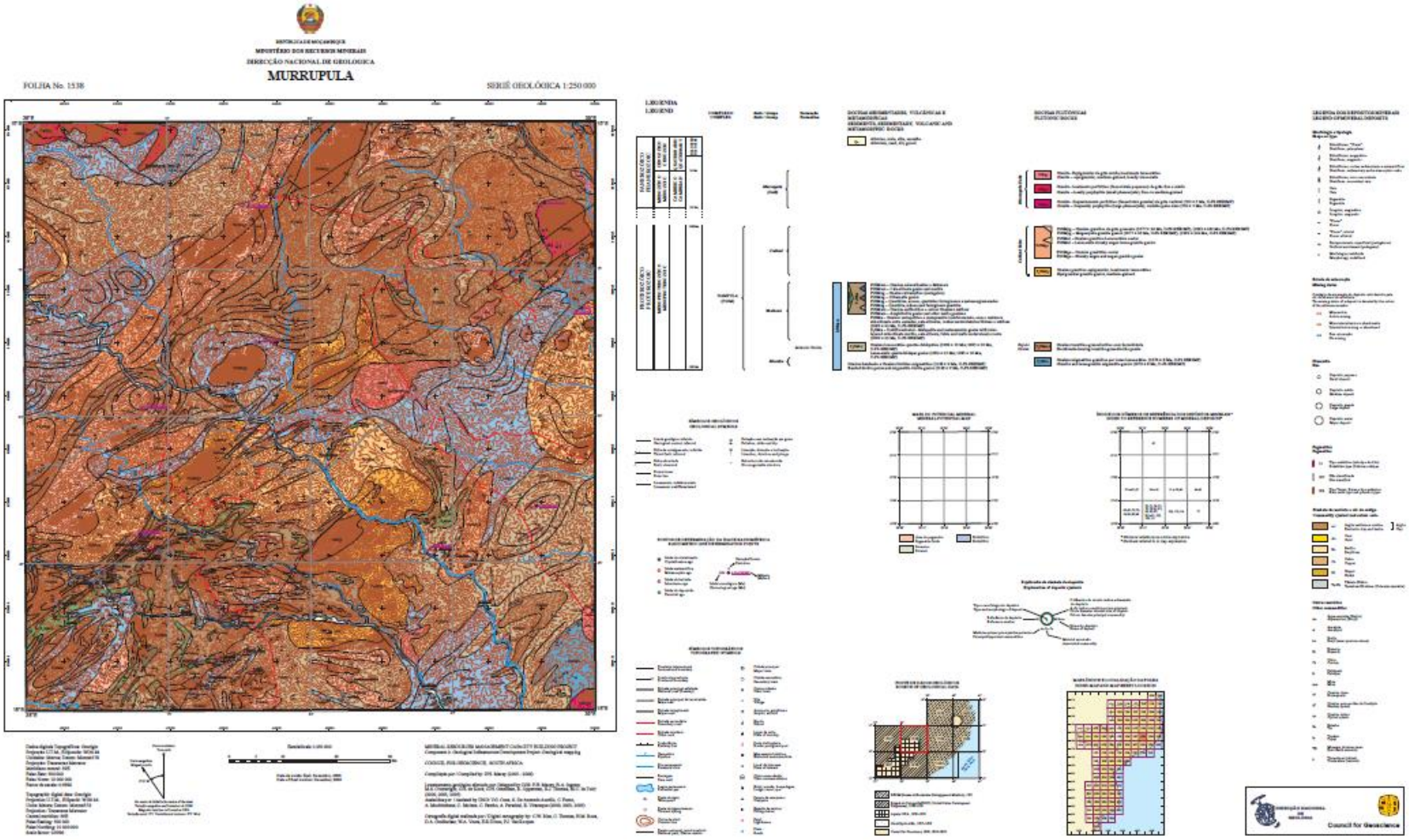


Anexo 3: Folha de Errego



Folha de Errego. Direção Nacional de Geologia de Moçambique.

Anexo 4: Folha de Murrupula

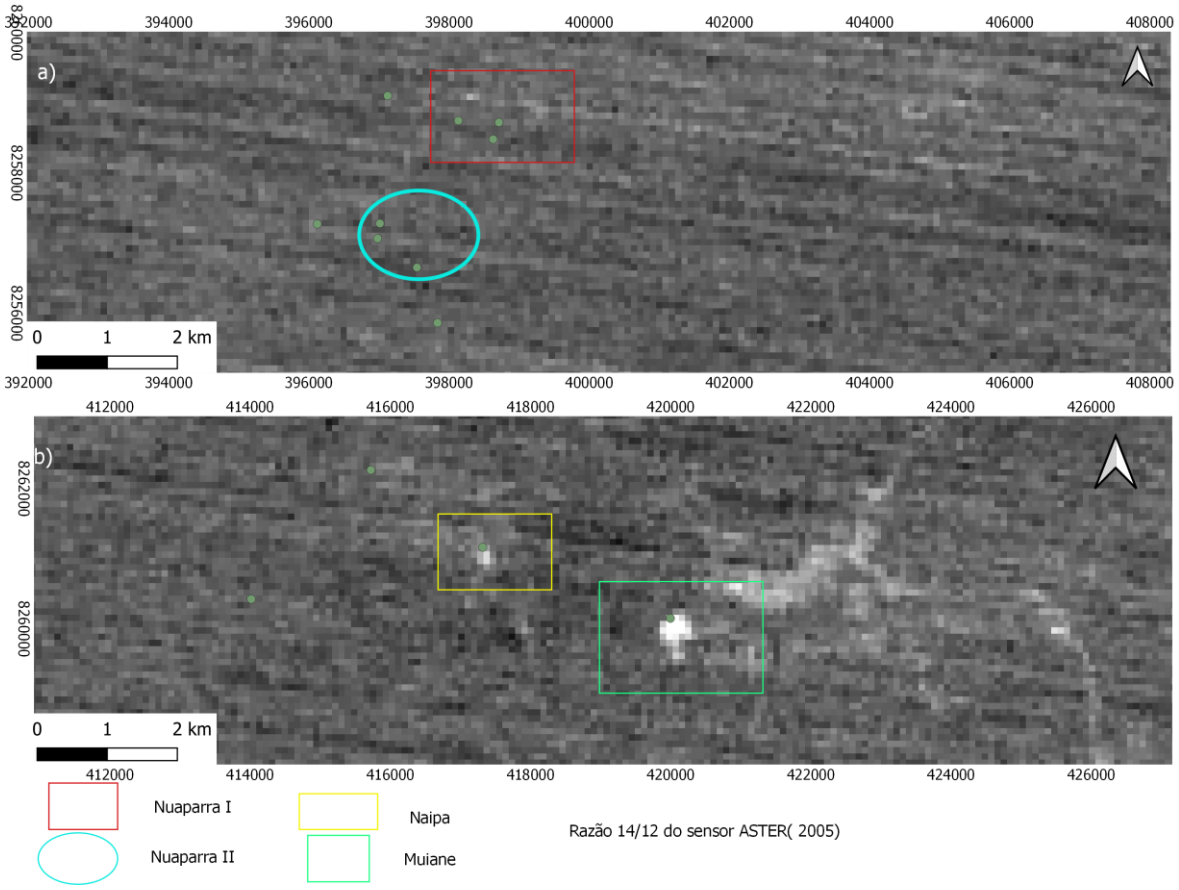


Folha de Murrupula Direção Nacional de Geologia de Moçambique

Apêndices

Apêndices I: Razão de Bandas

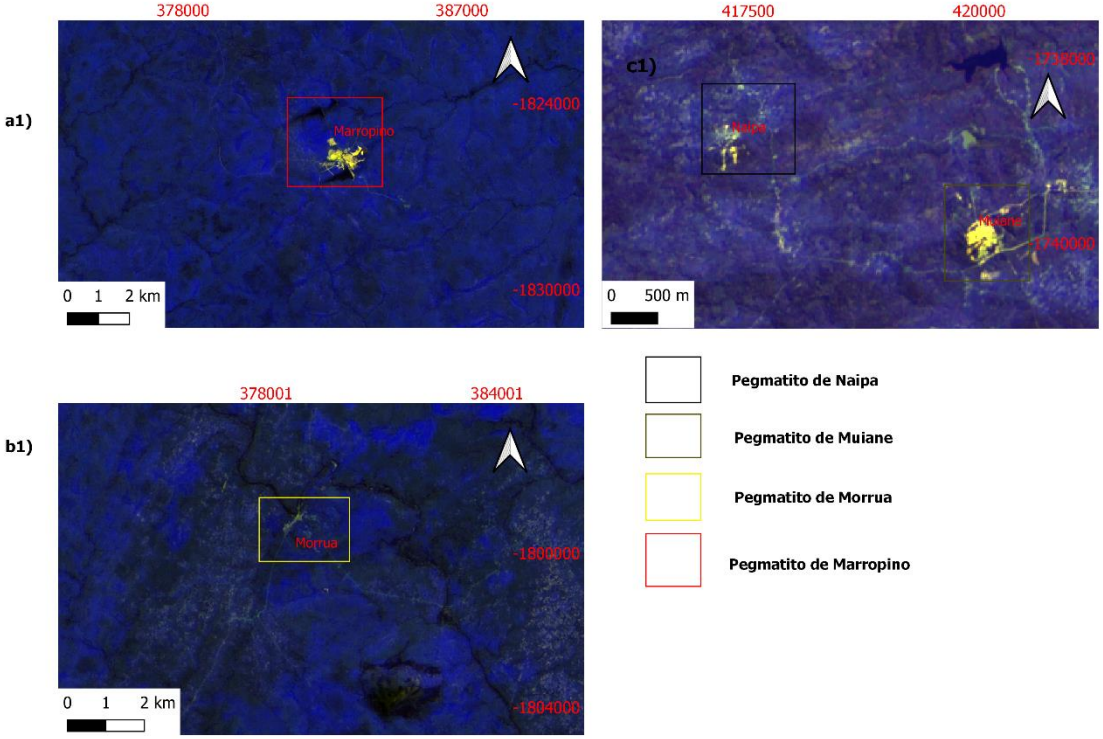
Apêndice IA: Imagem ASTER



Razão de bandas (14/12) do sensor ASTER (2005) para análise de rochas silicatada.

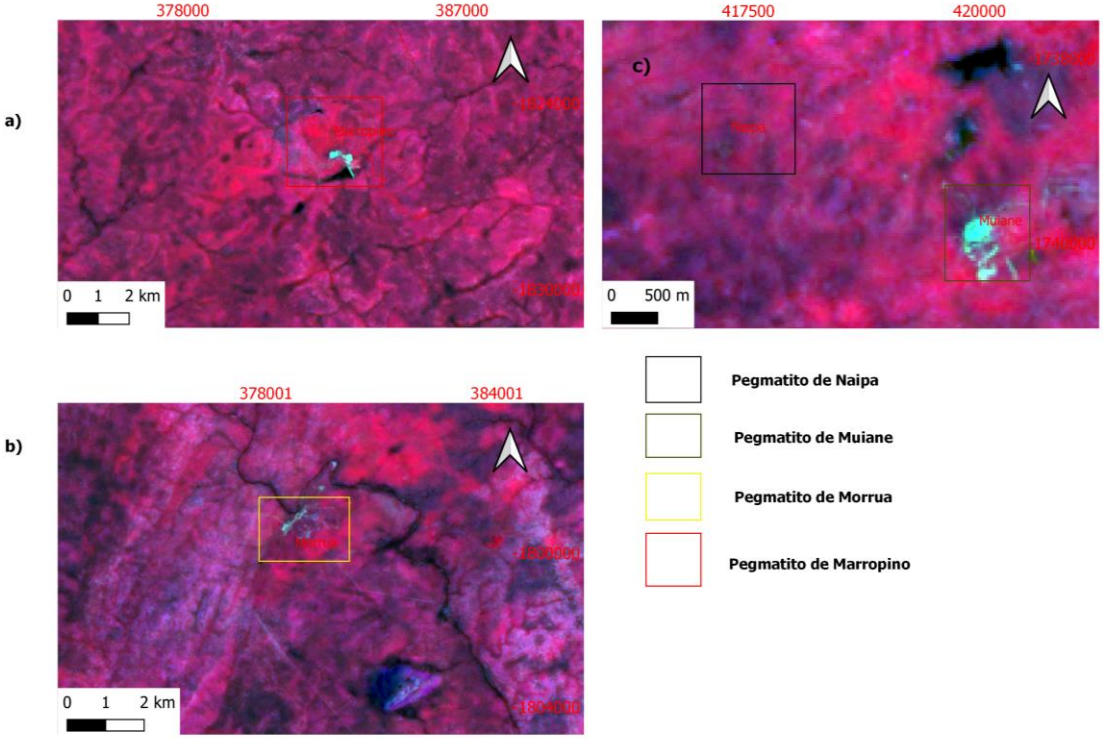
Apêndices II: Combinação de Bandas

Apêndice II A: Combinação ASTER

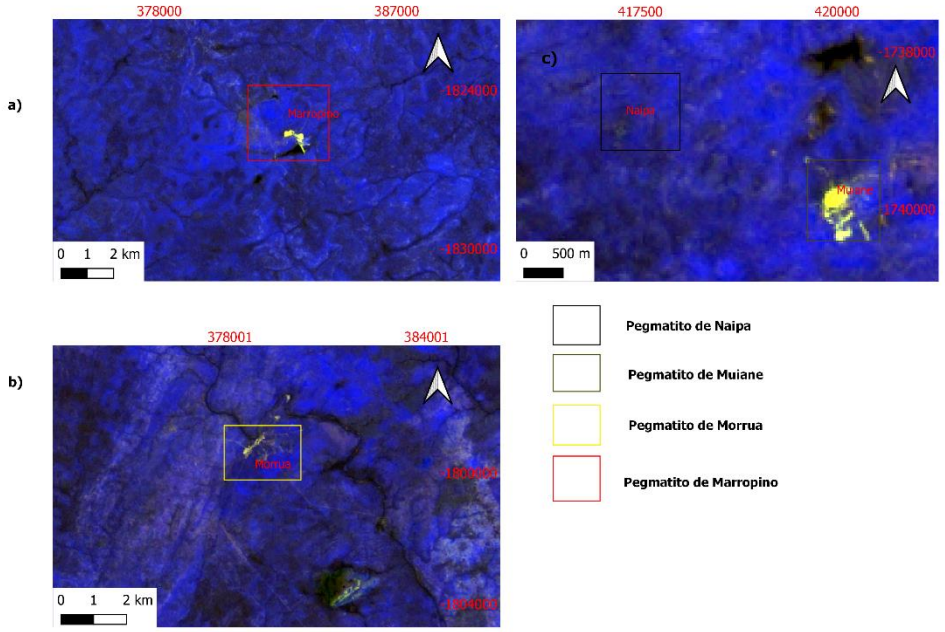


Combinação de bandas 2-1-13 (ASTER, 2005); a) pegmatitos de Muiane e Naipa; as áreas com mineralizações de lítio aparecem a amarelo carregado; os corpos de água aparecem a preto, a1) detalhe do pegmatito de Muiane; b) detalhe dos pegmatitos de Naipa; as mineralizações de lítio aparecem a amarelo.

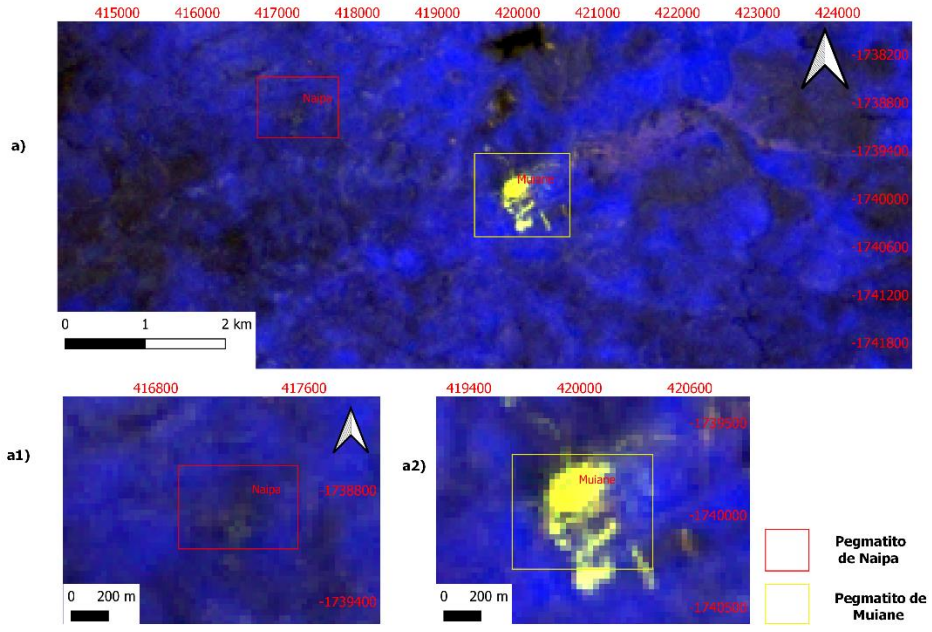
Apêndice II B: Combinação Landsat 5



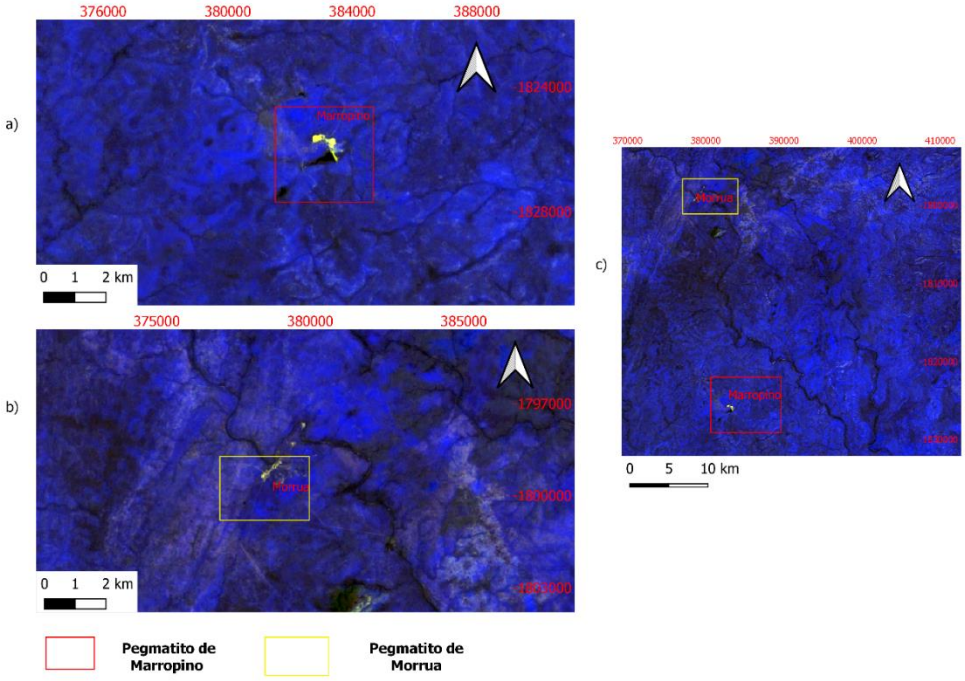
Combinação de bandas (7-2-6) do sensor ETM (L5) 1989; a) pegmatito de Marropino; as áreas com mineralizações de lítio aparecem a amarelo-verde carregado; b) detalhe do pegmatito de Morrua; as mineralizações de lítio aparecem a verde; c) pegmatitos de Muiane e Naipa; áreas com mineralizações de lítio aparecem amarelo verde carregado; os corpos de água aparecem a preto.



Combinação de bandas (2-1-6) do sensor ETM (L5) 1989; a) pegmatito de Marropino; as áreas com mineralizações de lítio aparecem a amarelo; os corpos de água aparecem a preto; b) detalhe do pegmatito de Morrua; mineralizações de lítio aparecem a amarelo; c) pegmatitos de Muiane e Naipa; áreas com mineralizações de lítio aparecem a amarelo carregado; os corpos de água aparecem a preto.

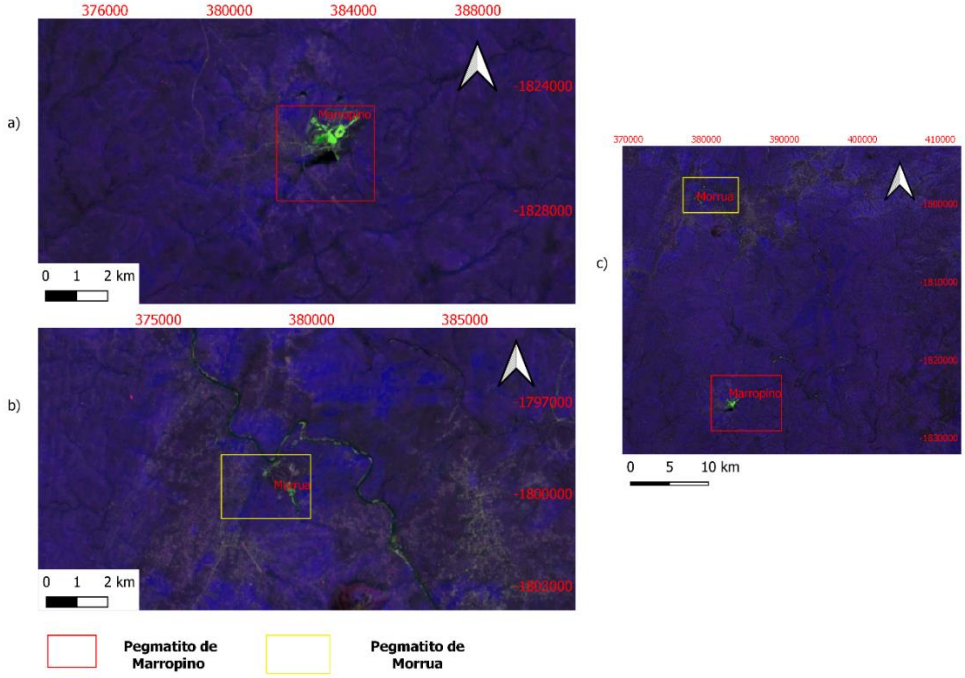


Combinação de bandas (2-1-6) do sensor ETM (L5) 1989; a) pegmatito de Naipa e Muiane; as áreas com mineralizações de lítio aparecem a amarelo; os corpos de água aparecem a preto; a1) detalhe do pegmatito de Naipa; mineralizações de lítio aparecem a amarelo, pouco positivas; a2) detalhe do pegmatito de Muiane com um sinal positivo.

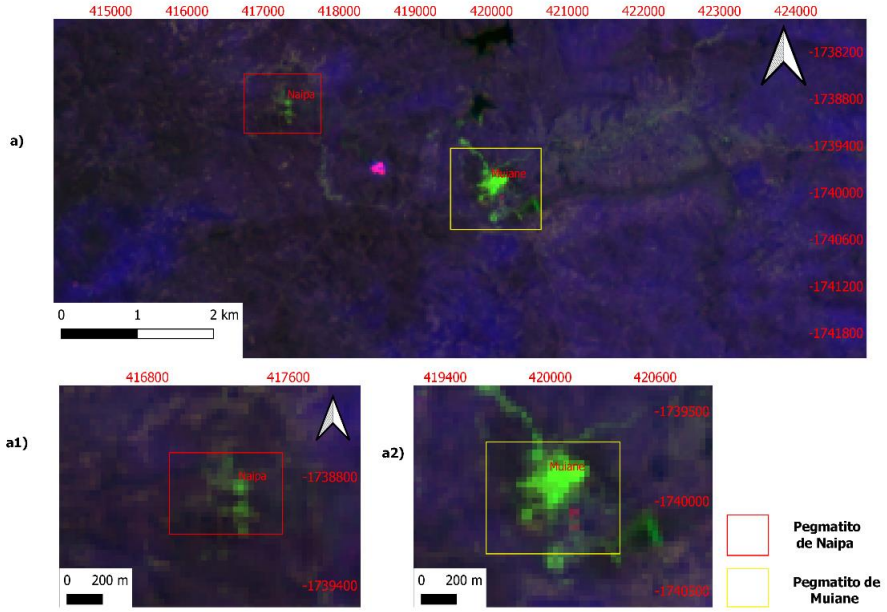


Combinação de bandas (2-1-6) do sensor ETM (L5) 1989; a) pegmatito de Marropino; as áreas com mineralizações de lítio aparecem a amarelo; os corpos de água aparecem a preto; b) detalhe do pegmatito de Morrua; mineralizações de lítio aparecem a amarelo; c) visão geral dos pegmatitos de Morrua e Marropino.

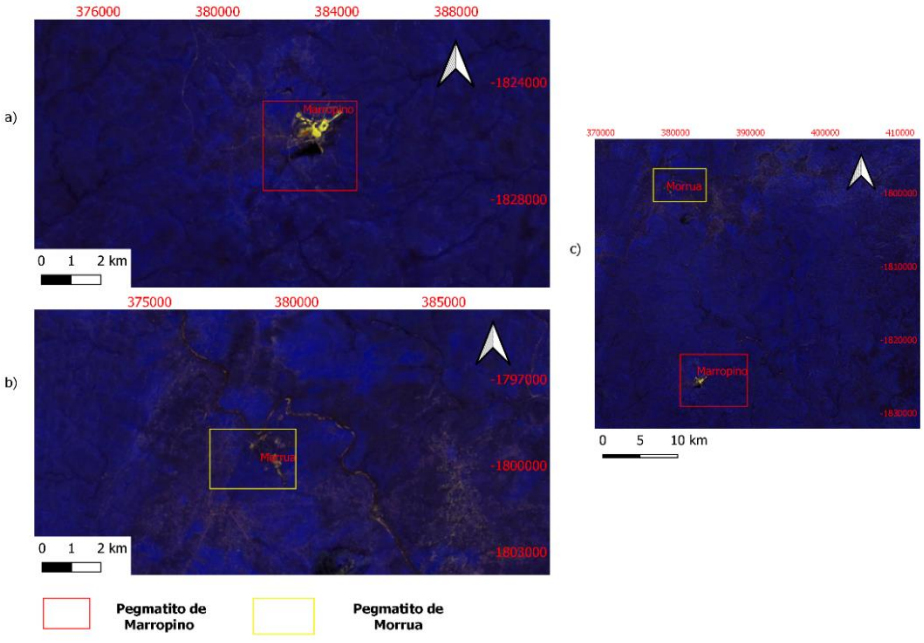
Apêndice II C: Combinação Landsat 8



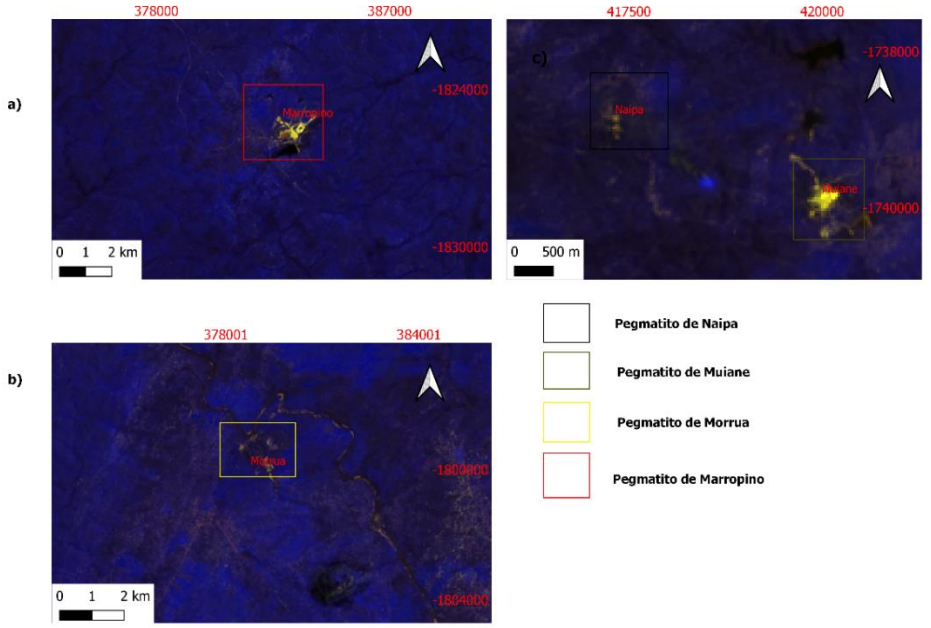
Combinação de bandas (7-3-11) de Landsat 8 (2018); a) pegmatito de Marropino; as áreas com mineralizações de lítio aparecem a amarelo; os corpos de água aparecem em preto; b) detalhe do pegmatito de Morrua e Marropino; mineralizações de lítio aparecem a amarelo.



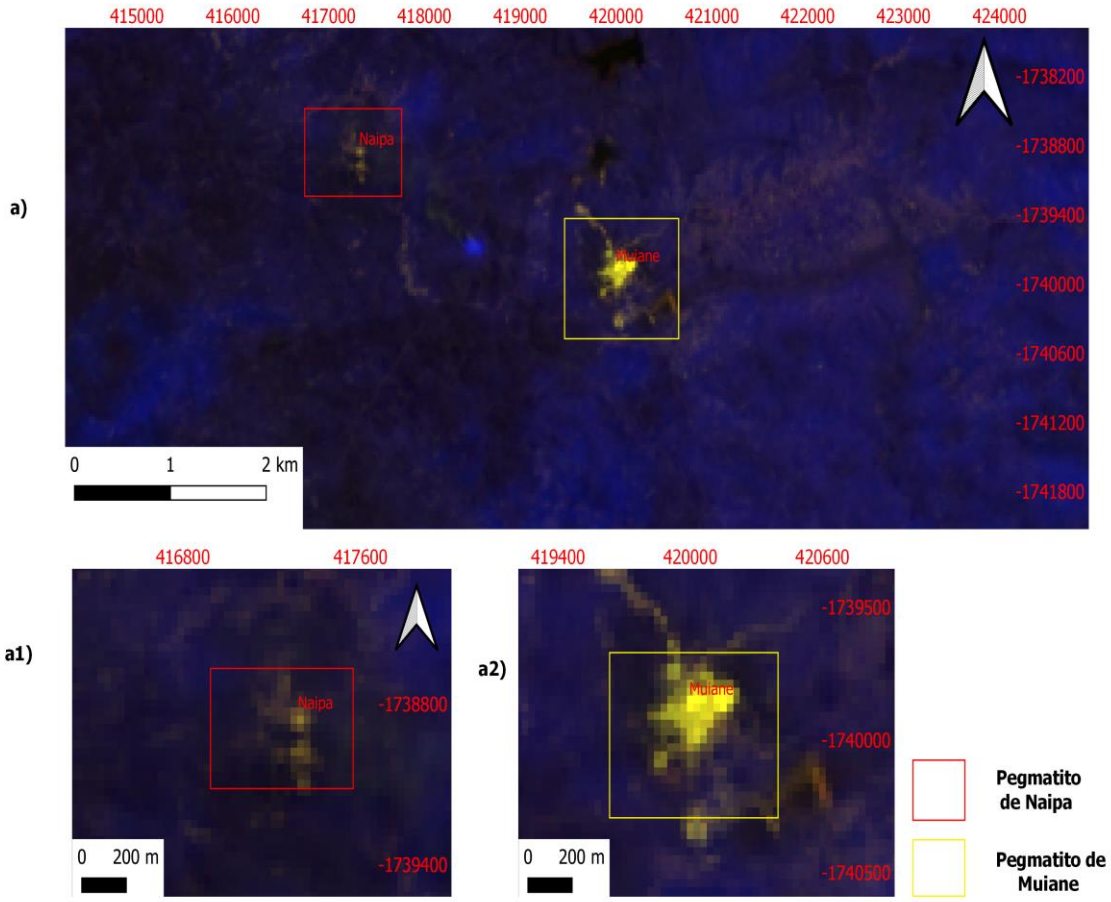
Combinação de bandas (7-3-11) de Landsat 8 (2018); a) pegmatito de Muiane e Naipa; as áreas com mineralizações de lítio aparecem a amarelo; corpos de água aparecem a preto; a1) detalhe do pegmatito de Naipa; mineralizações de lítio aparecem a amarelo; a2) pegmatitos de Naipa, com mineralizações de lítio conhecidas.



Combinação de bandas (3-2-11) de Landsat 8 (2018); a) pegmatito de Marropino; as áreas com mineralizações de lítio aparecem a amarelo claro, corpos de água aparecem a preto; b) detalhe do pegmatito de Morrua; mineralizações de lítio aparecem a amarelo; c) os pegmatitos de Morrua e Marropino com mineralizações de lítio conhecidas.



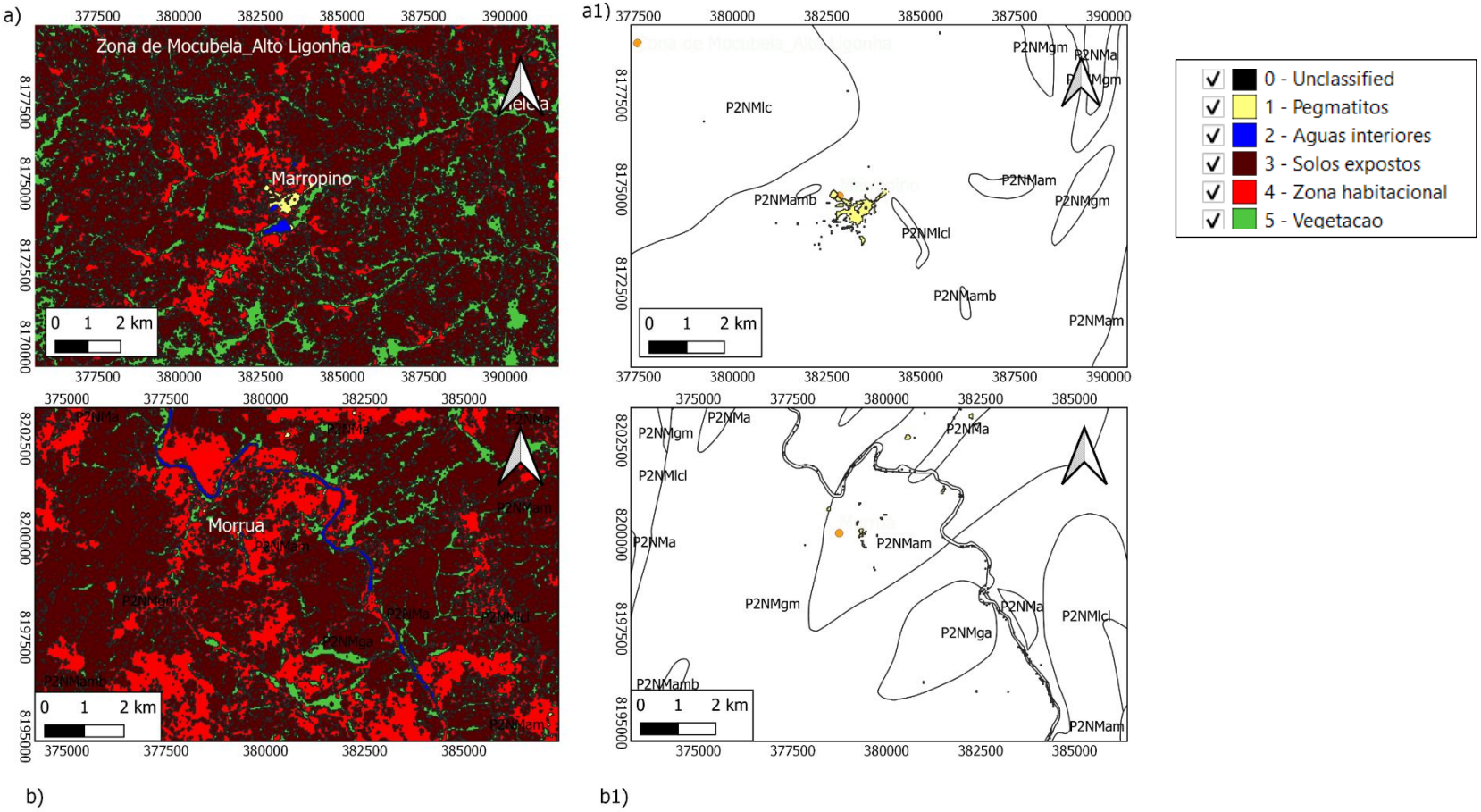
Combinação de bandas (3-2-11) de Landsat 8 (2018); a) pegmatito de Marropino; as áreas com mineralizações de lítio aparecem a amarelo claro; os corpos de água aparecem a preto; b) detalhe do pegmatito de Morrua; as mineralizações de lítio aparecem a amarelo; c) os pegmatitos de Muiane e Naipa com mineralizações de lítio conhecidas.



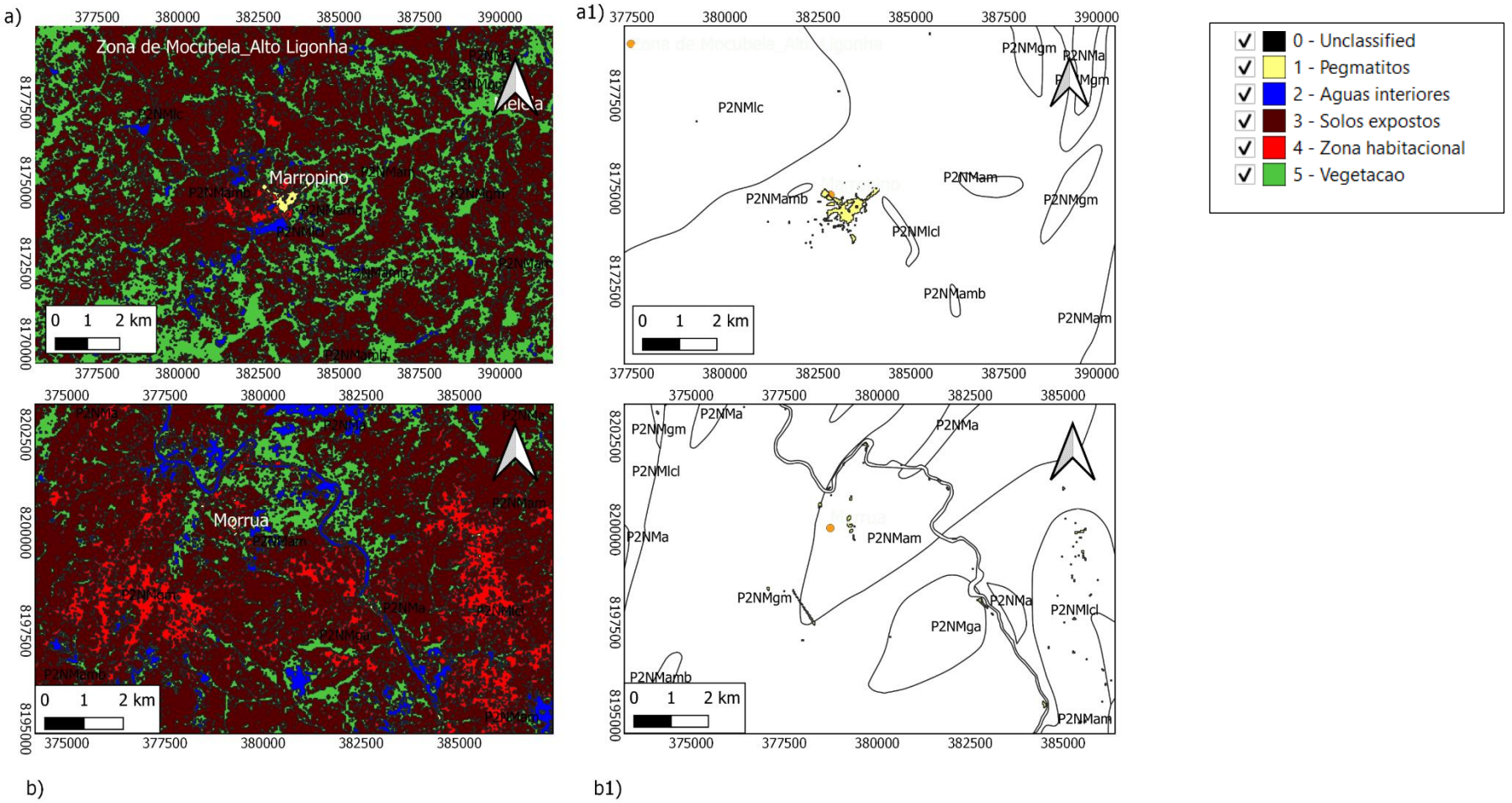
Combinação de bandas (3-2-11) de Landsat 8 (2018); a) pegmatito de Naipa e Muiane; as áreas com mineralizações de lítio aparecem a amarelo claro; os corpos de água aparecem a preto; a1) detalhe do pegmatito de Naipa; mineralizações de lítio aparecem em amarelo; a2) pegmatitos de Muiane com mineralizações de lítio conhecidas.

Apêndice III: Classificação de imagens

Apêndice III A: Imagens Landsat 8 OLI (Pegmatitos de Morrua e Marropino)

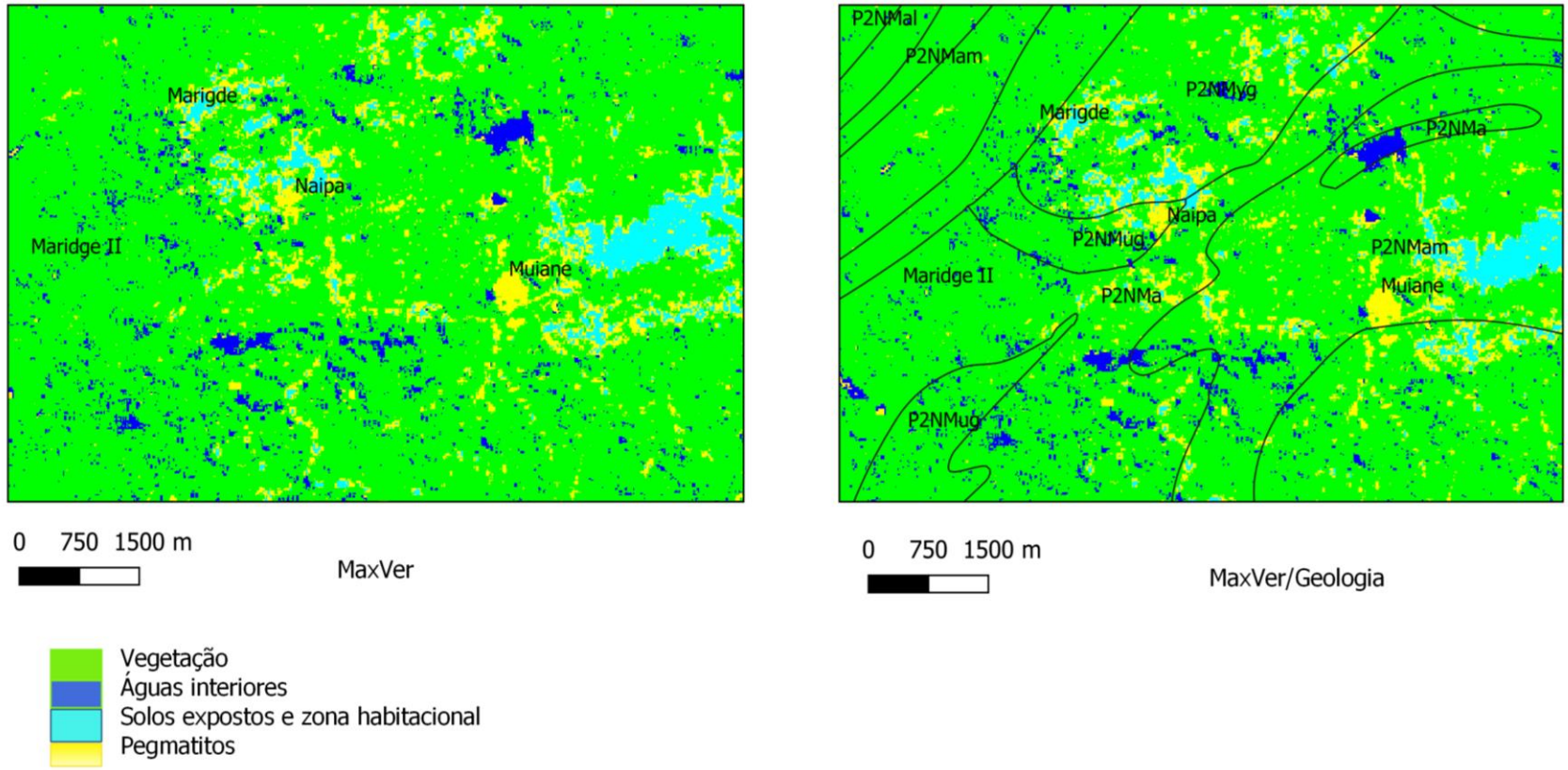


Classificação da imagem Landsat 8 (2018) nos pegmatitos de Marropino (zona de treino); a) resultado usando o algoritmo SAM; a1) integração da litologia e pegmatitos de Marropino; b) resultado usando o algoritmo SAM; b1) integração da litologia e pegmatitos de Morrua.



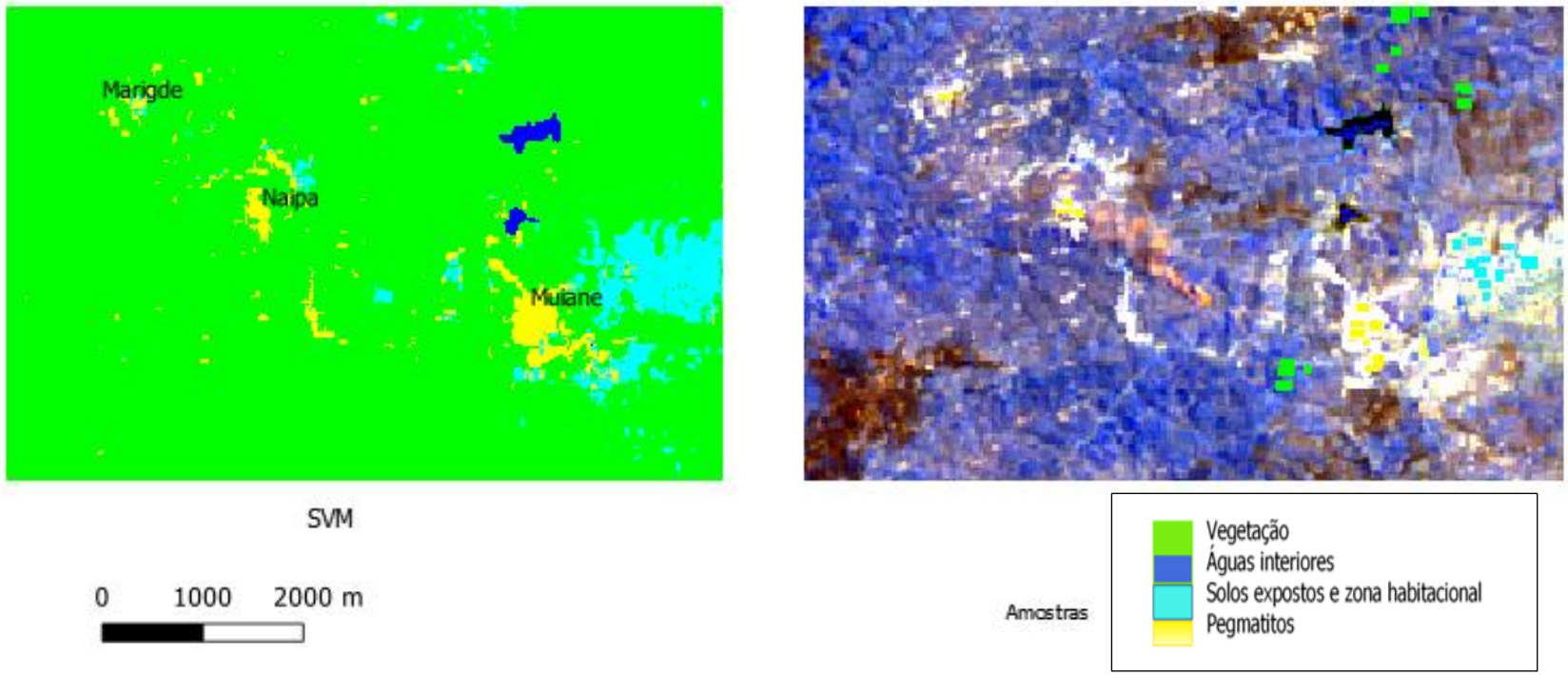
Classificação da imagem Landsat 8 (2018) nos pegmatitos de Marropino (zona de treino); a) resultado usando o algoritmo MinD; a1) integração da litologia e pegmatitos de Marropino; b) resultado usando o algoritmo MinD; b1) integração da litologia e pegmatitos de Morrua.

Apêndice III B: Imagem ASTER (2005) Pegmatitos de Muiane e Naipa

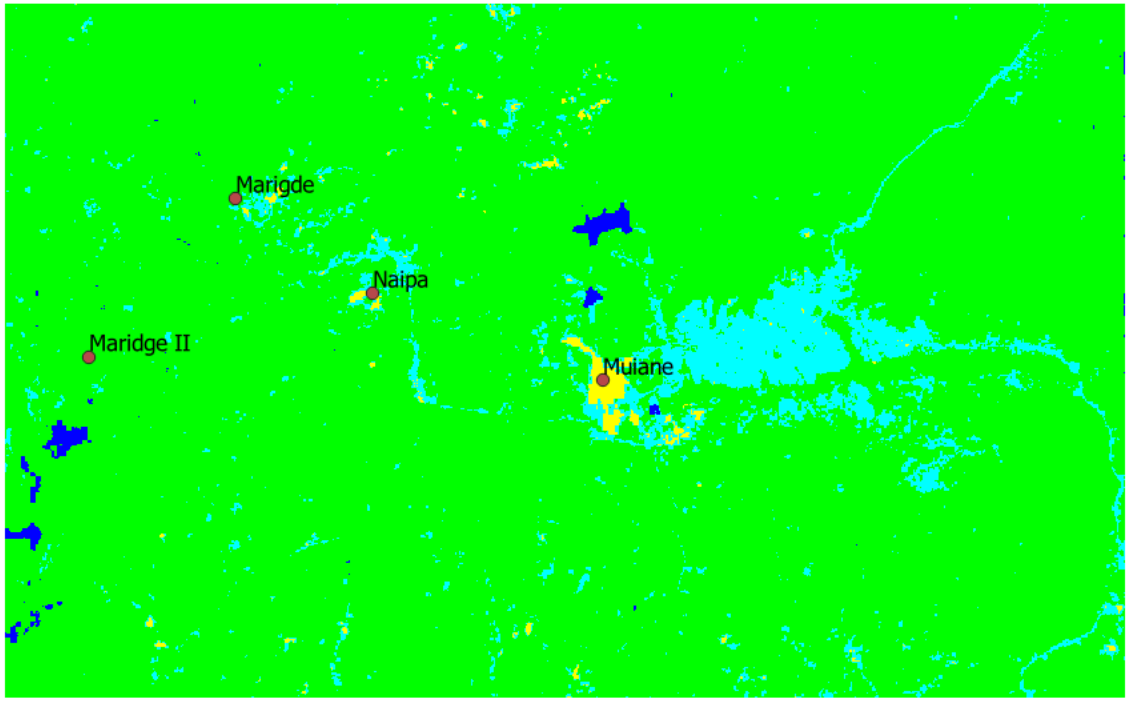


Classificação da imagem ASTER (2005) nos pegmatitos de Muiane (zona de treino); a) resultado usando o algoritmo Maxver e integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa.

Apêndice III C: Imagem Landsat 8 (Pegmatito de Muiane e Naipa)



Classificação da imagem Landsat 8 nos pegmatitos de Muiane (zona de treino); a) resultado usando o algoritmo SVM e integração da litologia e pegmatitos de Muiane e Naipa.

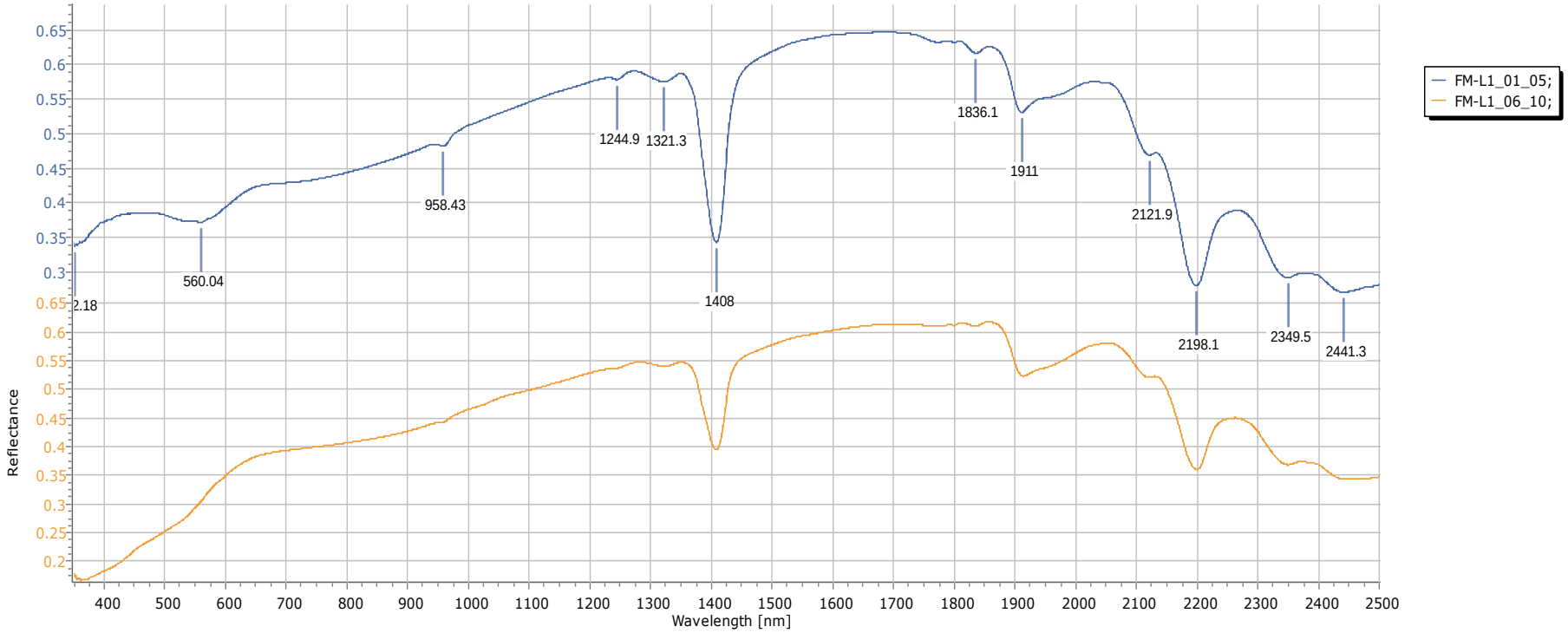


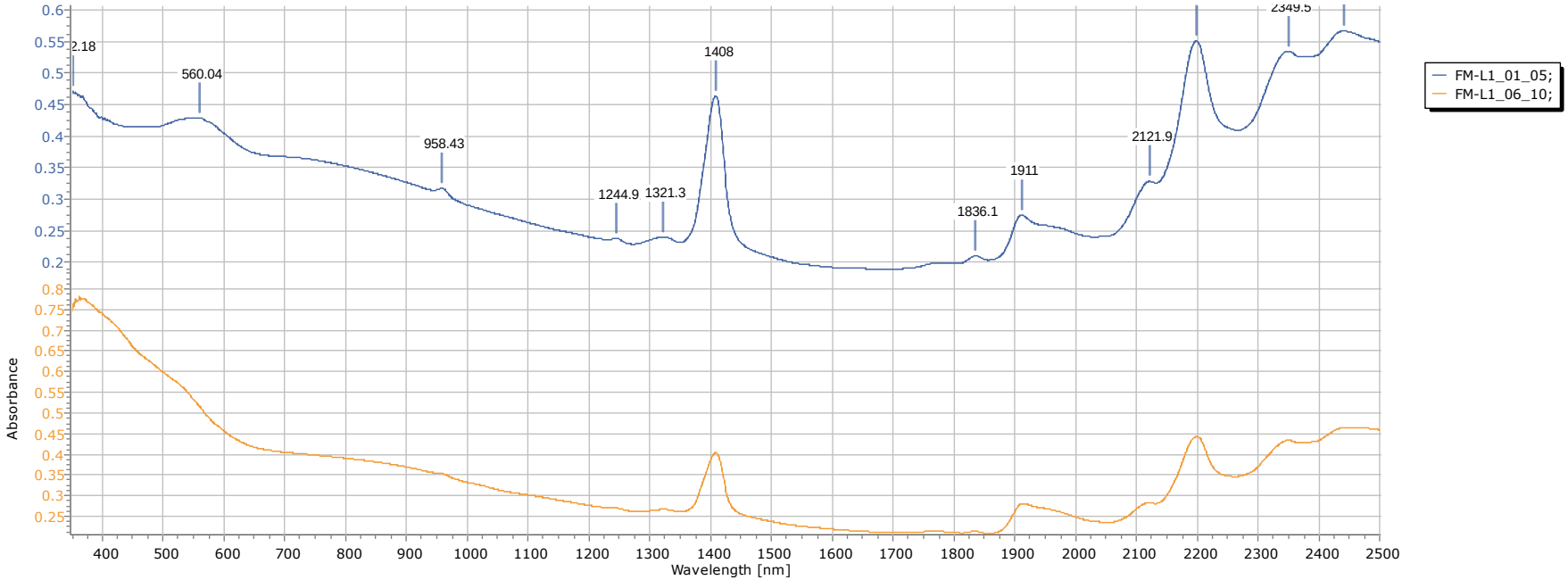
Classificação da imagem Sentinel 2 A nos pegmatitos de Muiane (zona de treino); resultado usando o algoritmo SVM.

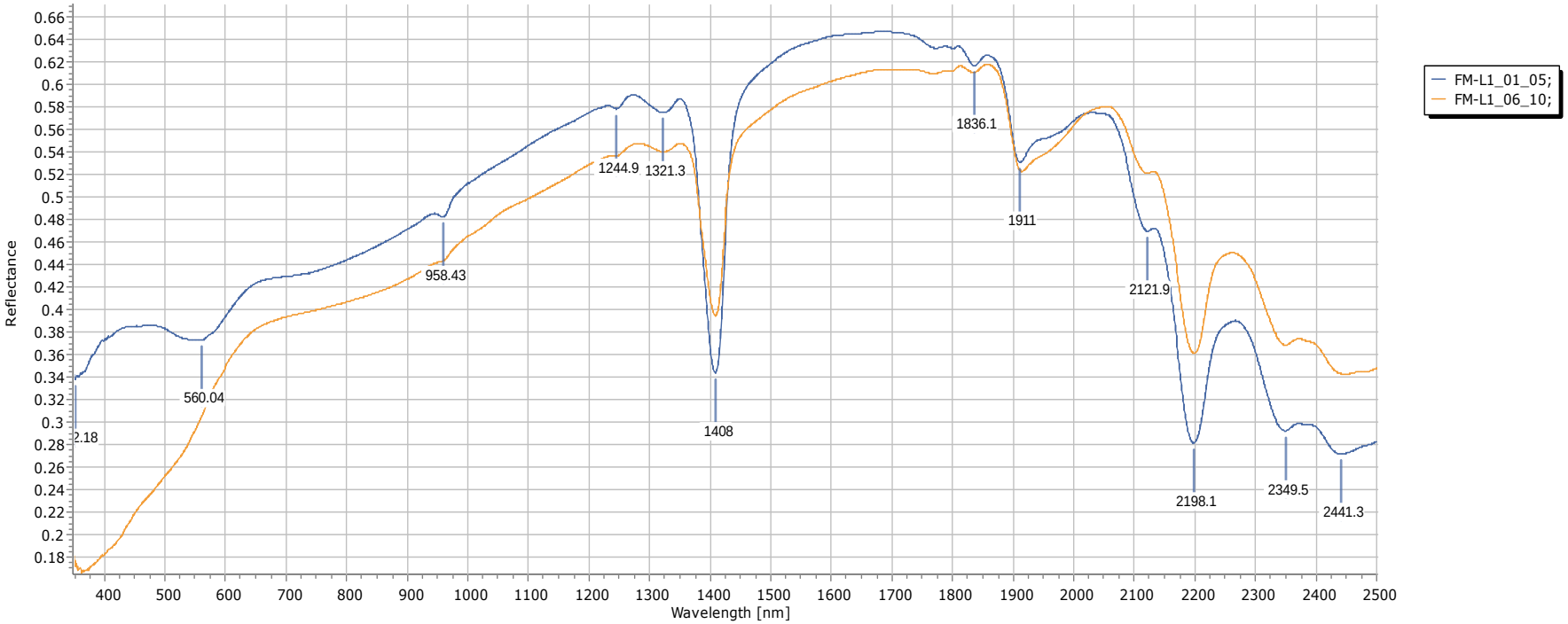
Apêndice IV: Curvas Espectrais

Espectros dos Pegmatitos de Muiane

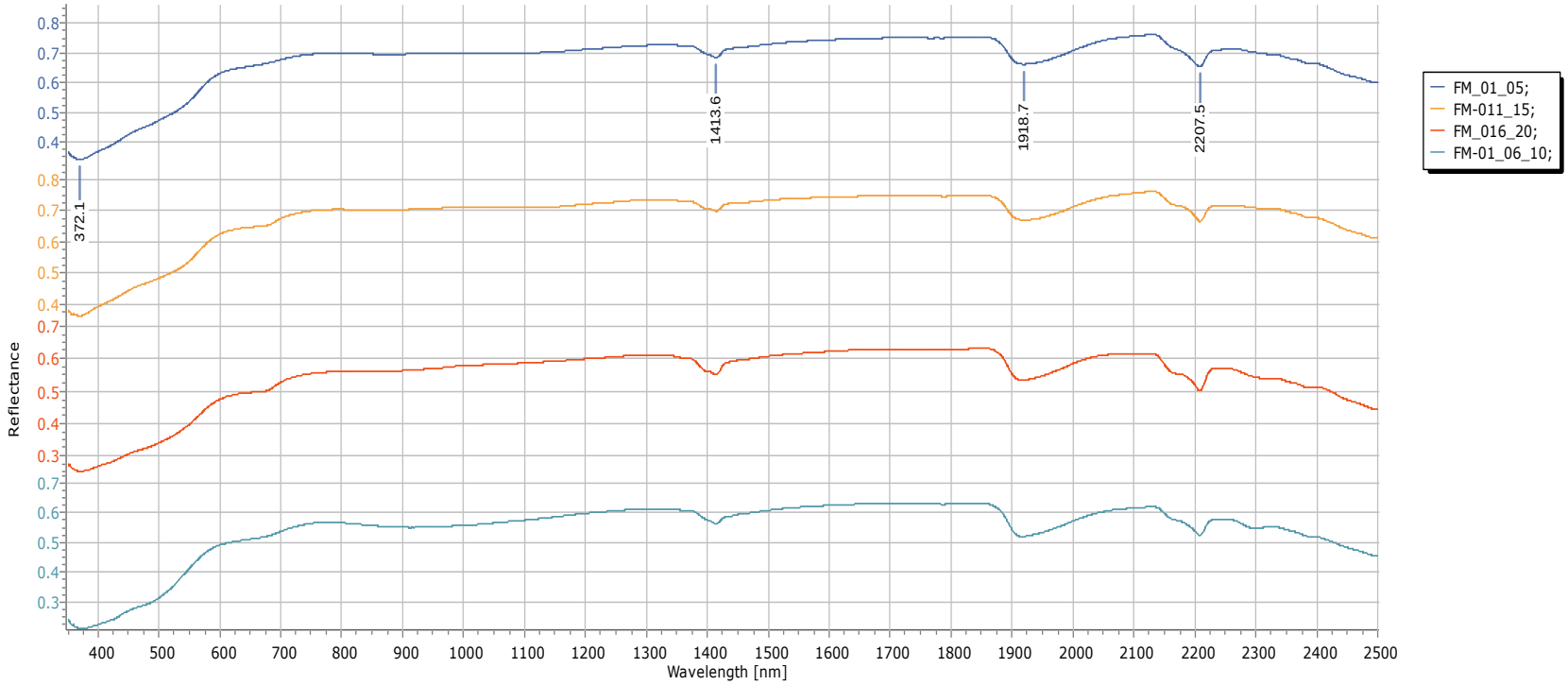
Felspatos (FML)



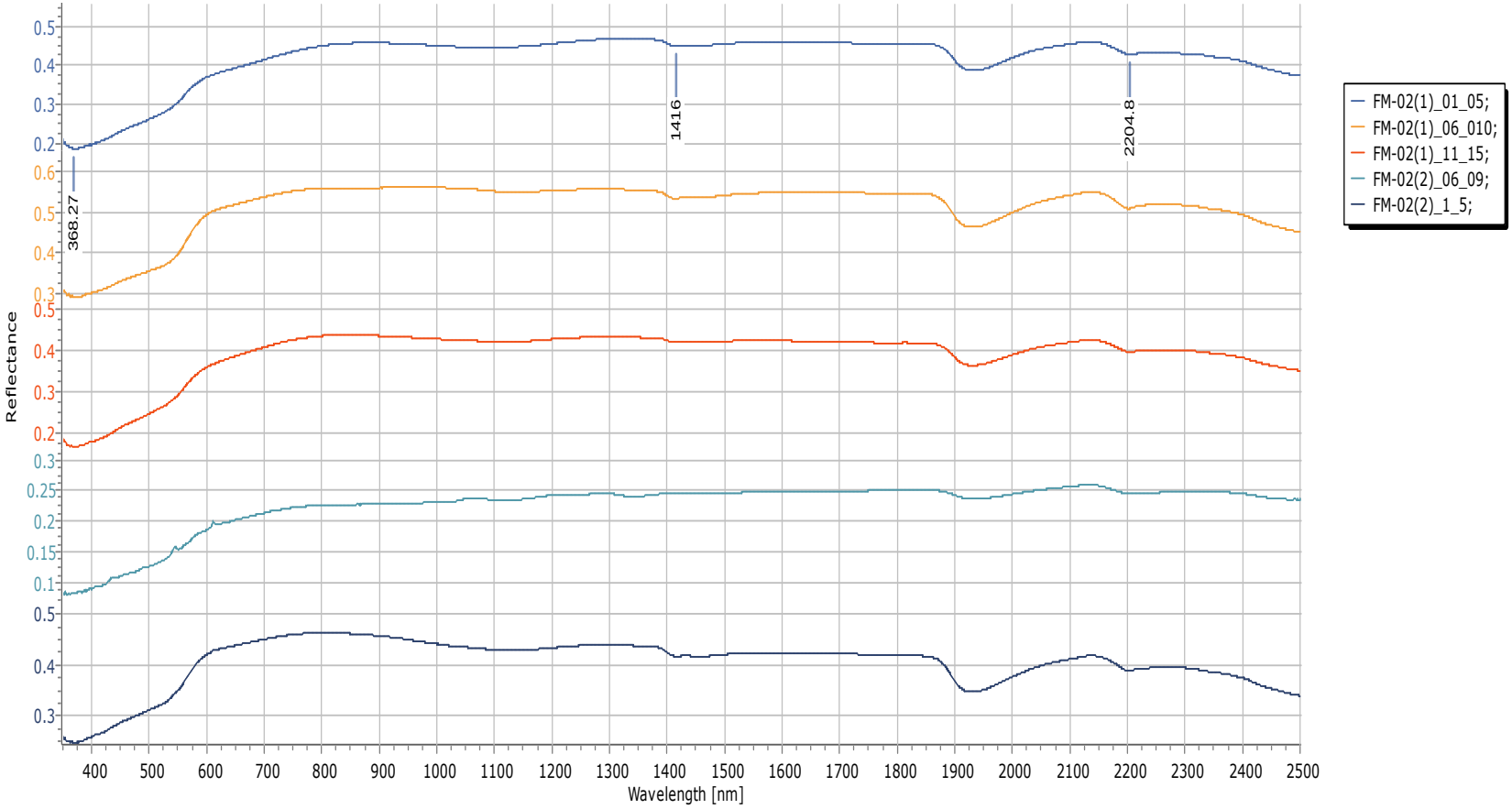

2.18
560.04
958.43
1244.9
1321.3
1408
1836.1
1911
2121.9
2349.5
Absorbance
Wavelength [nm]
FM-L1_01_05;
FM-L1_06_10;

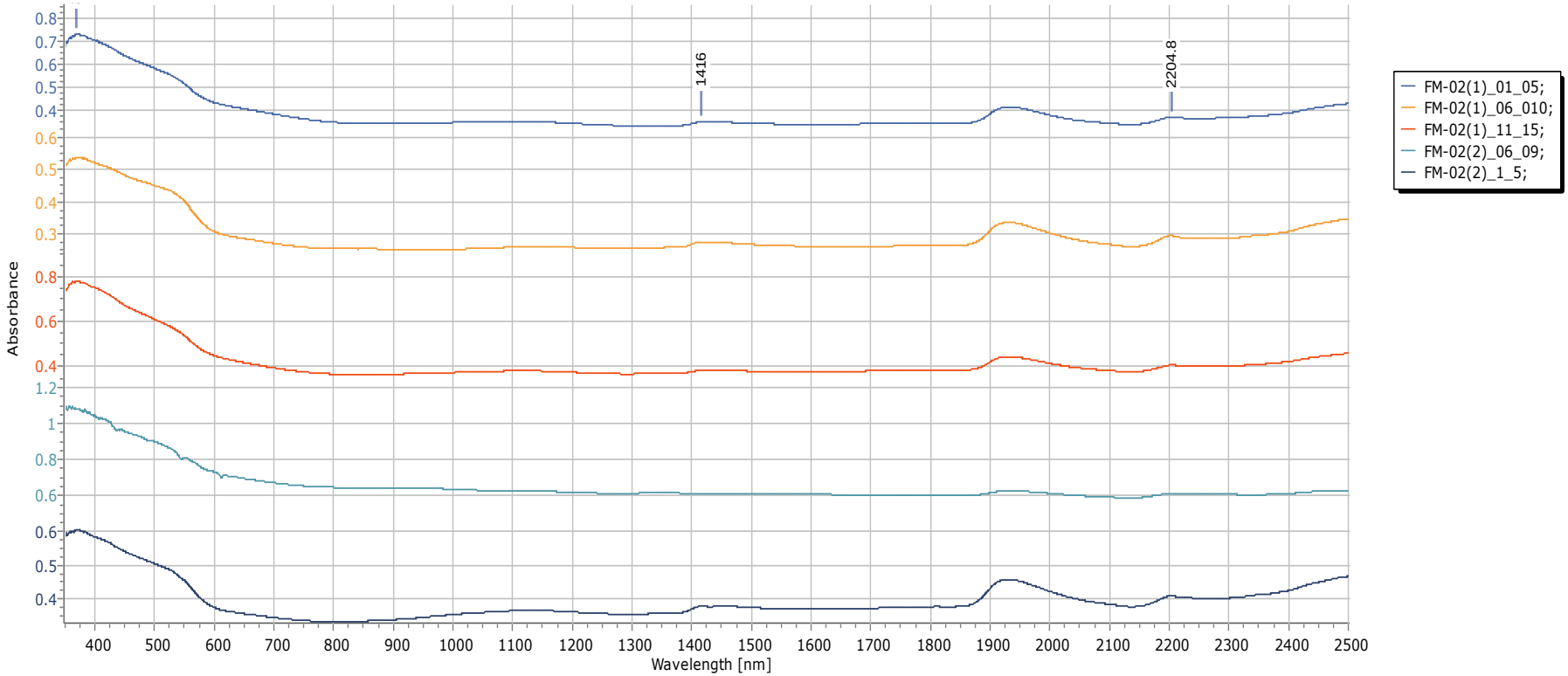

Reflectance
Wavelength [nm]
FM-L1_01_05;
FM-L1_06_10;
2.18
560.04
958.43
1244.9
1321.3
1408
1836.1
1911
2121.9
2198.1
2349.5
2441.3

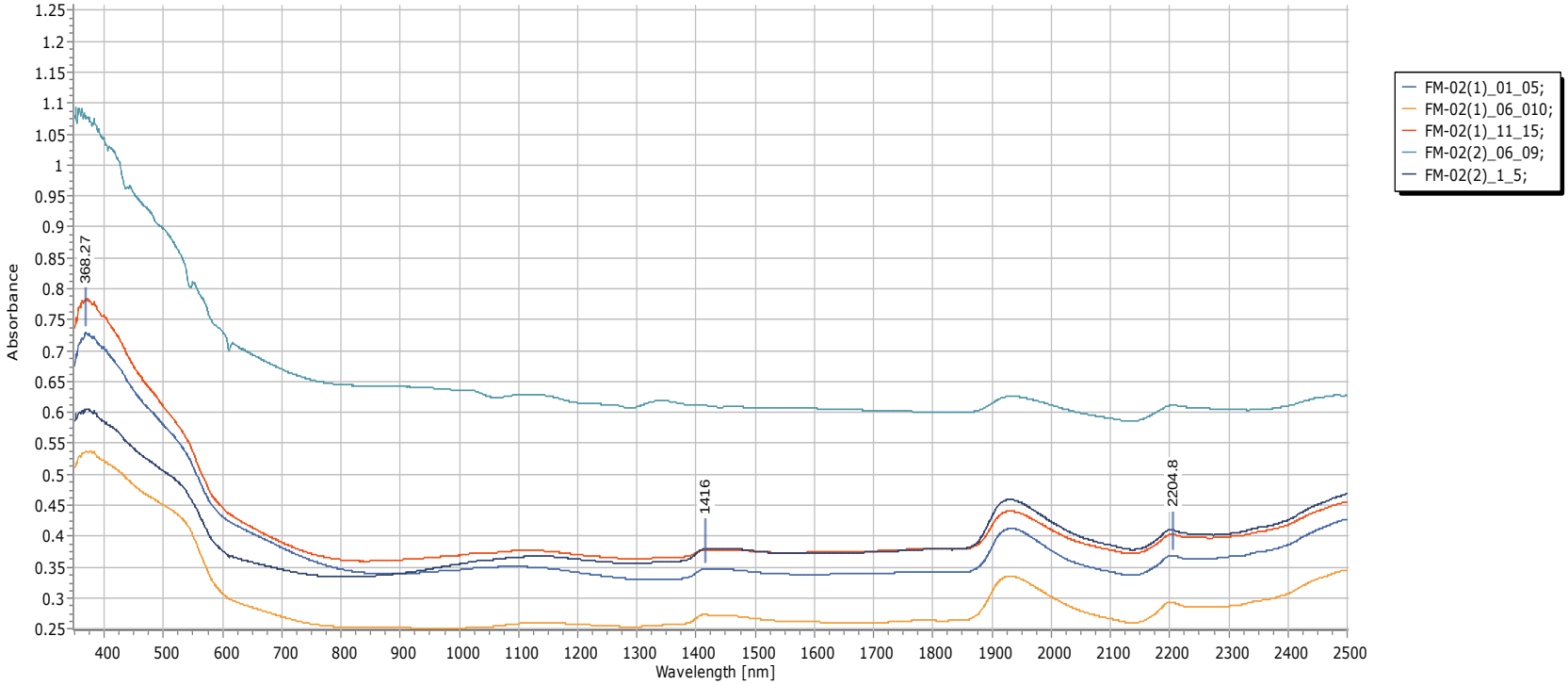
Feldspatos (FM)



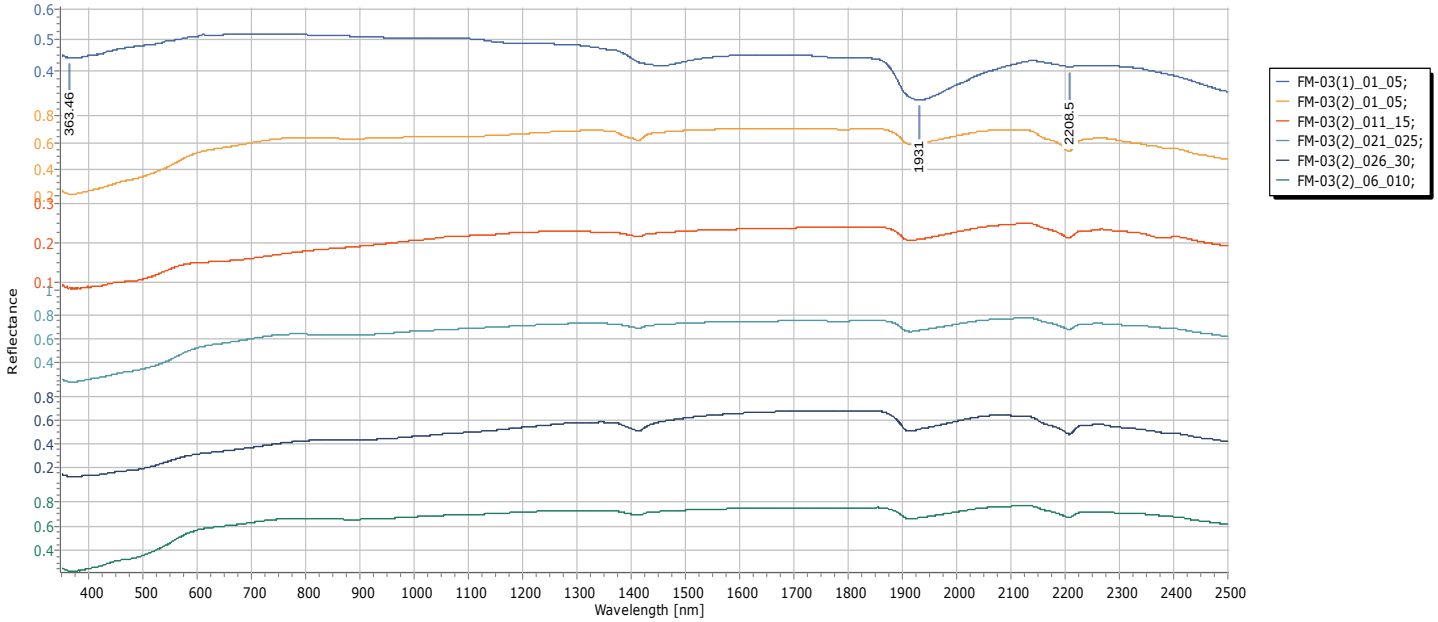
Feldspatos (FM2)

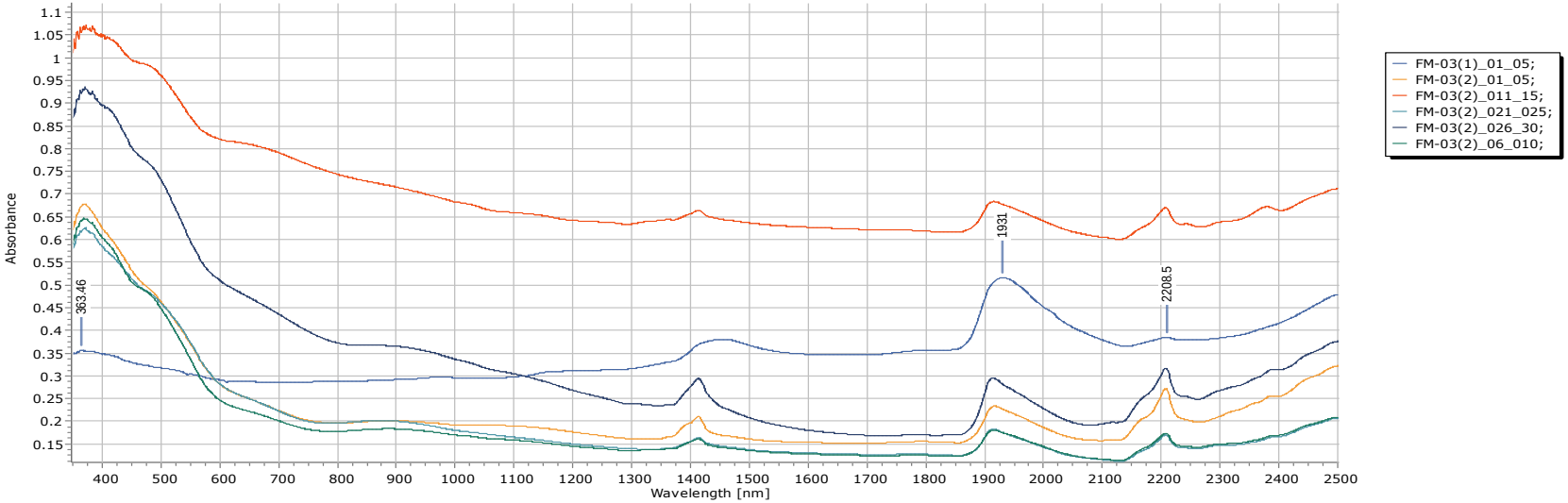


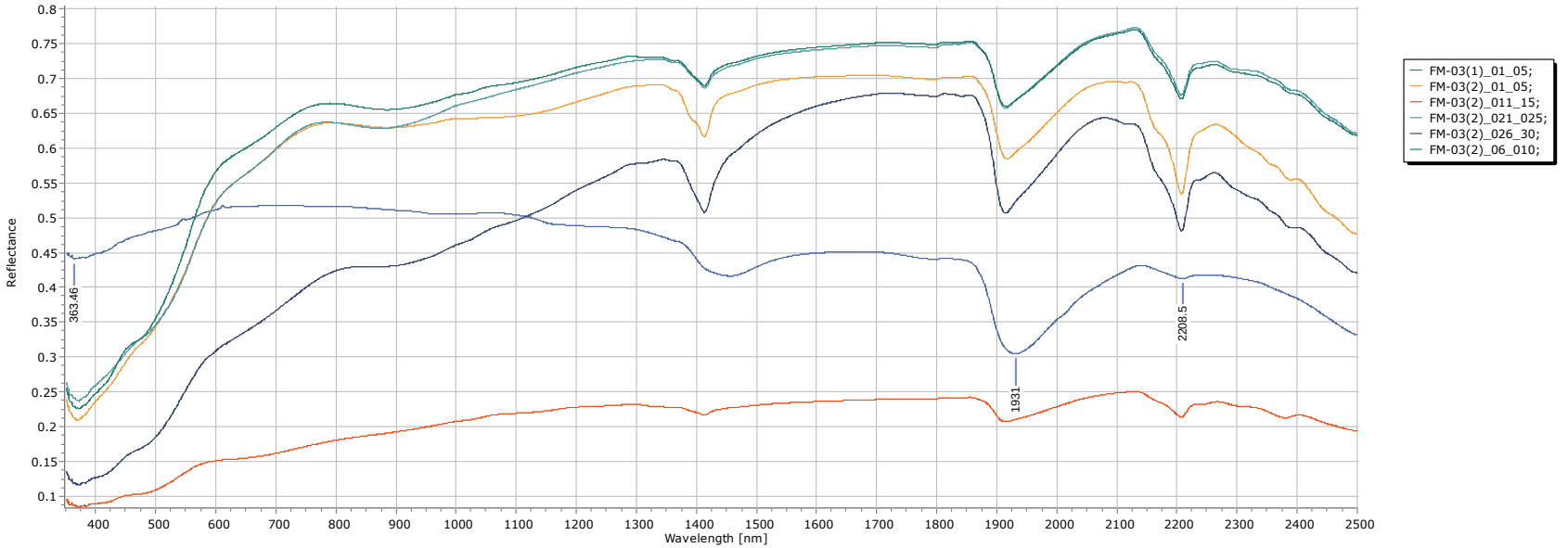

1416
2204.8
Absorbance
Wavelength [nm]
FM-02(1)_01_05;
FM-02(1)_06_010;
FM-02(1)_11_15;
FM-02(2)_06_09;
FM-02(2)_1_5;


Absorbance
Wavelength [nm]
368.27
1416
2204.8
FM-02(1)_01_05;
FM-02(1)_06_010;
FM-02(1)_11_15;
FM-02(2)_06_09;
FM-02(2)_1_5;

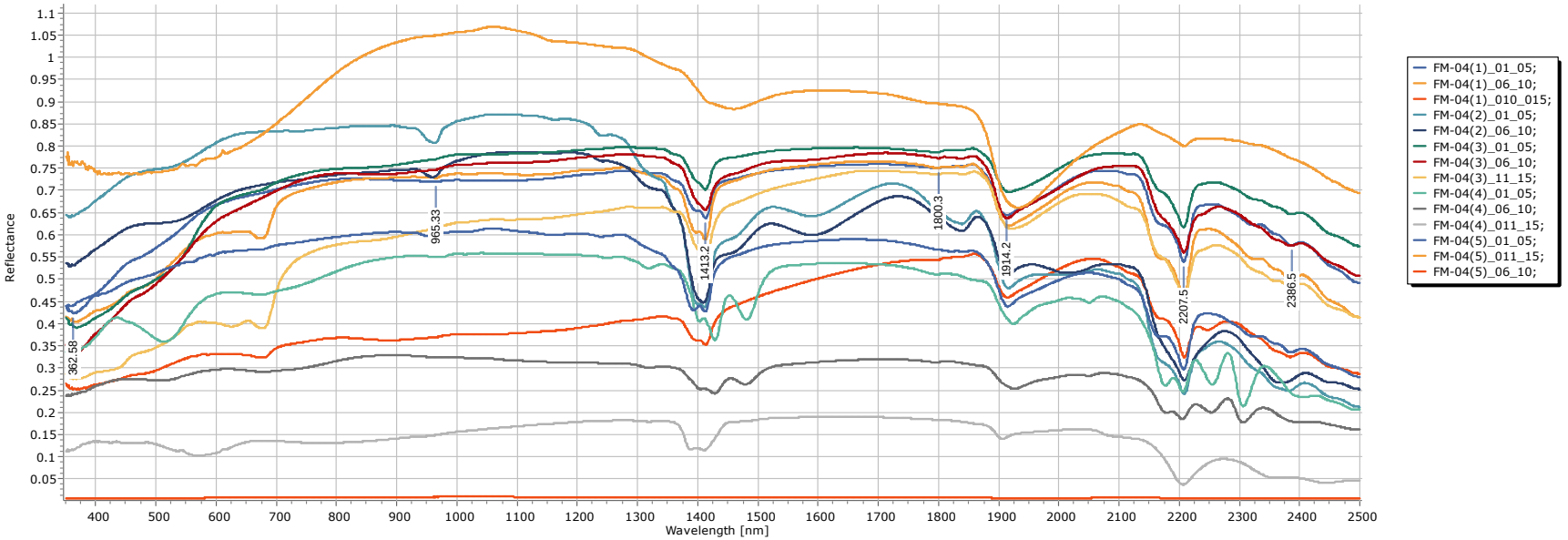
Feldspatos (FM3)

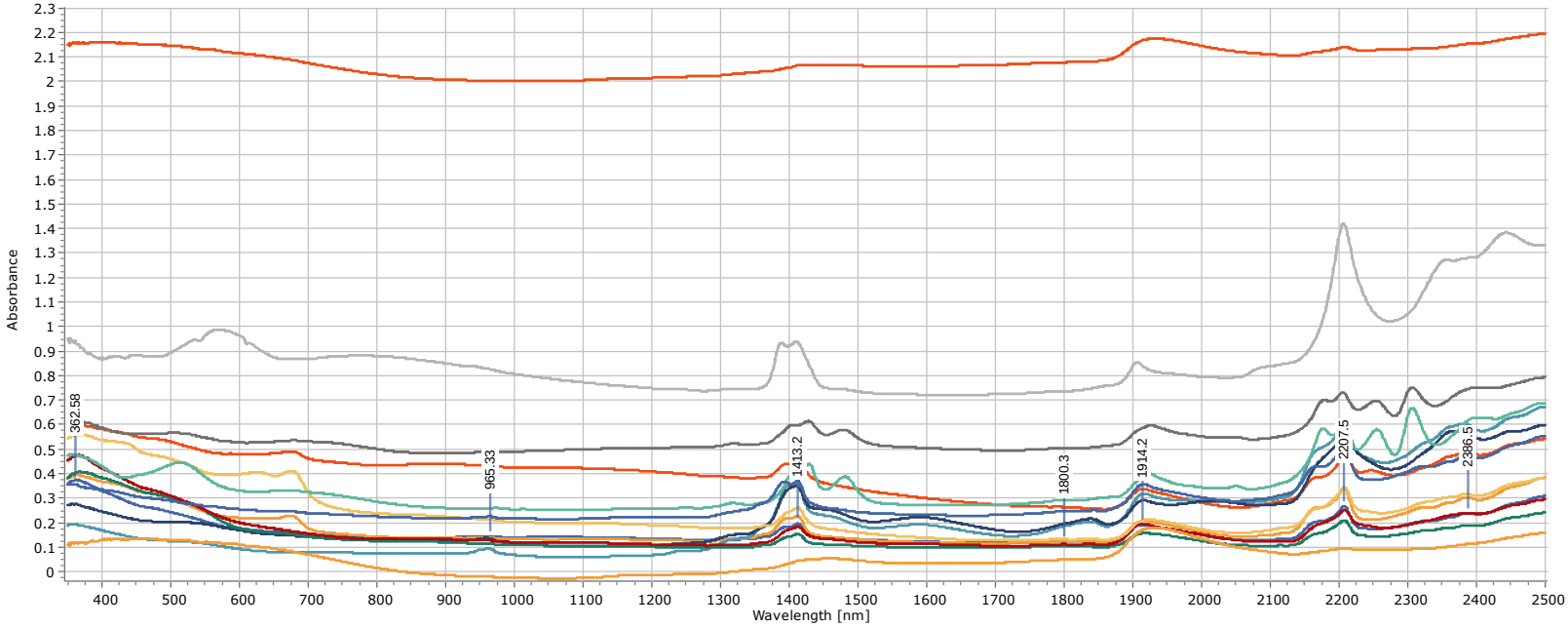


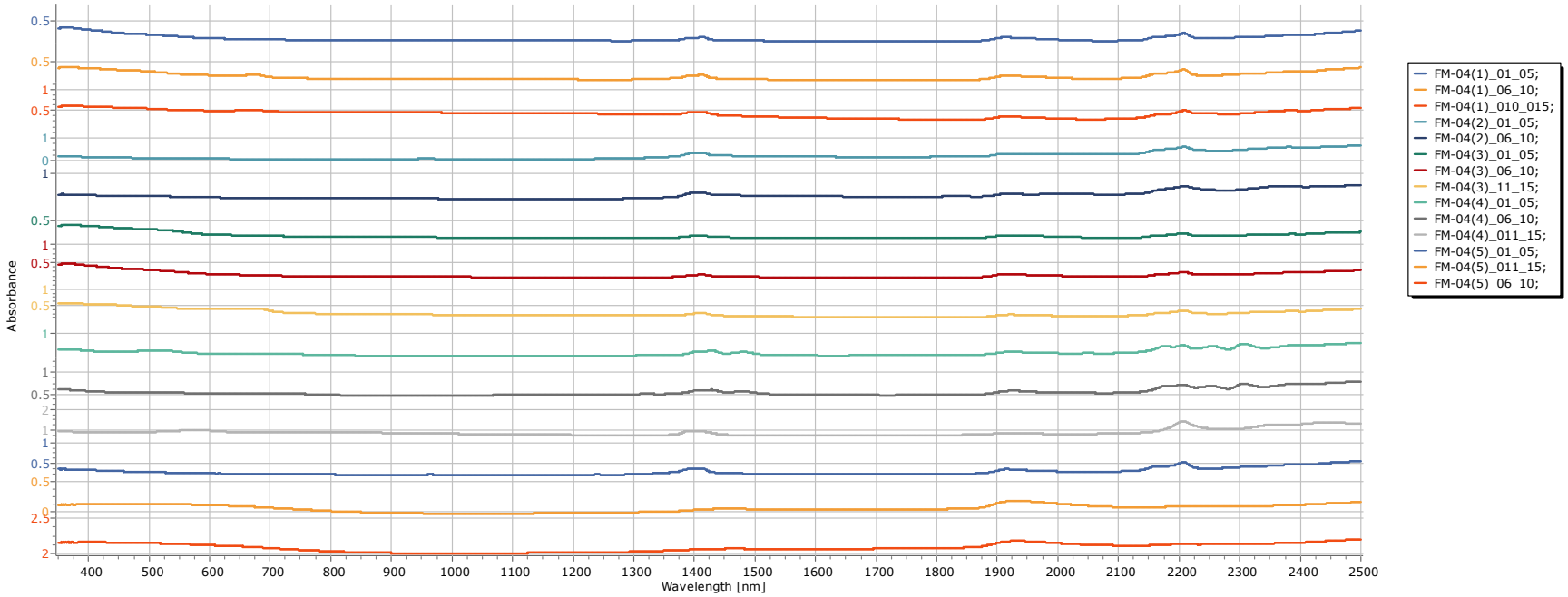

Absorbance
Wavelength [nm]
363.46
1931
2208.5
FM-03(1)_01_05;
FM-03(2)_01_05;
FM-03(2)_011_15;
FM-03(2)_021_025;
FM-03(2)_026_30;
FM-03(2)_06_010;

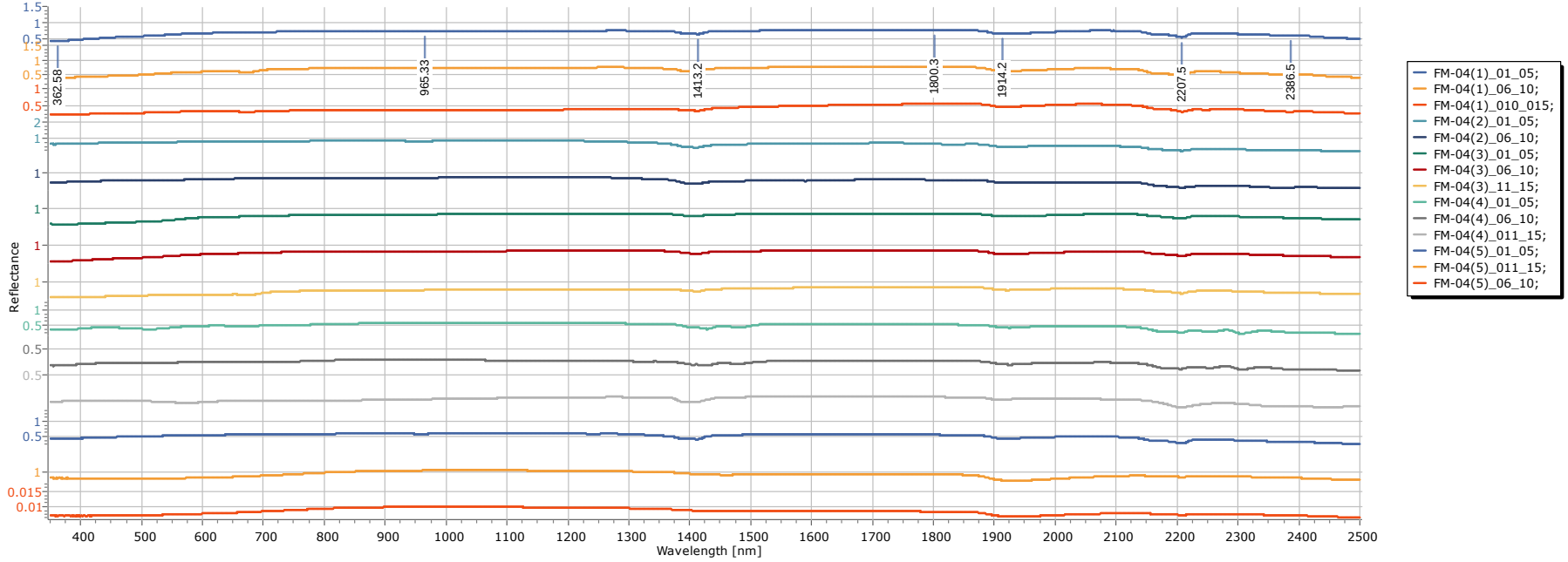

Reflectance
Wavelength [nm]
363.46
1931
2208.5
FM-03(1)_01_05;
FM-03(2)_01_05;
FM-03(2)_011_15;
FM-03(2)_021_025;
FM-03(2)_026_30;
FM-03(2)_06_010;

Feldspatos (FM4)

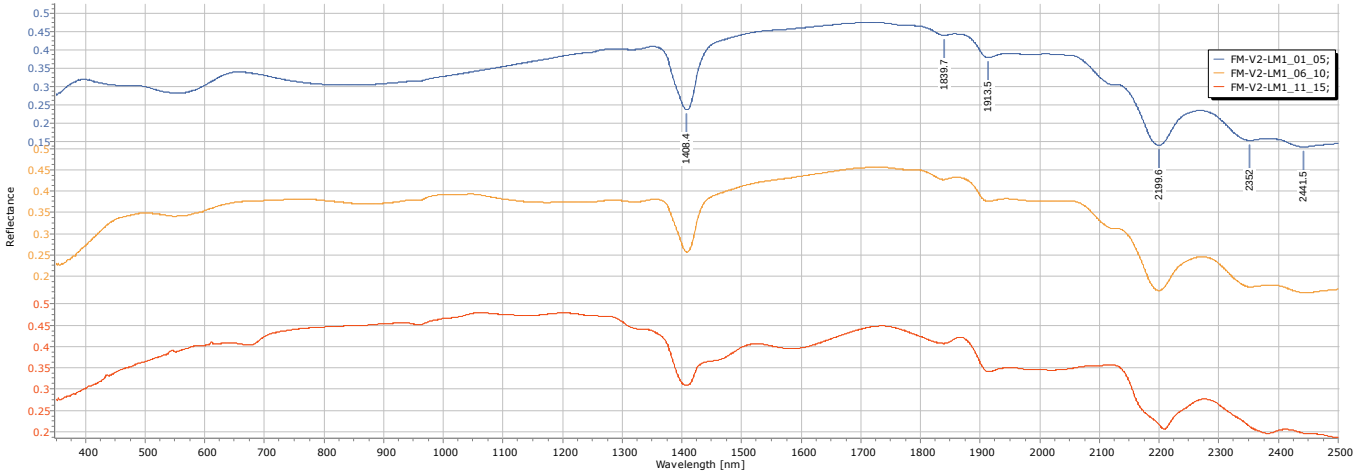


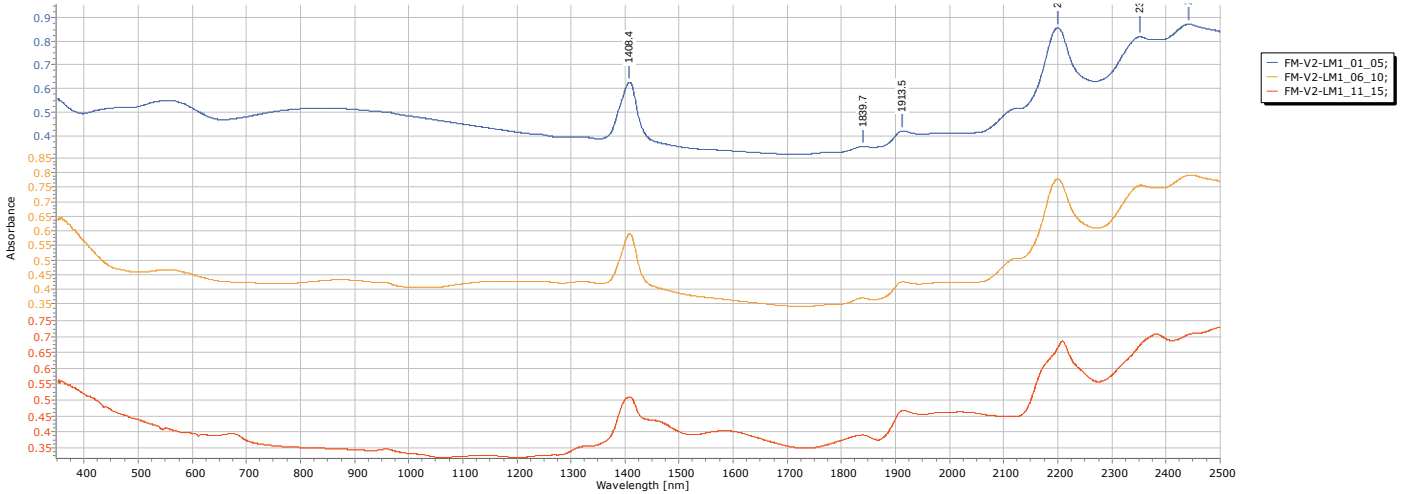

Absorbance
Wavelength [nm]
362.58
965.33
1413.2
1800.3
1914.2
2207.5
2386.5
FM-04(1)_01_05;
FM-04(1)_06_10;
FM-04(1)_010_015;
FM-04(2)_01_05;
FM-04(2)_06_10;
FM-04(3)_01_05;
FM-04(3)_06_10;
FM-04(3)_11_15;
FM-04(4)_01_05;
FM-04(4)_06_10;
FM-04(4)_011_15;
FM-04(5)_01_05;
FM-04(5)_011_15;
FM-04(5)_06_10;

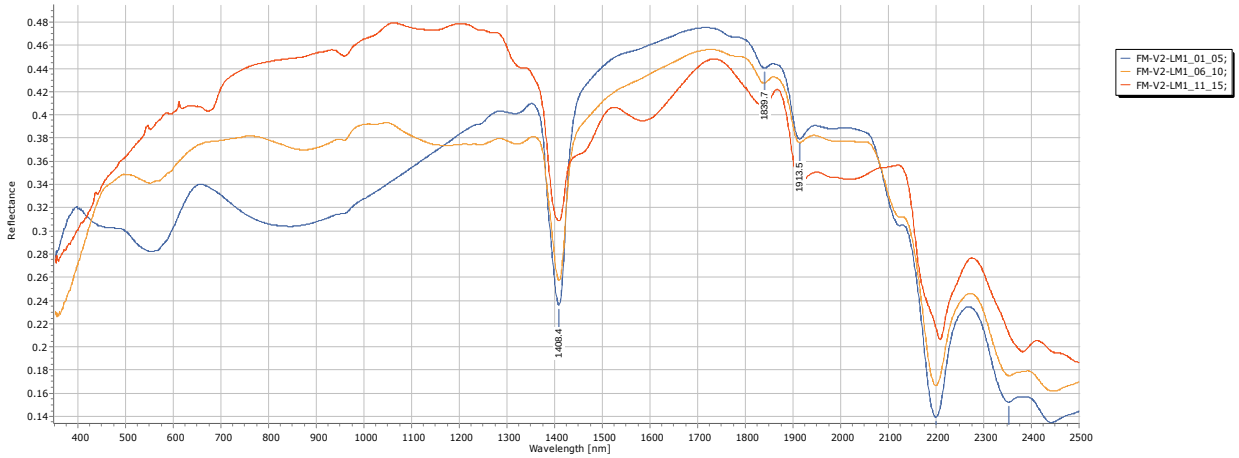

Absorbance
Wavelength [nm]
400
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
1400
1500
1600
1700
1800
1900
2000
2100
2200
2300
2400
2500
FM-04(1)_01_05;
FM-04(1)_06_10;
FM-04(1)_010_015;
FM-04(2)_01_05;
FM-04(2)_06_10;
FM-04(3)_01_05;
FM-04(3)_06_10;
FM-04(3)_11_15;
FM-04(4)_01_05;
FM-04(4)_06_10;
FM-04(4)_011_15;
FM-04(5)_01_05;
FM-04(5)_011_15;
FM-04(5)_06_10;


Reflectance
Wavelength [nm]
362.58
965.33
1413.2
1800.3
1914.2
2207.5
2386.5
FM-04(1)_01_05;
FM-04(1)_06_10;
FM-04(1)_010_015;
FM-04(2)_01_05;
FM-04(2)_06_10;
FM-04(3)_01_05;
FM-04(3)_06_10;
FM-04(3)_11_15;
FM-04(4)_01_05;
FM-04(4)_06_10;
FM-04(4)_011_15;
FM-04(5)_01_05;
FM-04(5)_011_15;
FM-04(5)_06_10;

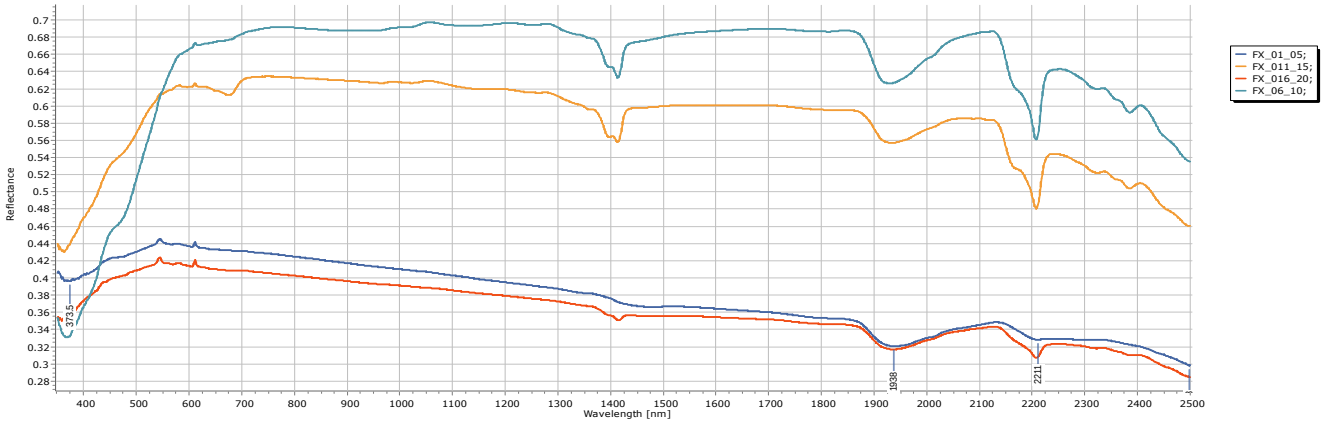
Feldspatos (FM-VML1)

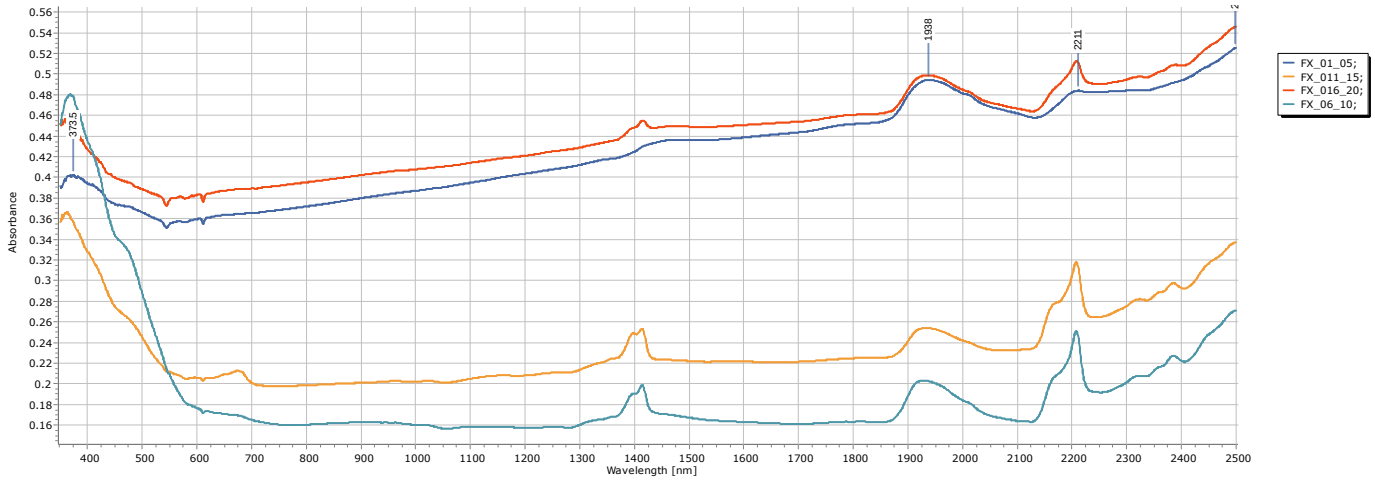


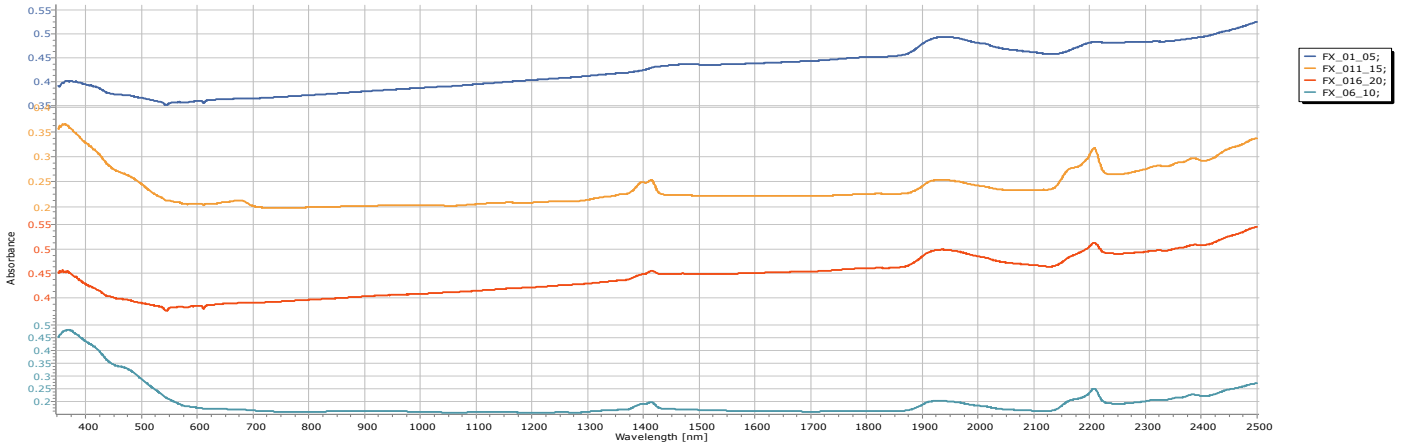

Absorbance
Wavelength [nm]
1408.4
1839.7
1913.5
FM-V2-LM1_01_05;
FM-V2-LM1_06_10;
FM-V2-LM1_11_15;

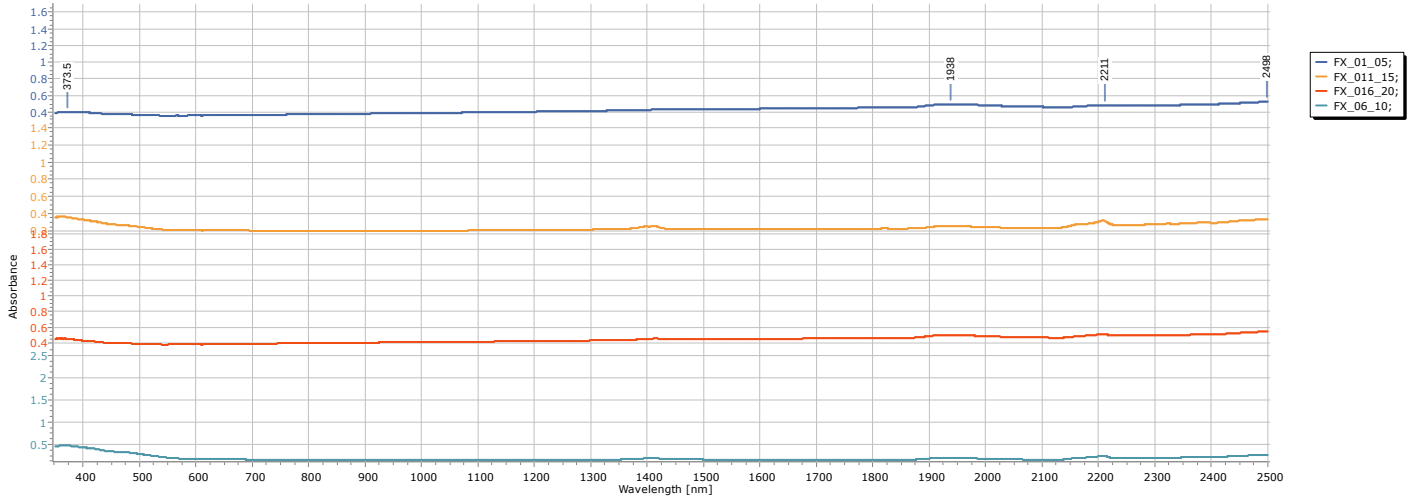

Reflectance
Wavelength [nm]
1408.4
1839.7
1913.5
FM-V2-LM1_01_05;
FM-V2-LM1_06_10;
FM-V2-LM1_11_15;

FX

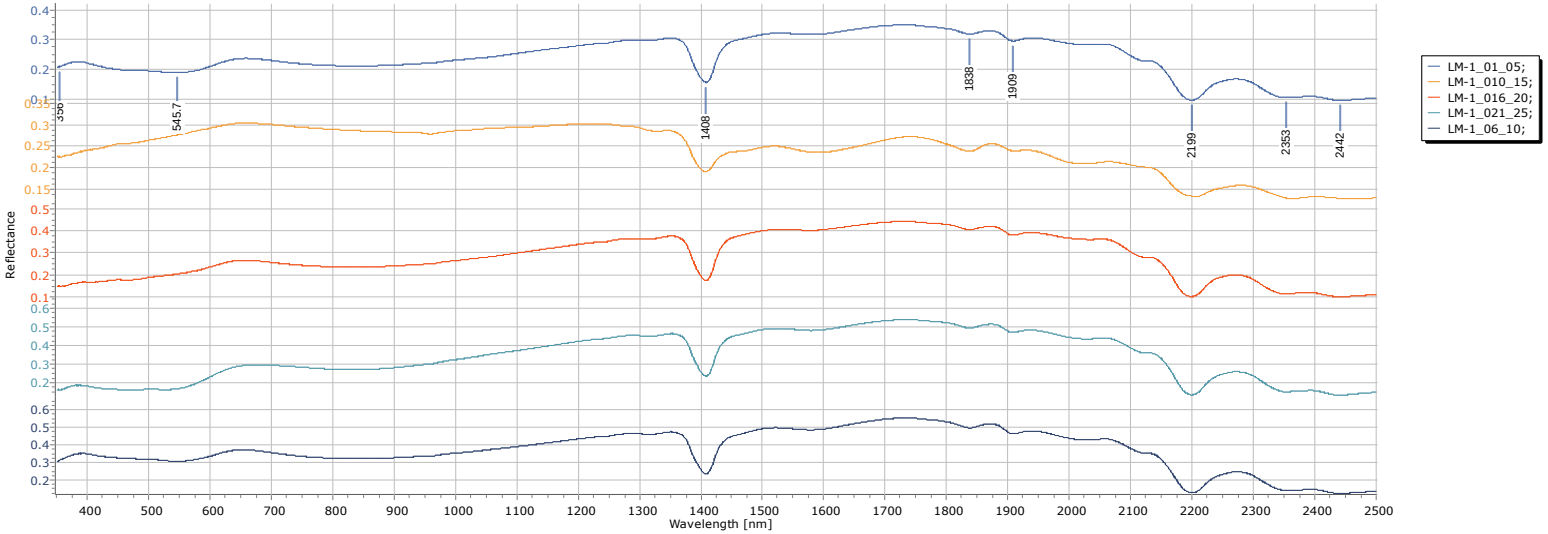

Reflectance
Wavelength [nm]
3735
1938
2211
FX_01_05;
FX_011_15;
FX_016_20;
FX_06_10;

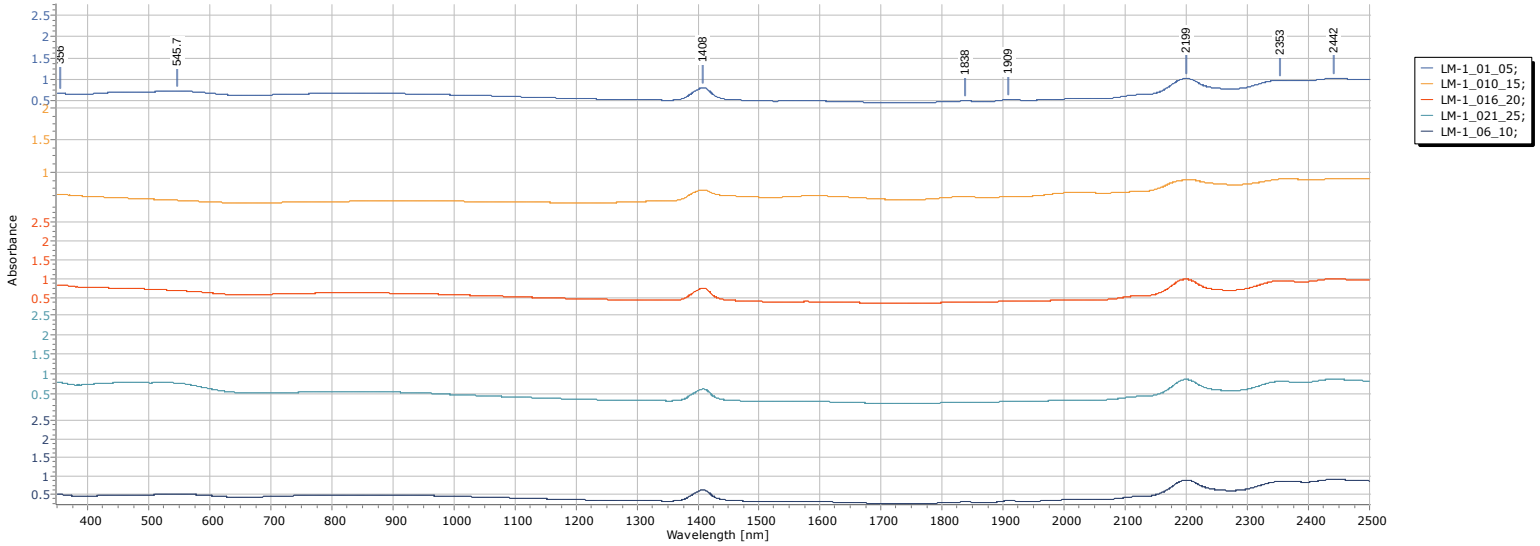

Absorbance
Wavelength [nm]
3735
1938
2211
FX_01_05;
FX_011_15;
FX_016_20;
FX_06_10;

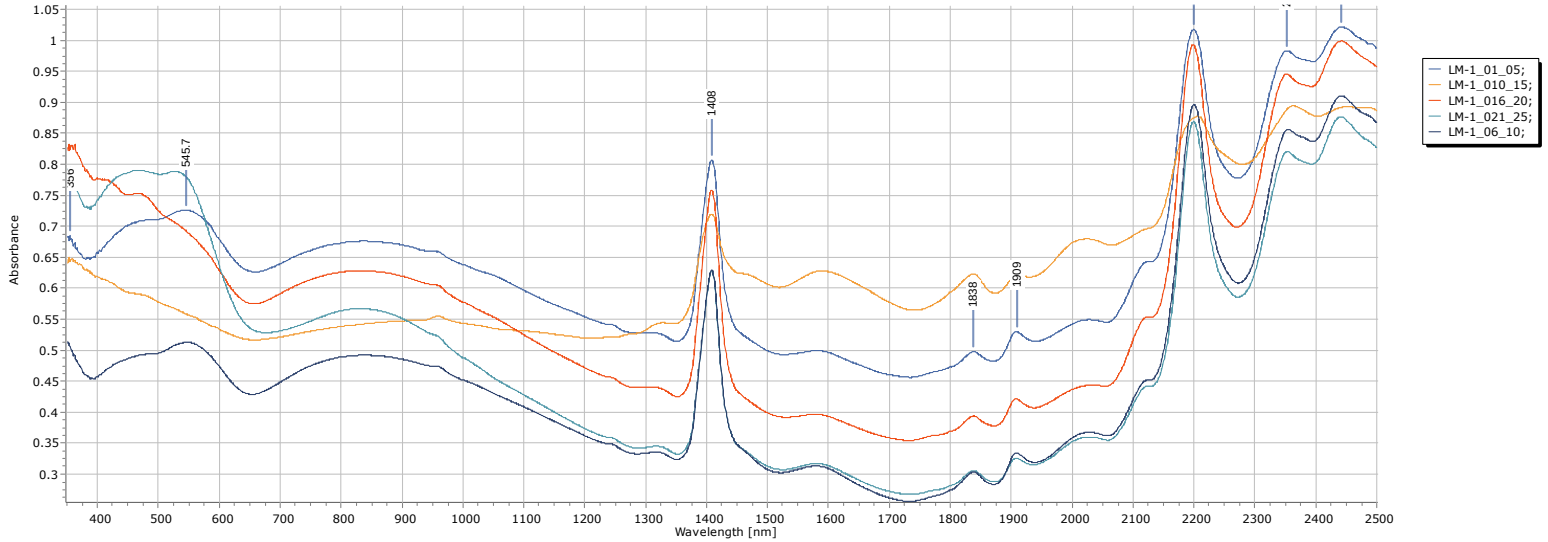

Absorbance
Wavelength [nm]
FX_01_05;
FX_011_15;
FX_016_20;
FX_06_10;

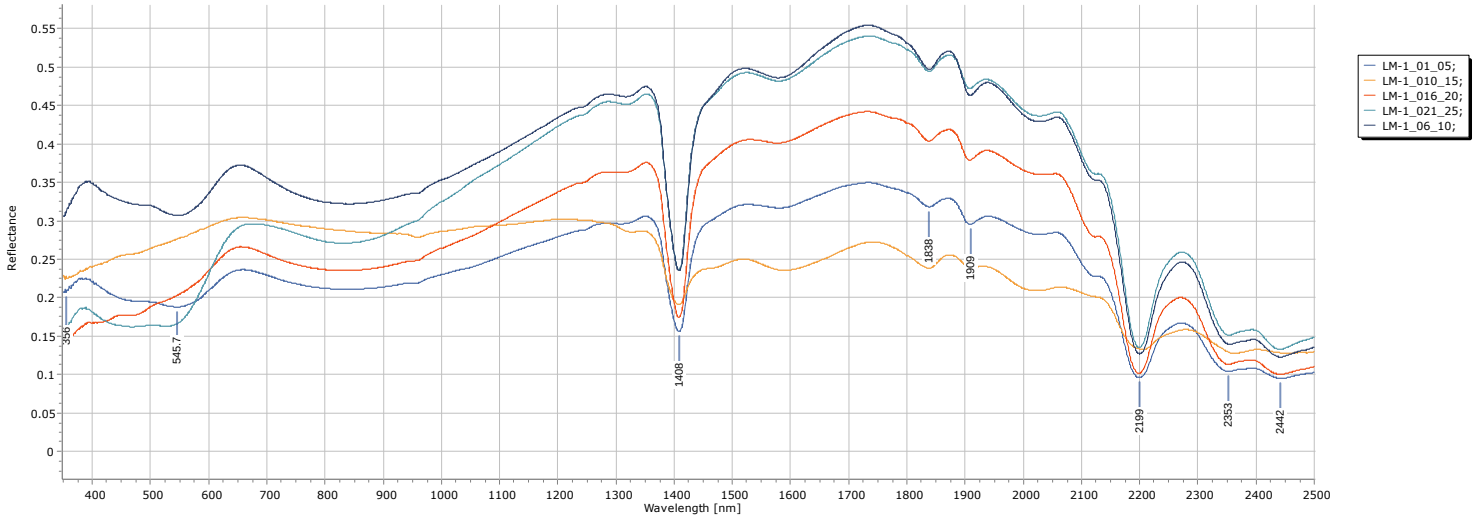

373.5
1938
2211
2498
Absorbance
Wavelength [nm]
FX_01_05;
FX_011_15;
FX_016_20;
FX_06_10;

Lepidolite (LM)

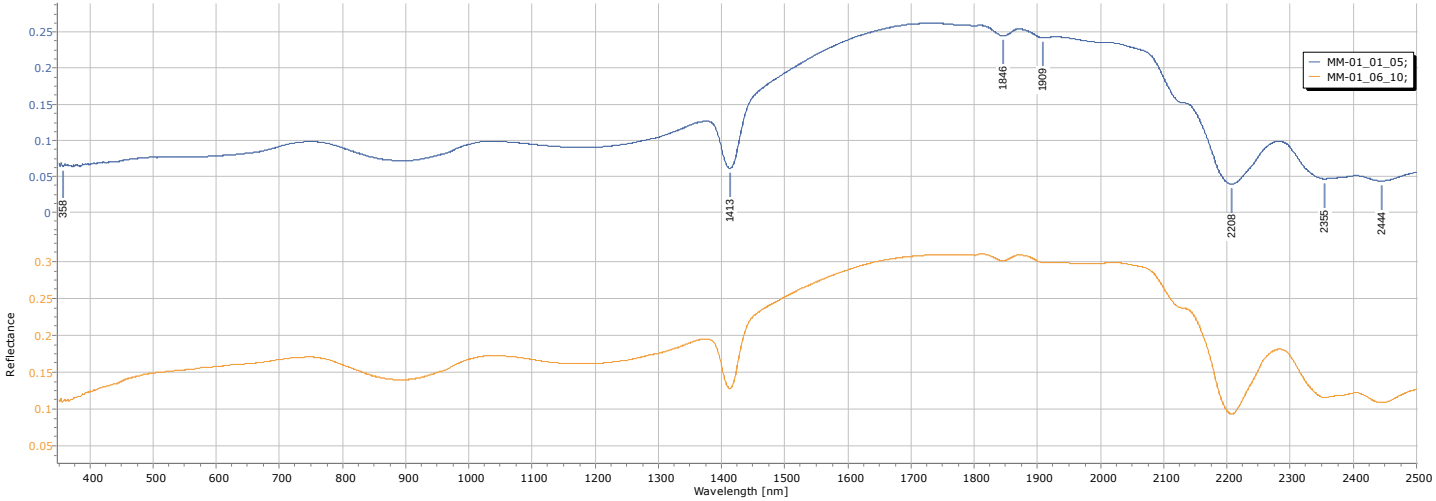


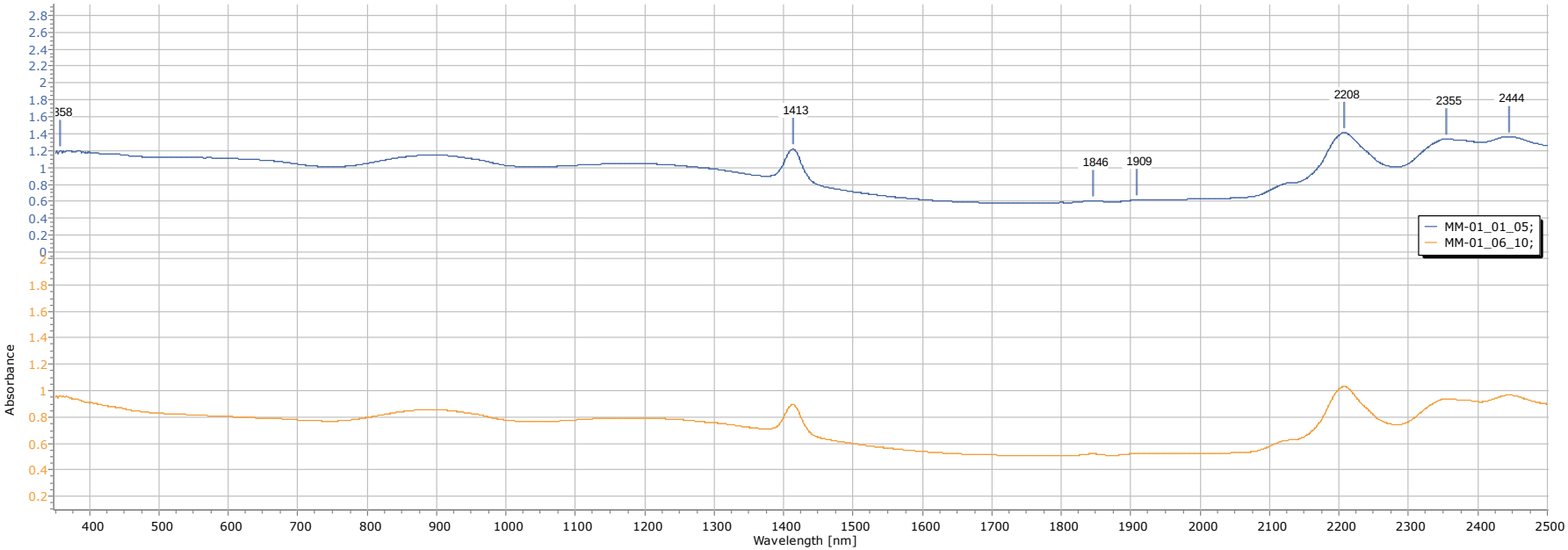


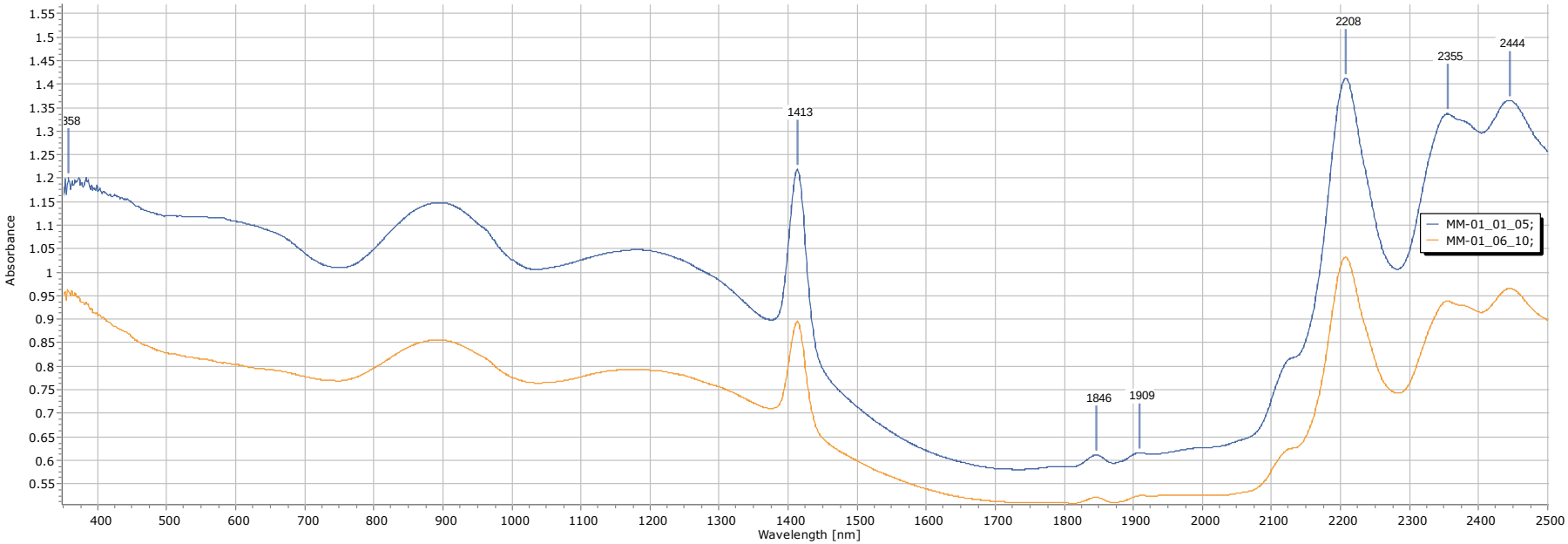

Absorbance
Wavelength [nm]
356
545.7
1408
1838
1909
LM-1_01_05;
LM-1_010_15;
LM-1_016_20;
LM-1_021_25;
LM-1_06_10;

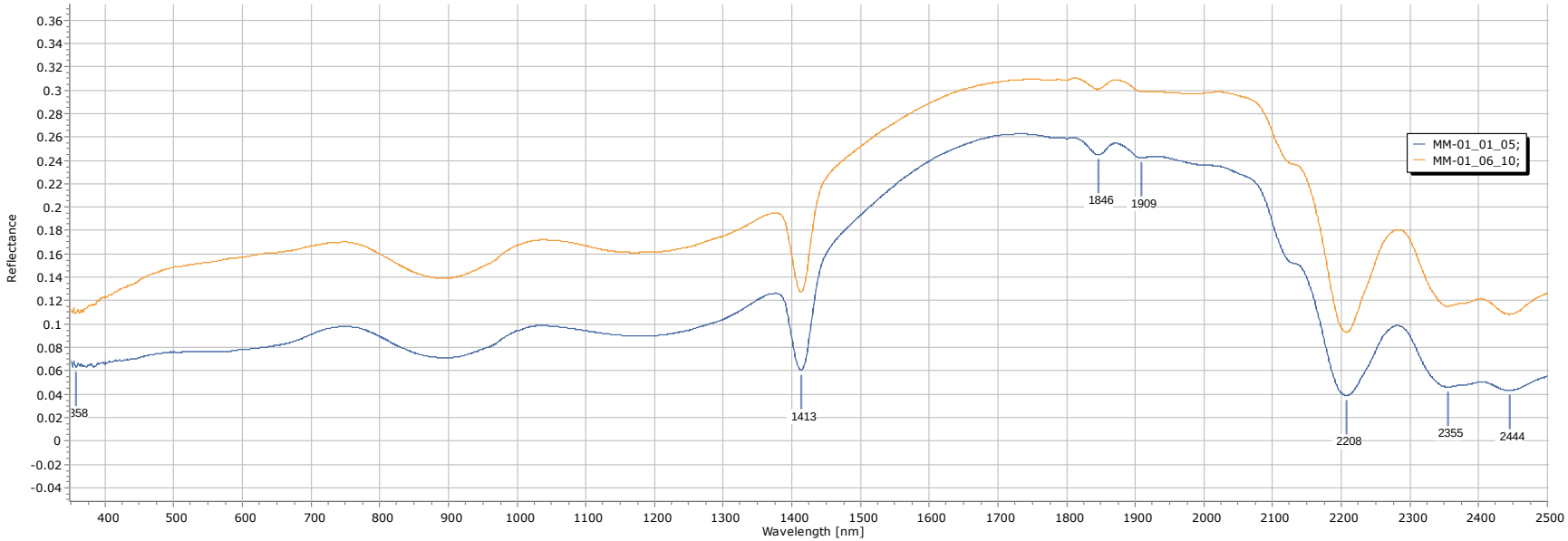

Reflectance
Wavelength [nm]
356
545.7
1408
1838
1909
2199
2353
2442
LM-1_01_05;
LM-1_010_15;
LM-1_016_20;
LM-1_021_25;
LM-1_06_10;

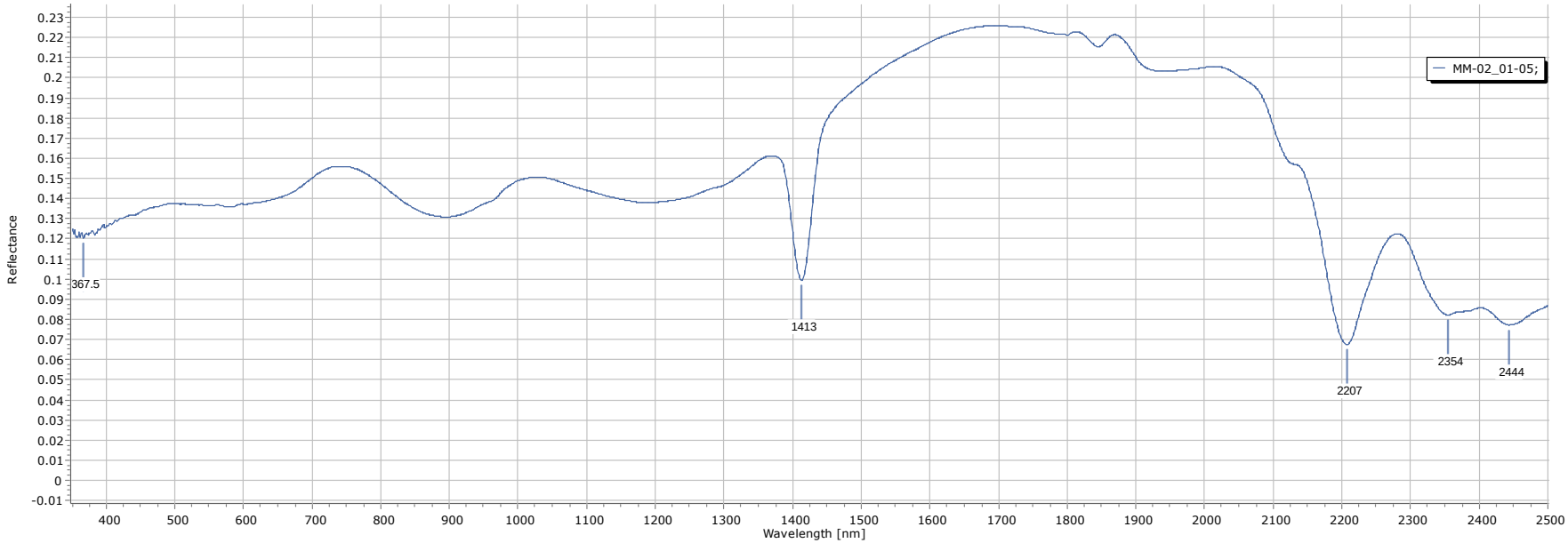
Moscovite (MM)

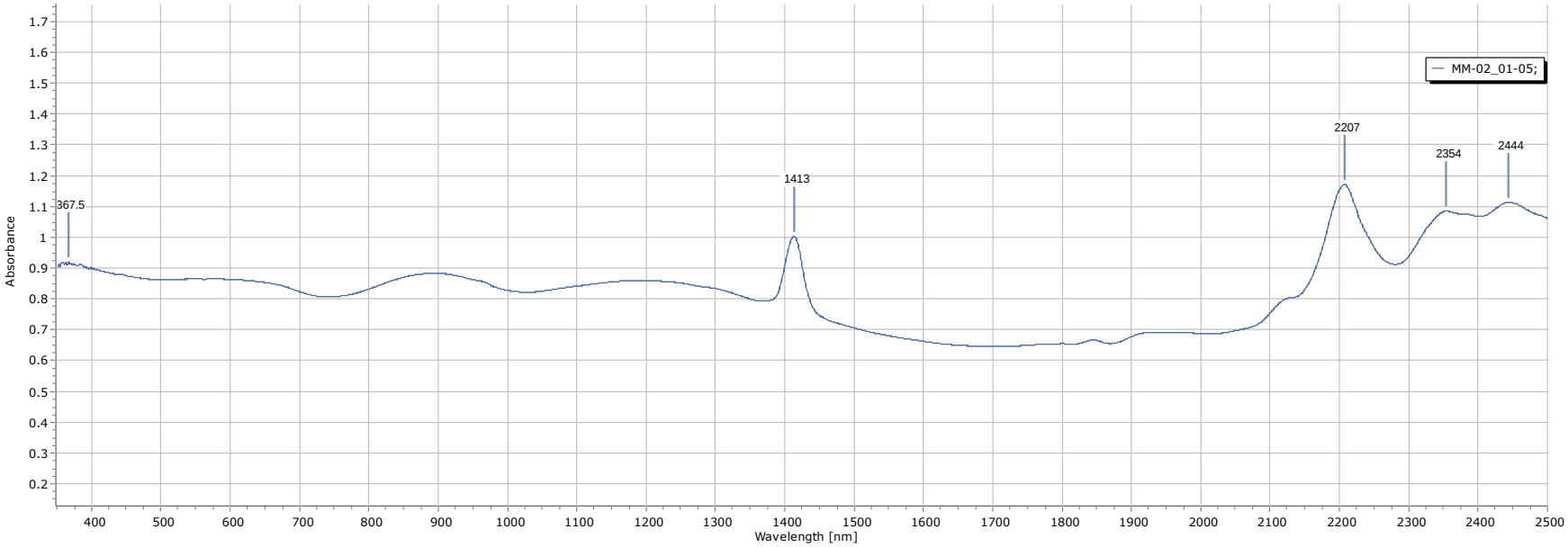



358
1413
1846
1909
2208
2355
2444
MM-01_01_05;
MM-01_06_10;
Absorbance
Wavelength [nm]

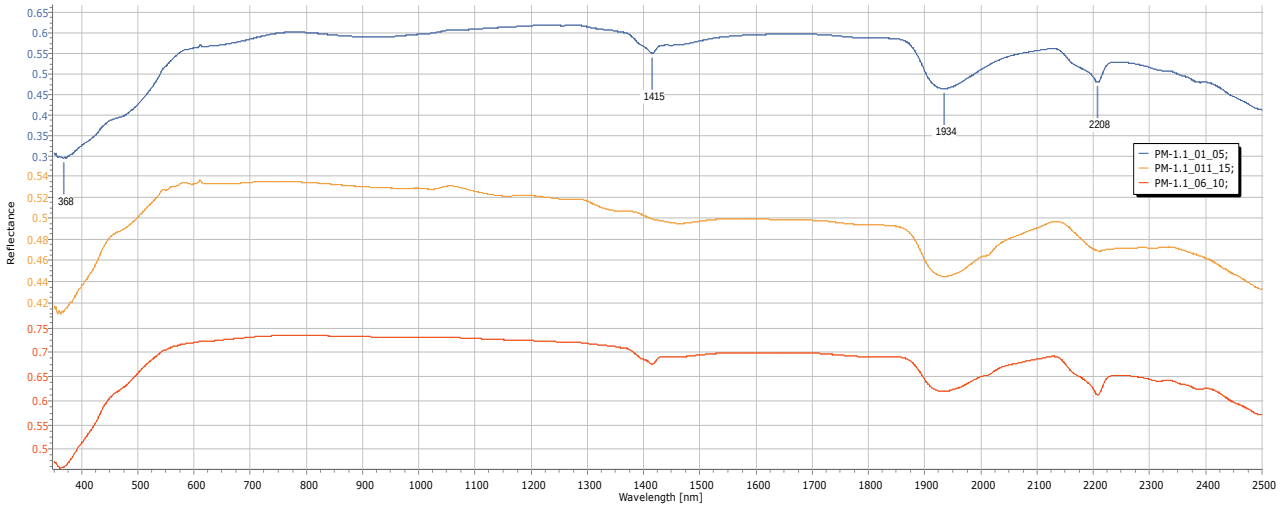

Absorbance
Wavelength [nm]
358
1413
1846
1909
2208
2355
2444
MM-01_01_05;
MM-01_06_10;

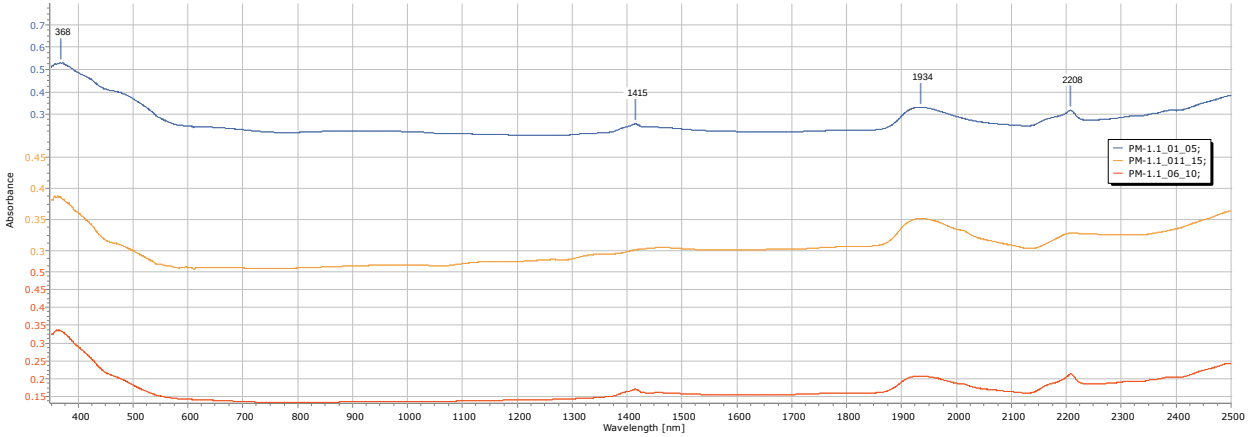

Reflectance
Wavelength [nm]
MM-01_01_05;
MM-01_06_10;
358
1413
1846
1909
2208
2355
2444

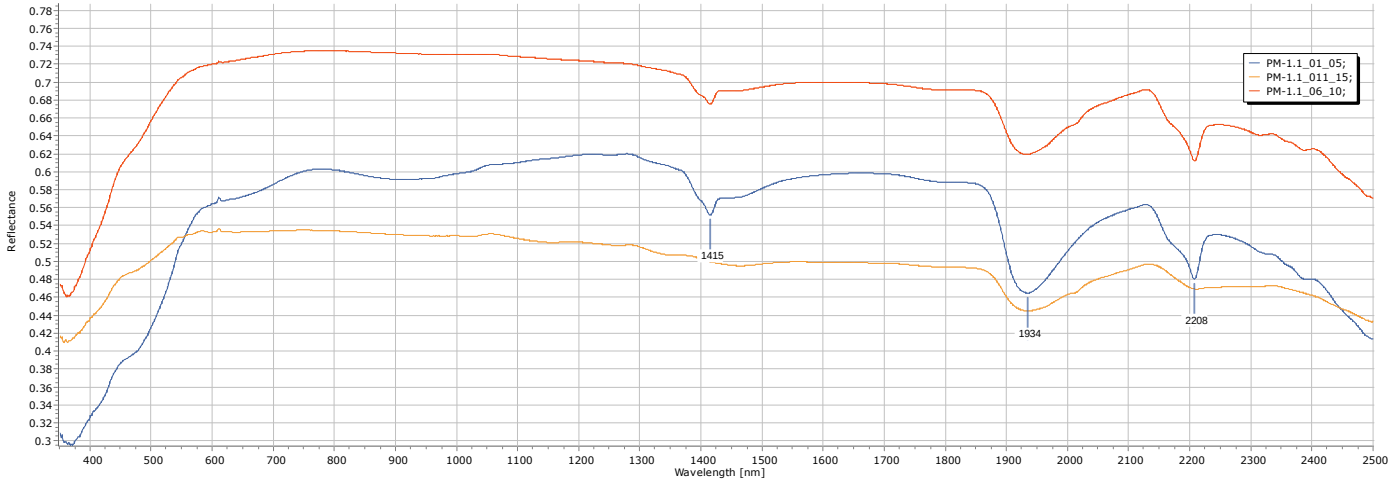

Reflectance
Wavelength [nm]
MM-02_01-05;
367.5
1413
2207
2354
2444

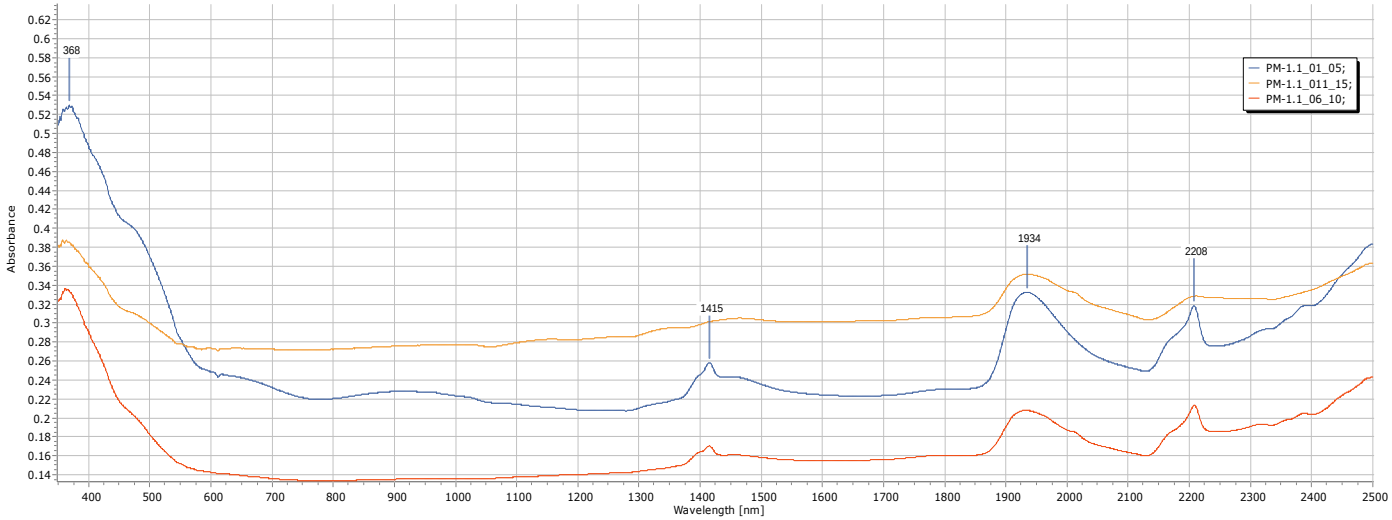

MM-02_01-05;
Absorbance
Wavelength [nm]
367.5
1413
2207
2354
2444

PM

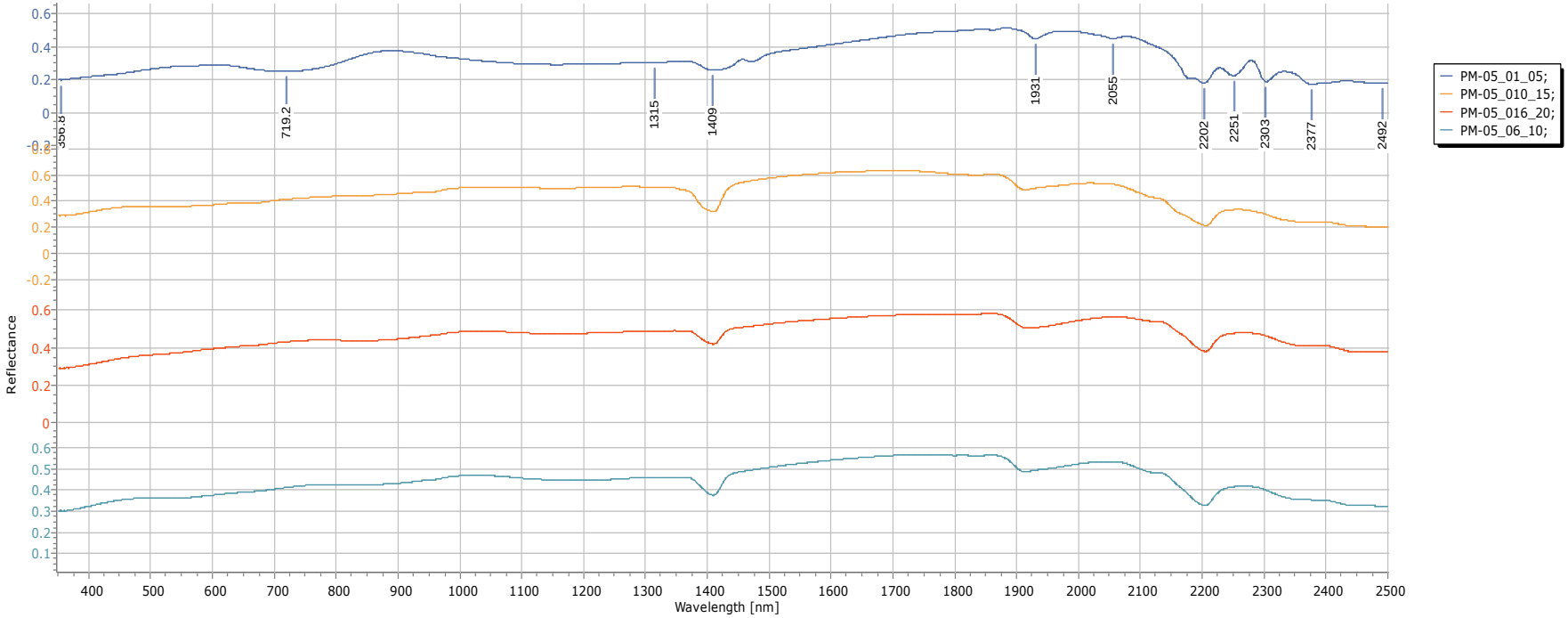

Reflectance
Wavelength [nm]
368
1415
1934
2208
PM-1.1_01_05;
PM-1.1_011_15;
PM-1.1_06_10;


Absorbance
Wavelength [nm]
368
1415
1934
2208
PM-1.1_01_05;
PM-1.1_011_15;
PM-1.1_06_10;

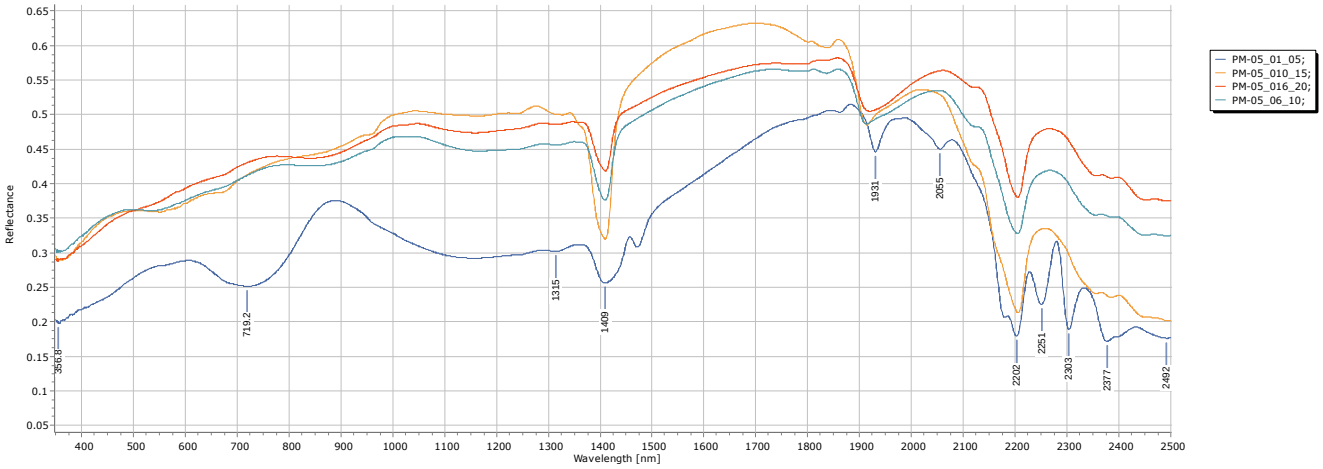

PM-1.1_01_05;
PM-1.1_011_15;
PM-1.1_06_10;
Reflectance
Wavelength [nm]
1415
1934
2208


PM-1.1_01_05;
PM-1.1_011_15;
PM-1.1_06_10;
Absorbance
Wavelength [nm]
368
1415
1934
2208

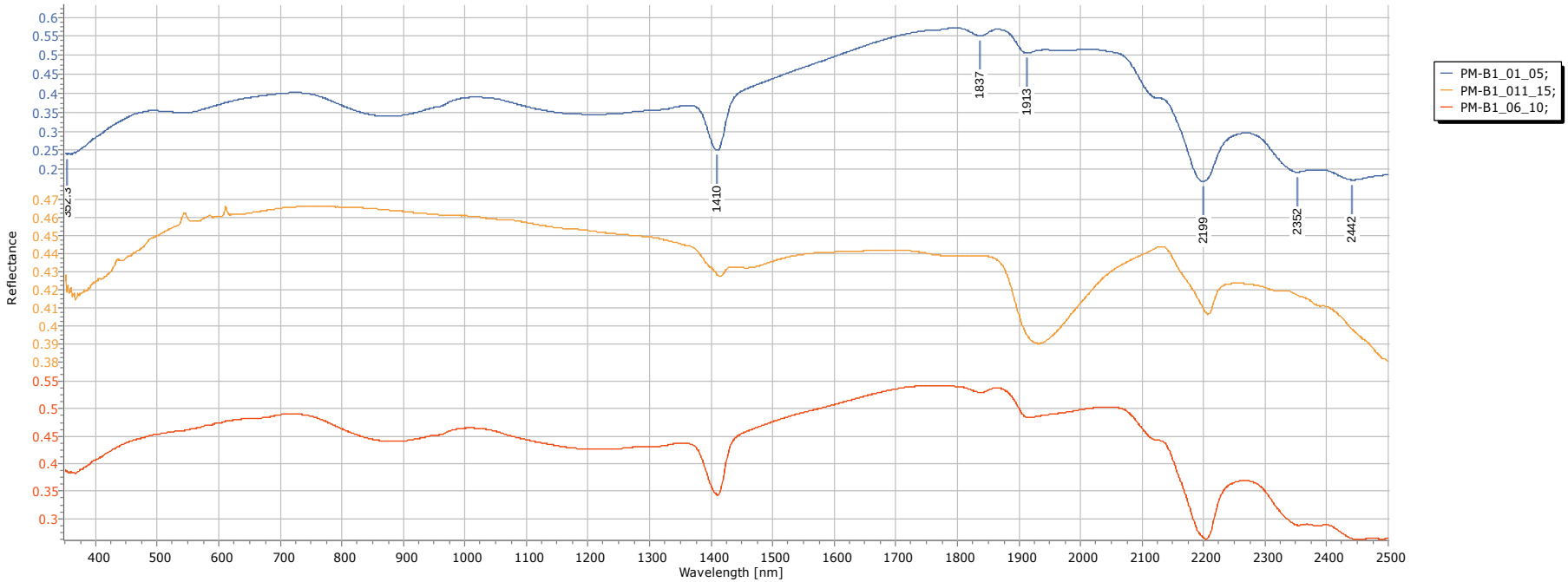
PM_1

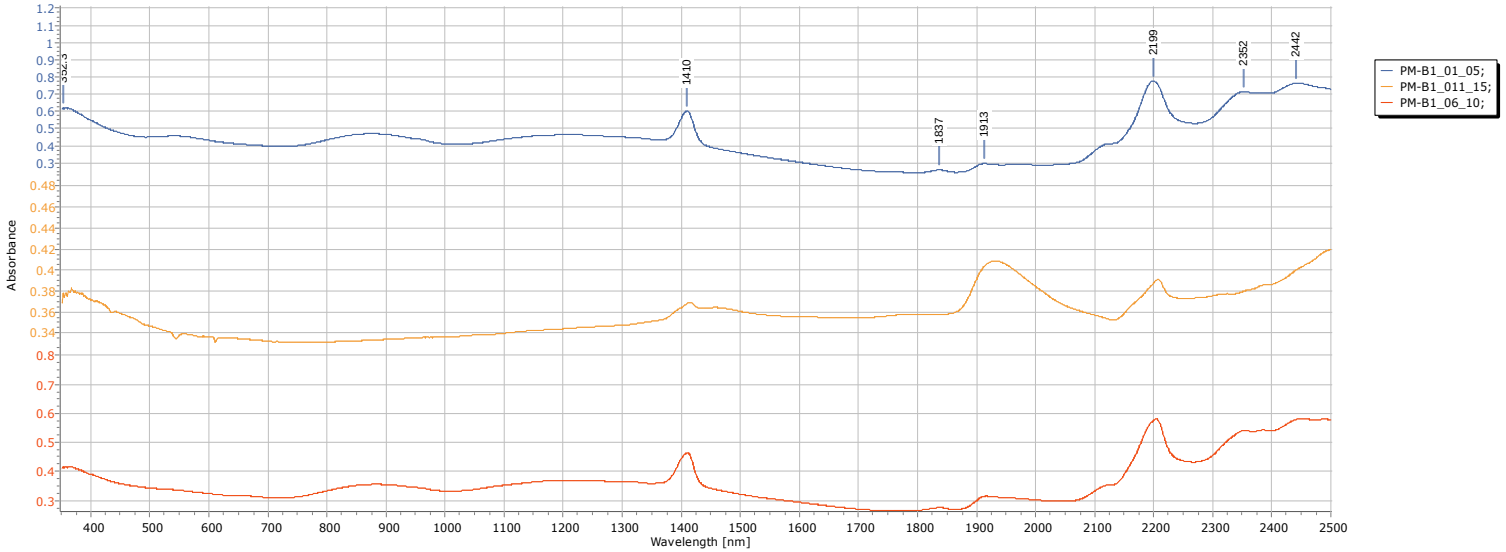

Reflectance
Wavelength [nm]
356.8
719.2
1315
1409
1931
2055
2202
2251
2303
2377
2492
PM-05_01_05;
PM-05_010_15;
PM-05_016_20;
PM-05_06_10;

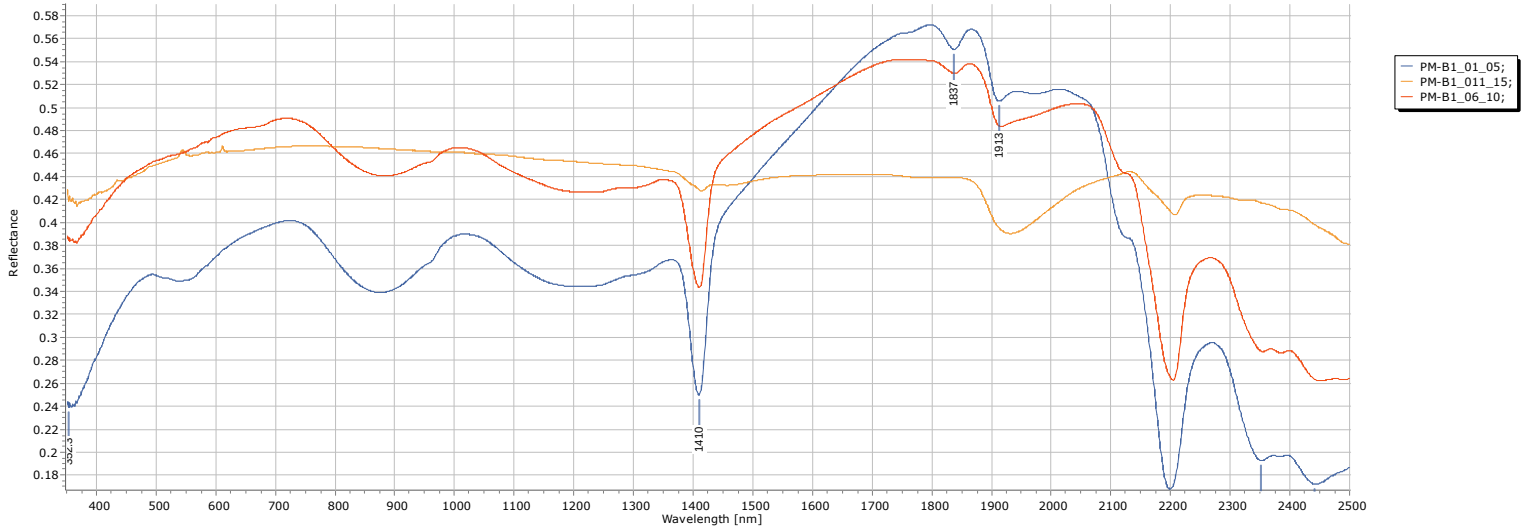

Absorbance
Wavelength [nm]
356.8
719.2
1315
1409
1931
2055
2202
2251
2303
2377
2492
PM-05_01_05;
PM-05_010_15;
PM-05_016_20;
PM-05_06_10;


Reflectance
Wavelength [nm]
356.8
719.2
1315
1409
1931
2055
2202
2251
2303
2377
2492
PM-05_01_05;
PM-05_010_15;
PM-05_016_20;
PM-05_06_10;

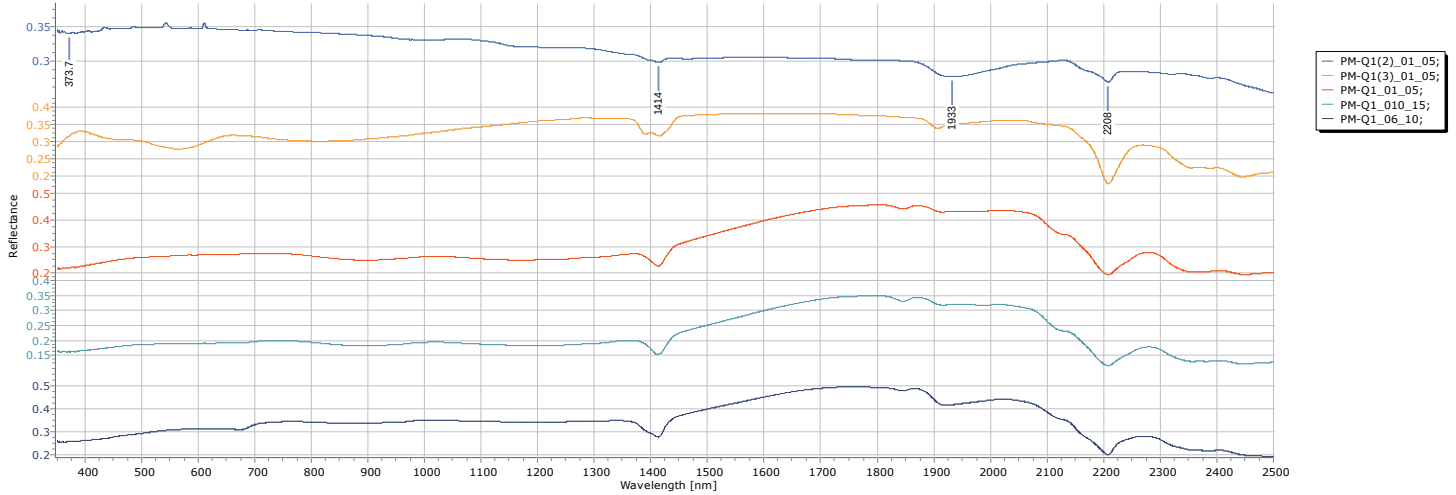
PMB

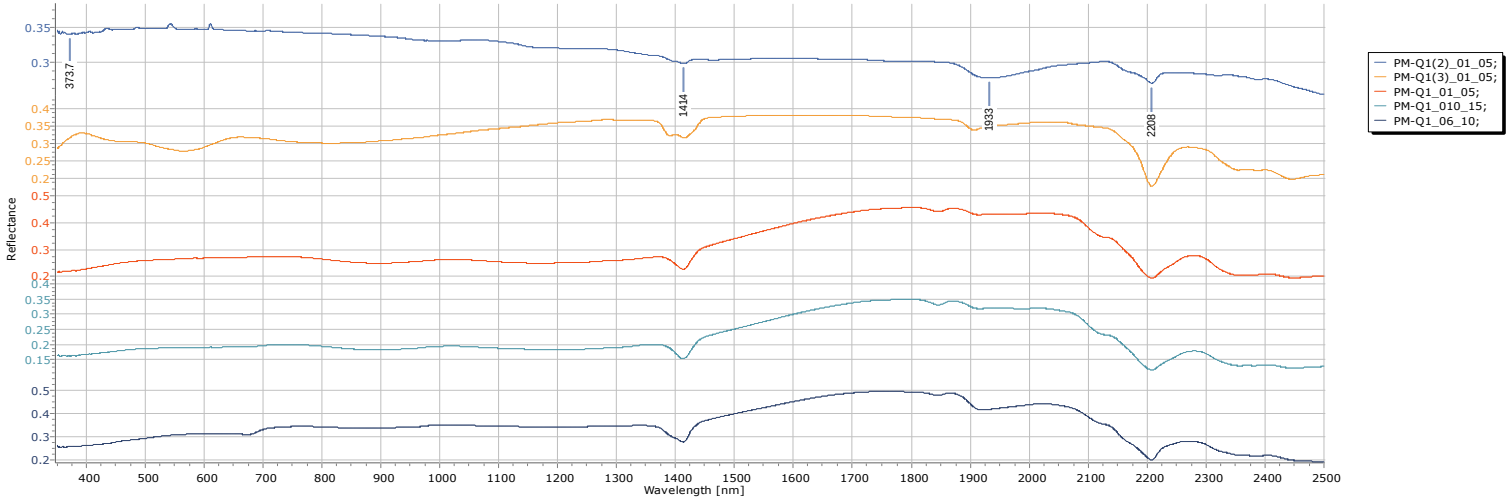

Reflectance
Wavelength [nm]
1837
1913
1410
2199
2352
2442
PM-B1_01_05;
PM-B1_011_15;
PM-B1_06_10;

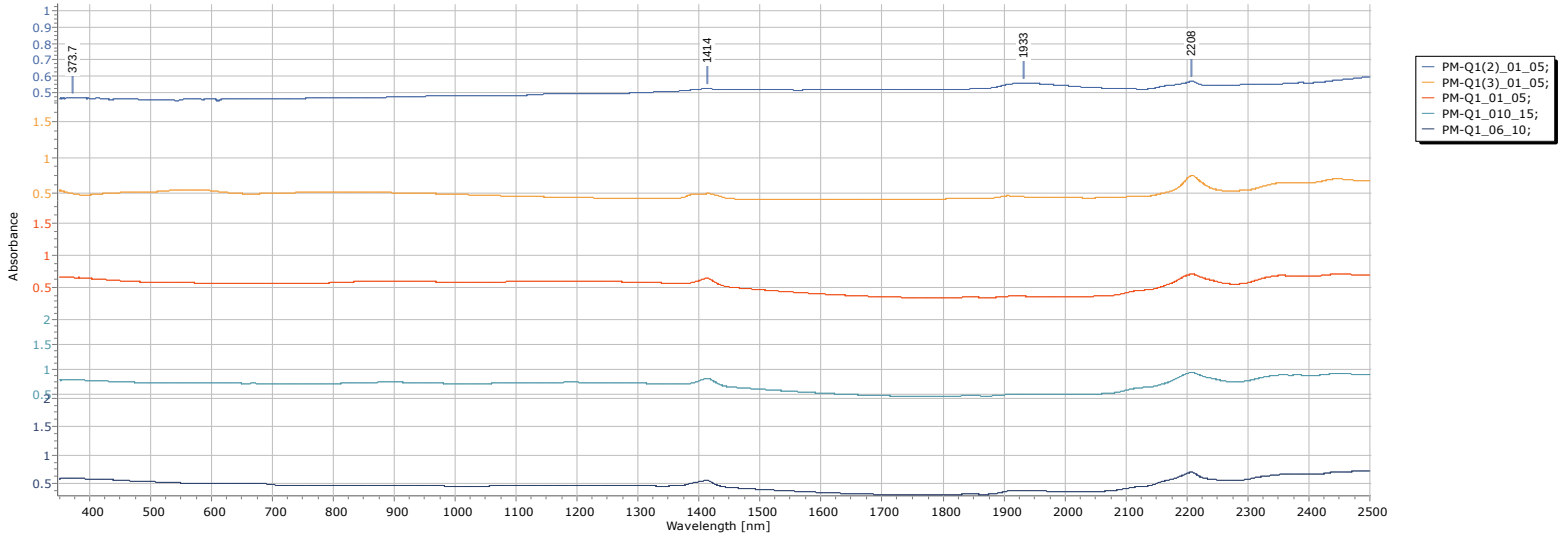

Absorbance
Wavelength [nm]
1410
1837
1913
2199
2352
2442
PM-B1_01_05;
PM-B1_011_15;
PM-B1_06_10;

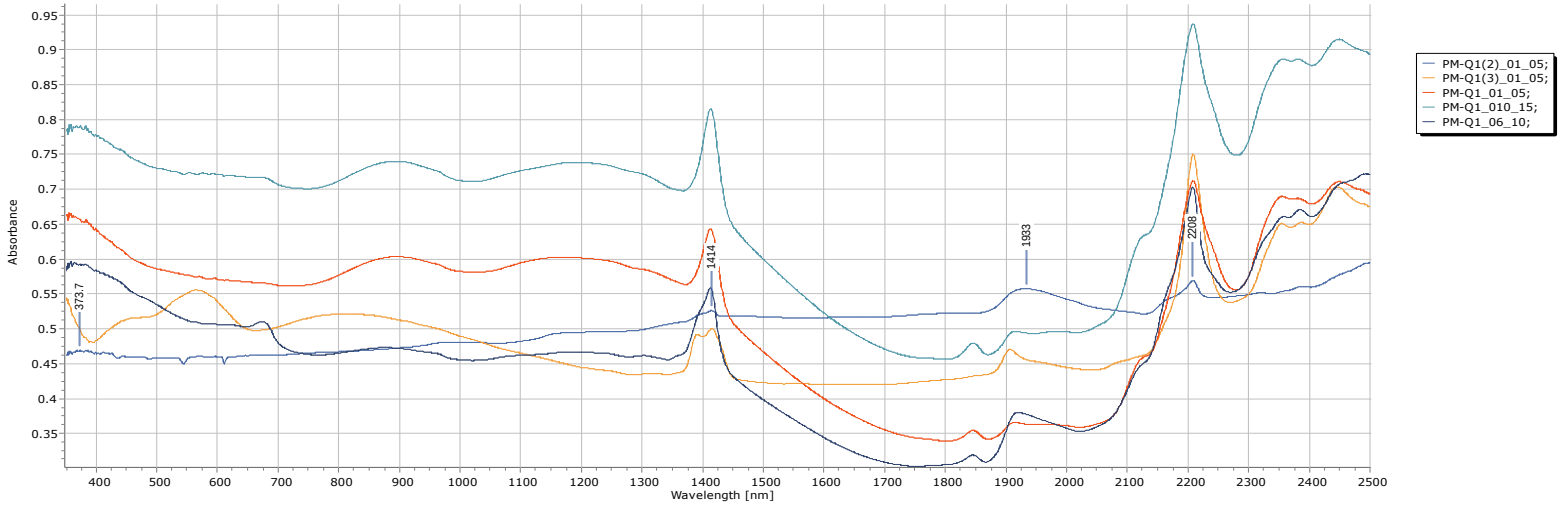

Reflectance
Wavelength [nm]
1410
1837
1913
PM-B1_01_05;
PM-B1_011_15;
PM-B1_06_10;

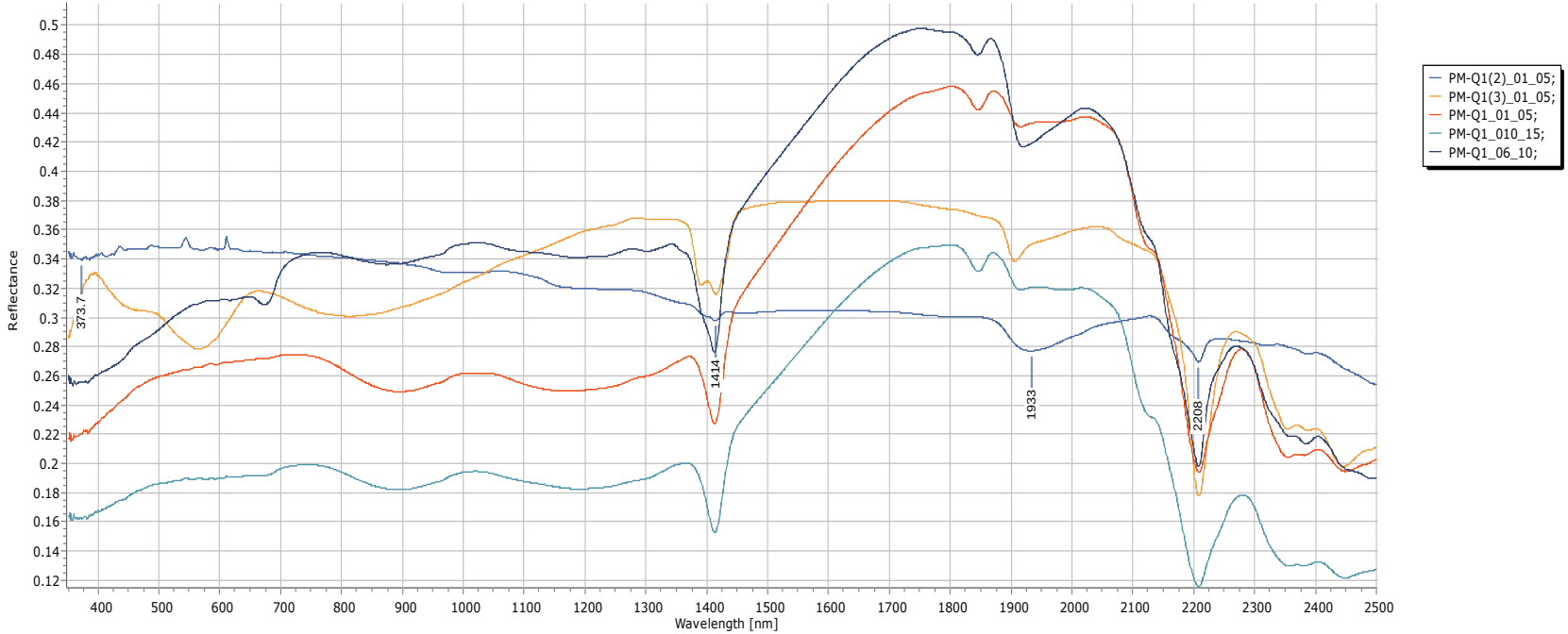
PMQ1


373,7
1414
1933
2208
Reflectance
Wavelength [nm]
PM-Q1(2)_01_05;
PM-Q1(3)_01_05;
PM-Q1_01_05;
PM-Q1_010_15;
PM-Q1_06_10;

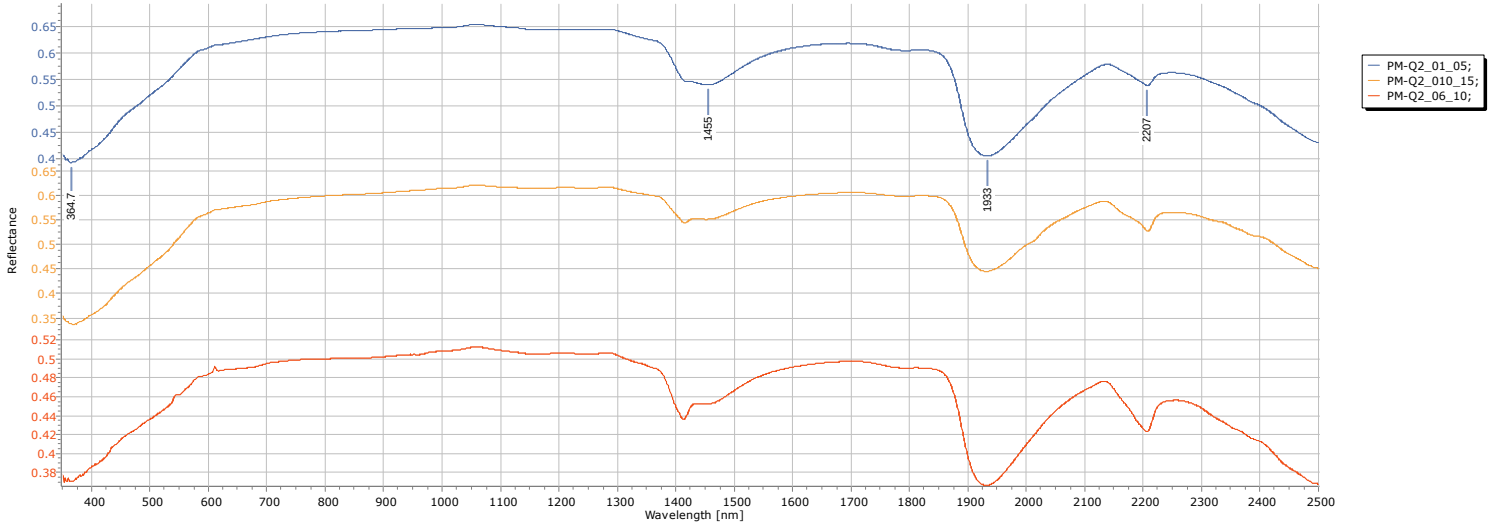

373,7
1414
1933
2208
Reflectance
Wavelength [nm]
PM-Q1(2)_01_05;
PM-Q1(3)_01_05;
PM-Q1_01_05;
PM-Q1_010_15;
PM-Q1_06_10;

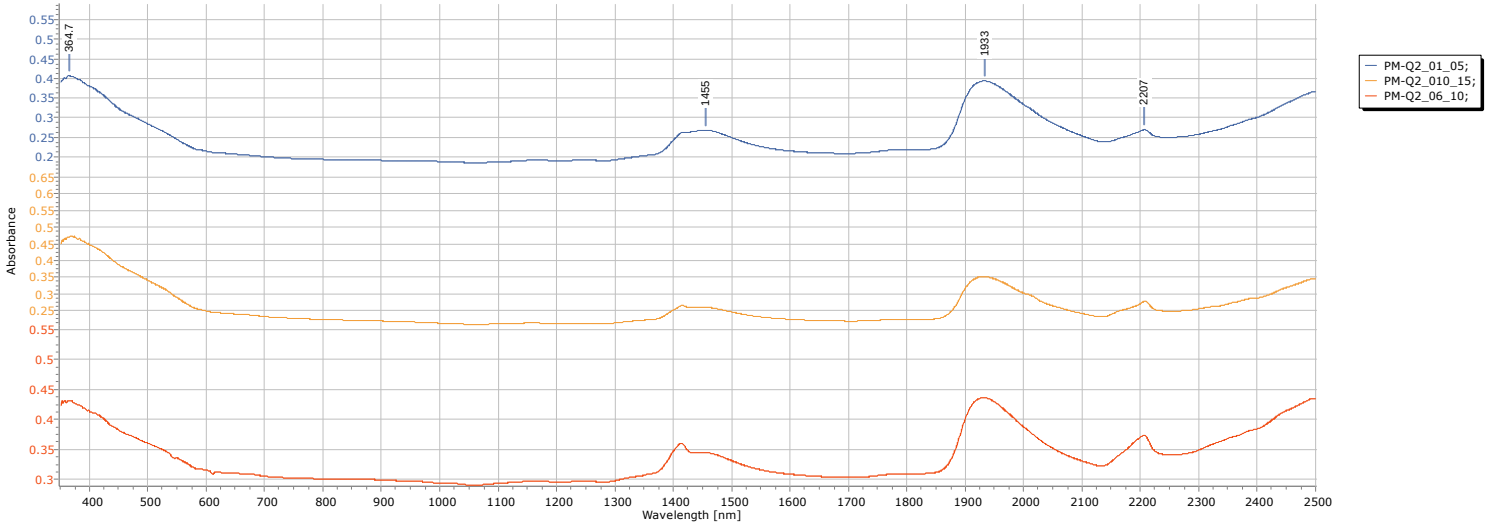

373.7
1414
1933
2208
Absorbance
Wavelength [nm]
PM-Q1(2)_01_05;
PM-Q1(3)_01_05;
PM-Q1_01_05;
PM-Q1_010_15;
PM-Q1_06_10;

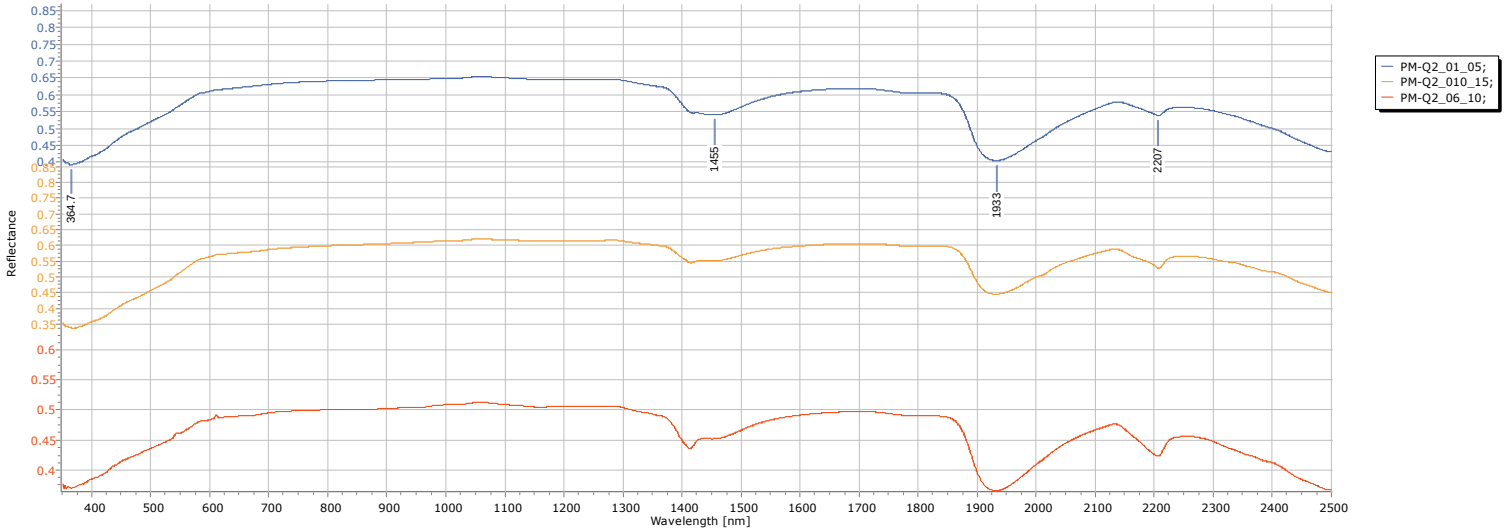

373.7
1414
1933
2208
Absorbance
Wavelength [nm]
PM-Q1(2)_01_05;
PM-Q1(3)_01_05;
PM-Q1_01_05;
PM-Q1_010_15;
PM-Q1_06_10;

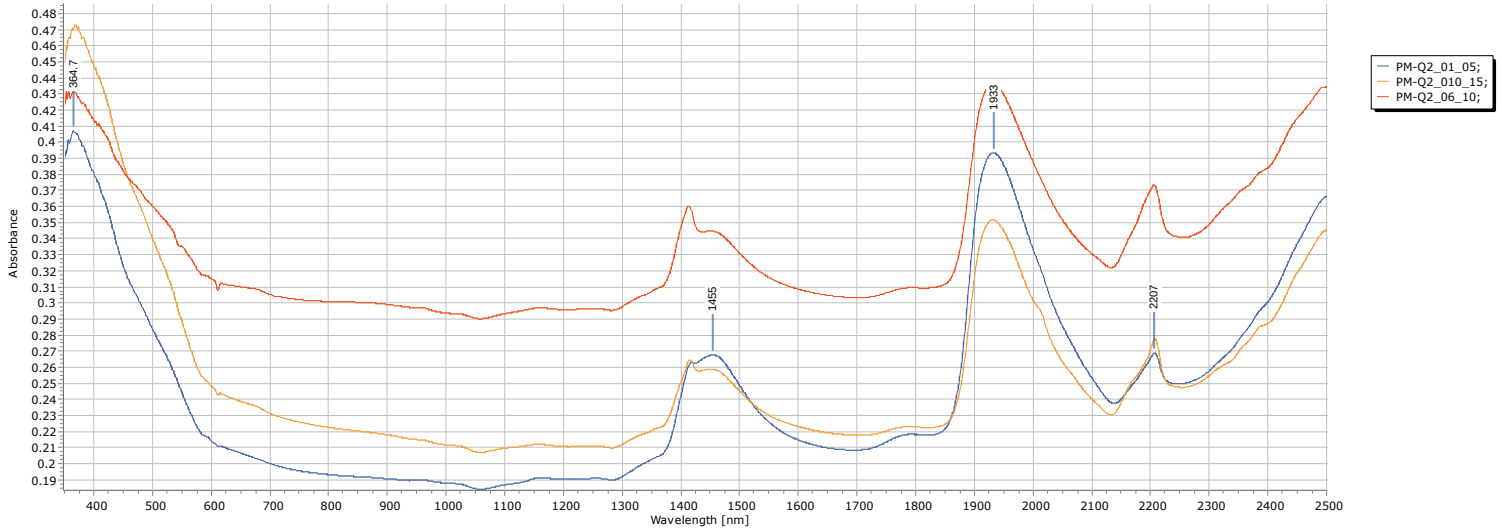

Reflectance
Wavelength [nm]
373.7
1414
1933
2208
PM-Q1(2)_01_05;
PM-Q1(3)_01_05;
PM-Q1_01_05;
PM-Q1_010_15;
PM-Q1_06_10;

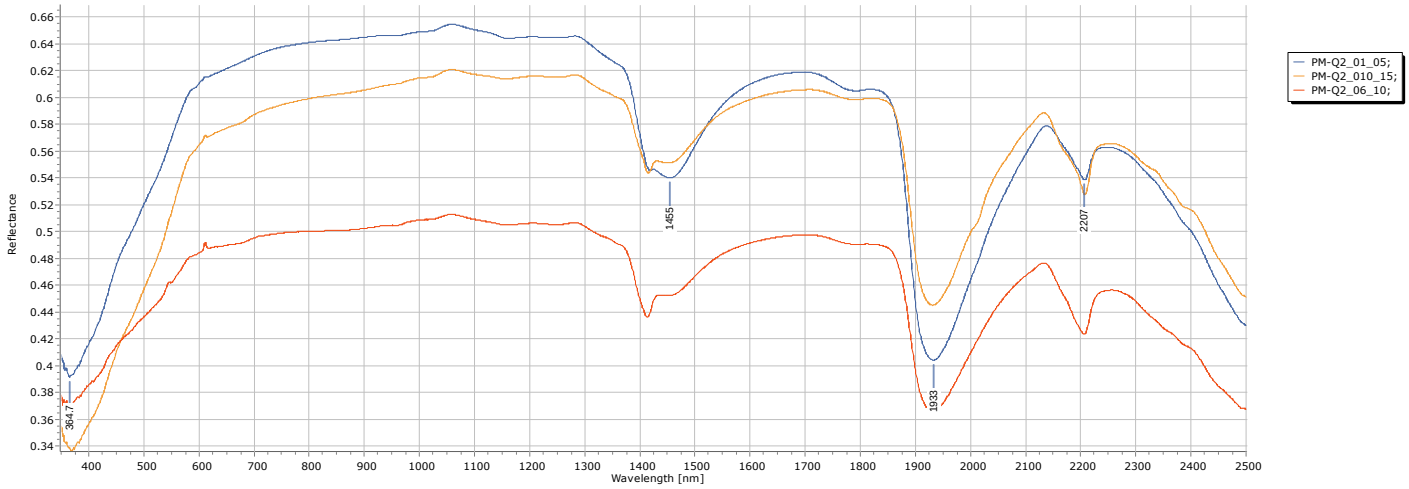
PMQ2


Reflectance
Wavelength [nm]
364.7
1455
1933
2207
PM-Q2_01_05;
PM-Q2_010_15;
PM-Q2_06_10;

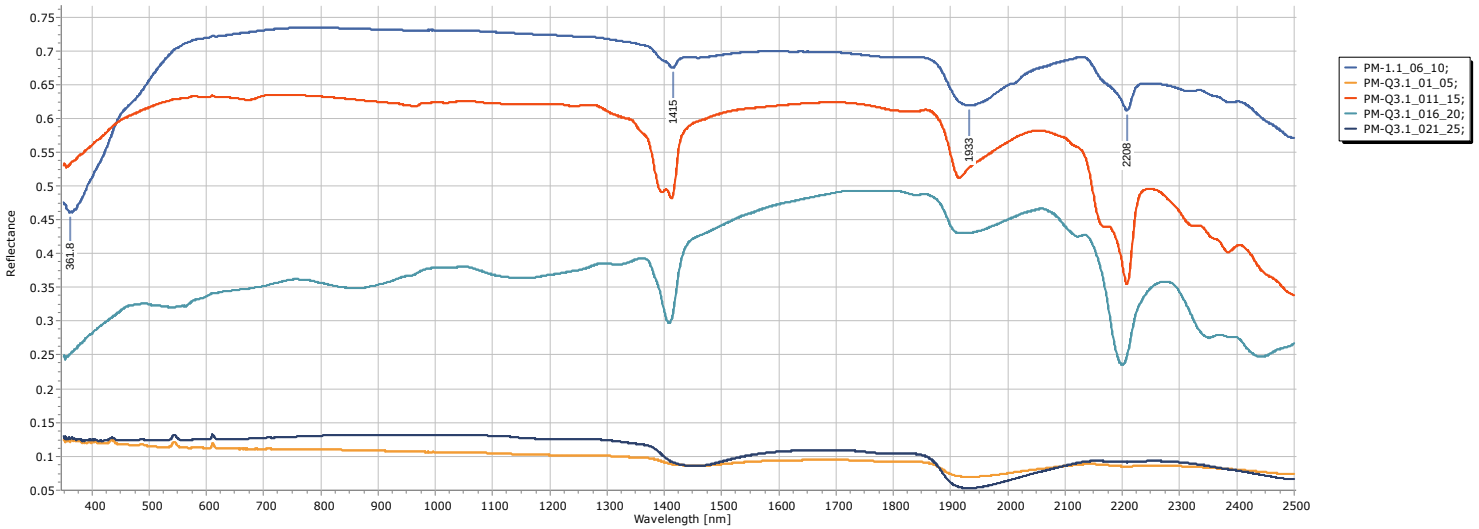

Absorbance
Wavelength [nm]
364.7
1455
1933
2207
PM-Q2_01_05;
PM-Q2_010_15;
PM-Q2_06_10;

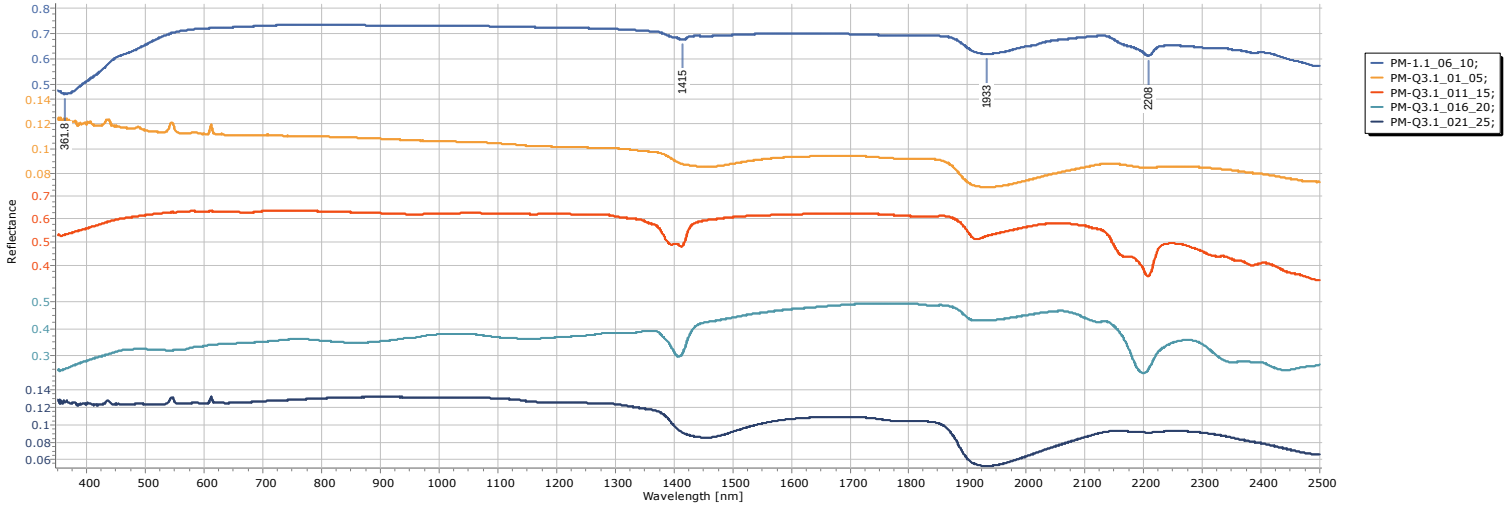

Reflectance
Wavelength [nm]
364.7
1455
1933
2207
PM-Q2_01_05;
PM-Q2_010_15;
PM-Q2_06_10;

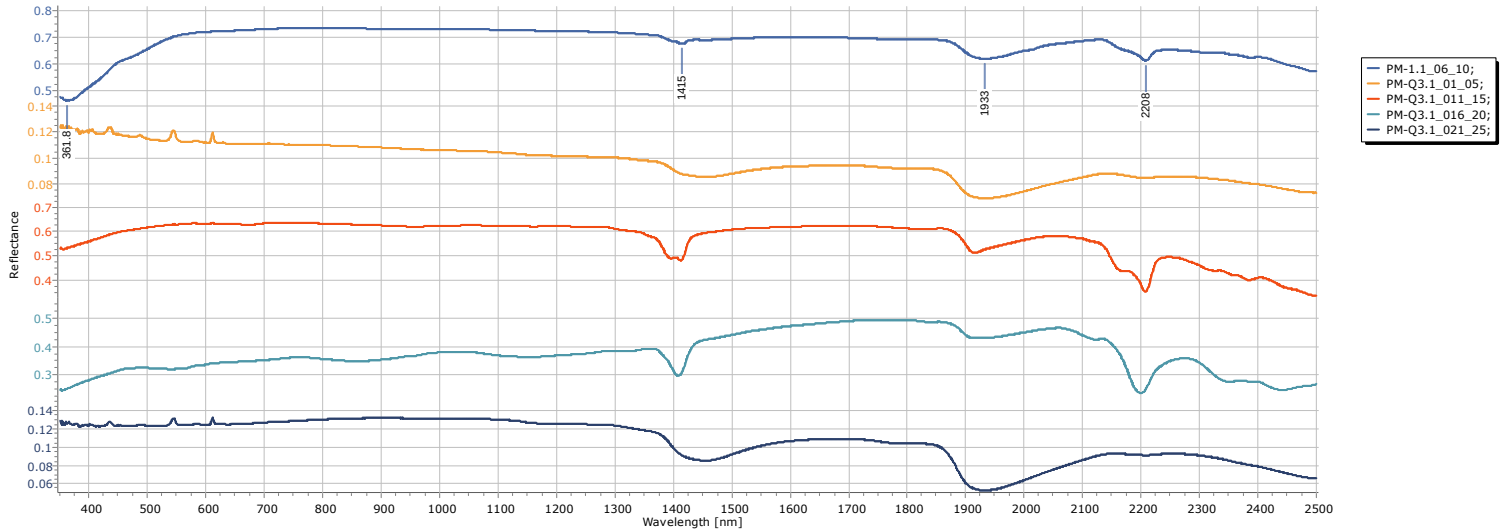

Absorbance
Wavelength [nm]
364.7
1455
1933
2207
PM-Q2_01_05;
PM-Q2_010_15;
PM-Q2_06_10;

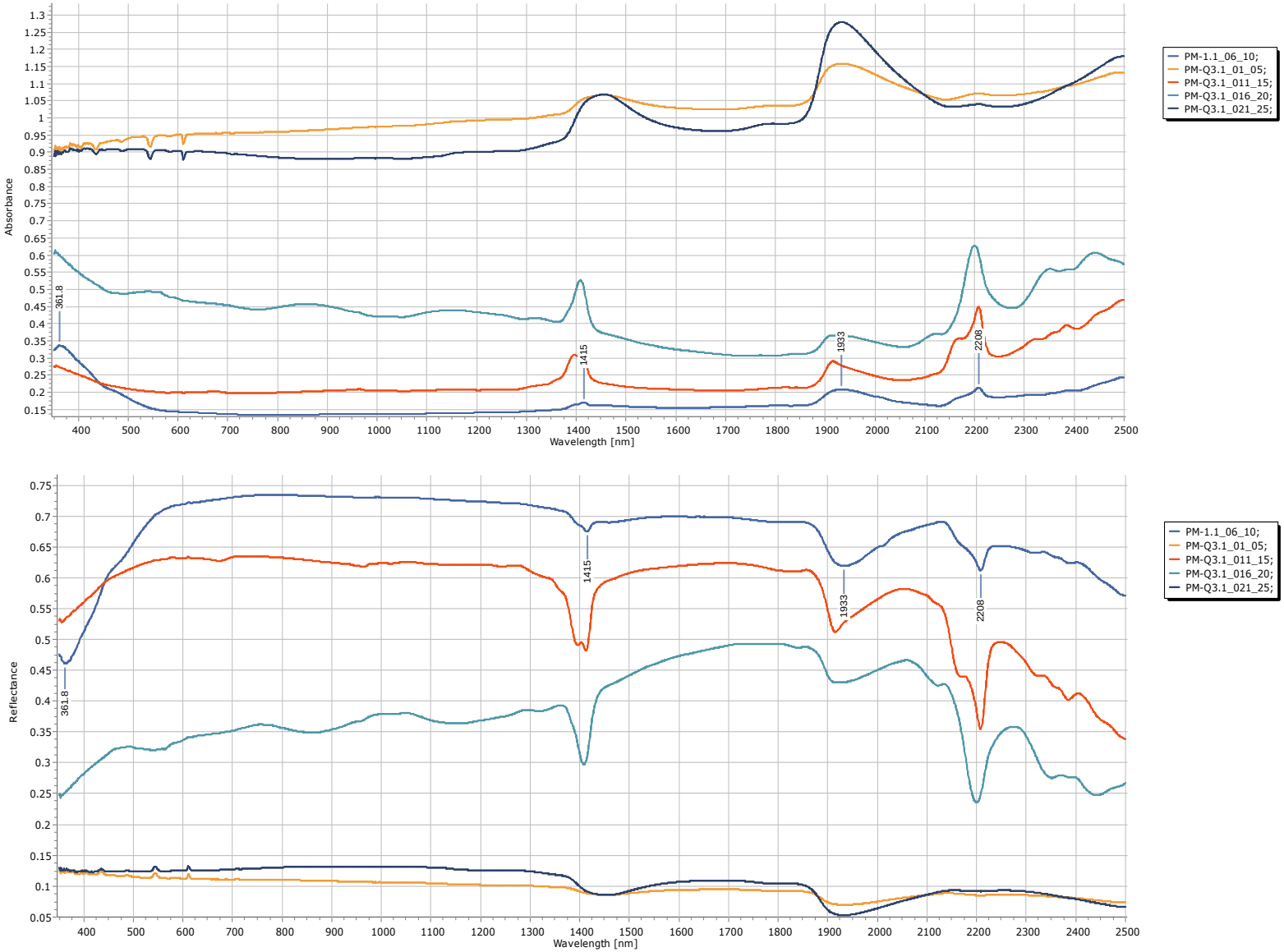

Reflectance
Wavelength [nm]
364.7
1455
1933
2207
PM-Q2_01_05;
PM-Q2_010_15;
PM-Q2_06_10;

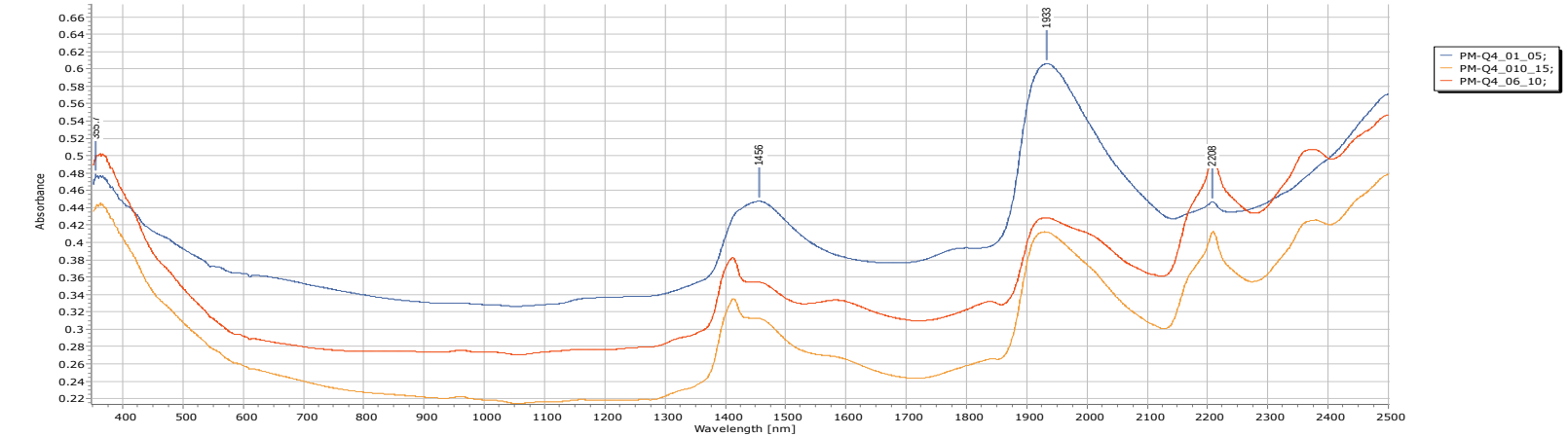
PMQ3.1

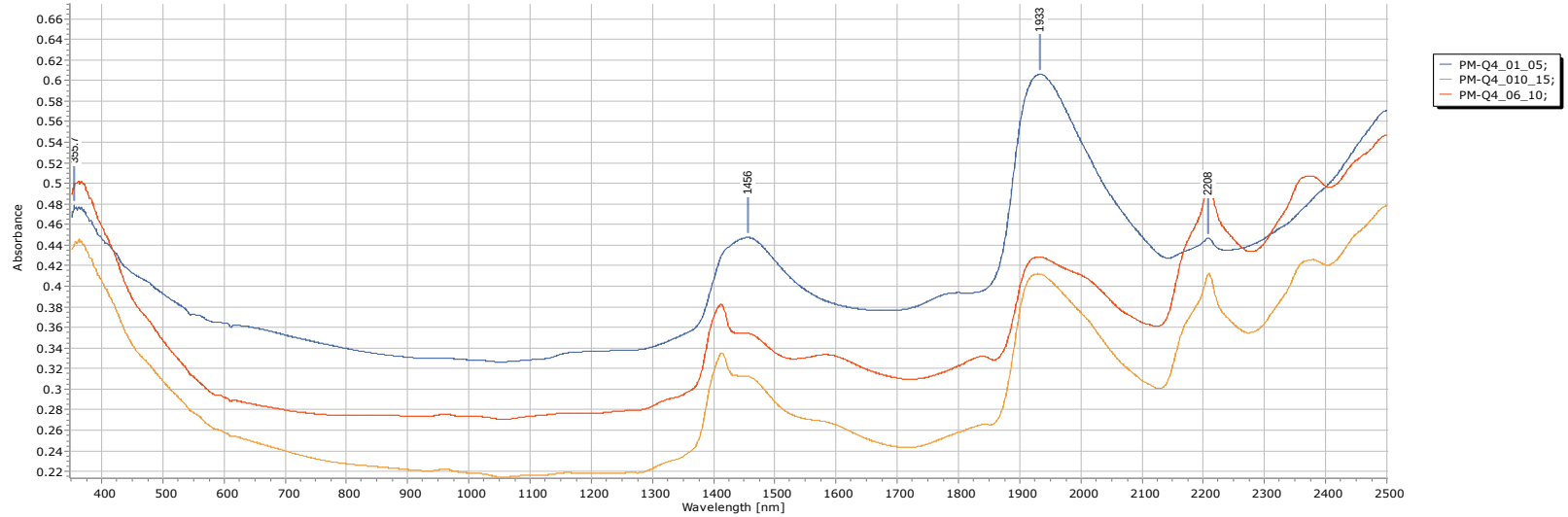

Reflectance
Wavelength [nm]
361.8
1415
1933
2208
PM-1.1_06_10;
PM-Q3.1_01_05;
PM-Q3.1_011_15;
PM-Q3.1_016_20;
PM-Q3.1_021_25;


Reflectance
Wavelength [nm]
1415
1933
2208
361.8
PM-1.1_06_10;
PM-Q3.1_01_05;
PM-Q3.1_011_15;
PM-Q3.1_016_20;
PM-Q3.1_021_25;

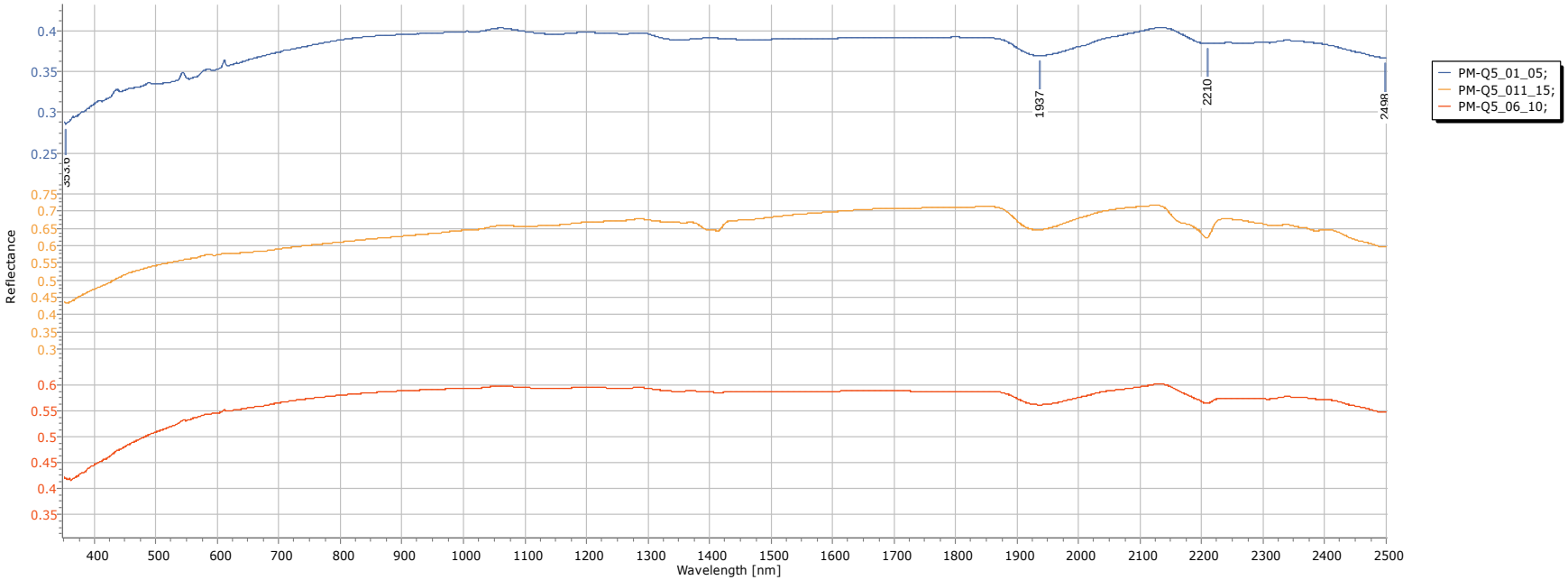

Reflectance
Wavelength [nm]
1415
1933
2208
361.8
PM-1.1_06_10;
PM-Q3.1_01_05;
PM-Q3.1_011_15;
PM-Q3.1_016_20;
PM-Q3.1_021_25;

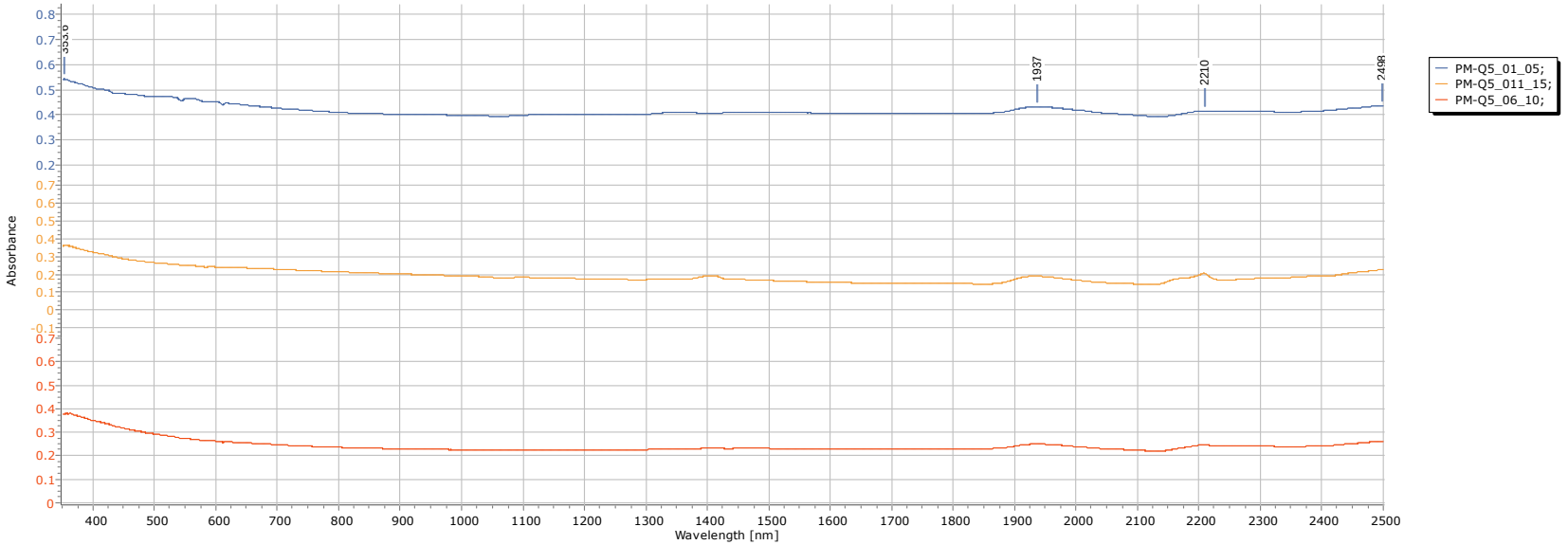

Absorbance
Wavelength [nm]
361.8
1415
1933
2208
PM-1.1_06_10;
PM-Q3.1_01_05;
PM-Q3.1_011_15;
PM-Q3.1_016_20;
PM-Q3.1_021_25;
Reflectance
Wavelength [nm]
361.8
1415
1933
2208
PM-1.1_06_10;
PM-Q3.1_01_05;
PM-Q3.1_011_15;
PM-Q3.1_016_20;
PM-Q3.1_021_25;

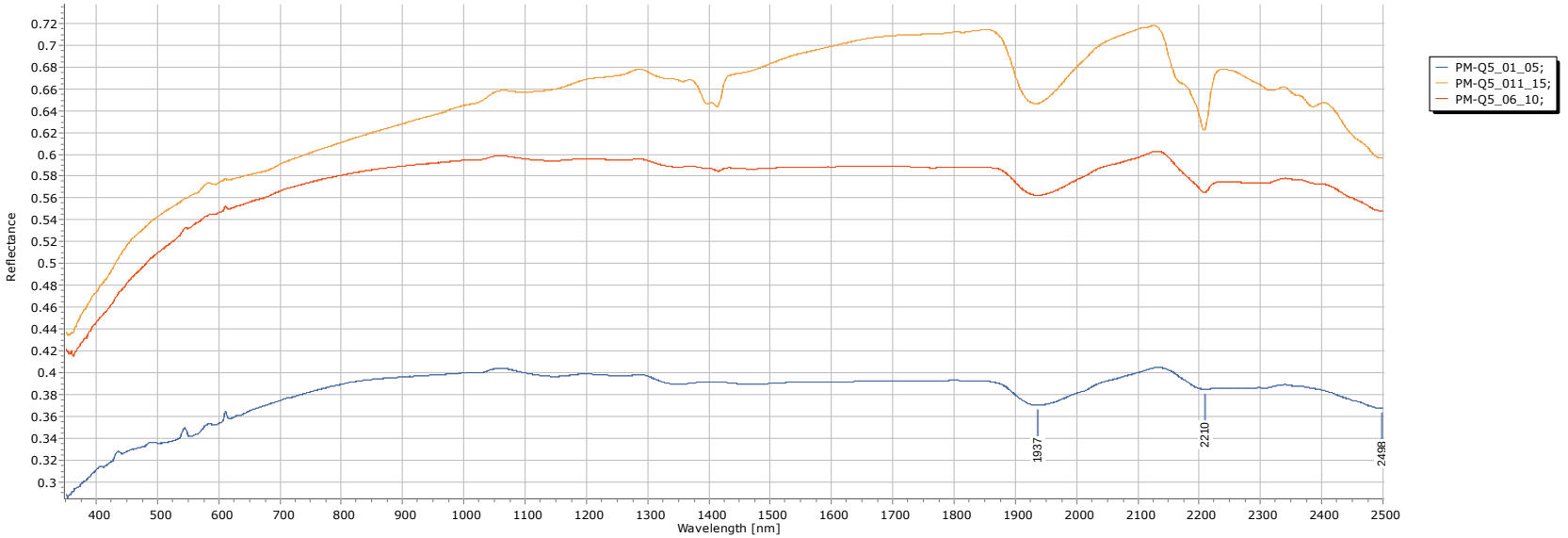

Absorbance
Wavelength [nm]
1933
1456
2208
355.7
PM-Q4_01_05;
PM-Q4_010_15;
PM-Q4_06_10;

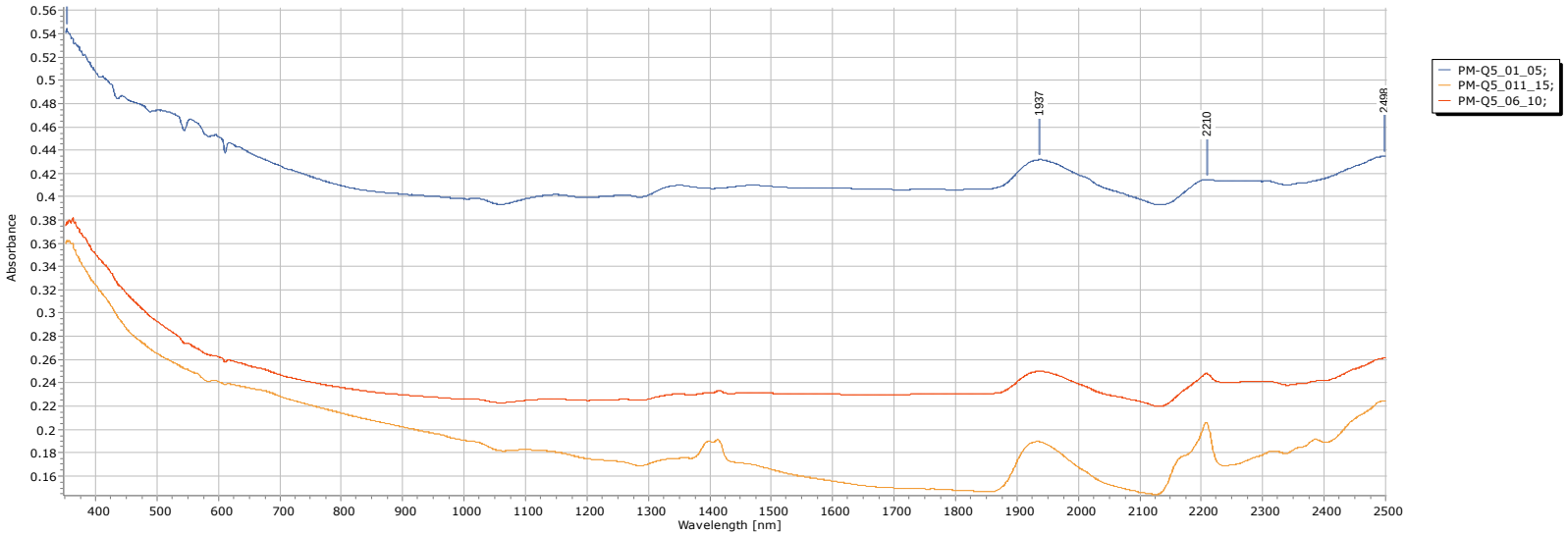

Absorbance
Wavelength [nm]
1933
1456
2208
355.7
PM-Q4_01_05;
PM-Q4_010_15;
PM-Q4_06_10;

MQ5

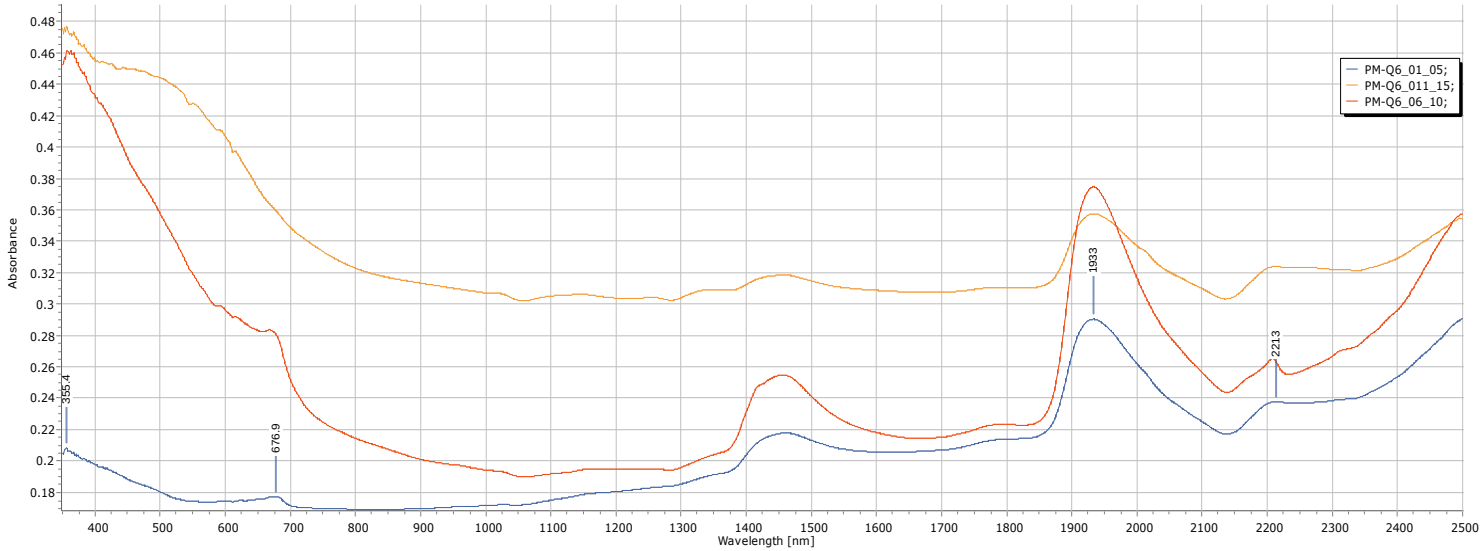

Reflectance
Wavelength [nm]
1937
2210
2498
PM-Q5_01_05;
PM-Q5_011_15;
PM-Q5_06_10;

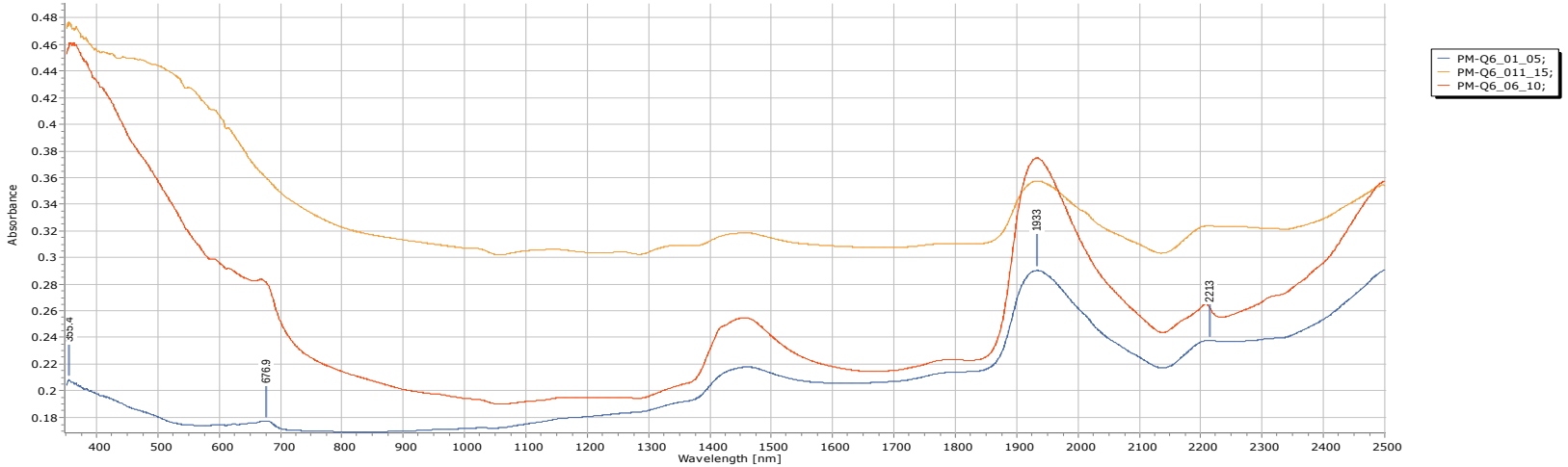

Absorbance
Wavelength [nm]
1937
2210
2498
PM-Q5_01_05;
PM-Q5_011_15;
PM-Q5_06_10;

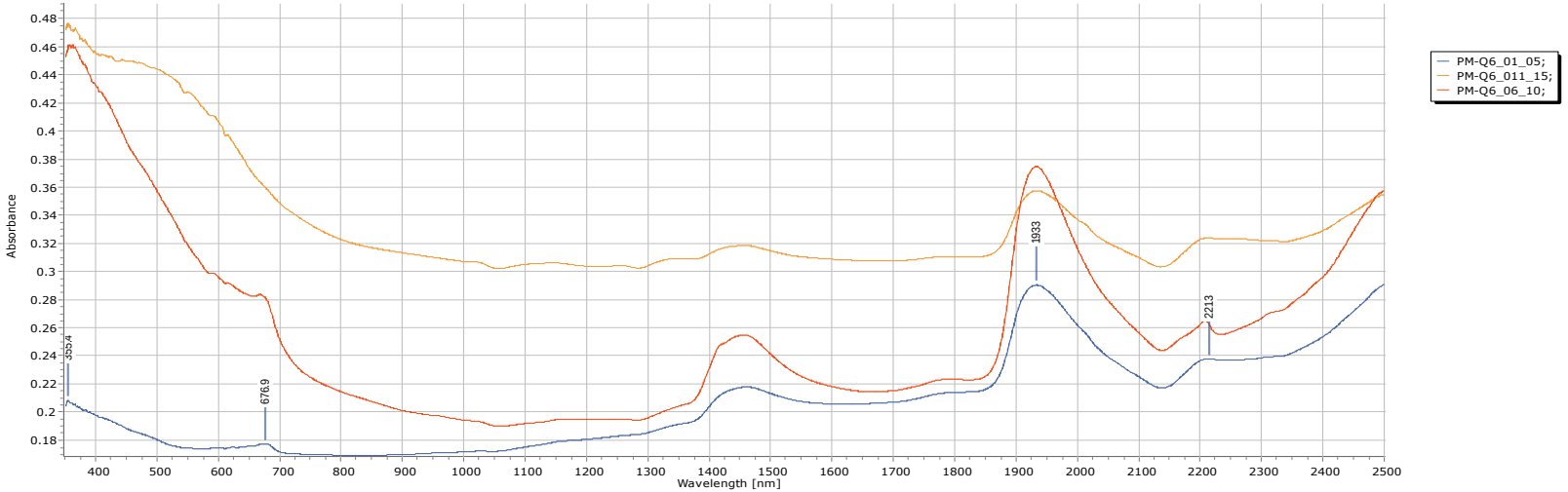

Reflectance
Wavelength [nm]
1937
2210
2498
PM-Q5_01_05;
PM-Q5_011_15;
PM-Q5_06_10;

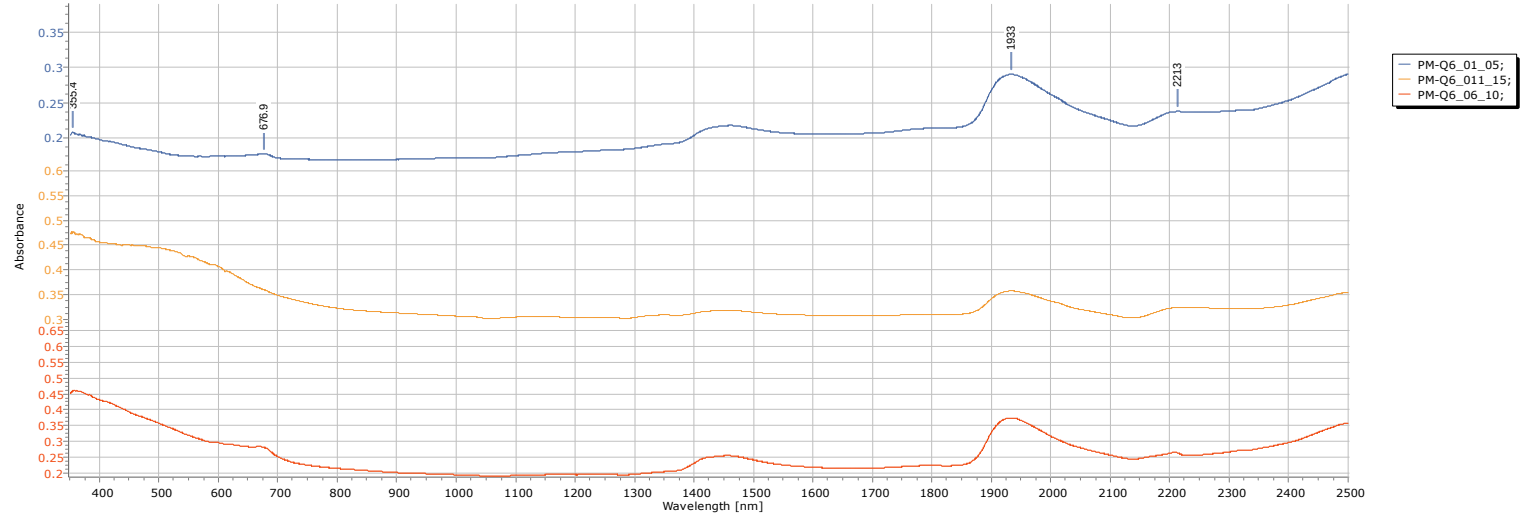

Absorbance
Wavelength [nm]
1937
2210
2498
PM-Q5_01_05;
PM-Q5_011_15;
PM-Q5_06_10;

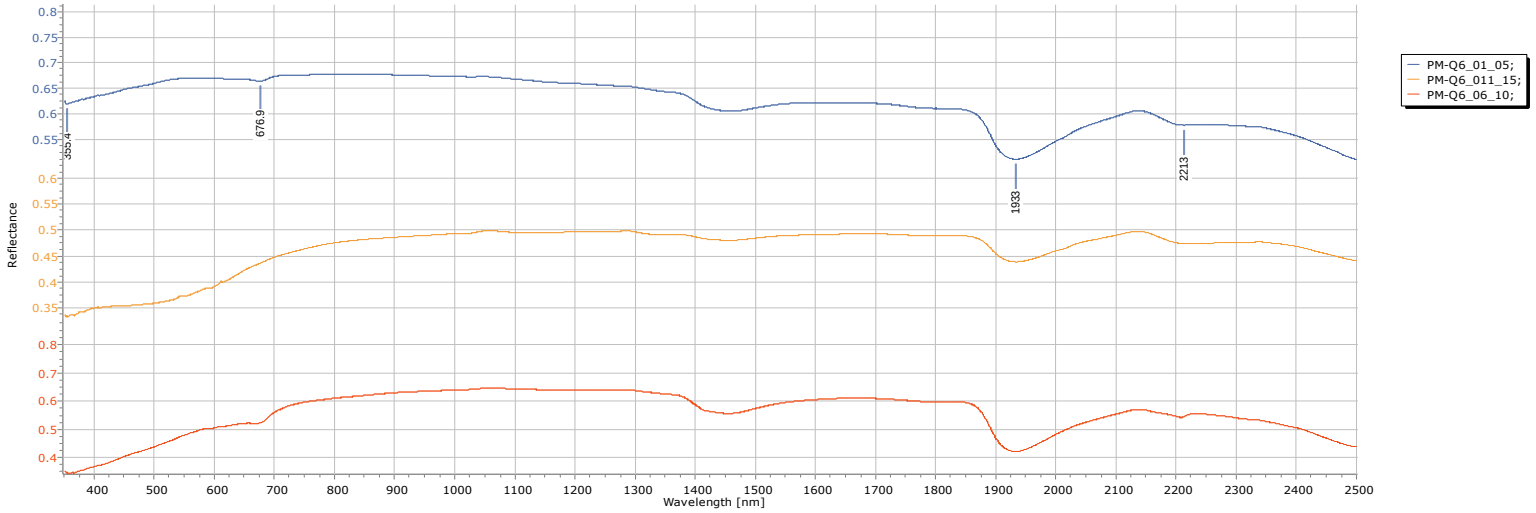
PMQ6


PM-Q6_01_05;
PM-Q6_011_15;
PM-Q6_06_10;
Absorbance
Wavelength [nm]
355.4
676.9
1933
2213

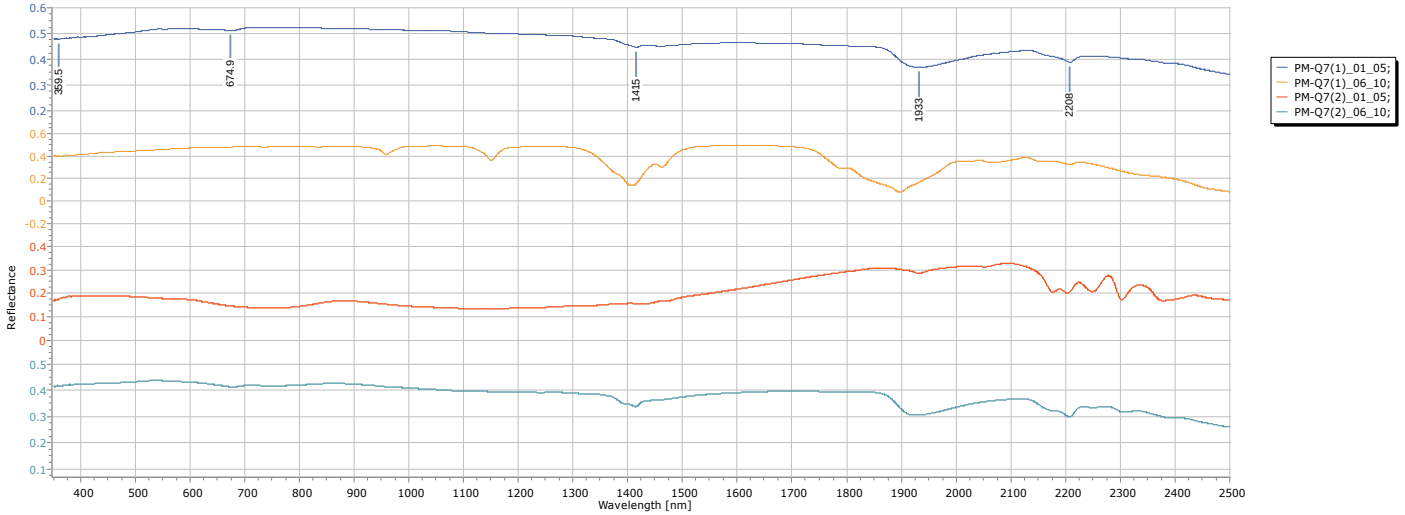

Absorbance
Wavelength [nm]
PM-Q6_01_05;
PM-Q6_011_15;
PM-Q6_06_10;
1933
2213
676.9

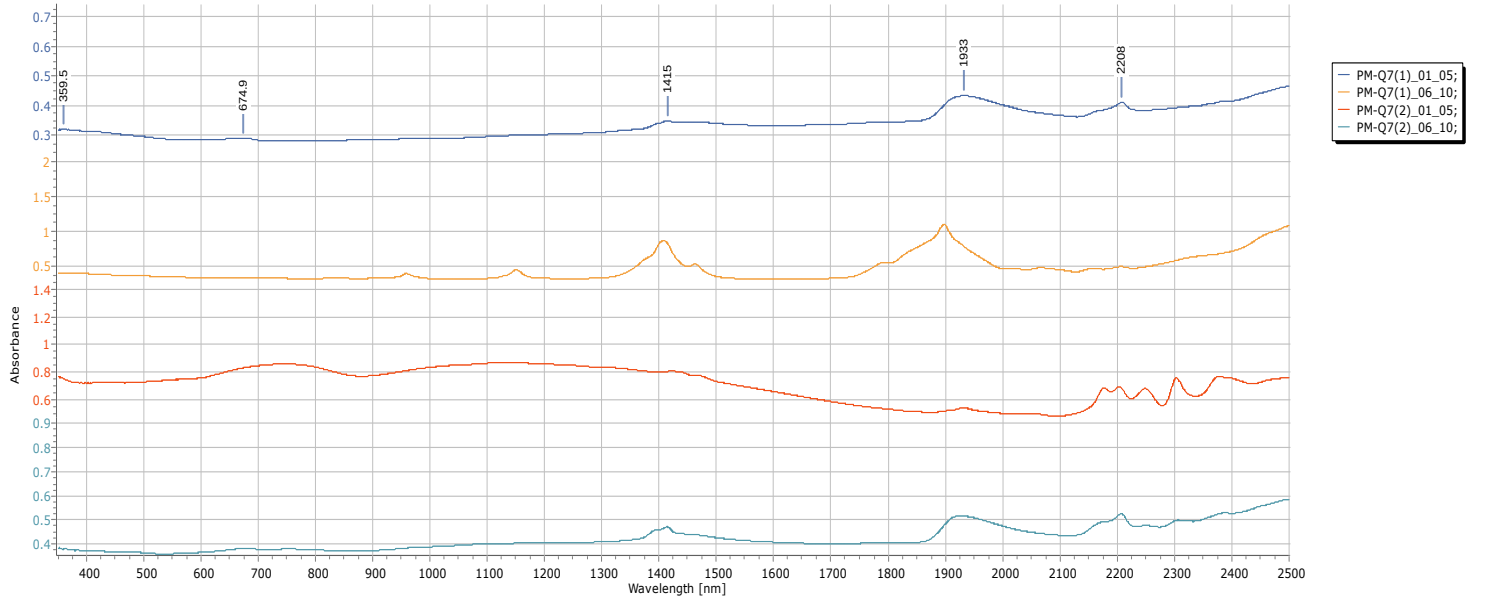

Absorbance
Wavelength [nm]
PM-Q6_01_05;
PM-Q6_011_15;
PM-Q6_06_10;
1933
2213
676.9

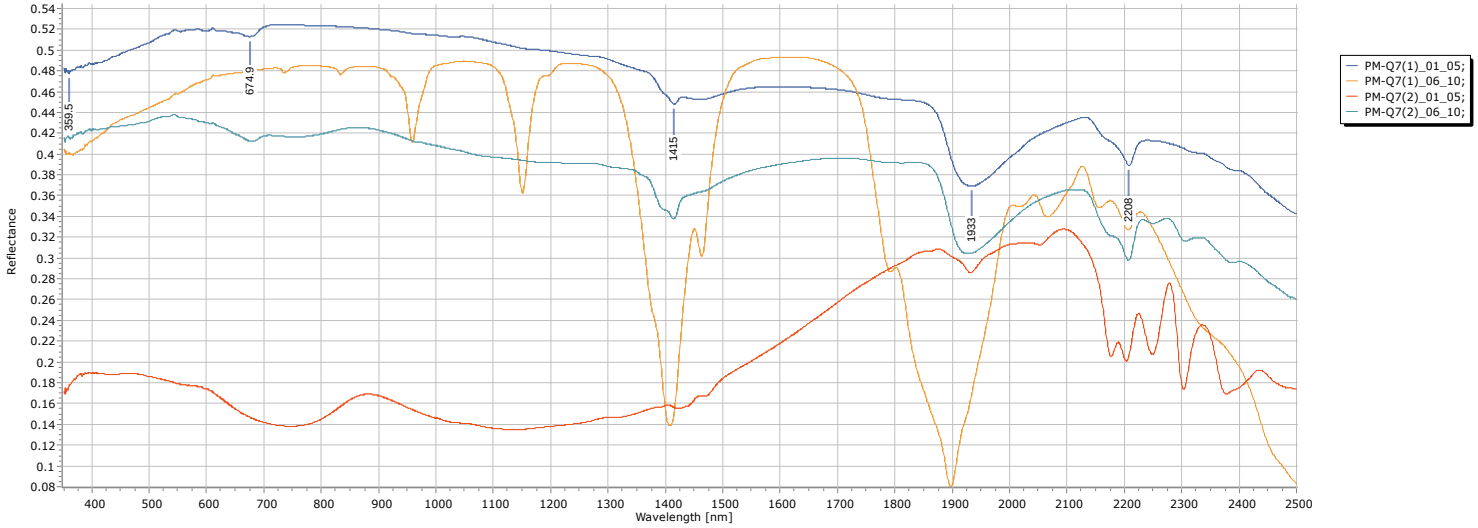

Absorbance
Wavelength [nm]
355.4
676.9
1933
2213
PM-Q6_01_05;
PM-Q6_011_15;
PM-Q6_06_10;


Reflectance
Wavelength [nm]
355.4
676.9
1933
2213
PM-Q6_01_05;
PM-Q6_011_15;
PM-Q6_06_10;

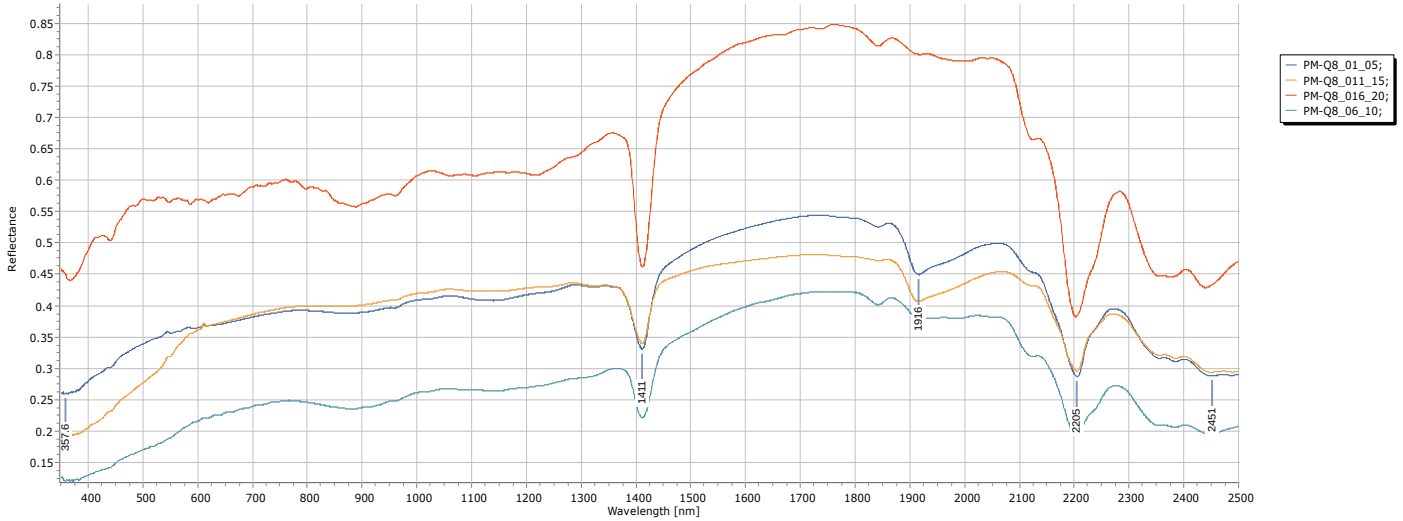
PMQ7

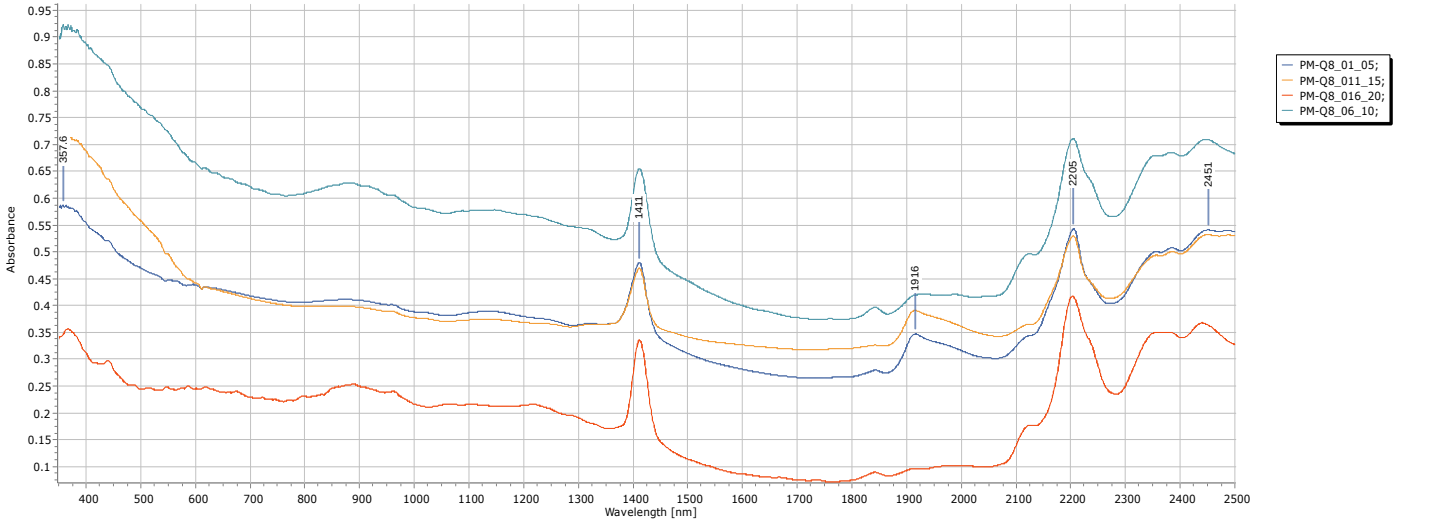

359.5
674.9
1415
1933
2208
Reflectance
Wavelength [nm]
PM-Q7(1)_01_05;
PM-Q7(1)_06_10;
PM-Q7(2)_01_05;
PM-Q7(2)_06_10;

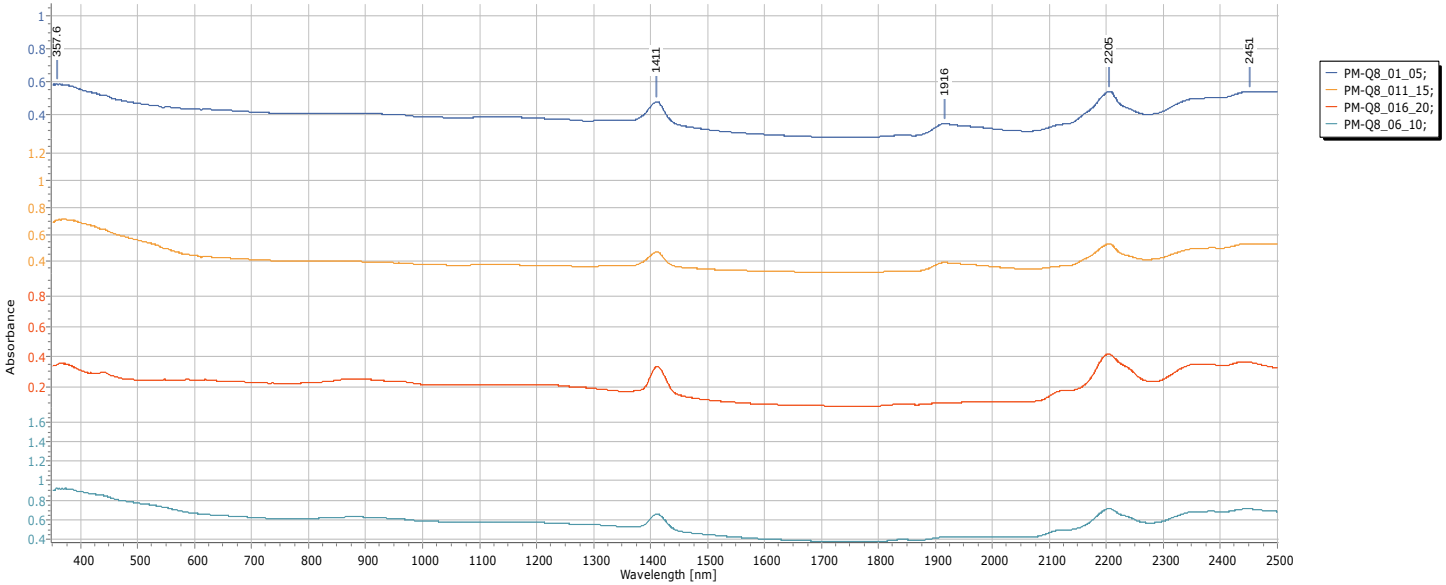

359.5
674.9
1415
1933
2208
Absorbance
Wavelength [nm]
PM-Q7(1)_01_05;
PM-Q7(1)_06_10;
PM-Q7(2)_01_05;
PM-Q7(2)_06_10;

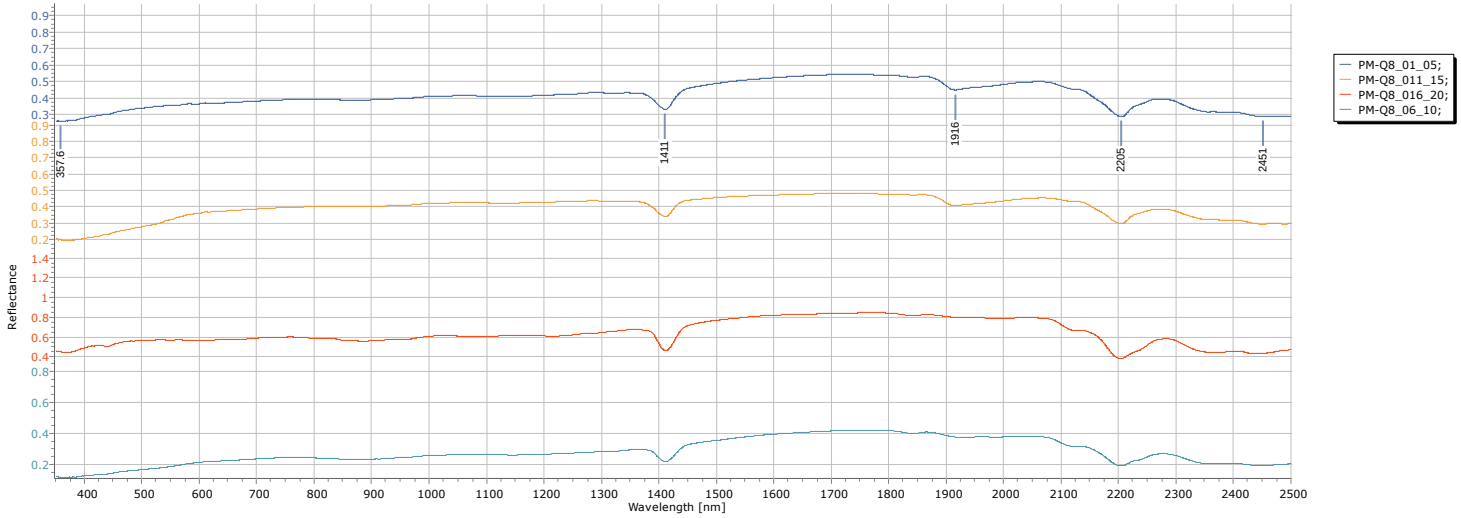

Reflectance
Wavelength [nm]
389.5
674.9
1415
1933
2208
PM-Q7(1)_01_05;
PM-Q7(1)_06_10;
PM-Q7(2)_01_05;
PM-Q7(2)_06_10;

PMQ8

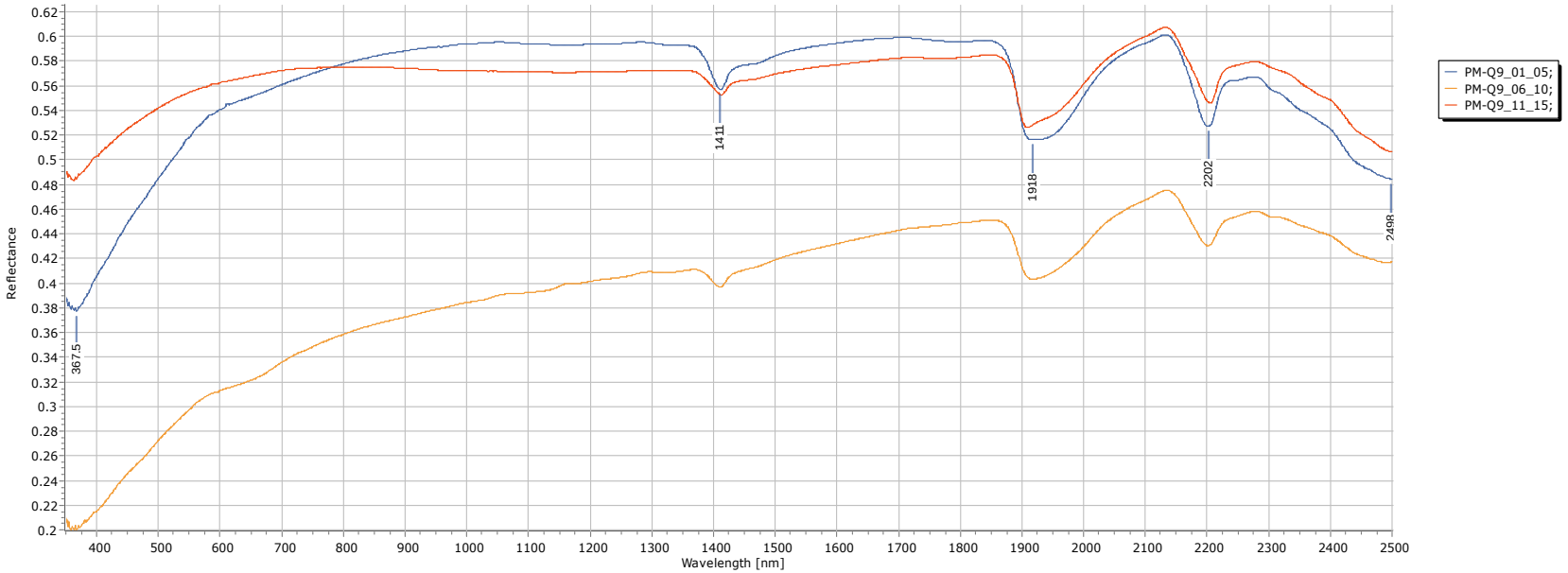

Reflectance
Wavelength [nm]
357.6
1411
1916
2205
2451
PM-Q8_01_05;
PM-Q8_011_15;
PM-Q8_016_20;
PM-Q8_06_10;

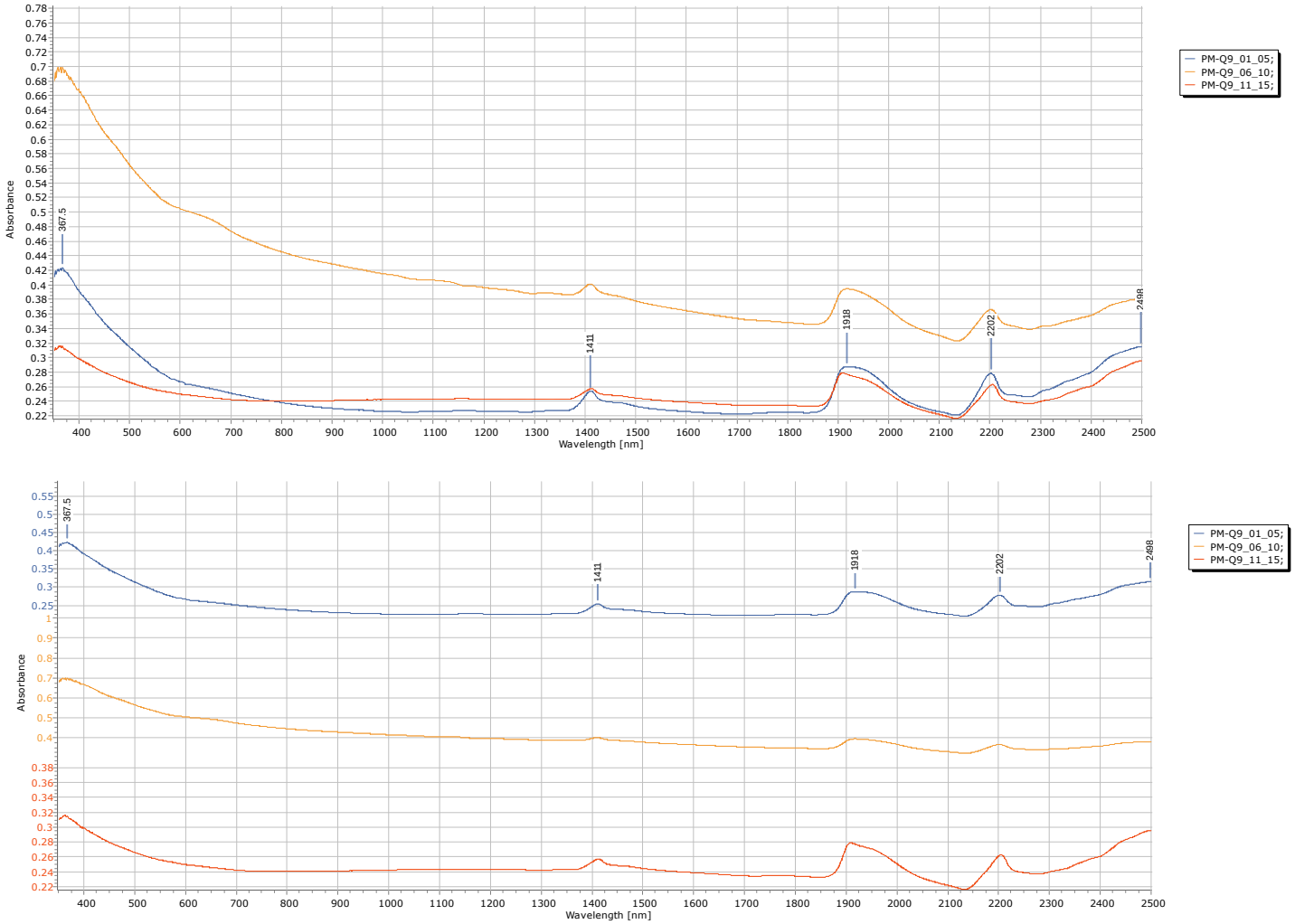

Absorbance
Wavelength [nm]
357.6
1411
1916
2205
2451
PM-Q8_01_05;
PM-Q8_011_15;
PM-Q8_016_20;
PM-Q8_06_10;

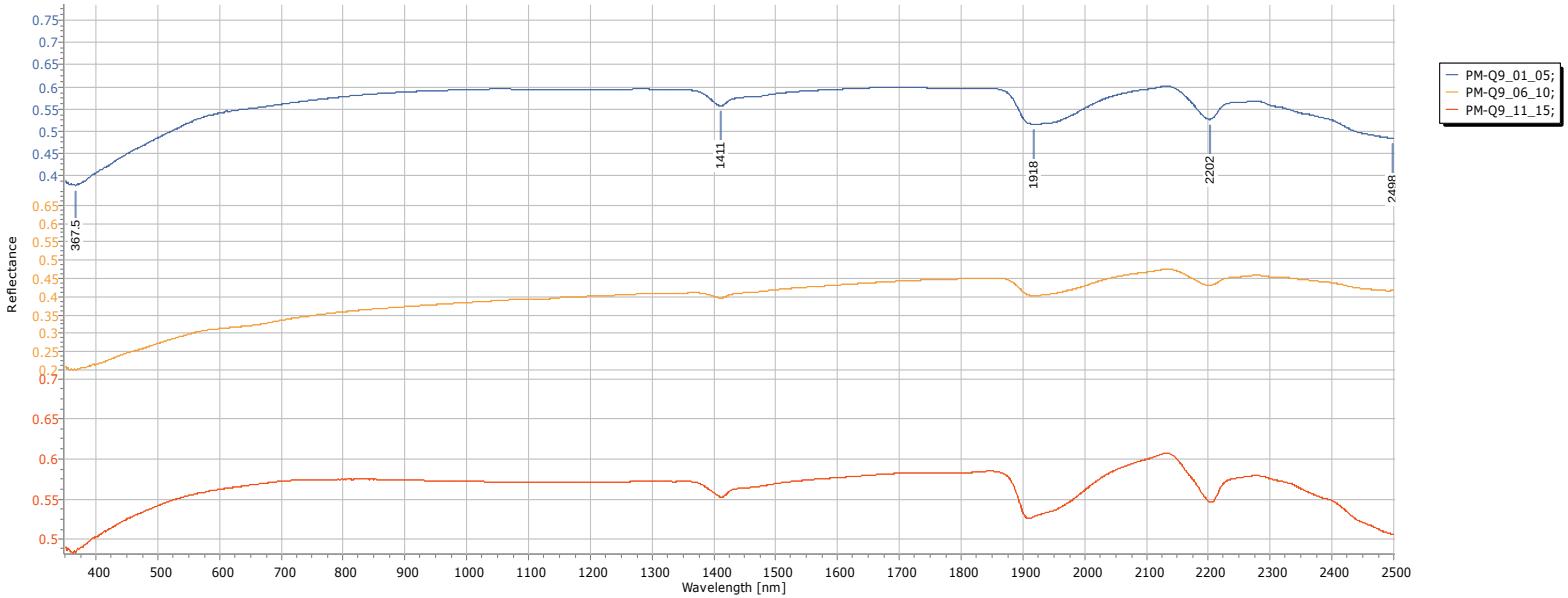

Absorbance
Wavelength [nm]
357.6
1411
1916
2205
2451
PM-Q8_01_05;
PM-Q8_011_15;
PM-Q8_016_20;
PM-Q8_06_10;


Reflectance
Wavelength [nm]
357.6
1411
1916
2205
2451
PM-Q8_01_05;
PM-Q8_011_15;
PM-Q8_016_20;
PM-Q8_06_10;

PMQ9

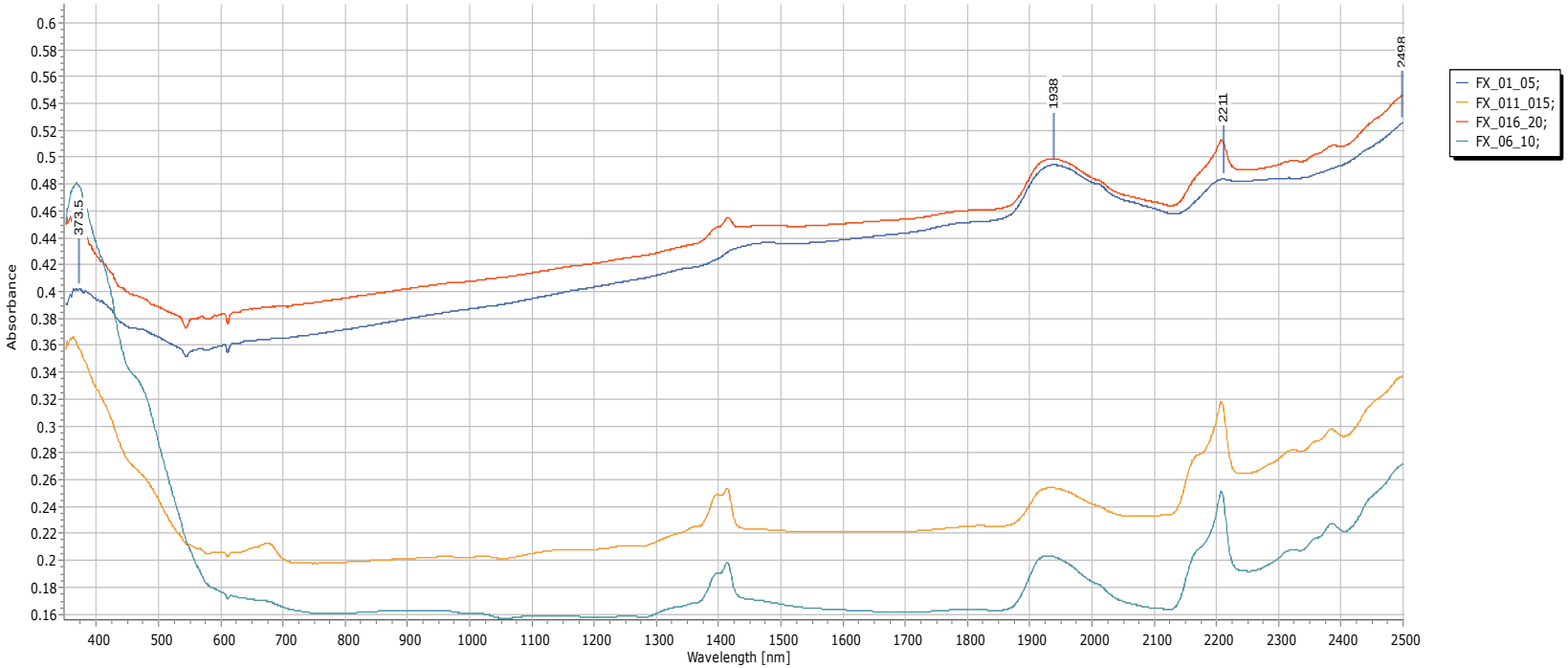

Reflectance
Wavelength [nm]
0.62
0.6
0.58
0.56
0.54
0.52
0.5
0.48
0.46
0.44
0.42
0.4
0.38
0.36
0.34
0.32
0.3
0.28
0.26
0.24
0.22
0.2
400
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
1400
1500
1600
1700
1800
1900
2000
2100
2200
2300
2400
2500
367.5
1411
1918
2202
2498
PM-Q9_01_05;
PM-Q9_06_10;
PM-Q9_11_15;

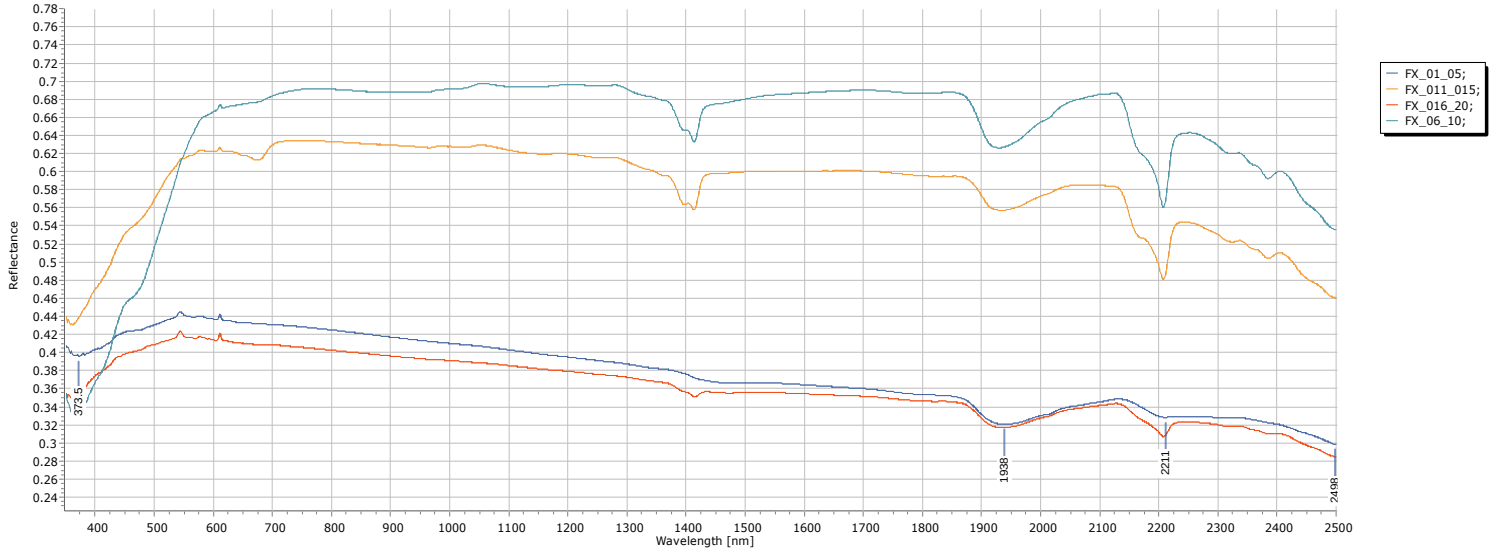

Absorbance
Wavelength [nm]
367.5
1411
1918
2202
2498
PM-Q9_01_05;
PM-Q9_06_10;
PM-Q9_11_15;

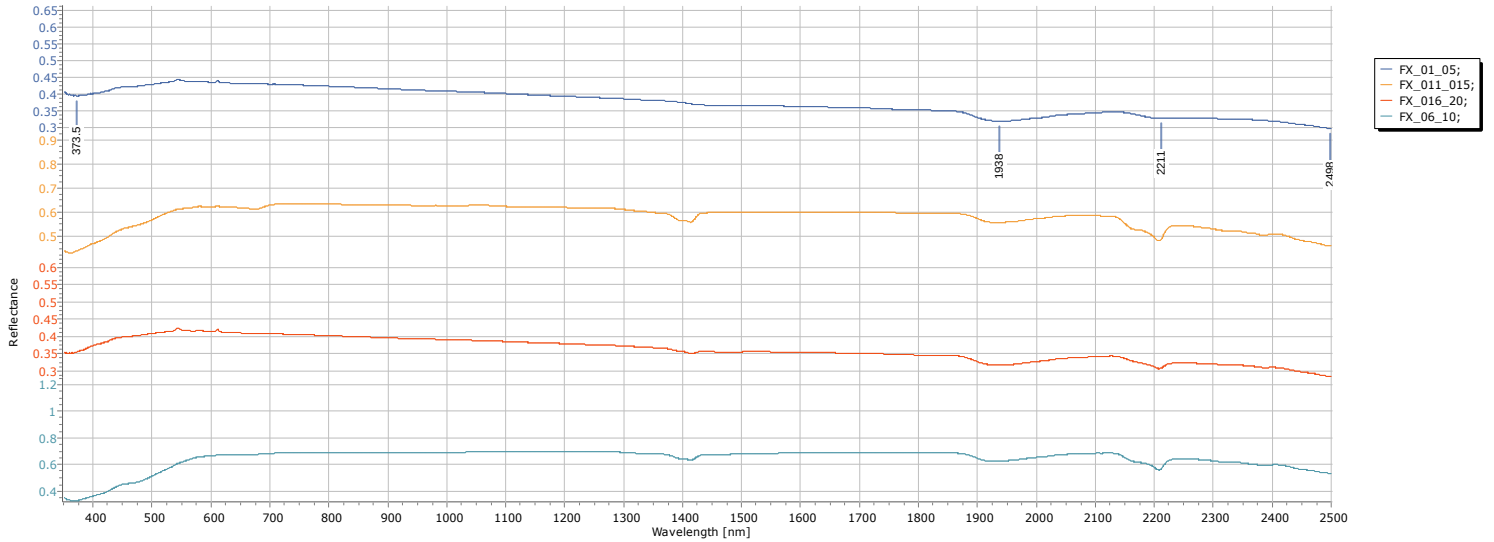

Reflectance
Wavelength [nm]
367.5
1411
1918
2202
2498
PM-Q9_01_05;
PM-Q9_06_10;
PM-Q9_11_15;

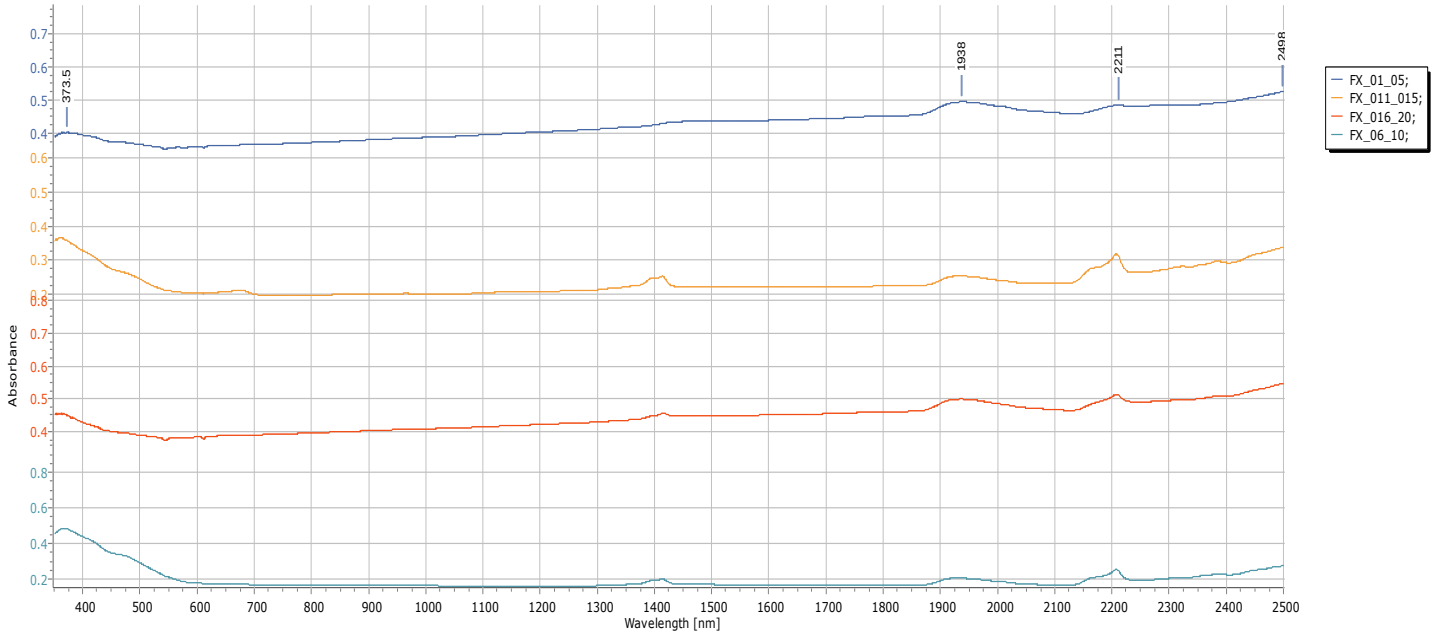
Espectros de Pegmatitos de Naipa

FX

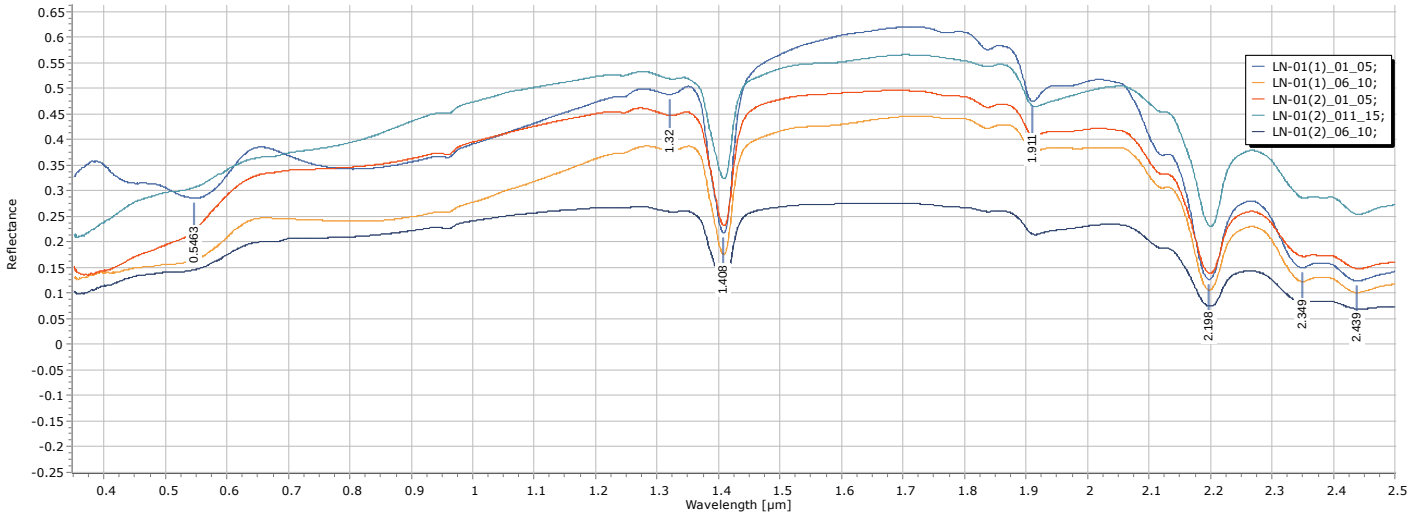


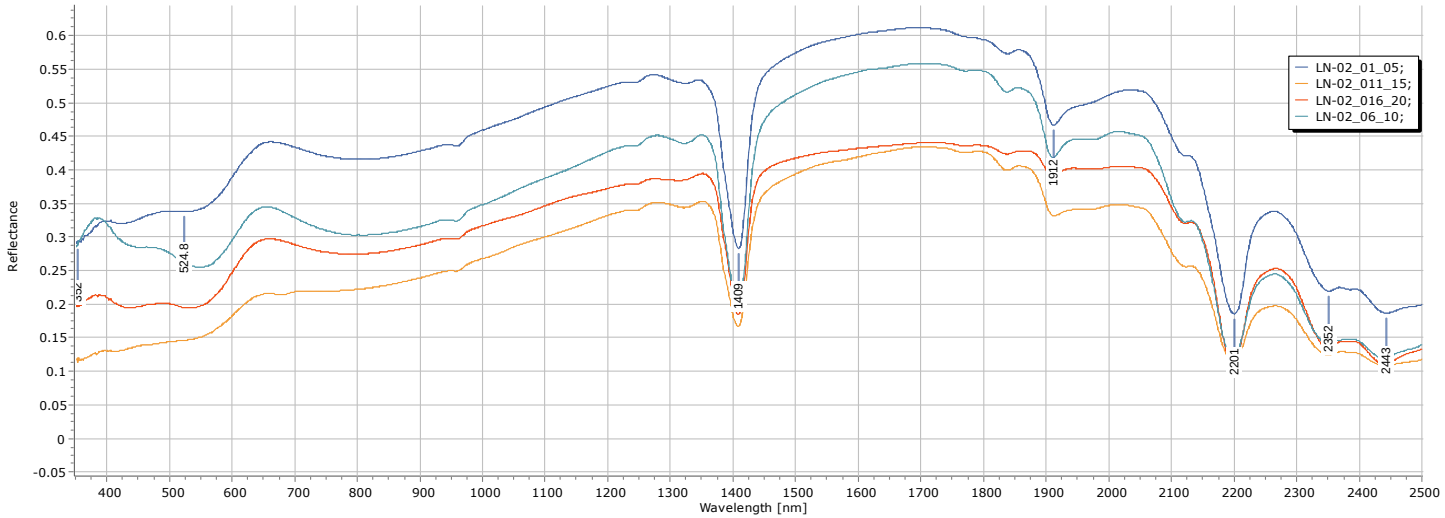

Reflectance
Wavelength [nm]
373.5
1938
2211
2498
FX_01_05;
FX_011_015;
FX_016_20;
FX_06_10;

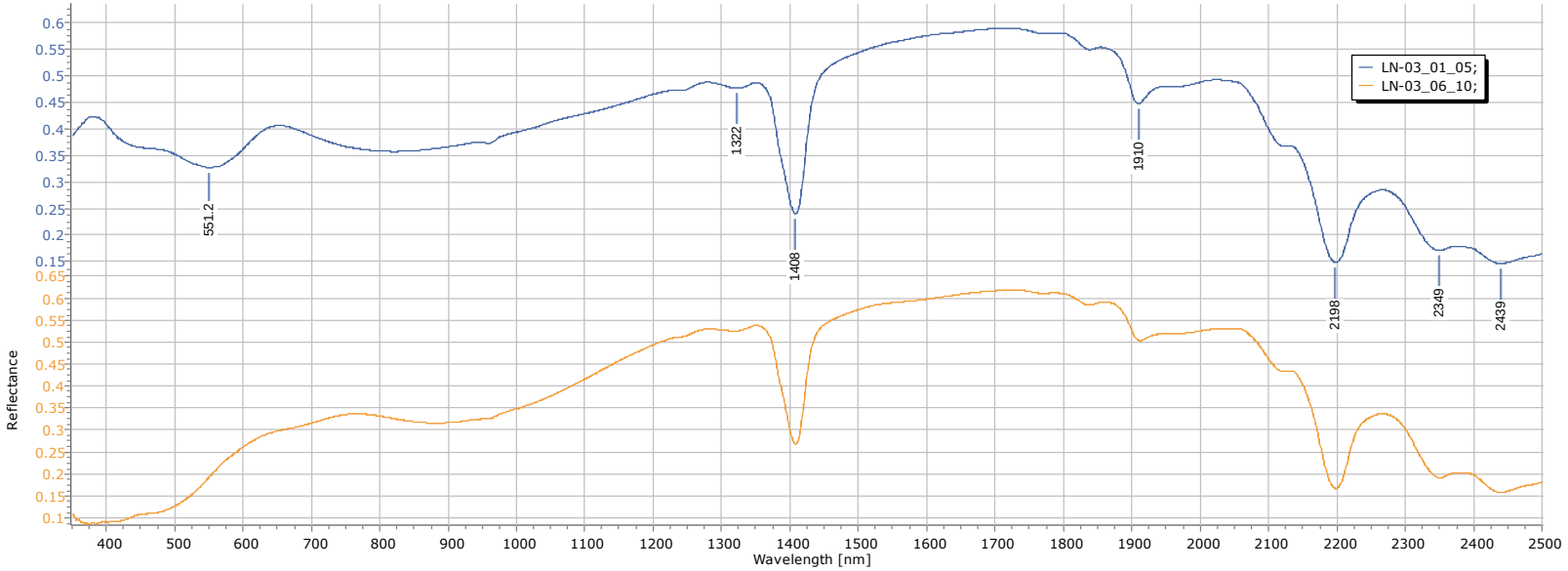

Reflectance
Wavelength [nm]
373.5
1938
2211
2498
FX_01_05;
FX_011_015;
FX_016_20;
FX_06_10;

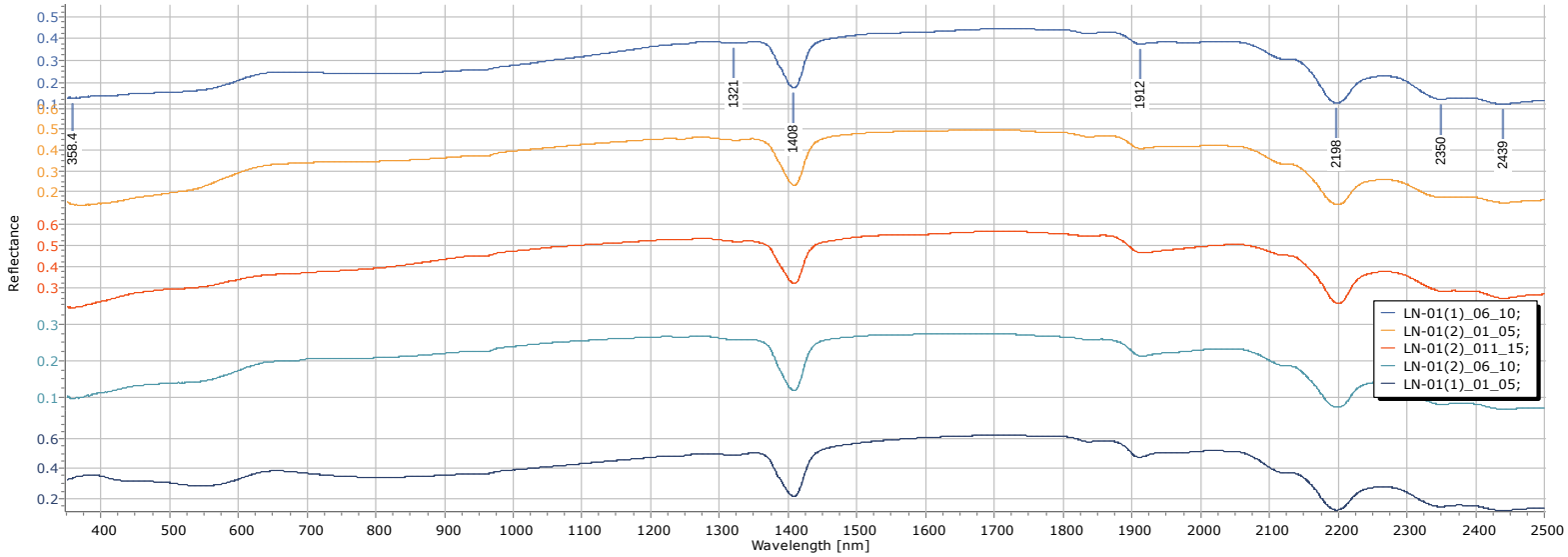

373.5
1938
2211
2498
FX_01_05;
FX_011_015;
FX_016_20;
FX_06_10;
Absorbance
Wavelength [nm]

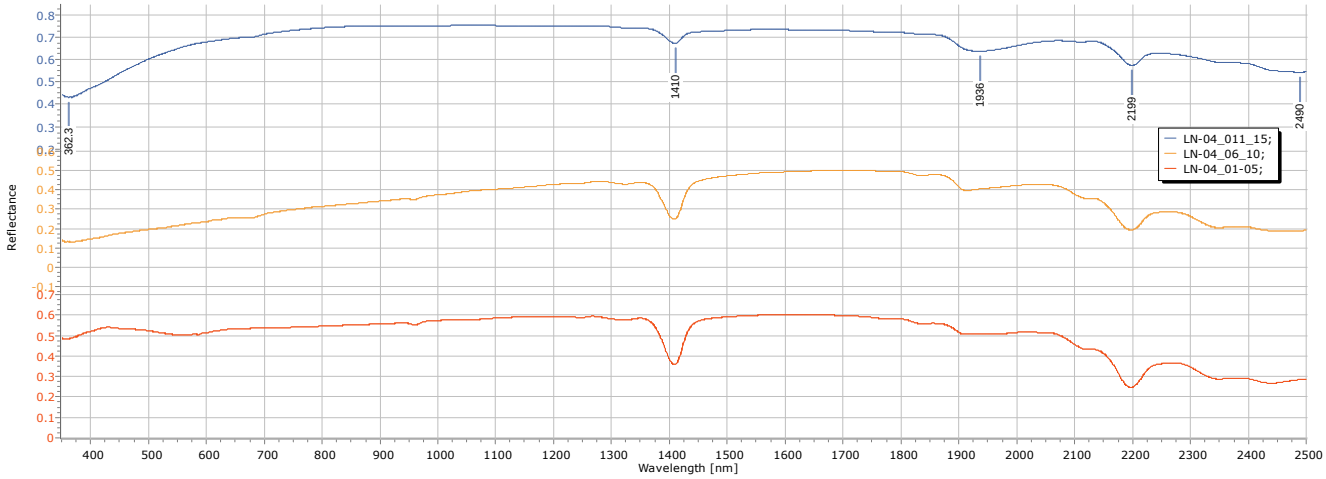
Lepidolites






LN-03_01_05;
LN-03_06_10;
551.2
1322
1408
1910
2198
2349
2439
Reflectance
Wavelength [nm]

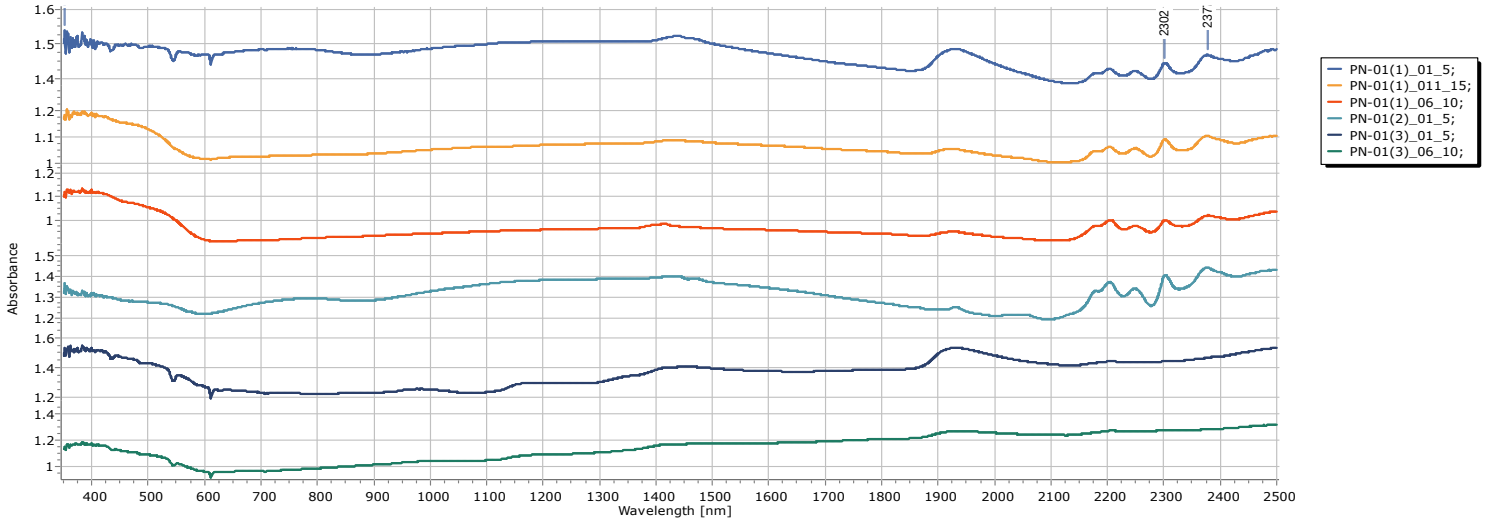

LN-01(1)_06_10;
LN-01(2)_01_05;
LN-01(2)_011_15;
LN-01(2)_06_10;
LN-01(1)_01_05;
358.4
1321
1408
1912
2198
2350
2439
Reflectance
Wavelength [nm]

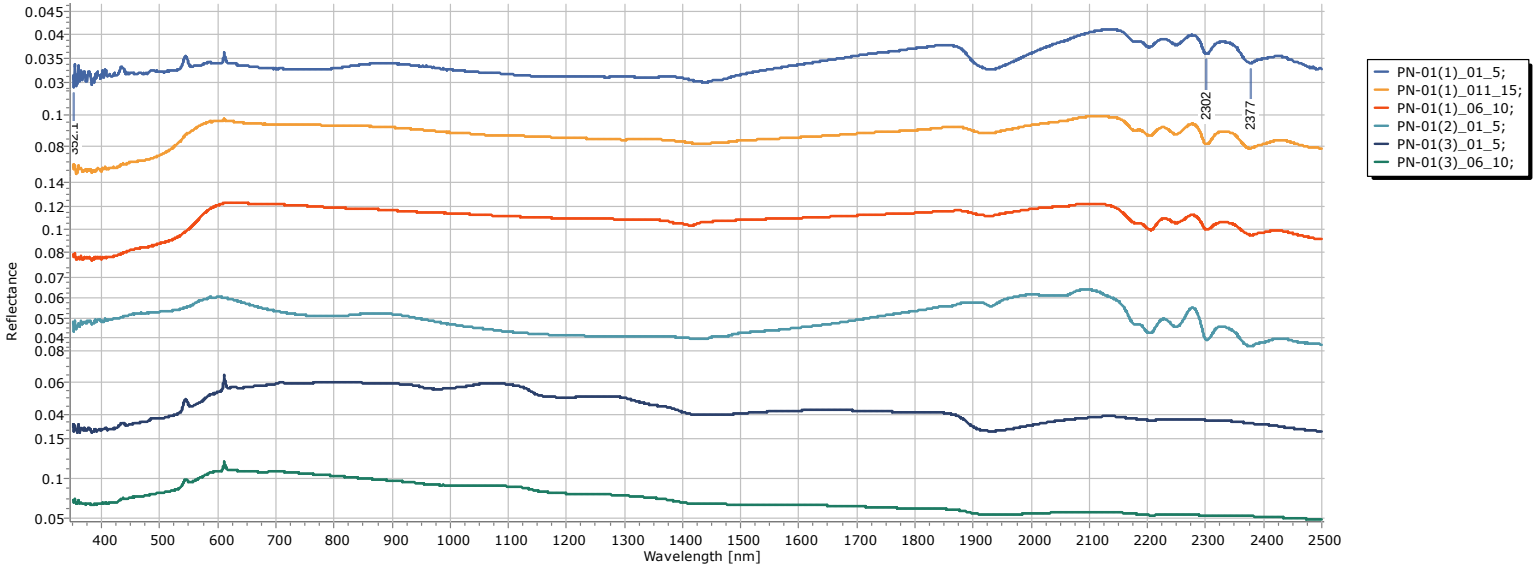

Reflectance
Wavelength [nm]
362.3
1410
1936
2199
2490
LN-04_011_15;
LN-04_06_10;
LN-04_01-05;

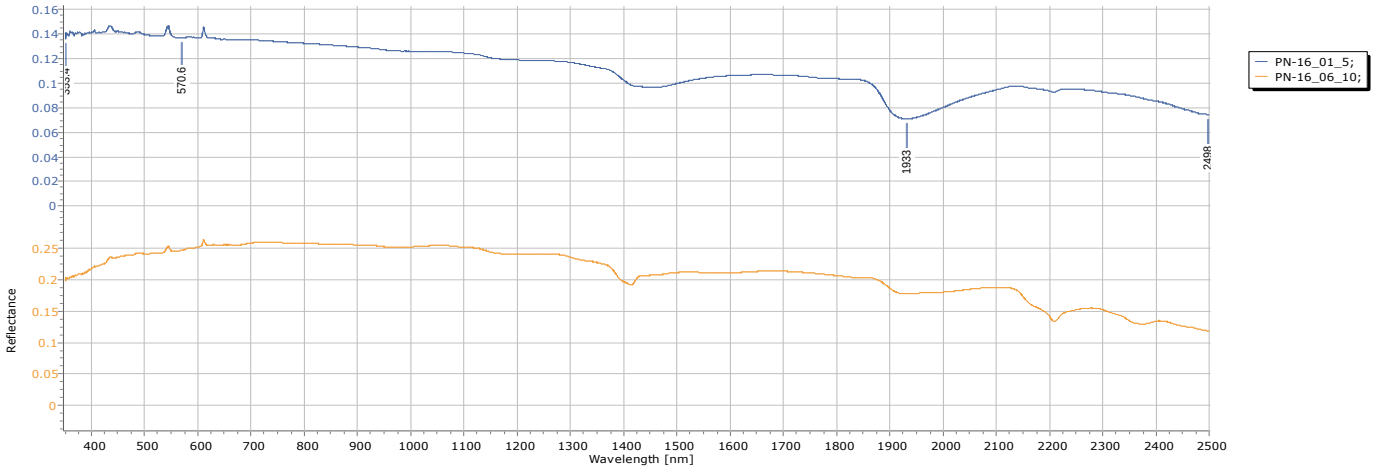
Cunzite

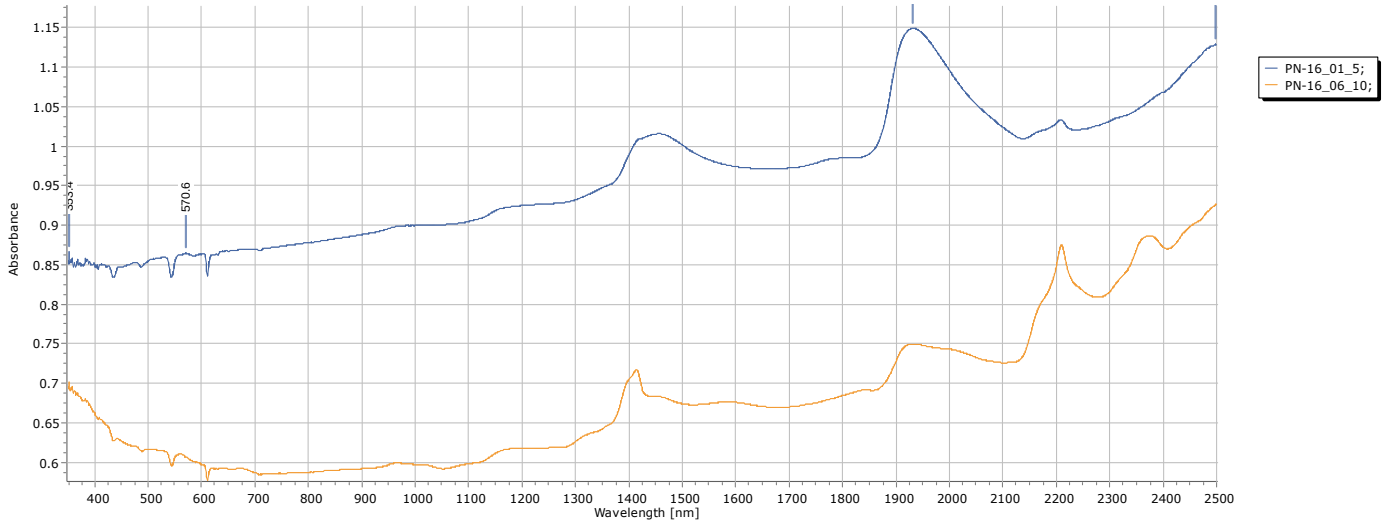

KN-01_01_05;
KN-02_01_05;
973.8
1196
367.6
2450
Reflectance
Wavelength [nm]

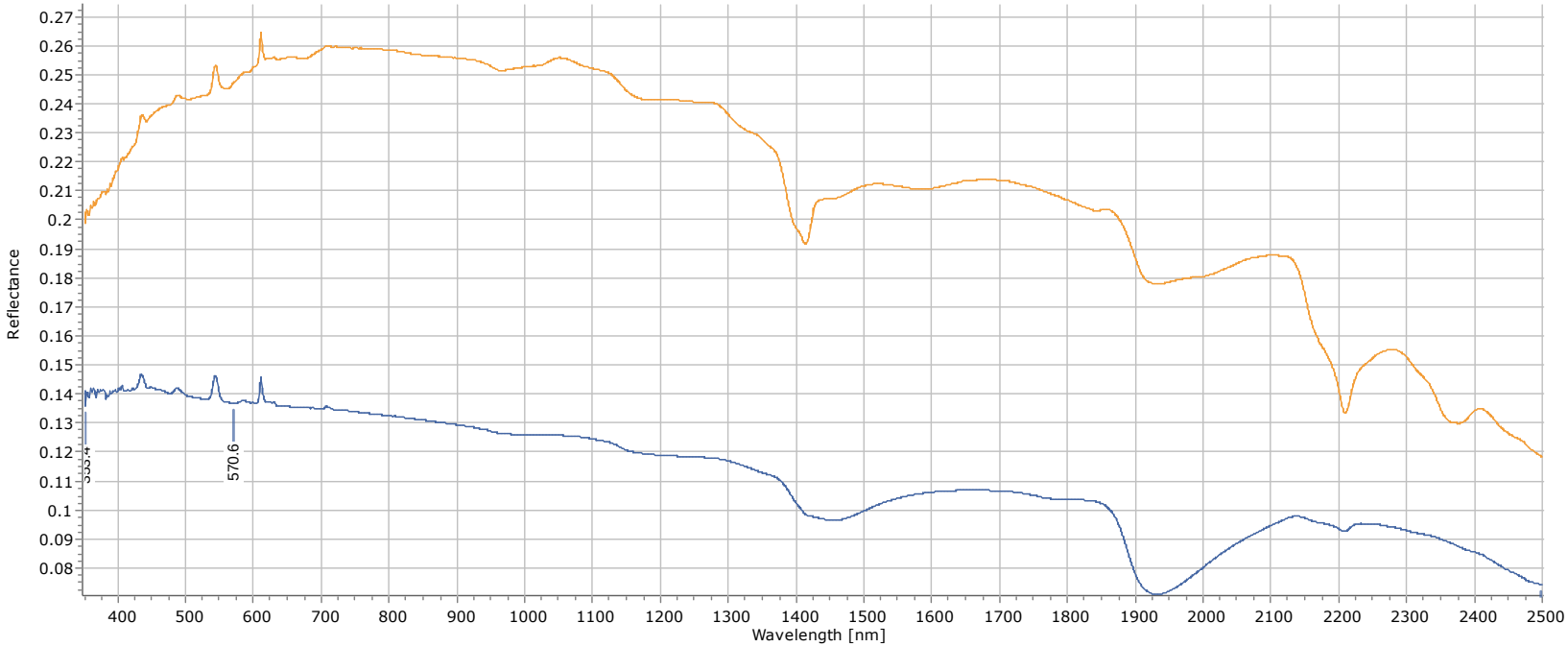
PN

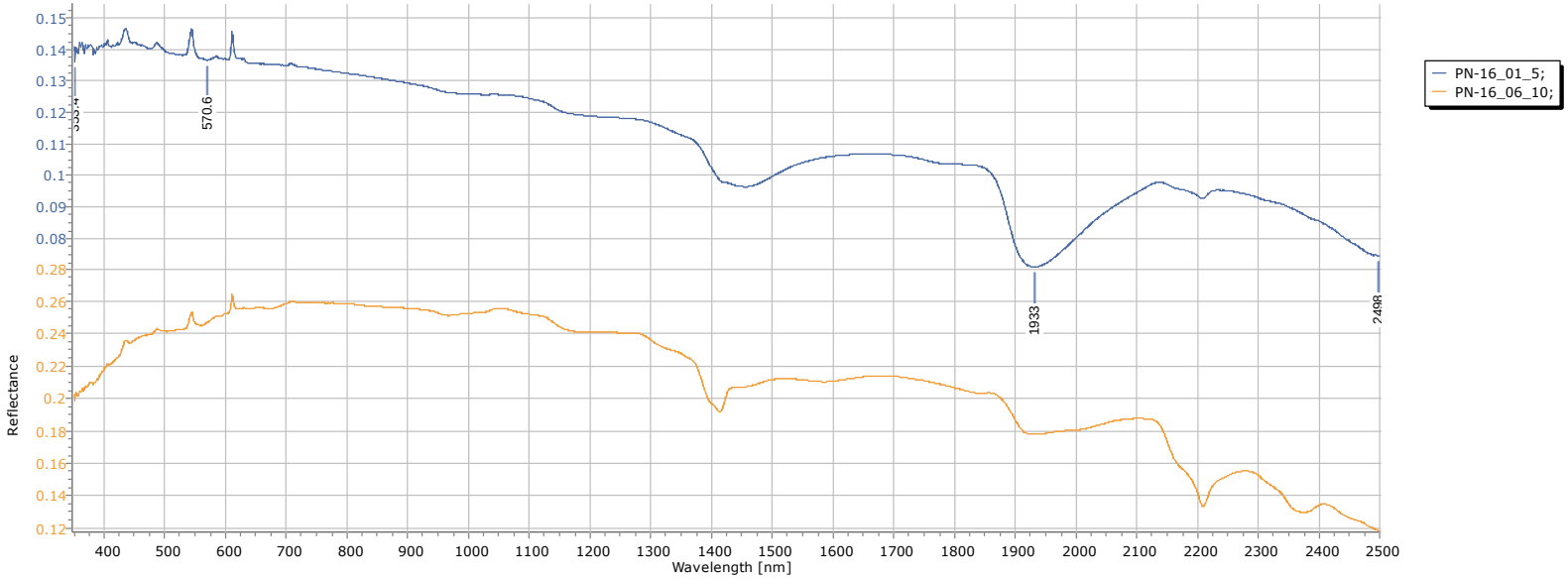

2302
2377
Absorbance
Wavelength [nm]
PN-01(1)_01_5;
PN-01(1)_011_15;
PN-01(1)_06_10;
PN-01(2)_01_5;
PN-01(3)_01_5;
PN-01(3)_06_10;


Reflectance
Wavelength [nm]
2302
2377
PN-01(1)_01_5;
PN-01(1)_011_15;
PN-01(1)_06_10;
PN-01(2)_01_5;
PN-01(3)_01_5;
PN-01(3)_06_10;

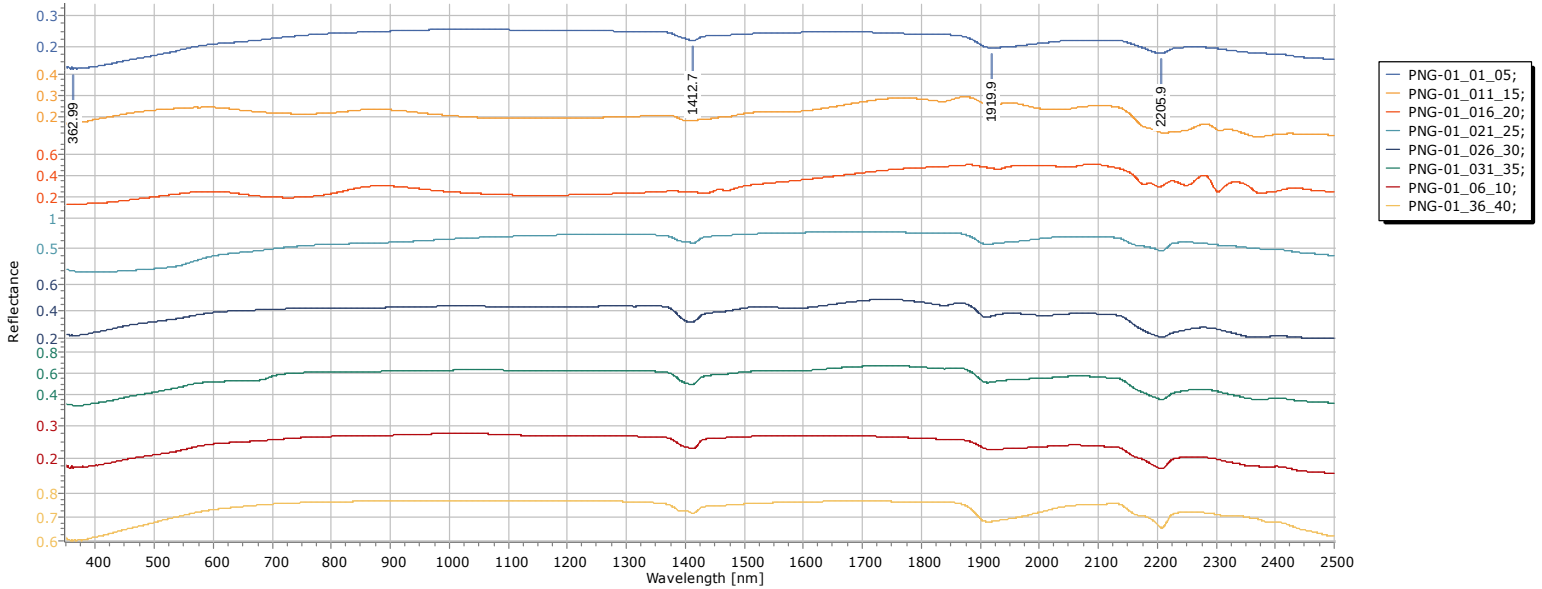

Reflectance
Wavelength [nm]
570.6
1933
2498
PN-16_01_5;
PN-16_06_10;

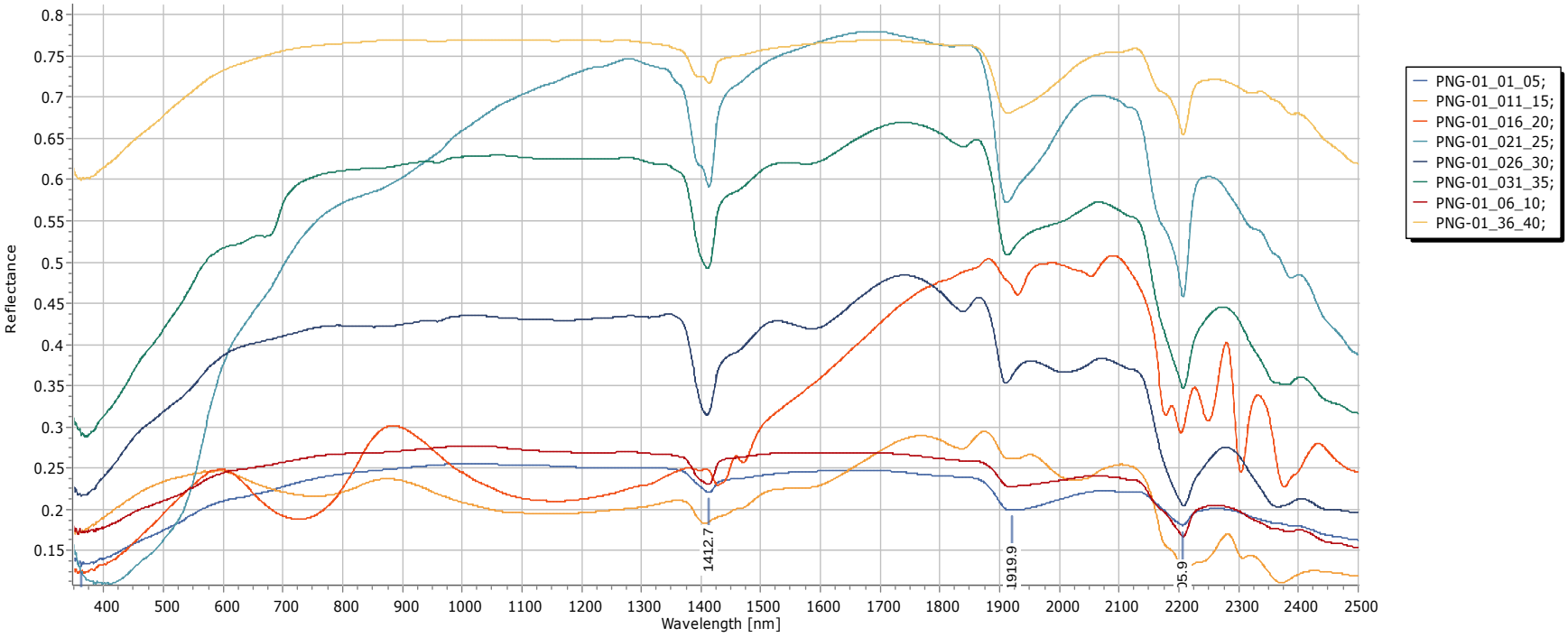

Absorbance
Wavelength [nm]
570.6
PN-16_01_5;
PN-16_06_10;

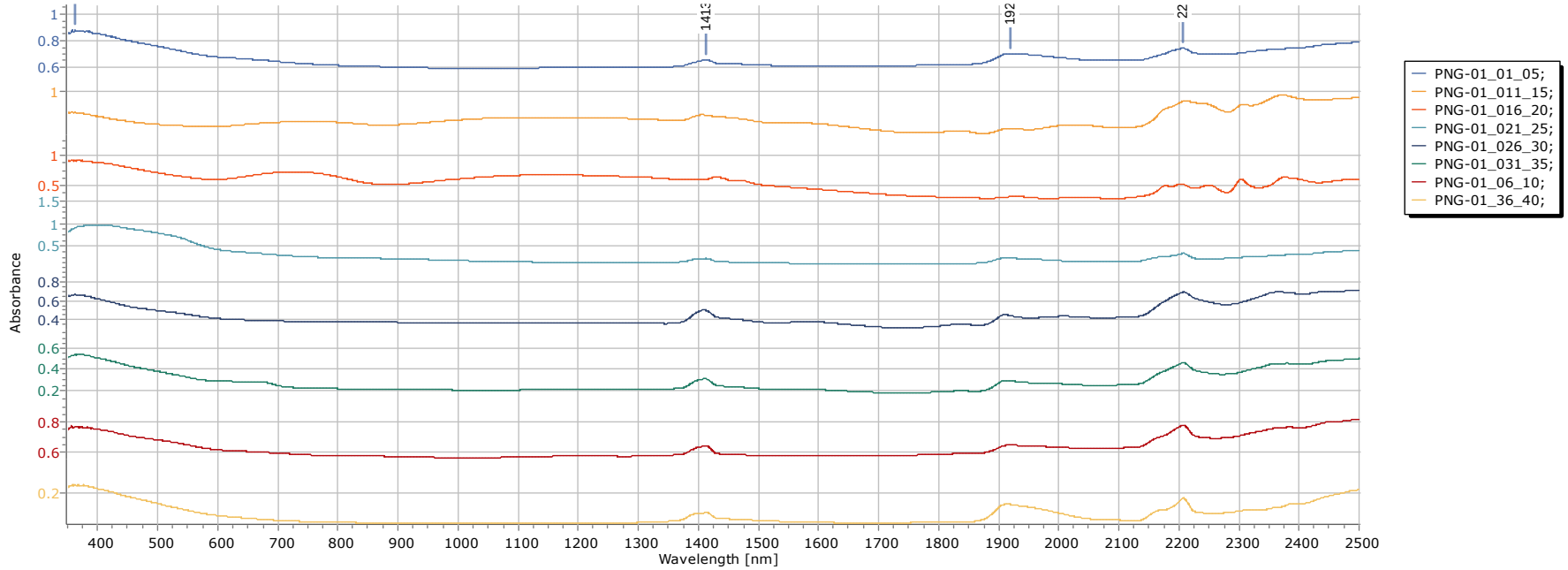

Reflectance
Wavelength [nm]
570.6
PN-16_01_5;
PN-16_06_10;

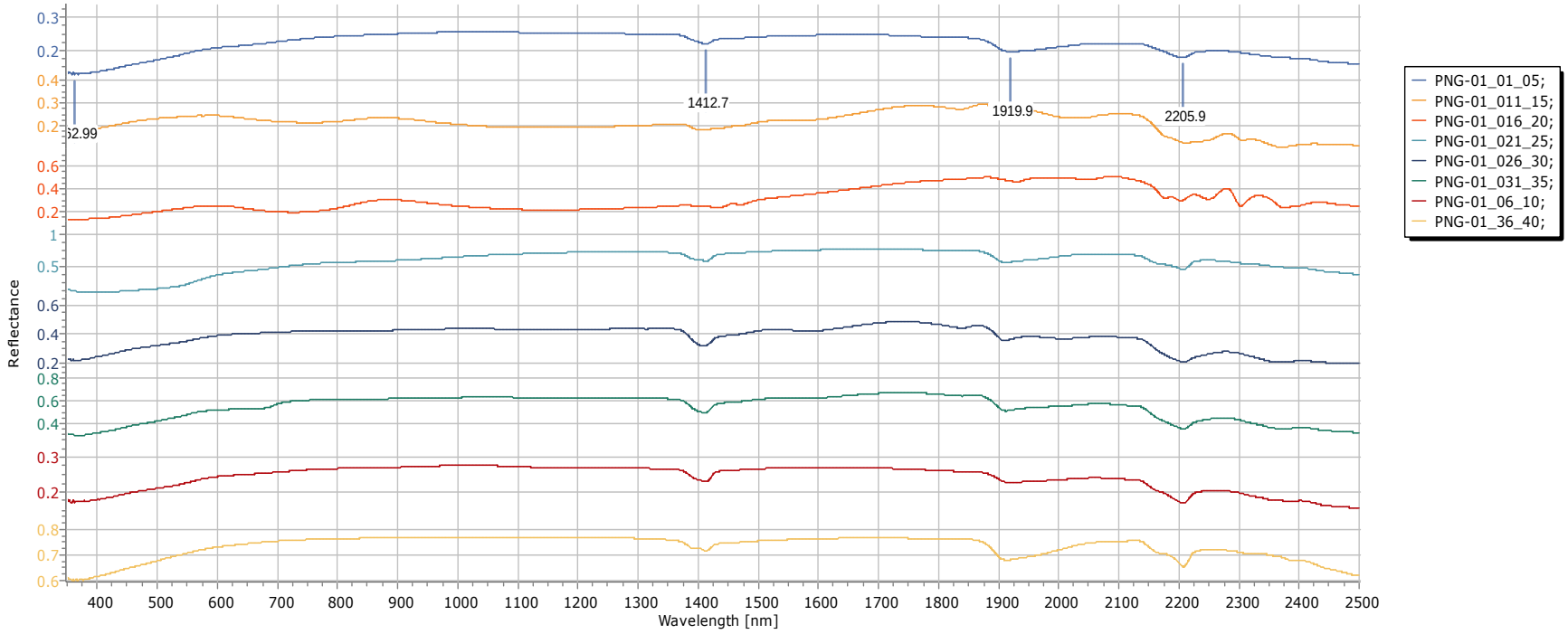

PN-16_01_5;
PN-16_06_10;
Reflectance
Wavelength [nm]
570.6
1933
2498

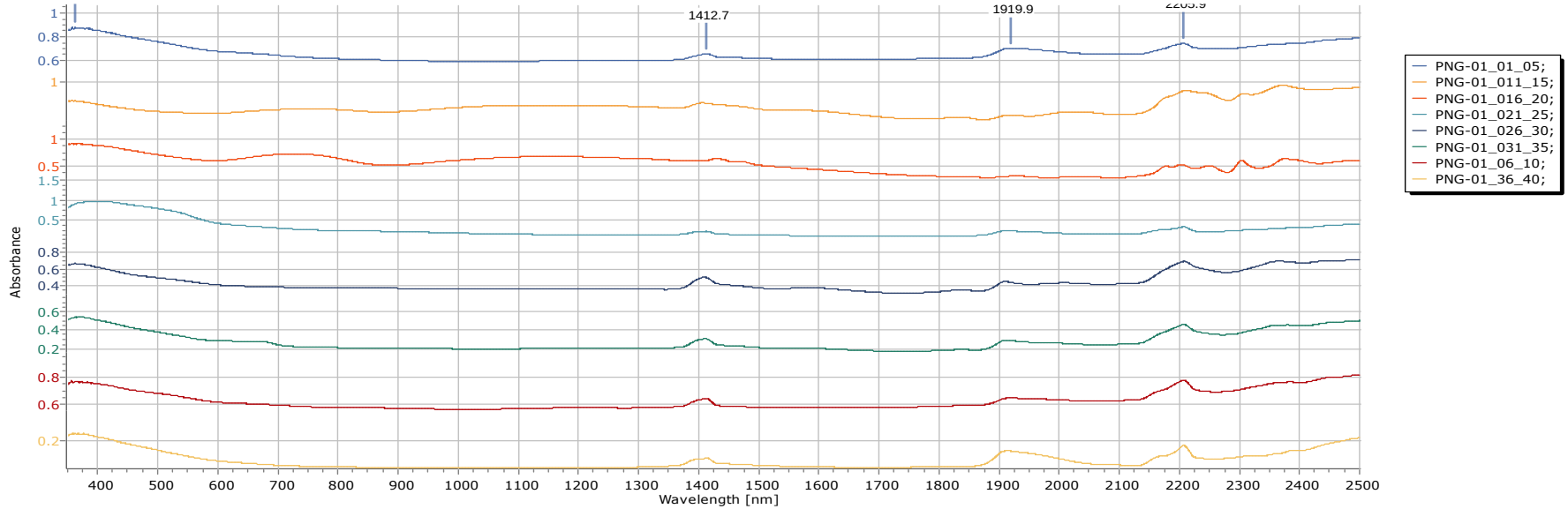
PNG


Reflectance
Wavelength [nm]
362.99
1412.7
1919.9
2205.9
PNG-01_01_05;
PNG-01_011_15;
PNG-01_016_20;
PNG-01_021_25;
PNG-01_026_30;
PNG-01_031_35;
PNG-01_06_10;
PNG-01_36_40;


Reflectance
Wavelength [nm]
1412.7
1919.9
2195.9
PNG-01_01_05;
PNG-01_011_15;
PNG-01_016_20;
PNG-01_021_25;
PNG-01_026_30;
PNG-01_031_35;
PNG-01_06_10;
PNG-01_36_40;


1413
1920
2200
Absorbance
Wavelength [nm]
400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300 1400 1500 1600 1700 1800 1900 2000 2100 2200 2300 2400 2500
PNG-01_01_05;
PNG-01_011_15;
PNG-01_016_20;
PNG-01_021_25;
PNG-01_026_30;
PNG-01_031_35;
PNG-01_06_10;
PNG-01_36_40;


Reflectance
Wavelength [nm]
1412.7
1919.9
2205.9
PNG-01_01_05;
PNG-01_011_15;
PNG-01_016_20;
PNG-01_021_25;
PNG-01_026_30;
PNG-01_031_35;
PNG-01_06_10;
PNG-01_36_40;


1412.7
1919.9
Absorbance
Wavelength [nm]
PNG-01_01_05;
PNG-01_011_15;
PNG-01_016_20;
PNG-01_021_25;
PNG-01_026_30;
PNG-01_031_35;
PNG-01_06_10;
PNG-01_36_40;