



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOPROCESSAMENTO E ANÁLISE AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO ESPECTRAL DE DEPÓSITOS DE FOSFATOS UTILIZANDO IMAGENS
ASTER NAS REGIÕES DE CAMPOS BELOS E CATALÃO (GO)**

RENATA DE ARAÚJO TEIXEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE Nº 19

BRASÍLIA – 2011

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOPROCESSAMENTO E ANÁLISE AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO ESPECTRAL DE DEPÓSITOS DE FOSFATOS UTILIZANDO IMAGENS
ASTER NAS REGIÕES DE CAMPOS BELOS E CATALÃO (GO)**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº19

RENATA DE ARAÚJO TEIXEIRA

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses

Co-Orientador: Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses - UnB

Prof. Dra. Tati de Almeida - UnB

Dr. Carlos Nogueira da Costa Júnior - MME

À Deus, família e a minha grande amiga Noelia Mejia,
pelo carinho, amor, companheirismo e dedicação que
sempre tiveram comigo, nesta etapa
tão árdua da minha vida.

À Deus, por ter me dado saúde e propiciar tantas oportunidades, dentre elas esta, que mesmo em meio a tantas dificuldades foi enfim, concretizada.

À minha família, principalmente meu pai e minha mãe, que mesmo distante sempre estiveram ao meu lado, me ajudando no que fosse necessário e me dando a força que muitas das vezes precisei.

À minha especial e grande amiga irmã Noelia, que nunca poupou esforços para me ajudar, sempre dando força, sempre incentivando a continua, sempre presente em todas as etapas desde trabalho, passando noites em claro comigo, sendo sempre sem dúvida a amiga que sempre quis e que mais esteve ao meu lado neste trabalho e na vida, tantos nos momentos de alegria e também dos de desespero, me auxiliando sempre no que fosse necessário sem mesmo pestanejar e sem pensar.

Às minhas amigas e companheiras de moradia e de mestrado Noelia, Lorena e Raphaela que viveram comigo 24 h por dia, me ajudando a viver melhor longe de casa, a ter força pra continuar e muitas vezes me ajudando no desenvolvimento do mestrado, corrigindo, sugerindo, incentivando e até mesmo indo a campo.

Ao meu orientado Paulo Roberto Meneses sempre muito calmo e sereno, que me ajudou afincado para finalização deste trabalho, estando sempre presente em todas as etapas, me direcionando e aconselhando. Ao meu co-orientado Gustavo Baptista sempre muito alegre e disposto a me ajudar no que fosse necessário.

A empresa Itafós e seus funcionários, por ter me permitido adentrar em sua área de exploração para realização deste estudo.

A empresa Vale Fertilizantes, antiga Fosfértil, por me permitir realizar esta pesquisa e pela ajuda dos geólogos e demais servidores da empresa.

Aos professores do Instituto de Geociências que compartilharam comigo o seu conhecimento e sanaram tantas vezes minhas dúvidas.

A professora Edi e seus alunos, por realizarem as análises de Difração de raios-X e no auxílio interpretativo da mesma.

Ao Antônio Felipe, colega de Doutorado, por ter auxiliado na aquisição das medidas espectrais das amostras no espectrorradiômetro FieldSpec.

Aos meus colegas de mestrado, Patrícia, Saulo, Leo, Edvaldo, Júlia, Loiane, Ednelson e outros, que compartilharam comigo muitos momentos de aprendizado e de amizade, inclusive me ajudando a compreender certos assuntos.

Ao Serjão, amigo e funcionário do Instituto de Geociências, que sempre ajudou e incentivou a finalização deste estudo.

Aos funcionários do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília que me ajudaram direta e indiretamente.

À TODOS MEU MUITO OBRIGADA!

**A vida é feita de dedicação, de força e esperança.
Dedicação para chegar ao fim. Força para continua.
E a esperança de que tudo um dia pode ser melhor.**

Renata Teixeira

A utilização de Sensoriamento Remoto em investigação prospectiva de bens minerais vem crescendo com o avanço da produção de sensores imageadores voltados às aplicações geológicas, o que propicia em novas abordagens metodológicas e a extração de informações adicionais através de imagens. Sendo o Brasil um dos maiores importadores mundiais de fertilizantes, abordou-se nesta dissertação, o estudo de depósitos de fosfatos, com a finalidade de investigar feições espectrais de P_2O_4 utilizando imagens dos diferentes subsistemas do sensor ASTER e a espectrorradiometria de reflectância, avaliando o subsistema que melhor discrimina este bem mineral. Foram investigadas duas áreas distintas, Catalão e Campos Belos, localizadas na região nordeste e sudeste do estado de Goiás, respectivamente. As áreas foram selecionadas propositalmente por se tratarem de regiões com depósitos de fosfatos de origens distintas, ígnea (carbonatitos) e sedimentar (carbonatos), atualmente explorados por empresas especializadas.

O processamento das imagens incluiu tanto medições espectrorradiométricas em amostras de rochas, utilizando espectrorradiômetros, assim como informações extraídas de bibliotecas espectrais da USGS, JPL e ASU. Esses dados foram utilizados como espectros de referência para a classificação espectral SFF (*Spectral Feature Fitting*) das imagens, reamostrados para as bandas do sensor ASTER. Foram utilizados ainda, como suporte para validar a identificação mineralógica, a utilização da difratometria de raio-x.

A região de Catalão apresentou amostras de foscoritos e rochas fosfatadas com feições diagnósticas de absorção, na faixa do VNIR em $0,66 \mu\text{m}$, típico da feição do mineral monazita, mineral que contém fosfato em sua composição. Na faixa do SWIR, apresentou feições de absorções em $2,16 \mu\text{m}$, $2,26 \mu\text{m}$ e $2,33 \mu\text{m}$, tais feições são correspondentes a presença do mineral apatita e minerais secundários de flogopita e dolomita, que ocorrem associados, uma vez que as apatitas deste depósito são impuras. No TIR, a feição diagnóstica do fosfato encontra-se a $9,1 \mu\text{m}$. Para a região de Campos Belos as feições de absorção interpretadas como diagnósticas dos fosforitos e siltitos fosfatados, na faixa do VNIR, não foram possíveis de caracterizar, devido à forte presença de óxidos e íons ferrosos, que acabam por mascarar possíveis feições diagnósticas. Na faixa do SWIR, mesmo ocorrendo à presença marcante dos argilominerais (illita e caolinta) foi possível caracterizar algumas feições de absorção a $2,16 \mu\text{m}$, $2,20 \mu\text{m}$ e $2,33 \mu\text{m}$, ligados a presença de P e C, que junto ao O, durante trocas iônicas, podem ser fosfatos e/ou carbonatos. Na faixa do TIR, assim como na região de Catalão apresentou a mesma feição de absorção, a $9,1 \mu\text{m}$, característico da presença do mineral apatita, rico em fosfato.

A classificação SFF hiperespectral aplicada em imagens multiespectrais são metodologicamente possíveis e válidas, principalmente em estudos prospectivos. Esta técnica aplicada em conjunto a espectrorradiometria pode auxiliar significativamente em estudos relacionados a fosfatos.

The use of Remote Sensing in mineral commodities prospective investigation has increased with the advancement of the imaging sensors production facing the geological applications, which provides in new methodological approaches the extraction of additional information through images. Brazil is one of the largest fertilizers importers. In this thesis, the phosphates deposits were studied with the purpose to investigate spectral features of P_2O_4 using images of different subsystems of ASTER sensor and spectroradiometry reflectance, evaluating the subsystem that best discriminates against this and mineral. Were investigated two distinct areas, *Catalão* and *Campos Belos*, located in the northeast and southeast of *Goiás* state respectively. The areas were selected because they are related to phosphates deposits with different origins, igneous (carbonatites) and sediment (carbonates), currently operated by specialized companies.

The processing of the images included both measurements spectroradiometrycs in rock samples, using spectroradiometers, as well as information extracted from the USGS spectral libraries, JPL and ASU. These data were used as spectral reference for SFF spectral classification (*Spectral Feature Fitting*) of the images, resample for bands of the ASTER sensor. They were also used in diffraction of x-ray, such as support to validate the mineralogical identification.

Catalão region presented samples of comprises and rock phosphate with diagnostic absorption features, in the range of VNIR at $0.66 \mu\text{m}$, typical of the appearance of mineral monazite, that contains phosphate in its composition. The range of the SWIR presented features of take-overs in $2.16 \mu\text{m}$, $2.26 \mu\text{m}$ and $2.33 \mu\text{m}$, such related to the presence of the mineral apatite and a secondary minerals phlogopite and dolomite, which occur associated. The TIR tailwinds diagnostic of phosphate is $9.1 \mu\text{m}$. In samples of *Campos Belos* region the absorption features were interpreted as diagnostic of phosphorites and siltstones phosphates in the range of VNIR, were not possible its characterization due to the strong presence of the oxides and ferrous ions, which eventually mask possible diagnostic features. In the range of the SWIR, even occurring the remarkable presence of clay minerals (illite and caolinta) it was possible to characterize some features of absorption to $2.16 \mu\text{m}$, $2.20 \mu\text{m}$ and $2.33 \mu\text{m}$, linked to the presence of P and C, adjacent to the O, during trading ionic, may be phosphates and/or carbonates. In the range of TIR, as well as in *Catalão region* presented the same appearance of absorption, the $9.1 \mu\text{m}$, typical of the presence of the mineral apatite, rich in phosphate.

The SFF hyperspectral classification applied in multispectral images are methodologically possible and valid, mainly in prospective study. This technique applied together to spectroradiometry can help significantly in studies related to phosphates.

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo geral:	3
1.2.2 Objetivos específicos:.....	3
1.3 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	4

CAPITULO 2 - ASPECTOS GERAIS DOS FOSFATOS E GEOLOGIA DAS ÁREAS

2.1 ASPECTOS GERAIS DOS FOSFATOS	6
2.2 GEOLOGIA DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	7
2.2.1 Catalão (área 1).....	7
2.2.2 Campos Belos (área 2).....	9

CAPITULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CONCEITO DE SENSORIAMENTO REMOTO.....	12
3.2 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	14
3.3 SENSOR ASTER	15
3.3.1 Subsistema VNIR (<i>Visible and Near Infrared Radiation</i>)	16
3.3.2 Subsistema SWIR (<i>Short Wave Infrared Radiation</i>)	16
3.3.3 Subsistema TIR (<i>Thermal Infrared Radiation</i>).....	16
3.3.4 Produtos e Aplicações	17
3.4 ESPECTRORRADIOMETRIA.....	18
3.4.1 Interações na região do visível e infravermelho do espectro eletromagnético	19
3.4.2 Interações na região do infravermelho termal.....	21
3.5 ESPECTROSCOPIA DE IMAGEAMENTO.....	22
3.5.1 Caracterização dos minerais de referência.....	23
3.5.2 Processamento da imagem ASTER.....	23
3.5.3 Mapeamento espectral	23

CAPITULO 4 - MATERIAIS E METODOS

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1.1 Materiais utilizados	25
4.1.2 Metodologia Aplicada	25

CAPITULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS ÁREAS DE ESTUDO

5.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO DA REGIÃO DE CATALÃO	30
5.1.1 Dados VNIR.....	30
5.1.2 Dados SWIR.....	37
5.1.3 Dados TIR.....	60
5.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO DA REGIÃO DE CAMPOS BELOS	65
5.2.1 Dados do subsistema VNIR	65
5.2.2 Dados do subsistema SWIR	69
5.2.3 Dados do subsistema TIR.....	80

CAPITULO 6 - CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES	85
-----------------------	----

CAPITULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
-------------------------------------	----

CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Tabela 3.1. Parâmetros dos subsistemas do sensor ASTER 16

Tabela 3.2. Produtos do sensor ASTER 18

CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E METODOS

Tabela 4.1. Classificação simplificada das amostras coletadas em campo com base em descrições macroscópicas da área 1 (Catalão) 27

Tabela 4.2. Descrição das amostras coletadas em campo da área 2 (Campos Belos) 28

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Figura 1.1. Modelos Digitais de Elevação do Estado de Goiás, em detalhe as áreas de estudo. Modificado de Moreira <i>et al.</i> (2008)	4
---	---

CAPÍTULO 2 – ASPECTOS GERAIS DOS FOSFATOS E GEOLOGIA DAS ÁREAS

Figura 2.1. Distribuição espacial dos principais depósitos de fosfato no mundo (Amaral, 1997)	6
Figura 2.2. Reserva mundial de rocha fosfatada em 2007, dados do sumário anual 2008 do DNPM (Souza & Cardoso, 2008 <i>in</i> Souza, 2009)	7
Figura 2.3. Mapa geológico do Complexo Catalão I (Brod <i>et al.</i> , 2004).....	8
Figura 2.4. Mapa geológico da área de estudo (Monteiro, 2009).....	10

CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Figura 3.1. Componentes básicos de um sistema de sensoriamentos remoto: fonte, alvo e sensor (Meneses, 2011)	13
Figura 3.2. Modelo ondulatório da propagação da radiação eletromagnética, em função das vibrações ortogonais dos campos elétrico (E) e magnético (M)	14
Figura 3.3. Regiões do espectro eletromagnético, em destaque a região do visível e infravermelho (próximo, médio e termal).	15
Figura 3.4. Configurações para medições espectrorradiométricas e em detalhe o espectrorradiômetro PIMA SP do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.	19
Figura 3.5. Sistema de aquisição de dados do espectrorradiômetro <i>FieldSpec</i> do Departamento de Geografia da Universidade de Brasília.	20
Figura 3.6. Processos de interação da REM com as superfícies dos materiais em função do comprimento de onda (Meneses, 2006b)..	21
Figura 3.7. Modos de vibrações moleculares da Molécula de CH ₂ (Meneses, 2006b)...	22

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS ÁREAS DE ESTUDO

Figura 5.1. Áreas de amostragem selecionadas na área de estudo...	31
Figura 5.2. Curvas espectrais das médias dos dados das áreas de amostragem da imagem VNIR ASTER...	32
Figura 5.3. Comportamento espectral da amostra de foscorito obtido com o espectrorradiômetro <i>FieldSpec</i>	33
Figura 5.4. Curvas espectrais das médias dos dados das áreas de amostragem da imagem VNIR ASTER...	33
Figura 5.5. Curva espectral obtida da imagem ASTER	33
Figura 5.6. Curva espectral da Goetita (JPL) reamostrada para imagem ASTER, em destaque as bandas.....	34
Figura 5.7. Difratoograma da amostra de foscorito CF 10.....	34
Figura 5.8. Curva espectral da monazita da biblioteca de referência espectral USGS.....	35
Figura 5.9. Curva espectral da monazita (USGS) reamostrada para a imagem ASTER...	35

Figura 5.10. Classificação espectral SFF na imagem ASTER do VNIR utilizando como <i>endmember</i> à biblioteca espectral da monazita da USGS.....	36
Figura 5.11. Visão do comportamento espectral geral das principais amostras de rochas coletadas em campo.....	37
Figura 5.12. (a)Biblioteca espectral do grupo 1 vs espectros de referência do mineral apatita (JPL), dolomita e flogopita (USGS); b)curvas espectrais do grupo 1 com o assinatura da mistura espectral de dolomita + flogopita da biblioteca USGS e da apatita da JPL.....	39
Figura 5.13. Resultado da análise de difração de raios-vs das amostras do grupo 1, evidenciando a presença de minerais fosfáticos e outros que compõem a assembléia mineral das rochas	40
Figura 5.14. Biblioteca Espectral do grupo 2 vs biblioteca de referência: a)curvas espectrais do grupo 2 com as assinaturas espectrais da Hidroxil-apatita e goetita da biblioteca de referência USGS; b)curvas espectrais do grupo 2 com o assinatura da mistura espectral da biblioteca de referência.....	42
Figura 5.15. Resultado da análise de difração de raios-X vs das amostras do grupo 2, evidenciando a presença de minerais fosfáticos e outros que compõem a assembléia mineral das rochas.....	43
Figura 5.16. Biblioteca espectral do grupo 3 vs biblioteca de referência: a)curvas espectrais do grupo 3 com as assinaturas espectrais da flogopita, dolomita e hidroxil-apatita da biblioteca de referência USGS; b)curvas espectrais do grupo 3 com a assinatura da mistura espectral da biblioteca de referência, com as setas em vermelho indicando as principais absorções.....	45
Figura 5.17. Resultado da análise de difração de raios-X das amostras do grupo 3, evidenciando a presença de minerais fosfáticos e outros que compõem a assembléia mineral das rochas... ..	46
Figura 5.18. Biblioteca Espectral do grupo 4 vs biblioteca de referência: a)curvas espectrais do grupo 4 com as assinaturas espectrais de dois conjuntos de bibliotecas de referência diferentes (JPL e USGS); b)curvas espectrais do grupo 4 com o assinatura da mistura espectral da biblioteca de referência, com as setas em vermelho indicando as principais absorções.....	48
Figura 5.19. Resultado da análise de difração de raios-X das amostras do grupo 4, evidenciando a presença de minerais fosfáticos e outros que compõem a assembléia mineral das rochas.....	49
Figura 5.20. Comportamento espectral das amostras de solo do Complexo Carbonatítico de Catalão I	50
Figura 5.21. Biblioteca espectral da amostra de solo 1 vs bibliotecas de referências da JPL e USGS: a)curva espectral da amostra de solo 1 com as assinaturas espectrais dos minerais das bibliotecas de referência da JPL e USGS; b)curva espectral da amostra de solo 1 interpretada com a assinatura das misturas espectrais da biblioteca de referência, com as setas em vermelho indicando as principais absorções.....	51
Figura 5.22. Difratograma da Amostra de solo 1 – apatita/magnetita.....	51
Figura 5.23. Difratograma da Amostra de solo 2 – mica de base.....	52

Figura 5.24. Biblioteca espectral da amostra de solo 2 vs biblioteca de referência da USGS: a) curva espectral da amostra de solo 2 com as assinaturas espectrais dos minerais da biblioteca de referência da USGS; b) curva espectral da amostra de solo 2 interpretada com a assinatura da mistura espectral da biblioteca de referência, com as setas em vermelho indicando as principais absorções.....	52
Figura 5.25. Comportamento espectral das amostras dos concentrados de fosfato e barita, cedidas pela mineradora Fosfértil.....	53
Figura 5.26. Difratoograma do concentrado de barita.....	54
Figura 5.27. Comportamento espectral do concentrado de Barita: a) análise do espectro do concentrado com as assinaturas espectrais dos minerais de referência (anidrita, quartzo e barita); b) Resultado da mistura espectral dos minerais de referência e o espectro do concentrado de barita interpretado.....	55
Figura 5.28. Difratoograma do concentrado de fosfato.....	55
Figura 5.29. Comportamento espectral do concentrado de Fosfato: a) análise do espectro do concentrado com as assinaturas espectrais dos minerais de referência (vermiculita e hidroxil-apatita); b) Resultado da mistura espectral dos minerais de referência e o espectro do concentrado de fosfato interpretado.....	56
Figura 5.30. Fusão HSV da imagem ASTER 3N com o resultado SFF dos minerais de referência Flogopita, Dolomita e Hidroxil-apatita da USGS.....	58
Figura 5.31. Fusão HSV da imagem ASTER 3N com o resultado SFF da amostra de Foscorito CF 003 do Complexo de Catalão I.....	58
Figura 5.32. Fusão HSV da imagem ASTER 3N com resultado SFF dos minerais de referência Apatita e Dolomita da JPL.....	59
Figura 5.33. Fusão HSV da imagem ASTER 3N com resultado SFF da amostra de solo apatita-magnetita (AMS 01) do Complexo de Catalão I.....	59
Figura 5.34. Espectro de emissividade da apatita da biblioteca de referencia da ASU, reamostrados para as bandas termiais do sensor ASTER, com espectro representando a média aritmética do mineral apatita.....	60
Figura 5.35. <i>Z-Profile</i> aplicado sob a mina de Catalão I na imagem ASTER – TIR.....	61
Figura 5.36. Classificação SFF aplicada sob a Mina de Catalão I utilizando a imagem termal do ASTER, em destaque a Mina de Catalão I e a área de rejeito da mina.....	62
Figura 5.37. Resultado final da imagem ASTER na faixa do Termal: classificação SFF reamostrada para faixa do visível por meio da banda 3N, em detalhe a área de estudo e as áreas propicias a ocorrência de depósitos de fosfato.....	63
Figura 5.38. Fusão da classificação SFF com a imagem 3N do visível. Em destaque as regiões que obtiveram os melhores resultados: A - área de estudo (Mina Fosfértil); B – pequenas exposições de frente de lavras; C – solos sem cobertura vegetal.....	64
Figura 5.39. <i>ROIs</i> da região de Campos Belos sob imagem ASTER-R1G3B2.....	65

Figura 5.40. Espectros das médias aritméticas de cada <i>ROIs</i> de áreas específicas na imagem ASTER-VNIR.....	66
Figura 5.41. Espectros das amostras de campo reamostradas para as bandas do ASTE.....	67
Figura 5.42. Espectros não reamostrados para as bandas do ASTER das amostras coletadas em campo na região de Campos Belos (GO).....	67
Figura 5.43. Curvas espectrais do primeiro grupo de amostras de campo com suas respectivas absorções (setas vermelhas) e minerais de referência Hematita e Limonita das bibliotecas USGS e JPL com suas principais absorções na faixa do visível e infravermelho próximo (VNIR).....	68
Figura 5.44. Curvas espectrais do segundo grupo das amostras de campo com suas absorções destacadas por setas vermelhas e a mistura espectral entre os minerais de referência Goetita e Limonita da biblioteca da USGS, correspondendo às expectativas de similaridades com as amostras de campo....	69
Figura 5.45. Comportamento espectral e feições de absorção dos espectros das amostras de Campos Belos (GO) na faixa do infravermelho de ondas curtas (<i>SWIR</i>).....	70
Figura 5.46. Difrátogramas das amostras do grupo A (ICSB 1A, ICSB 1C, ICC 1A, ICC 2C, ICC 2D e ICC 2D, adquiridos por meio de difração de raios-X.....	71
Figura 5.47. a) curvas espectrais do grupo A (ICSB 1A e 1C, ICC 1A, 2B, 2C e 2D) com as assinaturas espectrais do Rutilo, Quartzo, Caulinita, Illita e Hidroxil-apatita da USGS; b) curvas espectrais e as absorções das amostras do grupo A, com o assinatura da mistura espectral (vermelho) da biblioteca de referência (USGS).....	73
Figura 5.48. Feições de absorção do espectro reamostrado da mistura espectral do grupo A.....	74
Figura 5.49. Fusão entre a banda 3N do VNIR com a imagem <i>Scale</i> da Classificação SFF sobre o SWIR.....	75
Figura 5.50. Difrátogramas das amostras do grupo B (ICSB 1B, ICC 1E e 1F), adquiridos por meio da análise de difração de raios-X.....	77
Figura 5.51. a) curvas espectrais do grupo B (ICSB 1B, ICC 1E e 1F) com as assinaturas espectrais da Hidroxil-apatita, Illita e Quartzo da USGS; b) curvas espectrais e as absorções das amostras do grupo B, com a assinatura da mistura espectral (vermelho) da biblioteca de referência (USGS).....	78
Figura 5.52. Feições de absorção do espectro reamostrado da mistura espectral do grupo B.....	79
Figura 5.53. Classificação SFF do subsistema SWIR utilizando como <i>endmembers</i> à mistura espectral representativas das amostras de campo do grupo B.....	80
Figura 5.54. Espectros de emissividade da apatita da biblioteca de referência da ASU, reamostrados para as bandas termais do ASTER, destacando sua média.....	81
Figura 5.55. Resultado da classificação SFF - imagem <i>Scale</i> com aspecto litológico e base de dados cartográficos para melhor correlação, destacando em vermelho as áreas mais propícias à existência de minerais apatíticos na área de estudo e nas proximidades.....	82
Figura 5.56. a) Classificação SFF fusionada com a banda 3N do visível, destacando em cores avermelhadas as áreas mais propícias a existência de apatita (Fosfato); b) Composição R1G3B2 do	

subsistema *VNIR*, proporcionando uma falsa coloração para melhor observação de regiões propícias à prospecção de depósitos de fosfatos.....83

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

Figura 6.1. Resultado da Classificação SFF do subsistema *VNIR* da área 1 (Catalão), obtida por meio do mineral de referência da monazita (ETR).....86

Figura 6.2. Resultado da Classificação SFF do subsistema *SWIR* da área 1 (Catalão), obtida por meio dos minerais de referência coletados em campo (apatita, hidroxil-apatita, dolomita e flogopita)..... 87

Figura 6.3. Resultado da Classificação SFF do subsistema *TIR* da área 1 (Catalão), obtida por meio do mineral de referência da apatita (*ASU*)..... 88

Figura 6.4. Resultado da Classificação SFF do subsistema *TIR* da área 2 (Campos Belos), obtida por meio do mineral de referência da apatita (*ASU*).....89

1.1 INTRODUÇÃO

Segundo Novo (2008), sensoriamento remoto é uma tecnologia que possibilita obter imagens da superfície terrestre, por meio da captação e do registro da energia eletromagnética refletida, emitida ou retroespalhada pela superfície dos objetos sem contato direto com o alvo.

O sensoriamento remoto moderno ou ao nível orbital, teve início na década de 1960, com a jornada do homem ao espaço em satélites tripulados e de lá observar a Terra tomando as primeiras fotos da superfície terrestre, utilizando apenas câmeras fotográficas manuais. Foram essas experiências, realizadas com os programas espaciais tripulados, Mercury, Gemini e Apollo, que asseguraram o futuro do sensoriamento remoto. E deste então, o sensoriamento remoto se desenvolveu com uma rapidez impressionante, e em poucas décadas gerou uma revolução científica, proporcionando a observação da Terra numa escala global e periódica, com meios rápidos para monitorar os fenômenos dinâmicos e as mudanças das feições terrestres (Meneses, 2011).

O LandSat foi o primeiro satélite ocidental de sensoriamento remoto terrestre não tripulado a ser posto em órbita na Terra, lançado em 23 de julho de 1972, e seguido de mais seis lançamentos posteriores, que representaram avanços no sensor relativos a sua evolução. O advento desse satélite deu início a uma gama de possibilidades de análises de grandes áreas, em escalas regionais, além de, mais recentemente, a alta resolução espacial de alguns deles, permitirem estudos de detalhe, tendo a vantagem de uma grande precisão cartográfica. Este progresso científico refletiu em avanços nos estudos geológicos, auxiliando no mapeamento litológico, na identificação de estruturas geológicas (dobras, falhas, fraturas), em levantamento hidrogeológicos, geomorfológicos e de solos; como também na prospecção de óleo e de gás (hidrocarbonetos), de bens minerais (ouro, cobre, ferro, fosfato), dentre outros.

Posterior ao LandSat e outros satélites de configurações semelhantes, surgiu o sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), oferecendo promissoras potencialidades para a discriminação de alvos geológicos (Van de Meer, 1999). Este sensor encontra-se a bordo do Satélite TERRA (*EOS-AM1*), e se compõe de três subsistemas distintos: VNIR (*Visible and Near Infrared*) com 3 bandas, SWIR (*Shortwave Infrared*) com 5 bandas e TIR (*Thermal Infrared*) com 6 bandas, somando um total de 14 bandas, considerado como um sensor multiespectral em funcionamento desde 1999. As imagens deste sensor, distribuídas nas regiões do visível e do infravermelho óptico e termal do espectro eletromagnético, refletem em um significativo avanço na discriminação de rochas e de minerais. E podem ser processadas através de rotinas computacionais específicas, aplicando técnicas de mapeamento e classificação espectral.

Atualmente as imagens ASTER vêm sendo utilizadas como um dos principais recursos do sensoriamento remoto para a extração de informações sobre o comportamento espectral de materiais, e como uma técnica de espectrorradiometria por imageamento (Meneses & Netto, 2001). Vários estudos foram realizados, baseados nestas perspectivas, como os trabalhos de Crósta *et al.* (2002), Souza Filho *et al.* (2003), Lima (2003), Hoff *et al.* (2004), Lima (2004), Ducart *et al.* (2004), Galvão *et al.* (2005), Hoff *et al.* (2005), Filho *et al.* (2005), Carrino & Filho

(2007), Vicente *et al.* (2007), Bergmann *et al.* (2008), Cerqueira & Abram (2008), Carmelo *et al.* (2009) e Pedrosa *et al.* (2010). Estes estudos demonstraram a importância e a eficiência da utilização de dados de sensores remotos na pesquisa geológica e de recursos naturais.

A espectrorradiometria de reflectância é uma técnica que tem a função de medir em diferentes comprimentos de onda a energia eletromagnética refletida da superfície dos objetos e representá-la na forma de um gráfico que se denomina de *curva de reflectância espectral* (Meneses & Netto, 2001).

As imagens de reflectância do espectro óptico foram utilizadas por muitos anos para obter informações de composição dos materiais da superfície da Terra, mas atualmente, com as possibilidades do sensor ASTER, imagens multiespectrais na faixa do termal (TIR), se colocam como uma nova perspectiva para a pesquisa geológica de depósitos minerais. A faixa do infravermelho termal (TIR) do sensor ASTER possui 5 bandas (10 a 14) espectrais, operando nas faixas de 8,125-10,95 μm . As imagens deste subsistema atuam segundo o conceito físico teórico de corpo negro, que é uma fonte perfeita de emissão de radiação, que a intensidade da energia emitida pelos objetos tem como principal propriedade física a emissividade e sua temperatura de superfície.

Com base nestes conceitos, a análise espectrorradiométrica vem apresentando um grande avanço metodológico, em conjunto com processamentos digitais de imagens multiespectrais, utilizando-se de metodologias de processamento desenvolvidos para dados hiperespectrais. Baseiam-se essas técnicas na detecção de membros finais (*pixels* puros) existentes na cena, que, por exemplo, possibilitam a identificação de minerais segundo um classificador espectral. Esta metodologia foi utilizada nesta presente pesquisa para identificar depósitos de fosfatos em áreas sedimentares e ígneas.

O desenvolvimento de pesquisas sobre depósitos de fosfatos justifica-se devido à alta demanda comercial deste produto no Brasil e no mundo, além do fato do elemento principal do fosfato, o fósforo, ser pouco abundante. Estes dois fatos desencadearam a necessidade da utilização de novas técnicas para ajudar na detecção de novos depósitos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral:

Avaliar a potencialidade das imagens dos subsistemas VNIR (*visible and near infrared radiation*), SWIR (*short wave infrared radiation*) e TIR (*thermal infrared radiation*) do Sensor ASTER através do mapeamento espectral de depósitos de fosfatos em diferentes litologias.

1.2.1 Objetivos específicos:

- Caracterização espectrorradiométricas em laboratório de fosforitos (carbonatos) e foscoritos (carbonatitos);
- Classificação espectral dos depósitos de fosfatos nos diferentes contextos geológicos (sedimentar e ígneo) utilizando técnicas hiperespectrais em imagens multiespectrais ASTER, aplicando a classificação SFF (*Spectral Features Fitting*);

- Identificação de possíveis feições características de depósitos de fosfatos em diferentes litotipos, avaliando o comportamento espectral de cada depósito (Campos Belos e Catalão);

1.3 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

As áreas de estudos estão situadas na região sudeste (área 1) e nordeste (área 2) do Estado de Goiás. A área 1 está localizada próximo a cidade de Catalão (GO), cerca de 20km a nordeste da cidade com coordenada central de 18°08' S e 47°48' W. O acesso pode ser realizado através da BR-050 partindo da cidade de Brasília (DF) até Catalão (GO), com uma distância aproximada de 321 km. O acesso a área 2 foi realizado pela BR-020 e GO-118, com coordenadas central de 12°59'41.13" S e 46°43'21.24" W, cujo percurso total partindo de Brasília possui aprox. 398 km, abrangendo ainda, parte do estado de Tocantins, no município de Arraia (Figura 1.1).

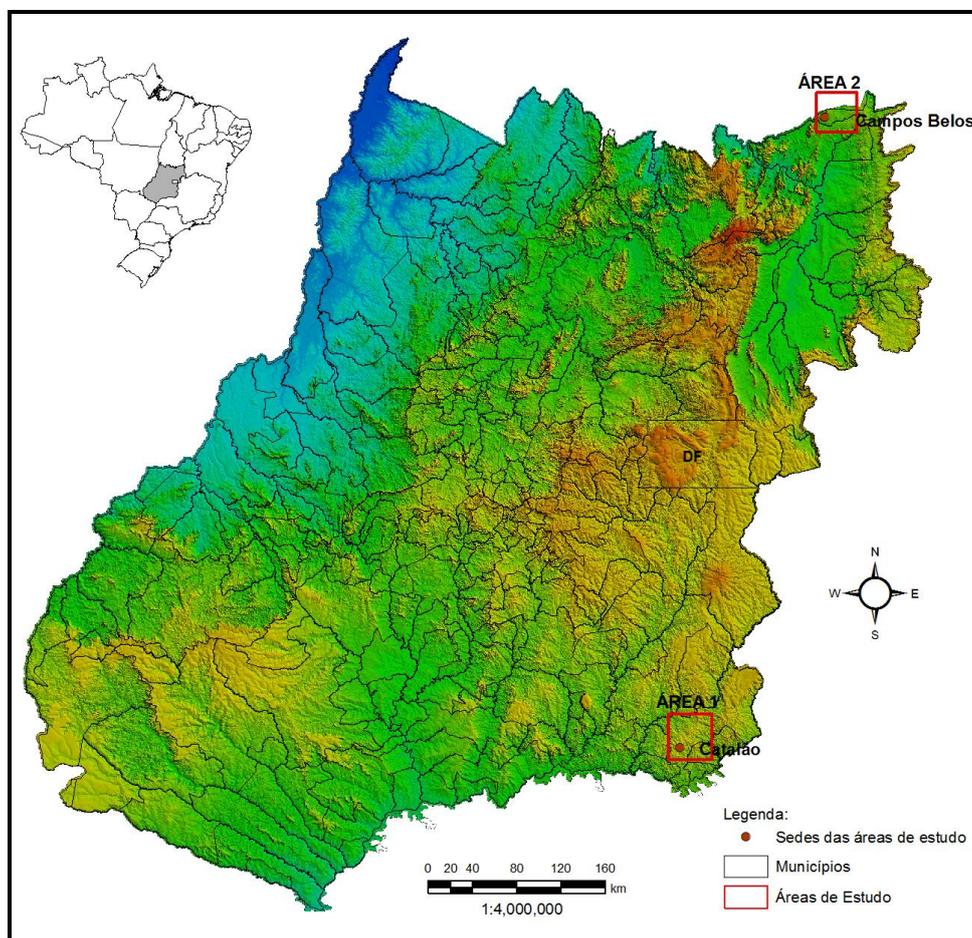


Figura 1.1. Modelo Digital de Elevação do Estado de Goiás, em detalhe as áreas de estudo.

Estas áreas (Catalão e Campos Belos) foram selecionadas para realização deste estudo devido à existência de jazidas minerais de fosfatos com a presença de pouca cobertura vegetal e a disponibilidade de mapeamentos geológicos de detalhe, realizados por Fava (2001), Cordeiro *et al.* (2009) e Barbosa *et al.* (2009) em Catalão, e por Monteiro (2009) em Campos Belos.

2.1 ASPECTOS GERAIS DOS FOSFATOS

Na tabela periódica, o fósforo é o elemento químico de número atômico 15, não metálico, reativo com diversos compostos importantes e não se encontra livremente na natureza, possuindo, portanto papel fundamental na vida animal ou vegetal, pois não existe substituto e nem reposição para ele. Este elemento ocorre em forma de sais, denominado de fosfato, cuja principal aplicação é na agricultura, como fertilizante e apenas os minerais da série da apatita são aproveitados como fonte deste bem mineral (Lapido-Loureiro *et al.*, 2005).

O fosfato é um íon poliatômico ou um radical consistindo de um átomo de fósforo e quatro de oxigênio e na forma iônica tem a carga formal de -3, sendo denotado como PO_4^{3-} . Os fosfatos incluem numerosas espécies minerais de composição bem variada, embora a quantidade em peso deste elemento na crosta terrestre seja relativamente pequena, porém resulta em um grande número de minerais raros, como adamita, ambligonita, autunita, brasilianita, eritrita, lazulita, vanadinita, torbenita, monazita, fosforita, cloroapatita, fluorapatita, hidroxil-apatita, cabornato-fluoroapatita ou francolita e carbonato-hidroxil-apatita. Tem como mineral mais importante e freqüente a apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$), de número 5 na escala de Mohs. Apresenta solução sólida com os ânions flúor, cloro, oxigênio e hidroxila, por vezes, sob determinadas condições, ocorre substituição parcial do fosfato pelos grupos carbonato e silicato, onde o cálcio pode ser substituído pelo Mn, Sr, Pb, Cu, Zn, La e outros elementos terras raras. Esta relação iônica complexa, típica dos fosfatos, resultam em relações química e estruturas complexas (Machado, 2003).

Os depósitos de rochas fosfatadas podem ser originados a partir de eventos ígneos, sedimentares, metamórficos, residuais zoógenos (tipo ilha) e meteóricos. Sendo os depósitos de origem sedimentar e ígnea os mais importantes no ponto de vista econômico (Amaral, 1997). As maiores reservas de fosfato no mundo estão situadas no Marrocos e Oeste do Saara, seguido da China e dos Estados Unidos, todos de origem sedimentar com poucas ocorrências de depósitos de origem magmática (Figuras 2.1) (Amaral, 1997).

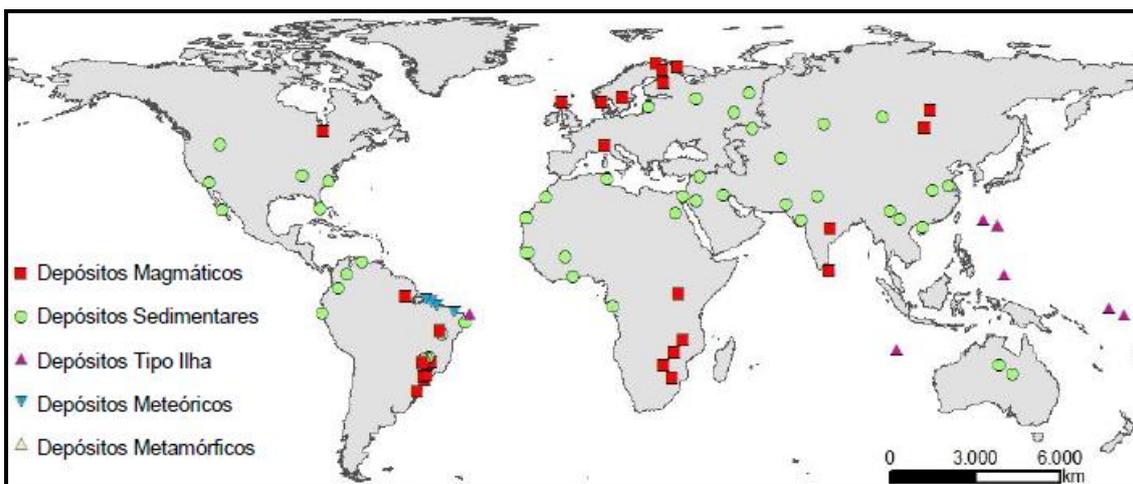


Figura 2.1. Distribuição espacial dos principais depósitos de fosfato no mundo (Amaral, 1997).

A China é considerada a maior produtora de fosfato em escala mundial, produzindo cerca de 35.000 Mt de fosfato (2007) (Figura 2.2). Já o Brasil é o sexto maior produtor mundial de rocha fosfatada, com a produção de 6.185 Mt (2.189 Mt em P_2O_5) e reservas de 319.156 Mt (Souza & Cardoso, 2008 *in* Souza, 2009).

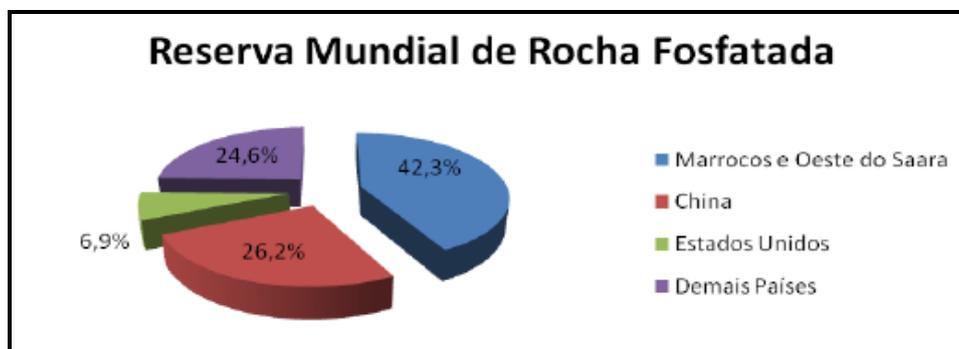


Figura 2.2. Reserva mundial de rocha fosfatada em 2007, dados do sumário anual 2008 do DNPM (Souza & Cardoso, 2008 *in* Souza, 2009).

No Brasil, diferente dos demais países produtores de fosfatos no mundo, possui cerca de 80% das jazidas de fosfatos de origem ígnea com presença acentuada de rochas carbonatíticas e minerais micáceos com baixo teor de P_2O_5 (Souza, 2001). Estes depósitos ocorrem em forma de intrusões carbonatíticas que hospedam os maiores volumes de fosfatos (P_2O_5) e estão associadas ao lineamento azimuth 125°. Este tipo de depósito é encontrado nos estados de Minas Gerais, Goiás, Santa Catarina e São Paulo. Já os depósitos de fosfatos de origem sedimentar são formados em bacias Neoproterozóicas de margem passiva, localizadas nos estados de Minas Gerais, Tocantins e Bahia, com algumas ocorrências no estado de Goiás no Grupo Bambuí (Monteiro, 2009). Com base nestes dados, nota-se que a maioria dos minérios fosfáticos produzidos no Brasil provém de depósitos de origem magmática, normalmente complexos carbonatíticos, e não de rochas sedimentares, como na maior parte mundo.

Os depósitos de fosfatos estudados neste trabalho estão situados no estado de Goiás, abrangendo duas diferentes origens, uma oriunda de depósitos de origem ígnea e outra de depósitos sedimentares, ambos são considerados importantes do ponto de vista econômico.

2.2 GEOLOGIA DAS ÁREAS DE ESTUDO

2.2.1 Catalão (área 1)

A área 1 faz parte da Província Ígnea do Alto Paranaíba (Cretáceo Superior), situada entre a borda sudoeste do Cráton São Francisco e a borda nordeste da Bacia do Paranoá, composta por rochas alcalinas (kamafugíticas, kimberlíticas e carbonatito-foscorito) que ocorrem nos estados de Goiás e Minas Gerais, situadas no Brasil Central. Esta Província está representada por uma variedade de magmas ultrapotássicos encaixados em rochas metassedimentares do Grupo Araxá, pertencentes ao cinturão móvel da Faixa Brasília (Proterozóico) (Gibson *et al.*, 1995).

O complexo Carbonatítico de Catalão I está situado entre as cidades goianas de Catalão, Ouvidor e Três Ranchos, ocupando uma área de aproximadamente 27 km², com morfologia na forma de um platô anelar concêntrico (dômo), sustentados por rochas encaixantes quartzíticas fenitizadas, geradas durante o evento intrusivo do complexo, possuindo eixos NW (6km) e NE (5km), limitados por falhas profundas na direção NW. Estas intrusões são compostas de dunitos, peridotitos, piroxenitos, kimberlitos, basanitos, andesito-basálticos, sienitos, traquitos, sienogabros e carbonatitos afetados por metassomatismo com geração de foscoritos e glimeritos. Tais intrusões produziram auréolas de fenetização resultantes da reação entre as soluções ígneas, ricas em álcalis e alumina, e os xistos aluminosos do Grupo Araxá, o que resultou em feldspatização, nefelinização e aegerinização, brechação e pegmatização, apresentando, portanto reservas de fosfato, nióbio, titânio, terras raras e vermiculita (Carvalho, 1974; Baecker, 1983; Danni *et al.*, 1991; Gibson *et al.*, 1995; Thompson *et al.*, 1998; Brod *et al.*, 2004; Ribeiro *et al.*, 2005; Cordeiro, 2009).

O Complexo de Catalão I consiste em um corpo intrusivo formado por rochas da série bebedourítica (piroxenitos) na borda e das séries carbonatíticas e foscoríticas no centro, composto predominantemente por bebedourito, clinopiroxenito, dunito, carbonatito, foscorito e flogopititos metassomáticos. No corpo intrusivo os flogopititos se localizam na borda e os foscoritos e carbonatitos nas porções mais centrais (Figura 2.3). As rochas da série-foscorítica foram consideradas as mais interessantes para este estudo, devido à abundância de minerais de apatita e de silicatos magnesianos (flogopita e/ou olivina) (Brod *et al.*, 2004; Cordeiro, 2009). Segundo Brod *et al.* (2004) a predominância dos flogopititos comprova o intenso metassomatismo que afetou as rochas ultramáficas primárias.

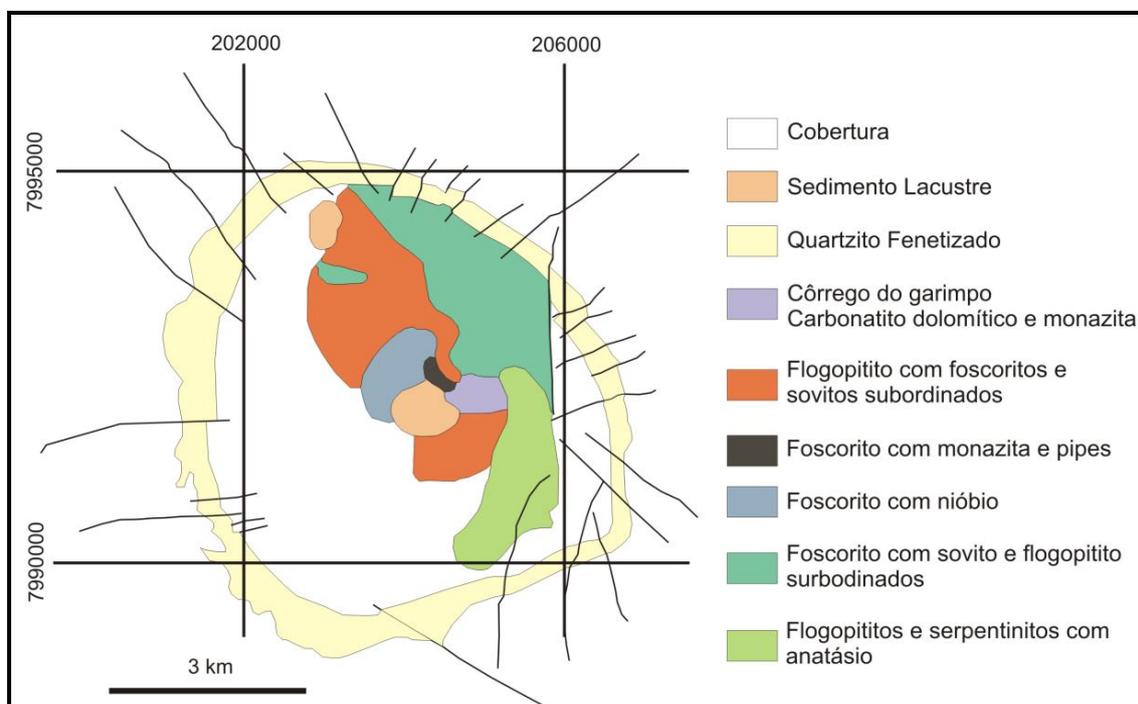


Figura 2.3. Mapa geológico do Complexo Catalão I (Brod *et al.*, 2004).

Segundo Ribeiro (2008) a evolução magmática originou-se pela série bebedourítica, onde a imiscibilidade de um magma primitivo sílico carbonatado gerou um líquido silicático, que por processos de diferenciação formou os dunitos, piroxenitos e veios carbonáticos. Na segunda fase da evolução ocorreu outro processo de imiscibilidade, de líquido carbonatítico, que se repartiu em dois líquidos, foscorítico e carbonatítico, o foscorito inicialmente enriquecido em olivina e que evoluiu formando acúmulos de apatita. Na terceira fase houve divisão do membro carbonatítico num segundo sub-trajeto foscorítico e outro carbonatítico. O segundo foscorito não tem olivina, mas é rico em pirocloro e magnetita. Ribeiro (2008) conclui ainda que os protólitos da mineralização de fosfato foram os piroxenitos tardios da série bebedourítica e os foscoritos da série foscorítica.

Os foscoritos prospectados que fazem parte deste complexo são encontrados principalmente na forma de um material terroso saprolitizado, derivado do processo de intemperismo. Em decorrência da atuação dos processos intempéricos alguns minerais são reconcentrados, como o nióbio, o titânio, terras raras e o fosfato no solo (Yegorov, 2003). Por este complexo apresentar uma diversidade de rochas e mineralizações, os Foscoritos e os dolomitos carbonatíticos associados, são as rochas primordiais para realização deste estudo, denominadas como sendo rochas ígneas intrusivas raras, cuja mineralogia é composta principalmente por apatita, magnetita, diopsídio forsterita/ ou flogopita (Wall & Zaisov, 2004). Tais rochas são o foco deste trabalho, já que a mesma comporta depósitos de fosfatos, industrializados pela empresa de mineração Vale Fertilizantes.

2.2.1 Campos Belos (área 2)

A área 2 engloba terrenos orogênicos neoproterozóicos, conhecidos como Província Tocantins, localizado no Brasil Central, integrando o sistema Brasileiro/Pan-Africano. A Província Tocantins é limitada a Oeste pelo Cráton Amazônico, a Leste pelo Cráton São Francisco, a Norte e Sul pelos depósitos fanerozóicos das bacias do Parnaíba e Paraná, respectivamente (Almeida *et al.* 1977, 1981; Almeida & Hasui 1984).

Geologicamente, o Grupo Bambuí se distribui ao longo da porção leste da Faixa de Dobramentos Brasília (FDB), margeando o Cráton São Francisco, onde estão inseridas ocorrências de rochas fosfatadas e fosforitos. Pode-se ainda, observar nas rochas do Grupo Bambuí, um padrão de dobramento assimétrico formado em condições compressivas dúcteis-rúpteis, com vergência para leste, além de falhas e fraturas associadas à deformação distensiva rúptil, ocorridas devido a Orogênese Brasileira durante o Neoproterozóico (Alvarenga *et al.* 2006).

O Grupo Bambuí representa extensa cobertura plataformar do Paleocóntinente São Francisco. E compreende uma associação de litofácies pelito-siliciclásticas e carbonáticas de extenso mar epicontinental neoproterozóico. Distribui-se geograficamente ao longo da vasta faixa N-S da região nordeste de Goiás e se estende de forma contínua para os estados da Bahia, Minas Gerais, Tocantins e Distrito Federal. Os primeiros estudos desenvolvidos nesta

unidade foram os de Derby (1880), Rimann (1917), seguidos por Branco & Costa (1961), Oliveira (1967), Almeida (1967), Braun (1968), Barbosa *et al.* (1969), Schöll (1972, 1973), Beurlen (1974), Alvarenga & Dardenne (1978) e Dardenne (1978a, b; 1979).

Dardenne (1978a) divide o grupo Bambuí, da base para o topo, nas formações Jequitaiá, Topázios, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade, reunidas no Supergrupo Paraopeba, e a Formação Três Marias, topo do grupo.

A formação Sete Lagoas corresponde à região de interesse deste trabalho, sendo composta predominantemente por rochas pelíticas, carbonáticas e fosfatadas, distribuídas a leste no embasamento granítico (Grupo Aurumina) (Figura 2.4). A origem desta formação sugere um ambiente *tardi* ou pós-glacial, assim determinado a partir da assinatura isotópica de C e O, com variações ao longo da coluna que indicam flutuações climáticas e/ou aportes de águas de mar aberto (Santos *et al.*, 1997). A formação representa a edificação de bioconstruções carbonáticas e depósitos de retrabalhamento em plataforma rasa, por vezes, de ambiente de planície de maré (Lima & Uhlein, 2005).

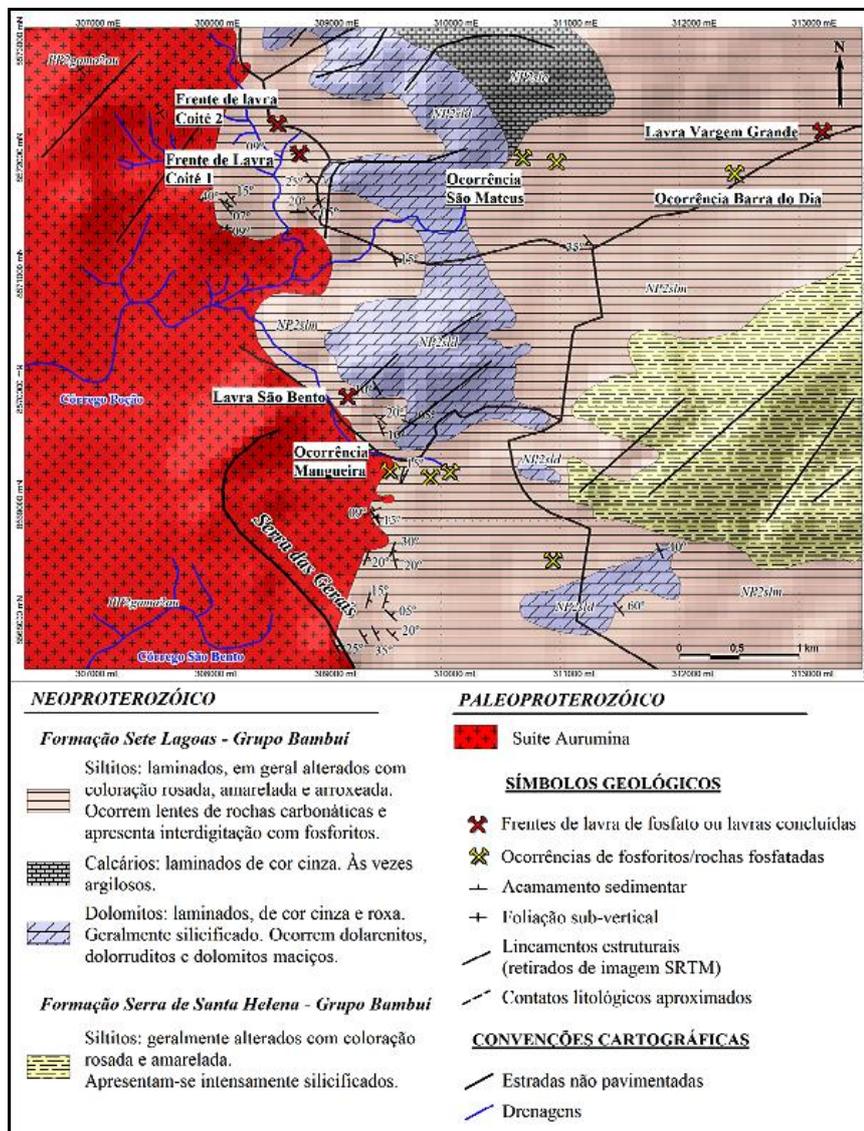


Figura 2.4. Mapa geológico da área de estudo (Monteiro, 2009).

Segundo Monteiro (2009), a Formação Sete Lagoas apresenta três conjuntos de litofácies: a primeira (*NP2slm*) corresponde à unidade basal da formação, constituída por margas, siltitos maciços, siltitos laminados, siltitos calcíferos, siltitos fosfatados e fosforitos, que apresentam níveis fosfolutitos intemperizados com teor médio de 22% de fosfato (P_2O_5); a segunda litofácies (*NP2slc*) corresponde à unidade mais delgada da formação, compreendendo calcários argilosos acinzentados e calcários laminados, por vezes dobrados; e a terceira litofácies (*NP2sld*) é constituída por extensas lentes de rochas dolomíticas, formando grandes paredões com aspecto runiformes, que se sobrepõem aos siltito, na direção NNW-SSE, acompanhando o embasamento granítico do grupo Aurumina. O primeiro conjunto de litofácies é o mais importante, economicamente, para prospecção de fosfatos como insumos de fertilizantes para agricultura, atualmente extraídos pela Itafós mineração Ltda e são as rochas focos deste estudo.

Neste primeiro conjunto Monteiro (2009), definiu ainda, 4 grupos de minério fosfático, com base em análises petrográficas, mineralógica e químicas, classificados como fosforito primário estratificado, fosforito brechado, fosforito pedogênico e siltito fosfatado. Os quais são constituídos mineralogicamente por:

- Fosforito estratificado: quartzo, fluroapatita e ilita;
- Fosforito brechado: quartzo e fluroapatita;
- Fosforito pedogênico: quartzo, fluorapatita, caolinita, ilita e mais raramente bohmita;
- Siltito fosfatado: fluroapatita, quartzo e ilita.

Tal assembléia mineral serviu de base para as análises espectrais do presente estudo.

3.1 CONCEITO DE SENSORIAMENTO REMOTO

Alguém disse: “*Suba ao espaço para ver a Terra*”. E os sensores a bordo dos satélites de sensoriamento remoto tornaram-se extensões dos olhos humanos para ver nosso planeta. Esses “olhos” conseguiram superar o poder da visão do homem, estendendo sua capacidade de identificar os objetos terrestres muito além dos comprimentos de onda da luz normalmente percebidos, identificando formas que antes desconhecíamos (Meneses & Netto, 2001).

Para Meneses (2011), o sensoriamento remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento de técnicas de obtenção e extração de informações sobre os objetos da superfície terrestre, por meio da detecção e medição das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais. Como processo, o sensoriamento remoto envolve a detecção, aquisição, processamento e análise da energia eletromagnética emitida, refletida ou retroespalhada pelos objetos terrestres e registradas por sensores. A energia proveniente do objeto é convertida em um sinal elétrico e transformada em um valor digital, passível de ser utilizado como informação. Essas informações podem ser expostas na forma de gráficos, tabelas ou imagens (Florenzano, 2007).

Para explicitar de forma fácil o que é sensoriamento remoto, um modelo clássico que ilustra este conceito, pode ser observado na Figura 3.1, sintetizando os três componentes básicos: fonte, alvo e sensor. A atmosfera se interpõe como um quarto componente, mas no sentido de apenas interferir no sinal radiométrico, que dos alvos é enviado ao sensor. O sensoriamento remoto é utilizado em escala mundial e reúne mais do que qualquer outra tecnologia para levantamento de dados da superfície terrestre, uma infinidade de pesquisadores e usuários. Suas aplicações fazem interfaces com diversas áreas do conhecimento, e seu uso está, praticamente, presente em todos os estudos e pesquisas relacionadas com a informação do espaço terrestre.

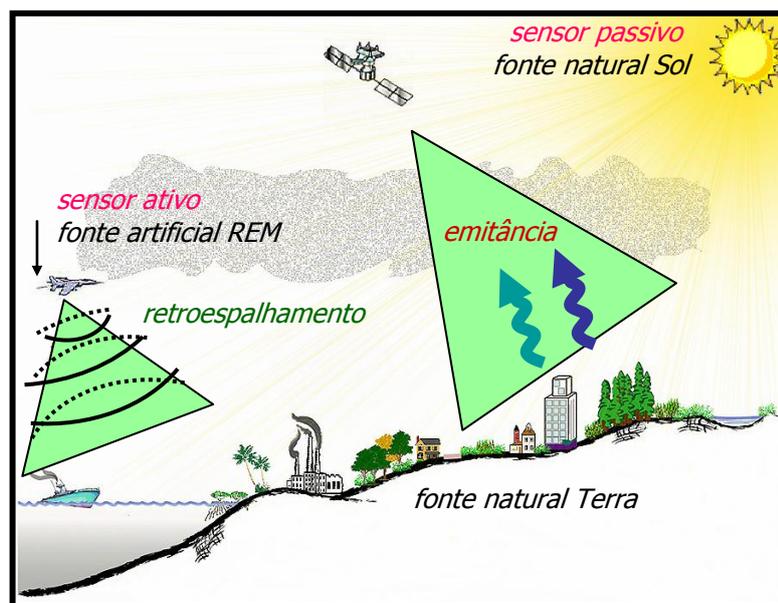


Figura 3.1. Componentes básicos de um sistema de sensoriamentos remoto: fonte, alvo e sensor (Meneses, 2011).

Segundo Slater (1980) a radiação eletromagnética (REM) é o meio pelo qual a informação é transferida do objeto ao sensor, de forma dinâmica, por meio da energia eletromagnética que se manifesta a partir de sua interação com os materiais. Devido à movimentação das partículas dos átomos e das moléculas, a energia eletromagnética é gerada e emitida por qualquer corpo que esteja a uma temperatura acima de zero absoluto (-273°C ou 0°K), considerado portanto, como uma fonte de radiação eletromagnética (REM). O Sol e a Terra são as fontes naturais de energia eletromagnética utilizadas no sensoriamento remoto da superfície terrestre. Emitem radiação com alta intensidade, respectivamente nos intervalos de comprimento de $0,45$ a $2,5\ \mu\text{m}$ e de 8 a $14\ \mu\text{m}$. O Sol é uma fonte bem mais potente que a Terra, porque quanto maior for a temperatura da fonte maior é a sua potência radiante de energia eletromagnética (Moraes, 2002).

Há duas teorias que explicam a natureza e propagação da radiação eletromagnética e que tem implicações na sua interação com a matéria: o modelo ondulatório e o corpuscular. Segundo o modelo ondulatório a REM pode ser explicada como uma forma de onda senoidal e harmônica. De acordo com as formulações de Maxwell uma partícula carregada eletricamente gera um campo elétrico em torno de si e o movimento dessa partícula gera, por sua vez, um campo magnético. Ambos os campos, elétrico e magnético, atuam vibrando ortogonalmente entre si e possuem as mesmas amplitudes, isto é, alcançam os seus máximos ao mesmo tempo. As variações do campo são causadas pelas vibrações da partícula. Quando essa partícula é acelerada, as perturbações entre os dois campos se propagam repetitivamente no vácuo em uma direção ortogonal à direção dos campos elétricos e magnéticos, como é mostrado na Figura 3.2. Essas perturbações dos campos elétrico (E) e magnético (M) são chamadas de ondas eletromagnéticas. Assim, define-se uma onda eletromagnética como a oscilação dos campos E e M, segundo um padrão harmônico de ondas, isto é, ondas espaçadas repetitivamente no tempo.

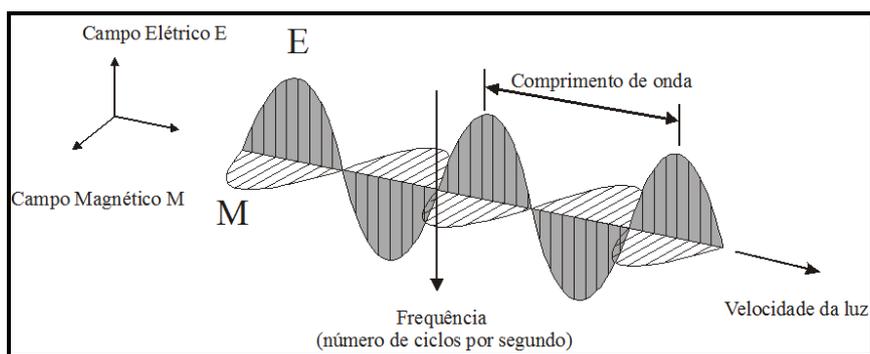


Figura 3.2. Modelo ondulatório da propagação da radiação eletromagnética, em função das vibrações ortogonais dos campos elétrico (E) e magnético (M).

A teoria do modelo Corpuscular surgiu nos meados do século XIX, com a descoberta de Albert Einstein propondo que quando a luz interage com os elétrons, ela tem um caráter diferente. Sendo assim, esta teoria fundamenta-se na afirmativa de que quando a energia atinge a superfície dos materiais, ela interage com o meio proporcionando trocas de energias

discretas entre o material e a radiação (Meneses, 2006a). Isso acontece porque a onda eletromagnética carrega corpos de energia, chamado de fótons, e explicam os processos de absorção e reflectância de radiação eletromagnética (REM) quando ela interage com os materiais.

3.2 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

O espectro eletromagnético representa a distribuição da radiação eletromagnética, por regiões, segundo o comprimento de onda e a freqüência. A radiação eletromagnética (REM) deve ser vista como um espectro contínuo, porém, o espectro eletromagnético foi arbitrariamente dividido pelo homem em intervalos de comprimentos de onda com base nos mecanismos físicos geradores da energia eletromagnética e nos mecanismos físicos de sua detecção (Florenzano, 2007).

O espectro eletromagnético apresenta subdivisões de acordo com as características de cada região. Cada subdivisão é função do tipo de processo físico que dá origem à energia eletromagnética, do tipo de interação que ocorre entre a radiação e o objeto sobre o qual esta incide, e da transparência da atmosfera em relação à radiação eletromagnética. Este se estende desde comprimentos de onda muito curtos associados aos raios cósmicos, até as ondas de rádio de baixa freqüência e grandes comprimentos de onda, cujos intervalos ou faixas de comprimento de onda da REM, recebem as denominações de: ultra-violeta, visível (luz branca), infravermelho (próximo, médio ou de ondas curtas, distante ou termal), microondas, e que são possíveis de serem detectados por determinados tipos de sistemas sensores (Figura 3.3) (Novo, 2008).

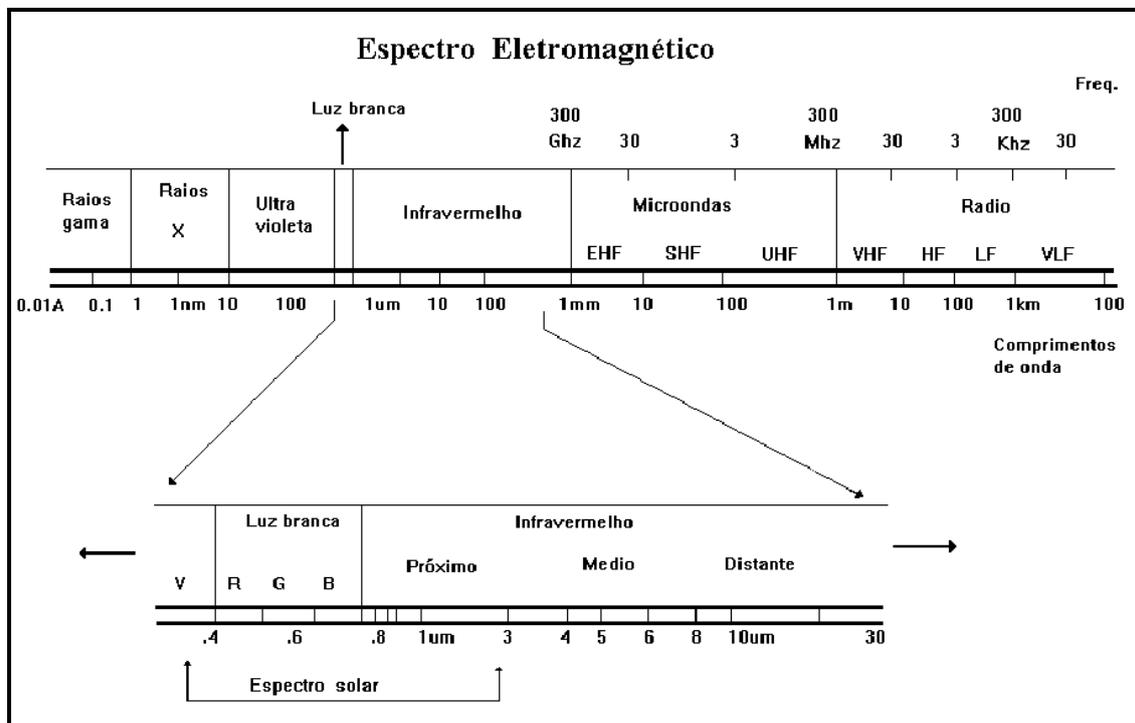


Figura 3.3. Regiões do espectro eletromagnético, em destaque a região do visível e infravermelho (próximo, médio e termal).

3.3 SENSOR ASTER

O sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission*) é um dos cinco sensores de imageamento que estão a bordo da plataforma Terra, satélite lançado em 18 de dezembro de 1999 como parte do programa *Earth Observing System* (EOS) da NASA. Este satélite opera a uma altitude de 705 km, possui faixa de imageamento no terreno de 60 km e cruza o equador às 10:30 hs.

O ASTER é um esforço de cooperação entre a NASA e o Ministério do Comércio Internacional e Indústria do Japão. Foi projetado para obter dados detalhados de temperatura, emissividade, reflectância e topografia da superfície da Terra, visando um melhor entendimento das interações entre a biosfera, hidrosfera, litosfera e atmosfera. É o único instrumento com resolução espacial relativamente alta a bordo do satélite TERRA (NASA ASTER, 2006).

A faixa espectral coberta pelo ASTER estende-se de 0,53 a 11,65 μm , constituindo 14 bandas subdivididas em três subsistemas de imageamento separados, cada um com resolução espacial e espectral diferentes. Cada subsistema opera em uma região espectral diferente: visível e infravermelho próximo (VNIR); infravermelho de ondas curtas (SWIR); e infravermelho termal (TIR), conforme mostra a Tabela 3.1 (ENGESAT, 2009).

Tabela. 3.1. Parâmetros dos subsistemas do sensor ASTER.

ASTER				
Subsistema	Banda	Intervalo Espectral (μm)	Resolução Espacial	Resolução Radiométrica
VNIR	1	0,52 - 0,60	15 m	8 bits
	2	0,63 - 0,69		
	3	0,76 - 0,86		
SWIR	4	1,60 - 1,70	30 m	8 bits
	5	2,145 - 2,185		
	6	2,185 - 2,225		
	7	2,235 - 2,285		
	8	2,295 - 2,360		
	9	2,360 - 2,430		
TIR	10	8,125 - 8,475	90 m	12 bits
	11	8,475 - 8,825		
	12	8,925 - 9,275		
	13	10,25 - 10,95		
	14	10,95 - 11,95		

3.3.1 Subsistema VNIR (*Visible and Near Infrared Radiation*)

O subsistema de detecção *VNIR* opera em três bandas espectrais dentro da faixa do espectro eletromagnético de 0,52 a 0,86 μm , que compreende porções do visível e do infravermelho próximo, as imagens tendo uma resolução espacial de 15 metros. Possui dois sistemas de visada, um que opera na visada nadir com as três bandas espectrais, e outro que aponta para trás da trilha de imageamento, operando com uma única banda. O telescópio que aponta para trás fornece uma segunda visada do alvo na banda três, a fim de possibilitar uma observação em estereoscopia. A separação das bandas é feita por meio de uma combinação de elementos dicróicos e filtros de interferência (NASA ASTER, 2006; Jensen, 2009).

3.3.2 Subsistema SWIR (*Short Wave Infrared Radiation*)

O subsistema *SWIR* opera com seis bandas espectrais na região do infravermelho de ondas curtas, no intervalo de comprimento de onda de 1,6 a 2,43 μm , por meio de um único telescópio apontado para nadir, e com resolução espacial de 30 metros. Devido o tamanho dos detectores eles estão muito espaçados um em relação ao outro, causando um erro de paralaxe de 0,5 pixels por 900 metros de elevação. Esse erro pode ser corrigido com o uso de modelos numéricos do terreno, quando disponíveis (NASA ASTER, 2006; Jensen, 2009).

3.3.3 Subsistema TIR (*Thermal Infrared Radiation*)

O subsistema *TIR* opera com cinco bandas na região do infravermelho termal (infravermelho distante), usando um único telescópio fixo a nadir, com resolução espacial de 90 metros. Cada banda usa 10 detectores em um arranjo espacial com filtros ópticos específicos para cada banda sobre cada elemento detector.

3.3.4 Produtos e Aplicabilidades

Este sensor oferece diferentes produtos, variando de acordo com o nível e o tipo de correção, conforme a Tabela 3.2.

O ASTER fornece dados úteis para uma variedade de pesquisas científicas, utilizado em diversas aplicações, como: **clima**, investigando parâmetros relacionados à temperatura da superfície e a interação de energia e fluxos de umidade; **vegetação e dinâmica do ecossistema**, investigando a distribuição da vegetação e do solo, observando alterações para estimar a produtividade biológica, assim como a compreensão das interações terra - atmosfera e a detecção das mudanças nos ecossistemas; **hidrologia**, na compreensão global da energia e dos processos hidrológicos e sua relação com as mudanças globais, incluindo a evapotranspiração das plantas; **superfície da Terra e cobertura vegetal**, monitorando a desertificação, desmatamento e urbanização, fornecendo dados para os gestores de áreas protegidas, parques nacionais e desertos; e **geologia e solos**, analisando composição detalhada das rochas e o mapeamento geomorfológico de solos e rochas para estudar os processos da superfície da Terra (NASA ASTER, 2006).

Tabela 3.2. Produtos do sensor ASTER (Fonte: NASA, 2010).

NIVEL	PRODUTOS	DESCRIÇÃO
1A	Radiância no sensor	Dados da imagem mais coeficientes radiométricos e geométricos. Os dados são separados por telescópio.
1B	Registro de radiação no sensor	1A com dados radiométricos e coeficientes geométricos aplicados.
1AE	Radiância no sensor	Produtos criados a partir de dados ASTER Nivel-0 (imagem com correções radiométricas e geométricas), com os dados separados por telescópio.
1BE	Registro de radiação no sensor	Produtos criados a partir de dados ASTER Nível-1AE (com coeficientes radiométrico e geométrico aplicados)
2	AST 05 -	Algoritmo de temperatura em emissividade, com dados de radiância e correção atmosférica de superfície, corrigidos.
2	AST 07	Derivado de radiância de superfície com correções topográficas.
2	AST 07 XT	Derivado de radiância de superfície com correções topográficas - VNIR e SWIR (crosstalk retificado).
2	AST 08	Algoritmo de temperatura em emissividade, aplicados a partir da separação dos dados de radiância e de correções atmosféricas da superfície.
2	AST 09	Radiância corrigida para os efeitos atmosféricos.
2	AST 09 T	Radiância corrigida para os efeitos atmosféricos, com superfície em radiância TIR
2	AST 09 XT	Valores de radiância corrigidos para os efeitos atmosféricos - VNIR e SWIR (crosstalk retificado).
3	AST 14	DEM produzido pela correlação estéreo de nadir e a banda 3.
3	AST 14 OTH	15 imagens ortorretificadas com nível L1B radiância em geotiff.
3	AST 14 DMO	15 imagens ortorretificadas com nível L1B + DEM.

Os dados ASTER podem ser adquiridos gratuitamente por meio de pedidos acadêmicos (projetos) ou podem ser comprados no site do ASTER, dependendo da finalidade do estudo, no endereço eletrônico: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>.

3.4 ESPECTRORRADIOMETRIA

Para compreender o que é espectrorradiometria é necessário entender a definição de radiometria, que segundo Meneses & Netto (2001) é a medida quantitativa da intensidade de qualquer um dos tipos conhecidos de radiação, que no sensoriamento remoto é a radiação eletromagnética emitida pelo Sol e a Terra. Denomina-se de espectrorradiometria a medição da radiação eletromagnética.

A espectrorradiometria é considerada uma das mais importantes e fundamentais áreas do conhecimento do sensoriamento remoto, pois é por meio das medidas

espectrorradiométricas de laboratório ou de campo que se descobre com qual intensidade cada material, seja um solo, um tipo de rocha ou vegetação, reflete ou emite radiação eletromagnética nos diferentes comprimentos de onda, permitindo assim explicar e entender como cada um desses objetos irá surgir nas imagens (Meneses & Netto, 2001).

A espectrorradiometria de reflectância tem a função de medir em diferentes comprimentos de onda, do visível (0,4 – 0,7 μ m), do infravermelho próximo (0,7 – 1,3 μ m) e do infravermelho de ondas curtas (1,3 – 2,5 μ m), a energia eletromagnética refletida da superfície dos objetos, para fins de análise das composições dos materiais, o que normalmente são representadas na forma de gráfico denominado de curva de reflectância espectral. A espectrorradiometria na região do termal possibilita investigar as propriedades de emissividade dos materiais.

Essas medidas espectrais são obtidas por intermédio de um aparelho denominado de espectrorradiômetro. Este aparelho mede a reflectância dos materiais, que é a razão entre a energia refletida e a energia incidente. Os espectrorradiômetros de laboratório utilizados nesta pesquisa foram os modelos *PIMA SP®* (*Portable Infrared Mineral Analyser*) e o *FieldSpec Full Resolution®*, pertencentes ao Instituto de Geociências e ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, respectivamente.

O espectrorradiômetro de reflectância *PIMA SP®*, modelo *integrated spectronics* na versão 2.2, opera entre os comprimentos de onda de 1,3 a 2,4 μ m, não necessita de iluminação solar, pois utiliza como fonte uma iluminação independente, localizado internamente no aparelho e adquire dados em intervalos espectrais de 0,002 μ m. Para realizar medidas neste aparelho é necessária pouca iluminação externa e a amostra deve ser acoplada a uma lente que se encontra posicionada externamente. Para calibração das mediadas, o aparelho utiliza um padrão de referência interna composto de uma placa de ouro, exigindo do usuário apenas um comando para calibração sempre que o aparelho solicitar. As medidas realizadas neste aparelho proporcionam, principalmente, conhecimento sobre composição química e mineralógica, variações granulométricas e de coloração (Figura 3.4).



Figura 3.4. Configuração para medições espectrorradiométricas e em detalhe o espectrorradiômetro *PIMA SP* do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.

O espectrorradiômetro *FieldSpec - FR®*, da *Analytical Spectral Devices* é um equipamento que detecta a radiação eletromagnética no intervalo espectral de 0,35 μm a 2,5 μm , cuja leitura da faixa é realizada por meio de três detectores independentes: 1 espectrômetro formado por arranjo de fotodiodo de silício (512 elementos) cobrindo o intervalo de 0,350-0,999 μm e os outros 2 cobrindo o intervalo de 1,000-1,775 μm e 1,775-2,500 μm , constituídos por *scanners* de alta velocidade de InGaAS, termoeletricamente resfriados. Este equipamento possui alta resolução (1250 canais), sendo 500 canais que cobrem a faixa de 0,35 μm a 1,0 μm (intervalo de amostragem 1,40 nm) e 750 canais recobrando a faixa de 1,0-2,5 μm (intervalo de amostragem 2.00 nm) (ASD 1994, Souza Filho & Crosta 1998; Hatchell, 1999) (Figura 3.5).



Figura 3.5. Sistema de aquisição de dados do espectrorradiômetro *FieldSpec* do Departamento de Geografia da Universidade de Brasília.

3.4.1 Interações na região do visível e infravermelho do espectro eletromagnético

Segundo Novo (2008), a grandeza radiométrica que mais é utilizada para caracterizar as interações entre a energia e a matéria é a reflectância espectral na região do visível e infravermelho do espectro eletromagnético. As interações (energia-matéria) podem ser realizadas em dois níveis: **macroscópico**, cujos processos são descritos pelas leis da óptica geométrica; e **microscópico**, cujos processos são descritos pela espectroscopia e pela física atômica e molecular (Hunt, 1980).

As **interações macroscópicas** são aquelas controladas pelas propriedades ópticas dos materiais e envolvem efeitos como reflexão, refração, transmissão e espalhamento, a depender das características da superfície do material. Os fatores macroscópicos que mais controlam a reflectância nas medidas realizadas em campo ou em laboratório estão relacionados com as características físicas e texturais da superfície, que de certa forma são dependentes do arranjo textural dos elementos, da forma, tamanho, estrutura, e ainda para caso de rochas e solo, granulometria, esfericidade e compactação dos grãos (Adams & Filice, 1967).

Nas **interações microscópicas** a radiação eletromagnética é capaz de penetrar apenas uma finíssima camada da superfície dos objetos, limitada aos primeiros 10 a 50

micrômetros de espessura. Tais interações são responsáveis por determinadas feições de absorção espectral, cujas características dependem do tipo de estrutura interna dos constituintes, do tamanho dos seus raios iônicos, das forças de ligação, e das impurezas iônicas contidas no material (Meneses & Netto, 2001).

Para a espectrorradiometria o modelo quântico é a chave da explicação para descrever as interações microscópicas, pois evidencia que os materiais se diferenciam por constituírem sistemas com diferentes arranjos de níveis de energia, refletindo em respostas indiretas de transições de energia. A energia quântica total contida nos átomos e moléculas é dividida em energia eletrônica, vibracional, rotacional e translacional, sendo as eletrônicas e as vibracionais que mais interessam ao sensoriamento remoto.

Os processos eletrônicos são os que requerem maior energia, contida apenas nos comprimentos de ondas menores, onde ocorrem os processos de transição ou trocas energéticas. A Figura 3.6 mostra os processos de interações da energia eletromagnética com as superfícies dos materiais em função dos comprimentos de onda.

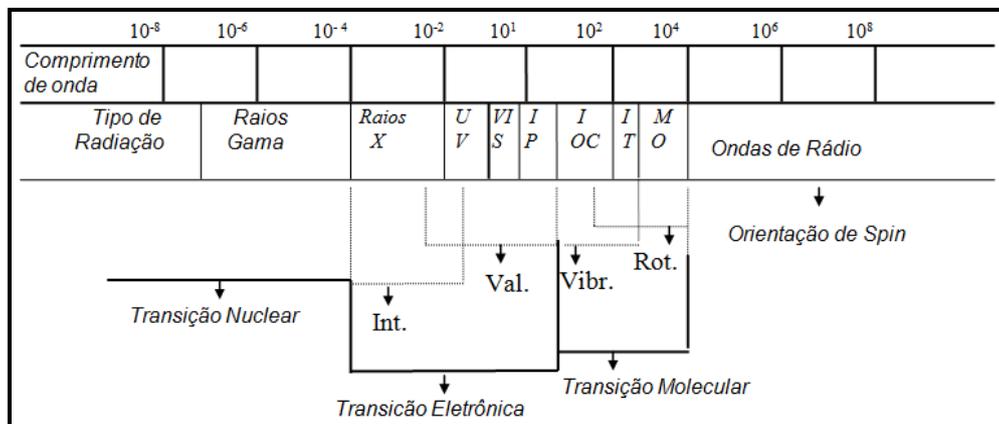


Figura 3.6. Processos de interação da REM com as superfícies dos materiais em função do comprimento de onda (Meneses, 2006b).

Nas transições eletrônicas de valência ocorrem mudanças do nível de energia dos elétrons acoplados aos íons. Os níveis de energia são medidos pelas posições dos orbitais que os elétrons ocupam nas camadas K, L, M, N, O, P e Q em torno do átomo. Quanto mais afastado for o orbital menor será a energia, sendo essas transições entre os níveis de energia as responsáveis pelas feições dos espectros. Ao nível do átomo, os principais elementos que mostram feições de absorções por transições eletrônicas são os metais de transição (Rossman, 1988).

Os processos vibracionais são caracterizados por serem muitas vezes mais intensos que os processos eletrônicos e resultam de mudanças energéticas do estado estacionário de vibração das moléculas, representando um número restrito de simples movimentos (Figura 3.7). As vibrações que causam dobramentos periódicos das moléculas são denominadas de vibrações deformacionais e necessitam de menos energia que as vibrações de estiramento (Hunt & Salisbury, 1971).

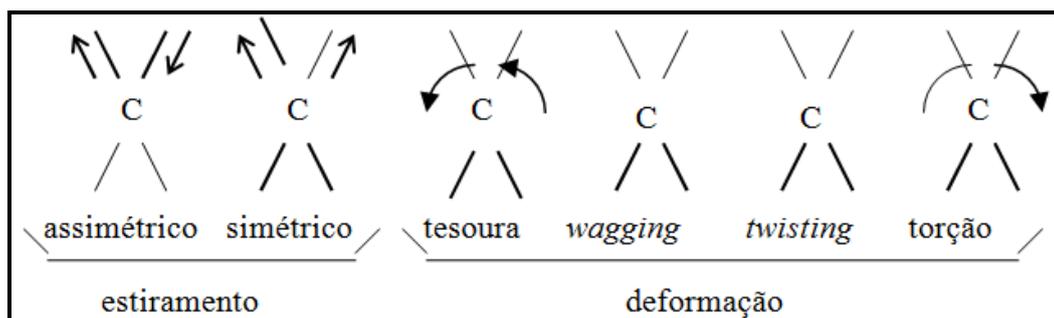


Figura 3.7. Modos de vibrações moleculares da Molécula de CH₂ (Meneses, 2006b).

As transições vibracionais ocorrem no infravermelho de ondas curtas porque são necessárias quantidades de energia menores que as de transições eletrônicas para promover a transição vibracional. As transições vibracionais envolvem transições tanto nas moléculas quanto no retículo cristalino. As feições de absorção que se observam neste intervalo são muito intensas e freqüentemente do tipo *overtones* e *combination tones*. *Overtones* são excitações do modo fundamental com dois ou mais quanta de energia produzindo uma banda dupla ou uma banda de algum múltiplo integral do valor de uma freqüência fundamental. *Combination tones* é a união de dois ou mais diferentes vibrações fundamentais ou de *overtones* resultantes de vibrações fundamentais de alta freqüência, envolvendo principalmente os grupos CO₃⁻², BO₃⁻³, PO₄³, OH⁻ e H₂O (Hunt, 1979).

3.4.2 Interações na região do infravermelho termal

O tratamento da região do infravermelho termal exige uma abordagem bastante distinta, pois é responsável por energias envolvidas na porção 3,0 a 20,0 μm, provenientes de vibrações moleculares decorrentes da temperatura dos corpos. A radiação termal é função da temperatura do corpo e de sua emissividade (ε).

As relações entre a temperatura do corpo (T), a emissividade (ε), e a quantidade total de energia radiante por um corpo (ω) pode ser expressa pela equação 3.1.

$$\omega = \epsilon \sigma T^4 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}, \quad \text{eq. 3.1}$$

onde, ω = energia radiante total emitida pelo corpo (W · m⁻²);

ε = emissividade;

σ = constante de Boltzman (5,67 x 10⁻⁸ W · m⁻² · K⁻⁴);

T = temperatura absoluta do corpo (K).

Emissividade (ε) representa a relação entre a radiância real emitida pelo corpo do mundo real (M_r) e pelo corpo negro à mesma temperatura (M_b), expressa pela equação 3.2. Todos os corpos na natureza são emissores seletivos, portanto com valores de emissividade menor que 1.

$$\epsilon = \frac{M_r}{M_b} \quad \text{eq. 3.2}$$

A emissividade de um objeto é função de uma série de fatores, tais como cor, composição química, rugosidade da superfície, umidade e tantos outros. A emissividade

depende da absorção pretérita de fótons. O físico Kirchoff observou que na porção do infravermelho do espectro a emissividade espectral de um objeto geralmente é igual à sua absorptância espectral, por isso podemos dizer que bons absorvedores são bons emissores. Se analisarmos as imagens dos objetos de coloração mais escura, ou seja, de baixa reflectância, deduzimos que eles são mais absorvedores e, no termal notaremos que eles são mais emissores, ou seja, apresentam maior emissividade que alvos que apresentem coloração clara, com maior reflectância (Meneses, 2011).

3.5 ESPECTROSCOPIA DE IMAGEAMENTO

É o processo de aquisição em centenas de bandas registradas e contíguas, de forma a possibilitar que para cada pixel das mesmas seja possível derivar uma curva de reflectância espectral completa (Van der Meer, 2000). O objetivo da espectroscopia de imageamento é medir quantitativamente a assinatura espectral dos componentes do sistema Terra a partir de espectros calibrados, adquiridos na forma de imagens, para uso na investigação científica e em aplicações de sensoriamento remoto (Goetz *et al.*, 1985).

As técnicas utilizadas no processamento de imagens de espectroscopia de imageamento possuem diferenças com relação às técnicas com dados multiespectrais, em decorrência do seu caráter quantitativo, contudo esta técnica também mostra resultados satisfatórios quando aplicadas a imagens multiespectrais, como as do sensor ASTER (Crósta *et al.*, 1998; Almeida, 2000; Kruse *et al.*, 2002; Rowan & Mars, 2003).

3.5.1 Caracterização dos minerais de referência

Para realizar uma análise espectral é necessário dispor de uma biblioteca espectral de referência, como as da USGS (*United States Geological Survey*) e JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), existentes no software de processamento de imagem ENVI 4.7@ (RSI, 2009). Estas bibliotecas espectrais são coleções de espectros de materiais de composição conhecida, medidos no campo ou em laboratório por intermédio do espectrorradiômetro (Clark, 1995).

A biblioteca espectral quando utilizada em espectroscopia de imageamento, torna possível a comparação da informação espectral contidas nos pixels de imagens hiperespectrais ou multiespectrais com dados espectrais de referência (minerais e rochas), possibilitando a identificação de materiais presente na superfície imageada (Ducart, 2004).

3.5.2 Processamento da imagem ASTER

As técnicas de classificação espectral baseiam-se na análise de similaridade entre os espectros de um conjunto de materiais de referência (*endmembers*) e as curvas espectrais correspondentes a cada pixel da imagem. Sendo o *endmember* denominado como espectro de uma classe pura de mineral idealizada em uma imagem (Showengerdt, 1997). Este tipo de processamento é chamado de classificação espectral devido o mesmo identificar e ressaltar materiais de interesse por intermédio de uma imagem, a partir de suas feições espectrais,

podendo ser aplicado com espectros de referências, materiais adquiridos em campo. Existem alguns tipos de classificação espectral presentes no software ENVI 4.7®, como a SAM (*Spectral Angle Mapper*), MNF (*Minimum Noise Fraction*), MTMF (*Mixture Tuned Matched Filtering*) e SFF (*Spectral Feature Fitting*) (Van der Meer, 2000 in Ducart, 2004).

3.5.3 Mapeamento espectral

Algumas técnicas de processamento vêm sendo desenvolvidas para aperfeiçoamento das existentes e melhor detalhamento das informações espectrais contidas em imagens, sejam elas multiespectrais ou hiperespectrais. A maioria delas pode, contudo, ser aplicada de forma mais precisa em imagens multiespectrais, porém com resultados limitados (Shippert, 2002).

O método de mapeamento espectral baseia-se na comparação entre espectros de referência com os de pixels da imagem. Tal técnica tem sido usualmente aplicada em estudos geológicos (Kruse, 1988; Clark *et al.*, 1990; Ducart, 2004; Florenzano, 2007; Carmelo *et al.*, 2009, Pedrosa *et al.*, 2010). Sendo neste trabalho aplicadas técnicas de mapeamento espectral utilizando como classificador o SFF, que é um método aplicado com base nas absorções, que ajusta o espectro da imagem ao espectro de referência (USGS, JPL, ASU) ou de campo, por meio do método de mínimos quadrados. Para analisar melhor as absorções dos espectros aplica-se uma remoção do contínuo, que por sua vez é dita como uma função matemática usada para isolar uma absorção especial que serve como uma entrada de análise, normalizando assim o espectro, tornando possível a comparação de feições de absorção individuais a partir de um valor de base comum (ENVI, 2009).

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.1 Materiais utilizados

Para realização deste estudo foram utilizadas bases de dados cartográficos e geológicos, imagens do sensor ASTER, e equipamentos como espectrorradiômetros e difratômetro de raios-X.

Os dados cartográficos e geológicos constituíram-se de *shapefiles* de drenagens, vias de acesso, localização das cidades, geologia da área, feições estruturais (falhas e fratura) e de áreas com ocorrência de minério fosfático, os quais foram adquiridos do banco de dados da CPRM-GO e do SIEG (Sistema Estadual de Estatística e de Informação Geográfica de Goiás), na escala de 1:250.000 com projeção em UTM/SAD-69 (CPRM, 2009; SIEG, 2010).

As imagens do sensor ASTER nas áreas de estudo são do tipo AST07 XT (com correções radiométricas, atmosféricas, topográficas e de *crosstalk*) para as faixas do visível e infravermelho próximo (VNIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR), e do tipo AST05 para a faixa do termal (TIR), que corresponde a imagens com correções atmosféricas da superfície e radiométricas – emissividade. São produtos do sensor ASTER (V003), obtidas em 18 de abril de 2002 para região de Catalão e 28 de julho de 2004 para Campos Belos, com projeção UTM – zona 23 sul e Datum em SAD 69.

Os espectrorradiômetros (*PIMA SP Aquisition®* e *FieldSpec®*) foram utilizados para aquisição de curvas espectrais das diferentes amostras coletadas em campo nas duas áreas de estudo. O difratômetro de raios-X foi utilizado para adquirir informações sobre a composição mineralógica das amostras.

4.1.2 Metodologia Aplicada

As etapas metodológicas deste estudo envolveram: (i) aquisição das amostras fosfáticas em campo, (ii) aquisição de medidas espectrorradiométricas das amostras; (iii) análise de difração de raios-X (iv) análise e interpretação espectral; (v) processamento digital das imagens.

Na área 1 (Catalão) foram coletadas quinze amostras representativas de foscoritos e rochas fosfatadas (Tabela 4.1), adquiridas de pontos estratégicos na Mina de Catalão I, uma vez que esta mina prospecta outros tipos de minérios além dos fosfatos. Já na área 2 (Campos Belos) foram adquiridas 9 amostras, envolvendo três frente de lavras distintas (São Bento, Coité 1 e 2), abrangendo fosforitos e siltitos fosfatados (Tabela 4.2).

As medidas espectrorradiométricas das amostras de campo foram realizadas em laboratório com os espectrorradiômetros *Pima SP Aquisition®* e *FieldSpec®*, pertencentes aos Laboratórios de Sensoriamento Remoto do Instituto de Geociências-IG/UnB e do Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE) pertencente ao Departamento de Geografia-UnB, respectivamente. Com o *Pima* foram efetuadas dez medidas em cada amostra coletada em campo para observar as possíveis variações existentes, sempre levando em consideração a análise estatística interna do *Pima Aquisition*. Nas medidas com o *FieldSpec* as amostras passaram pelo processo de pulverização, pois a aquisição da curva espectral neste tipo de espectrorradiômetro é executada simulando amostras de solo, com intuito de eliminar o máximo de ruído. O *FieldSpec* foi aplicado neste estudo, por recobrir a faixa espectral do VNIR, já que o *Pima* apenas recobre a faixa do SWIR.

Ainda na fase de aquisição das medidas espectrorradiométricas, foram efetuadas uma pré-análise do comportamento espectral de cada amostra. Onde nos espectros adquiridos pelo *Pima* foi realizado uma expressão matemática simples ($S1+S2+S3...+S10/10$) efetuada no *spectral math* do *ENVI 4.7*, a fim de obter uma média espectral representativa das variações minerais. Os espectros adquiridos no *FieldSpec* foram convertidos em *txt*, para poderem ser analisados no *ENVI 4.7*.

Tabela 4.1. Classificação simplificada das amostras coletadas em campo com base em descrições macroscópicas da área 1 (Catalão).

AMOSTRAS	ROCHAS	DESCRIÇÃO
CF - 001	Foscorito	Foscorito com tamanho variando de 10 a 14 cm, de coloração cinza esverdeada, com minerais de flogopita.
CF - 002	Flogopitito	Flogopitito com ~ 20 cm, de coloração cinza escuro, com pequenos minerais de flogopita.
CF - 003	Flogopitito c/ carbonatito	Flogopitito com ~13 cm, de coloração variando de cinza esbranquiçado a cinza escuro, pequenas venulações de quartzo, e minerais de flogopita.
CF - 004	Foscorito	Foscorito com ~ 18 cm, de coloração cinza acastanhada e minerais de magnetita.
CF - 005	Flogopitito alterado	Flogopitito alterado de coloração amarelada, de ~ 12 cm, com minerais de magnetita e flogopita.
CF - 006	Carbonatito Calcico	Carbonatito com ~ 10 cm, esbranquiçado, dolomitizado.
CF - 007	Foscorito Carbonático	Foscorito cinza esbranquiçado, pouco alterado, de ~ 8 cm.
CF - 008	Canga Laterítica	Rocha alterada, ferruginosa, amarronzada, com ~ 8 m.
CF - 009	Flogopita Foscorita	Flogopito intercalado com foscorito, de coloração cinza esbranquiçado, com ~ 15 cm.
CF - 010	Foscorito alterado (Terras raras)	Foscorito bastante alterado de cinza esverdeado, com 12 cm.
Amostra de solo	Apatita/magnetita (AMS 01)	Amostra de latossolo alterado contendo minerais de apatita e magnetita.
	Mica de Base (AMS 02)	Amostra de flogopitas.
Concentrado	Barita	Concentrado de barita com coloração avermelhada.
	Fosfato ultrafino	Concentrado do fosfato de coloração alaranjado.
	Magnetita	Concentrado de minerais de magnetita.

As análises de difração de raios-X foram realizadas no laboratório de DRX do IG-UNB, com o intuito de discriminar a assembléia mineralógica existente nas diferentes áreas de estudo, auxiliando assim na análise interpretativa dos espectros das amostras de campo.

A análise espectral das amostras foi efetuada no *ENVI 4.7*, a fim de determinar os centros de comprimento de onda das principais feições de absorção, aplicando ainda sob os espectros a remoção do contínuo e o *stack plots* (RSI, 2009). Esses espectros foram comparados com os dados de bibliotecas espectrais de minerais (*USGS, JPL, ASL*) e com os dados de difração de raios-X, com intuito de auxiliar na determinação da composição mineralógica das amostras coletadas em campo. Ao determinar a assembléia mineralógica das amostras de campo foram realizadas misturas espectrais, para melhor representar as áreas de estudo. Para a mistura espectral foram efetuadas expressões matemáticas simples no *ENVI 4.7*, utilizando a ferramenta *spectral math*, que são expressas na forma *float (s1+s2+s3)*, dependendo de quantos minerais são utilizados na mistura espectral.

Tabela 4.2. Descrição das amostras coletadas em campo da área 2 (Campos Belos).

AMOSTRAS	ROCHAS	DESCRIÇÃO
ICSB 1A	Fosforito brechado	Fosforito brechado com tamanhos variando de 5 a 7cm de coloração amarelo avermelhada.
ICSB 1B	Fosforito brechado	Fosforito brechado de coloração vermelho alaranjada e em algumas partes esbranquiçadas com tamanho ~8cm.
ICSB 1C	Siltito laminado	Siltito bastante alterado de coloração amarelo alaranjado, pouco laminado de espessuras de 1cm, com tamanhos variando de 10 a 11cm.
ICC 1 A	Fosforito laterítico	Fosforito laterítico bastante ferruginoso com aspecto botrioidal com tamanho ~10cm.
ICC 1 E	Fosforito	Fosforito silicificado com intercalações de cores, variando de amarelo, vermelho e cinza.
ICC 1 F	Filito bege	Filito bege, bastante alterado, com algumas intercalações avermelhadas, com tamanhos variando de 12 a 14cm.
ICC 2 B	Fosforito brechado	Fosforito de coloração vermelho amarelado, brechado com tamanho variando de 10 a 12cm.
ICC 2 C	Fosforito laterítico	Fosforito avermelhado, pouco intemperizado com tamanho variando de 12 a 15cm.
ICC 2 D	Fosforito brechado	Fosforito brechado pouco intemperizado, por vezes laminados, com tamanhos de 14 a 18cm.

A etapa de processamento digital das imagens ASTER envolveu seus 3 diferentes subsistemas: VNIR, SWIR e TIR.

As imagens do subsistema VNIR possuem nível 07XT de processamento, que implica em ajustes adicionais realizados pela NASA desde 2002. Com as três bandas do VNIR efetuou-se uma composição RGB 2/3N/1, seguida da aplicação de contraste linear 2% e de um filtro *sharpen 18*, com a finalidade de melhorar visualmente o contraste da vegetação, água, solo e, principalmente, a área de estudo (mina). Nesta imagem foram selecionadas regiões de amostragem (áreas nas quais foram coletadas as amostras de campo) via o uso da ferramenta ROI (*region of interest*), adquirindo assim,

espectros médios dos pixels amostrados, a fim de compará-los com os espectros de laboratório reamostrados para o intervalo espectral destas imagens.

Devido ao fato de a faixa espectral das imagens VNIR, para a região de Catalão, não exibir feições diagnósticas de fosfato, foi realizada a classificação SFF (*Spectral Feature Fitting*), utilizando como *endmember* o espectro de elementos terras raras (monazita) da biblioteca espectral de referência da USGS, mineral que acompanha os minerais fosfáticos ígneos em certos locais do complexo. Nas imagens SFF aplicou-se um filtro passa-baixa seguido de ajustes de cores (*rainbow*) e ajustes histográficos, com a finalidade de ressaltar melhor a visualização dos resultados da classificação. Efetuou-se ainda, uma fusão HSV (*Hue, Saturation, Value*), no software ENVI entre o resultado SFF processado e a banda 3N do visível. Para a região de Campos Belos, não foi possível realizar esta classificação espectral, efetuando-se apenas a análise espectral das amostras deste depósito.

O SWIR é a faixa espectral mais utilizada atualmente em trabalhos voltados ao mapeamento mineral. Nestas imagens também aplicou-se a classificação SFF (*Spectral Feature Fitting*), com base nas respostas das misturas espectrais de referência que melhor caracterizaram os foscoritos, fosforitos e rochas fosfatadas das áreas de estudo, assim como para as amostras coletadas em campo que melhor representaram a ocorrência dos fosfatos. No resultado da classificação realizou-se o mesmo processamento anteriormente descrito de otimização visual da imagem, envolvendo a aplicação de filtros passa-baixa, ajustes de cores (*prisma*) e histográficos, bem como a fusão das imagens.

Para as imagens TIR os dados foram transformados de valores de radiância para emissividade, utilizando valores na escala de 0 a 1, por meio de uma expressão simples no aplicativo *band math* do ENVI, expressa por $b1*0.001$. Na fase de processamento de classificação espectral SFF (*Spectral Feature Fitting*) foram utilizados os espectros de apatita (501, 504 e 506) acessados da biblioteca espectral da Universidade Estadual do Arizona (*ASU Public Library*). Os espectros foram convertidos para a unidade de micrômetros e depois reamostrados para o intervalo espectral das imagens ASTER, seguida por uma média aritmética dos espectros $(S1+S2+S3/3)$. O espectro resultante da média aritmética dos espectros da apatita foi utilizado como espectro de referência para a classificação SFF das imagens. Após o processo de otimização de contraste da imagem realizou-se uma fusão HSV (*Hue, Saturation e Value*) da imagem ASTER 3N (15m de resolução espacial) da faixa do visível, para fins de enriquecer a visualização, com o resultado da classificação SFF.

O uso do classificador SFF em todos os subsistemas do ASTER foi aplicado para possibilitar uma comparação dos resultados obtidos das três faixas espectrais deste sensor.

5.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO DA REGIÃO DE CATALÃO

Para uma melhor disposição e compreensão, os resultados e discussões da região de Catalão foram subdivididos de acordo com os subsistemas do sensor ASTER: VNIR (visível e infravermelho próximo), SWIR (infravermelho de ondas curtas) e TIR (infravermelho termal).

5.1.1 Dados VNIR

Foram estabelecidas regiões de interesse (ROI's) sob o RGB da imagem ASTER na faixa do VNIR, com intuito de avaliar o comportamento espectral da mesma em diferentes áreas da mina de Catalão I. As ROI's de numeração 1 a 5 estão relacionadas a áreas correspondentes a presença de minério fosfáticos, principalmente o ROI 2 (centro da mina), onde são encontradas as maiores concentrações deste minério. Os demais ROI's, que vão de 6 a 8, correspondem a área circunvizinha a área foco deste estudo, envolvendo a região de rejeito da mina (Figura 5.1).

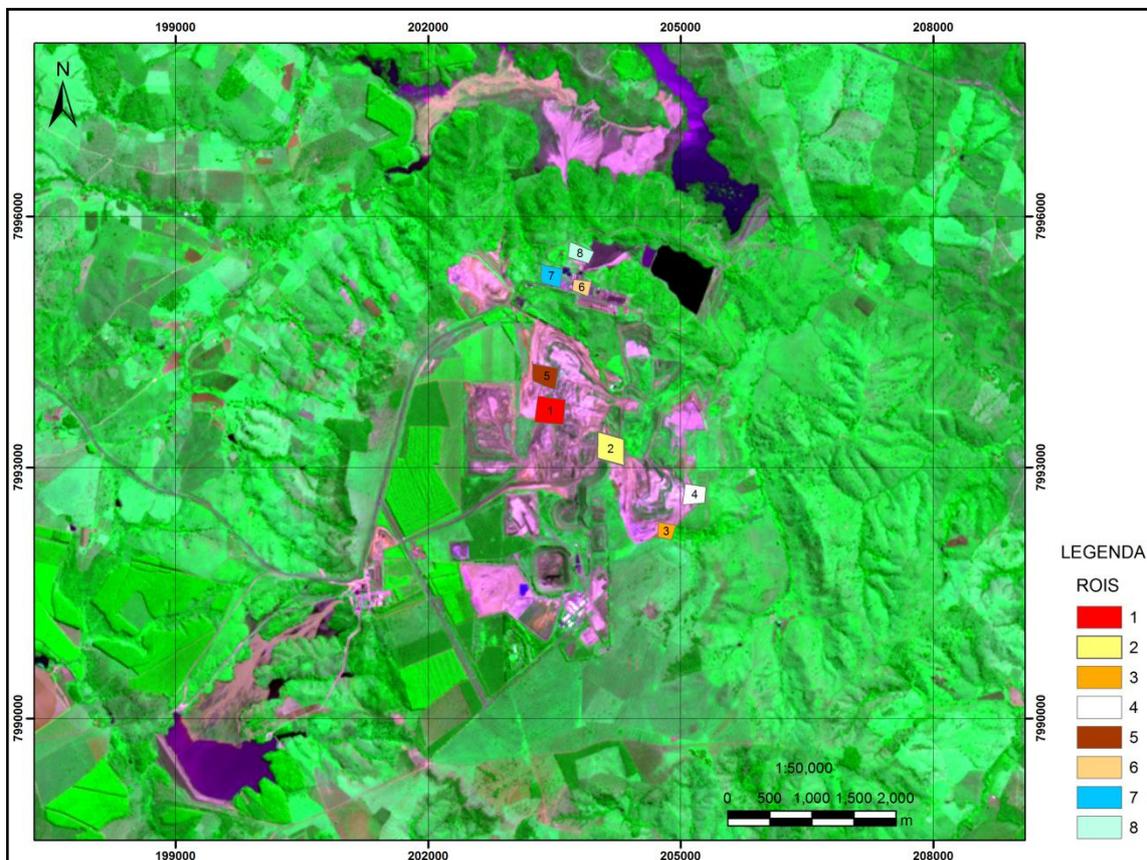


Figura 5.1. Áreas de amostragem selecionadas na área de estudo.

A partir destes ROI's aplicados sob a imagem, foi possível obter uma média aritmética dos pontos amostrados, os quais foram representados em forma de curva espectral, definindo assim o comportamento espectral para estas diferentes regiões na mina de Catalão I e qual a banda de absorção para este intervalo espectral (Figura 5.2).

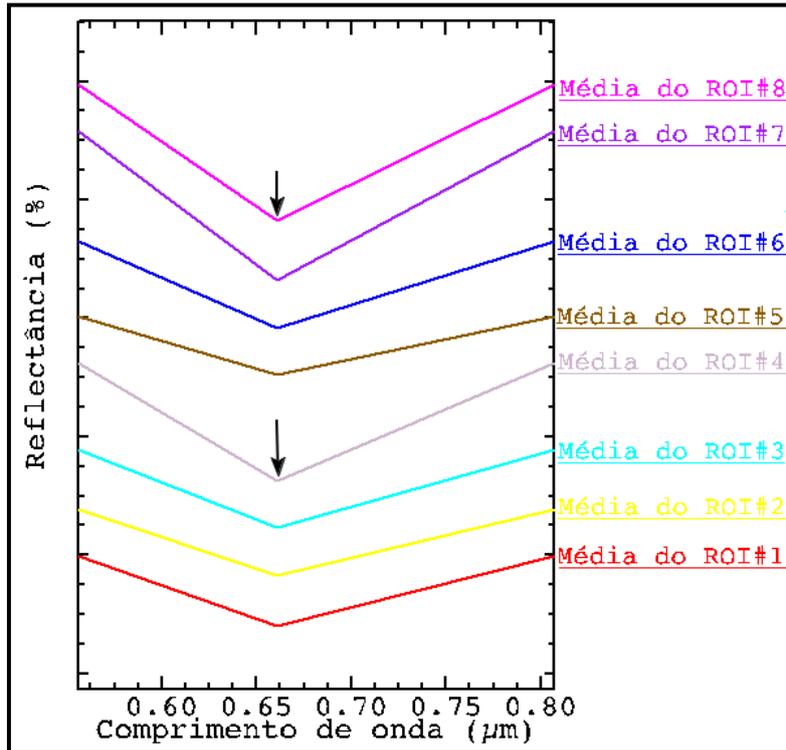


Figura 5.2. Curvas espectrais das médias dos dados das áreas de amostragem da imagem VNIR ASTER.

Ao analisar o comportamento espectral destas curvas observou-se que todas as áreas mostraram feições de absorções semelhantes, em torno de 0,66 μm, na posição da banda 2 (0,63 – 0,69 μm) do sensor ASTER, o que significa a provável presença da mesma composição mineral em todas as regiões de interesse (ROI's). Para validar esta informação, tomou-se então, o espectro da amostra de campo (foscorito) que melhor representava as feições de absorção dentro da faixa espectral do VNIR, como *endmembers* (Figura 5.3) e efetuou-se a reamostragem para o intervalo espectral das bandas VNIR (Figura 5.4), o qual observou-se o pico de absorção em 0,661 μm, ou seja, feições diagnosticas de fosfato nesta faixa espectral encontra-se mascarados pela forte presença de minerais ferrosos.

A curva espectral reamostrada mostrou uma notável coincidência do pico de absorção em relação às curvas espectrais da imagem (ROI's). A fim de evidenciar os resultados obtidos plotou-se na imagem as coordenadas dos pontos visitados na mina, mais precisamente na região onde se coletou o maior número das amostras de foscoritos. Como era de se esperar, os comportamentos espectrais da imagem e das amostras, mostraram o mesmo pico de absorção em 0,661 μm (Figura 5.5). Tal pico de absorção pode esta relacionada com a presença de oxido de ferro na composição destas amostras, provavelmente derivada do mineral goetita, conforme podemos visualizar na figura 5.6. Nesta figura podemos observar a goetita da biblioteca de referência JPL reamostrada para imagem ASTER, cuja feição de absorção é coincidente a 0,661 μm, correlatas com os espectros adquiridos pelos ROI's. Segundo, Meneses (2001), tal feição (0,661 μm) é característico do mineral goetita, que é um oxido de ferro hidratado, provavelmente presente em algumas regiões na área de estudo em

decorrência do forte intemperismo atuante sob as rochas carbonatíticas, em especial os foscoritos.

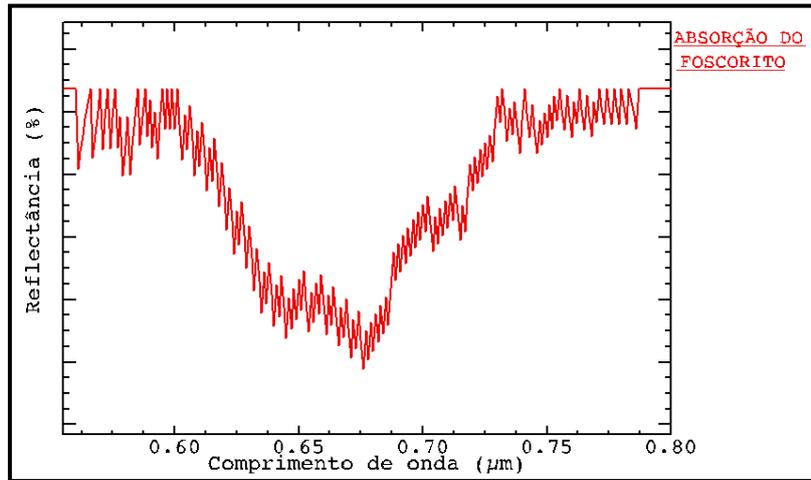


Figura 5.3. Comportamento espectral da amostra de foscorito obtido com o espectrorradiômetro *FieldSpec*.

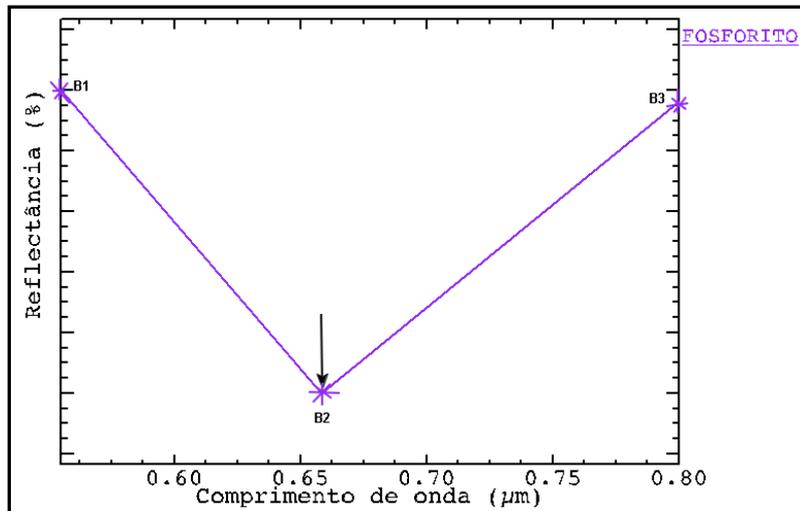


Figura 5.4. Curva espectral da amostra de fosforito reamostrada para o intervalo espectral da imagem ASTER.

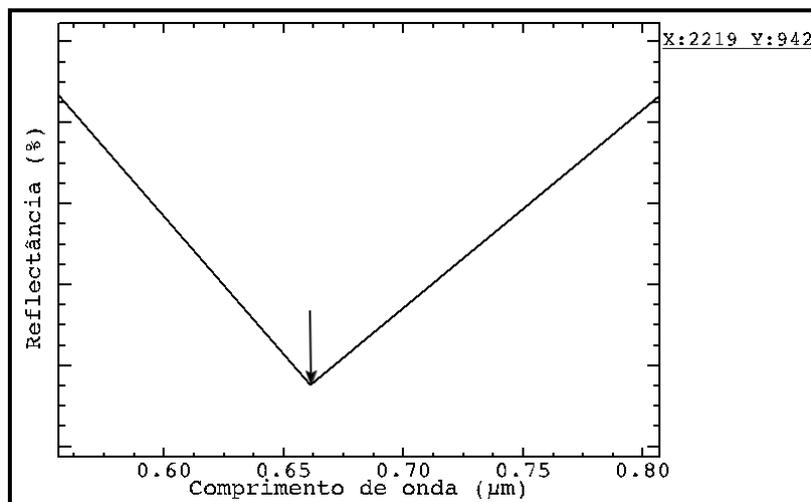


Figura 5.5. Curva espectral obtida da imagem ASTER.

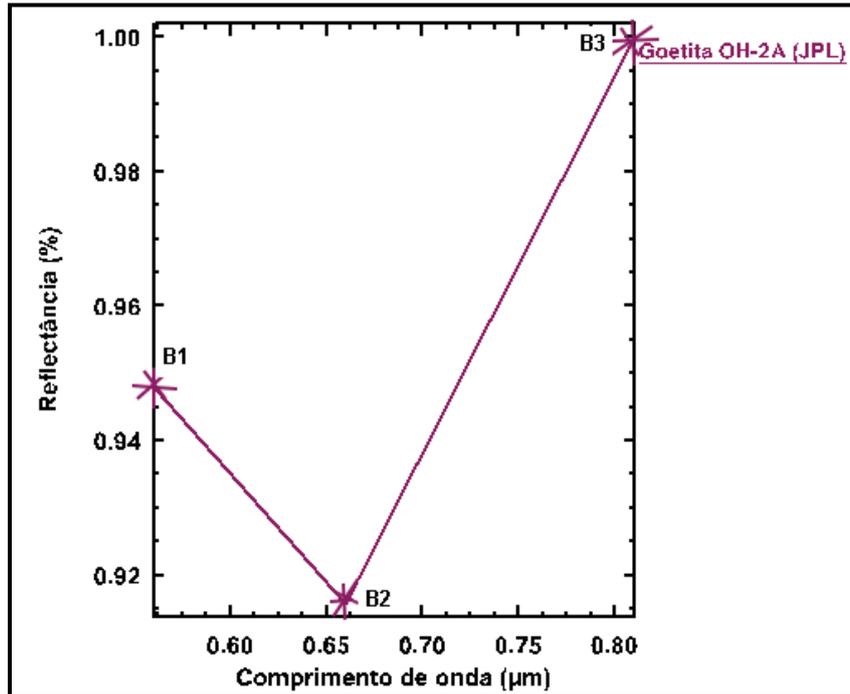


Figura 5.6. Curva espectral da Goetita (JPL) reamostrada para imagem ASTER, em destaque as bandas.

Segundo Meneses *et al.* (2001), os carbonatitos são rochas conhecidas por apresentarem uma grande variabilidade mineralógica e por exibirem espectros que apresentam notáveis feições de absorção nos comprimentos de onda do visível e do infravermelho próximo, originados pela presença de $\text{Fe}^{2+,3+}$ e de elementos terras raras (Sm^{3+} , La^{3+} , Eu^{3+} , Nd^{3+} , Pr^{3+}). Com base nesta informação e na resposta da difração de raios-X da amostra CF-10 (Figura 5.7), foi realizado também uma análise no comportamento espectral do mineral monazita, uma vez que os foscorititos da área de estudo, ocorrem associados aos ETR.

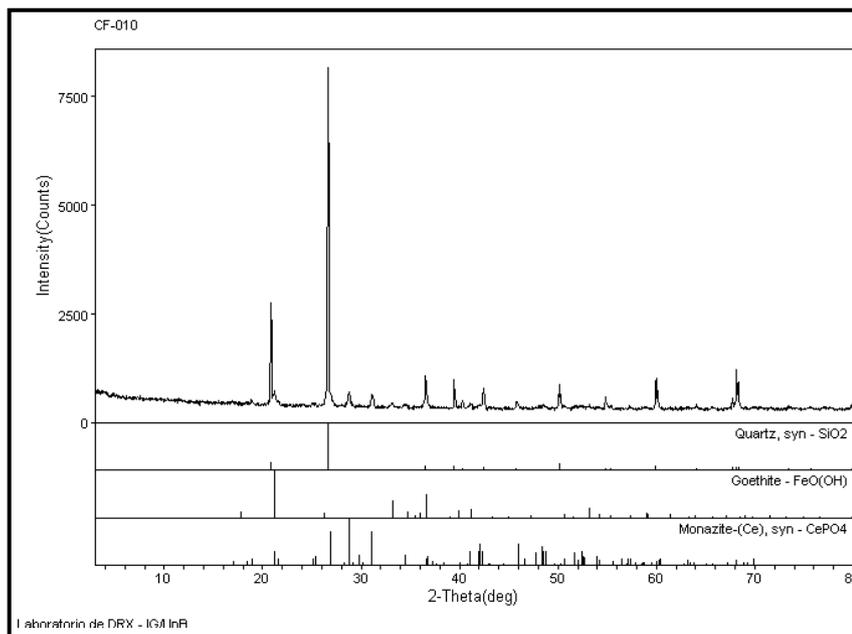


Figura 5.7. Difrátograma da amostra de foscorito CF 10.

Por meio da difração de raios-X determinou-se a paragênese mineral na amostra de foscorito alterado (CF-10), constituída essencialmente por quartzo (SiO_2), goetita [FeO(OH)] e monazita [$(\text{Ce, La, Nd, Th, Y})\text{PO}_4$], que comprova a ocorrência de fosfato associados a ETR.

Além disso, foi analisado o espectro do mineral monazita da biblioteca espectral do USGS, ilustrado na Figura 5.8. O espectro da monazita mostra diversas absorções próximas a $0,51 \mu\text{m}$, $0,52 \mu\text{m}$, $0,58 \mu\text{m}$, $0,62 \mu\text{m}$, $0,67 \mu\text{m}$, $0,74 \mu\text{m}$, $0,80 \mu\text{m}$ e $0,87 \mu\text{m}$, os três últimos com picos mais intensos. Rowan *et al.*, (1986) observou que os carbonatitos por ele estudados apresentavam padrões dos espectros de neodímio e samário, com valores de absorção em torno de $0,52 \mu\text{m}$, $0,58 \mu\text{m}$, $0,74 \mu\text{m}$, $0,80 \mu\text{m}$ e $0,87 \mu\text{m}$, que são coincidentes com os principais valores de absorção da monazita da biblioteca USGS. Com base nestes resultados pode-se sugerir que as imagens do subsistema VNIR do sensor ASTER podem auxiliar indiretamente na prospecção de depósitos de fosfato de origem ígnea contendo terras raras.

A fim de evidenciar estes resultados realizou-se uma classificação espectral SFF utilizando como *endmembers* o espectro da monazita (USGS), reamostrado para o intervalo espectral das imagens ASTER (Figura 5.9). O pico de absorção ficou em a $0,81 \mu\text{m}$, coincidente com a banda 3 do sensor ASTER.

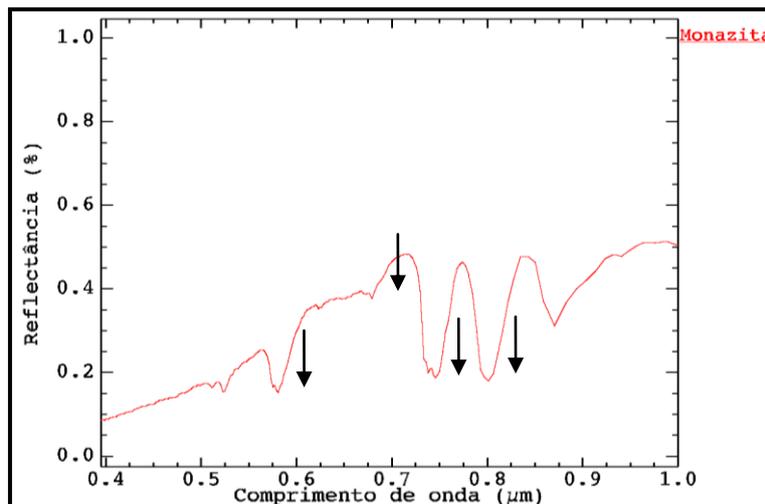


Figura 5.8. Curva espectral da monazita da biblioteca de referência espectral USGS.

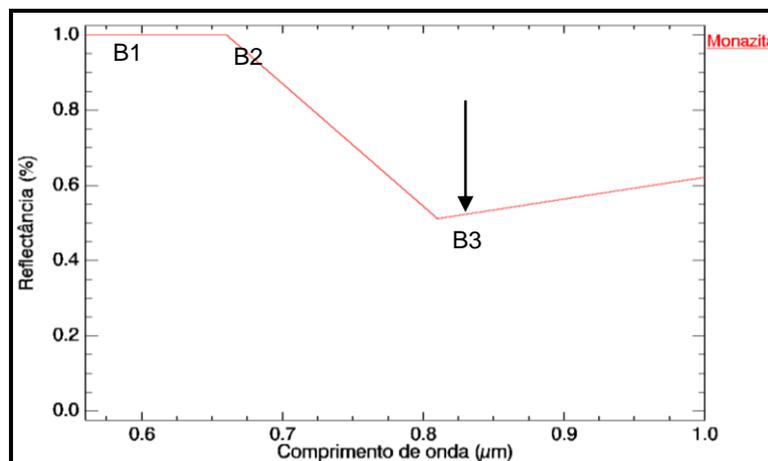


Figura 5.9. Curva espectral da monazita (USGS) reamostrada para a imagem ASTER.

Ao analisar os resultados dos ROIS com os da biblioteca de referência da USGS (monazita), observamos que ambas as feições reamostradas são características de minerais associados aos elementos terras raras, principalmente devido a estes elementos possuírem transições eletrônicas de íons trivalentes de európio, neodímio, samário e praseodímio (Rowan *et al.*, 1986).

O resultado desta classificação SFF é representado pela figura 5.10, demonstrando as possíveis áreas propícias à prospecção de fosfato, baseado na existência de monazita. As regiões que se apresentam na cor vermelha seriam as áreas mais promissoras. Na figura, a área de estudo que inclui a mina está demarcada pelo quadrado amarelo, e o resultado desta classificação parece ter sido bastante satisfatório.

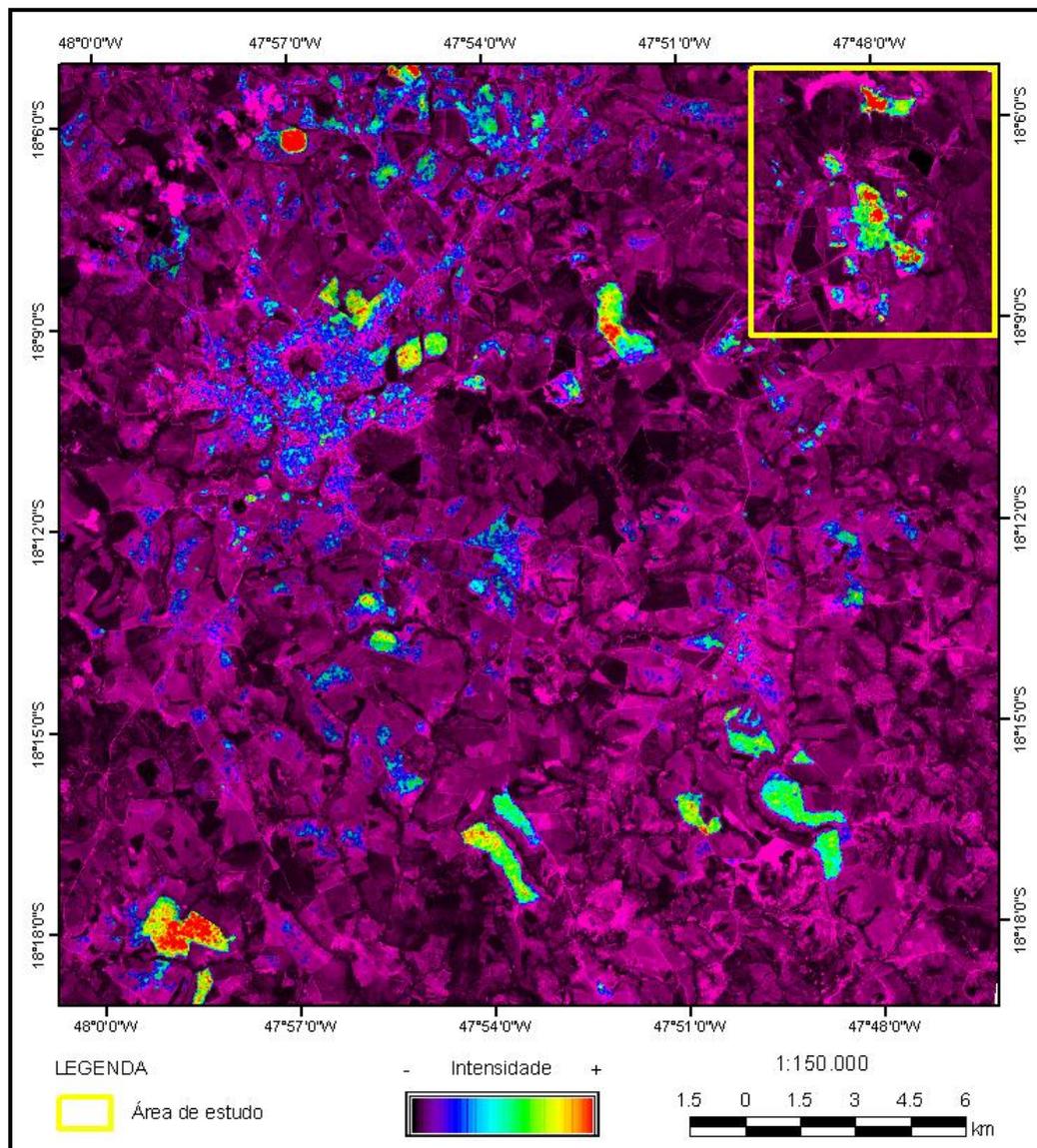


Figura 5.10. Classificação espectral SFF na imagem ASTER do VNIR utilizando como *endmember* à biblioteca espectral da monazita da USGS.

Com o resultado desta classificação podemos observar que além da área de estudo (mina Fosfértil) existem outras regiões na imagem que podem ser futuros depósitos de fosfatos

associadas a elementos terras raras (ETR), destacados com a coloração mais avermelhada na imagem.

5.1.2 Dados SWIR

Neste trabalho as análises da faixa do infravermelho de ondas curtas foram enfatizadas com os estudos da espectrorradiometria de laboratório, com o intuito de se obter uma melhor caracterização do comportamento espectral das rochas fosfatadas. Os dados obtidos dos espectros de rocha foram comparados com os espectros das bibliotecas espectrais do *JPL* e *USGS*, envolvendo minerais carbonatíticos, fosfáticos e derivados: Apatita [(Ca₅(PO₄)₃F)], Hidroxil-Apatita [Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂], Flogopita [K(Mg, Fe²⁺)₃Si₃AlO₁₀(OH,F)₂], Barita (BaSO₄), Anidrita (CaSO₄), Calcita (CaCO₃), Dolomita [CaMg(CO₃)₂], Magnesita (MgCO₃), Goetita [FeO(OH)], Vermiculita [(Mg,Fe,Al)₃(Al,Si)₄O₁₀(OH)₂.4H₂O], Quartzo (SiO₂) e Diopsídio (Ca,Mg,Si₂O₆), predominantemente.

Os espectros das amostras de campo (foscritos, rochas fosfatadas, amostras de solo e concentrados), apresentaram padrões de comportamento espectral similares, mas com diferenças principalmente nos valores de intensidade de absorção (Figura 5.11). Com base nesta diferença, as curvas espectrais foram separadas em quatro grupos para as amostras de rocha, a fim de analisar e classificar mais facilmente os padrões espectrais.

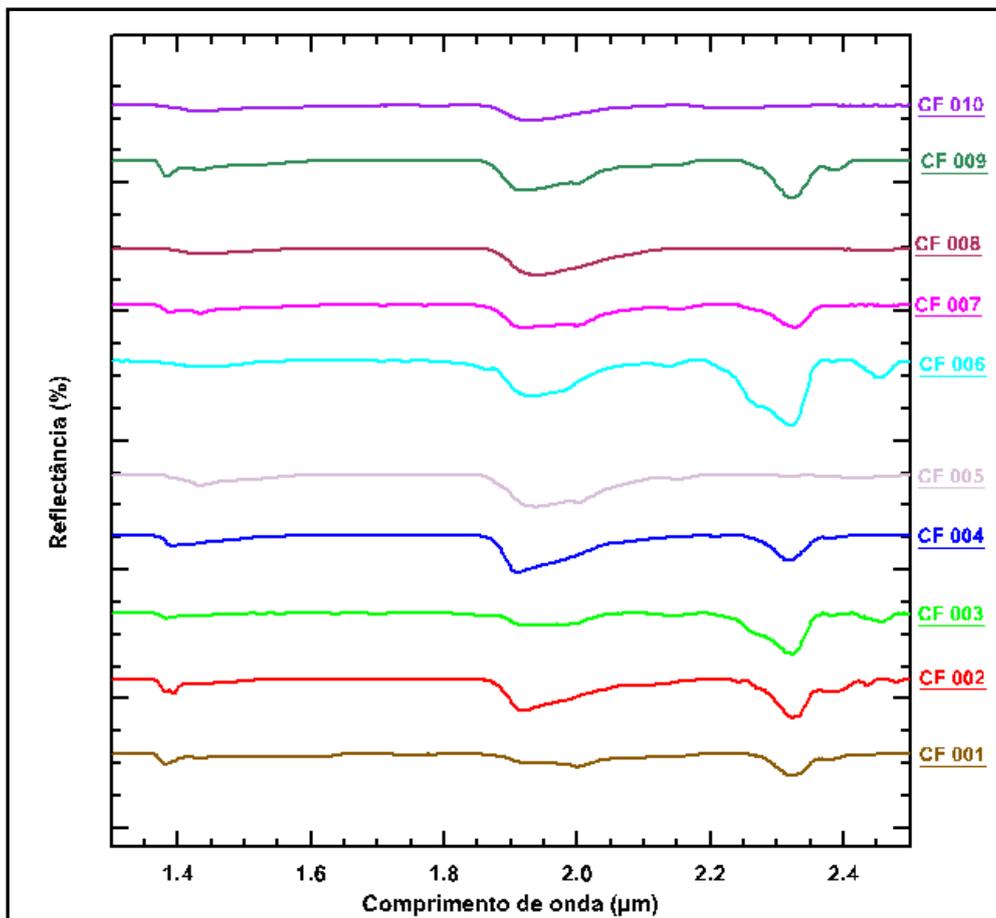


Figura 5.11. Visão do comportamento espectral geral das principais amostras de rochas coletadas em campo.

O grupo 1 é constituído pelo conjunto de amostras representadas pelas siglas CF 001, CF 007 e CF 009, cujo aspecto descritivo encontra-se na tabela 4.1, do capítulo anterior. Neste grupo o comportamento espectral apresenta semelhanças bem marcantes, principalmente nos picos de absorção em torno de 1,434 μm , 1,908 μm , 2,0 μm , 2,32 μm e 2,38 μm .

No grupo 1 a biblioteca das amostras assemelha-se a duas assinaturas espectrais dos minerais de referência: um com os minerais flogopita e dolomita da biblioteca do USGS e o outro com o mineral apatita da biblioteca JPL (Figura 5.12a). Os picos de absorção são marcados pelas setas pretas e correspondem aos pontos de absorções característicos do mineral de referência. Estes três minerais de referência (apatita-flogopita-dolomita) representam a assembléia mineral identificada neste grupo de amostras, os quais foram determinados com base na resposta da difração de raios-X, conforme mostra a figura 5.13.

Através desta análise comparativa entre os espectros das amostras e os de referência, aliados à resposta da difração, imaginou-se fazer uma mistura espectral dos minerais de referência (apatita, flogopita e dolomita) para tentar chegar o mais próximo do comportamento real da rocha, no caso os foscoritos coletados em campo, que fazem parte do grupo 1. Porém, para este grupo mineral foi possível fazer apenas a mistura espectral dos minerais flogopita e dolomita, pois apenas os dois fazem parte da biblioteca da USGS. Para realizar análise de mistura espectral é necessário que os minerais façam parte da mesma biblioteca de referência.

Com o resultado desta mistura espectral entre a dolomita e a flogopita, obteve-se uma única curva espectral, que analisada com os espectros da apatita (JPL) e do grupo 1, possibilitou classificar este grupo de curvas espectrais como padrão de rochas foscorito apatitito-flogopito-dolomito, por ser constituído por uma assembléia mineralógica, as quais estão intimamente relacionadas, já que a rocha que hospeda o minério fosfático é um carbonatito (Figura 5.12b).

Por meio desta mistura espectral podemos dizer que a primeira feição de absorção em 1,434 μm esta relacionada com presença do mineral flogopita, que ocorre associada as apatitas na área de estudo. As absorções são demarcadas pelas setas pretas para os minerais das bibliotecas e com setas vermelhas quando correspondentes às mesmas absorções nas amostras do grupo 1. As duplas absorções em torno de 1,908 e 2,0 μm , podem esta relacionadas com ao mineral apatita, bem como a presença de OH^- na estrutura destas amostras de rochas foscoríticas. E as absorções com *shoulder* em 2,32 e 2,38 μm , correspondem aos maiores picos de absorção que aparecem nestes espectros de rochas, e caracterizam a presença dos minerais de dolomita e flogopita, ou seja, presença de CO_3^{2-} e Mg na composição das rochas, os quais estão bem marcados na curva espectral resultante da mistura espectral da figura 5.12b.

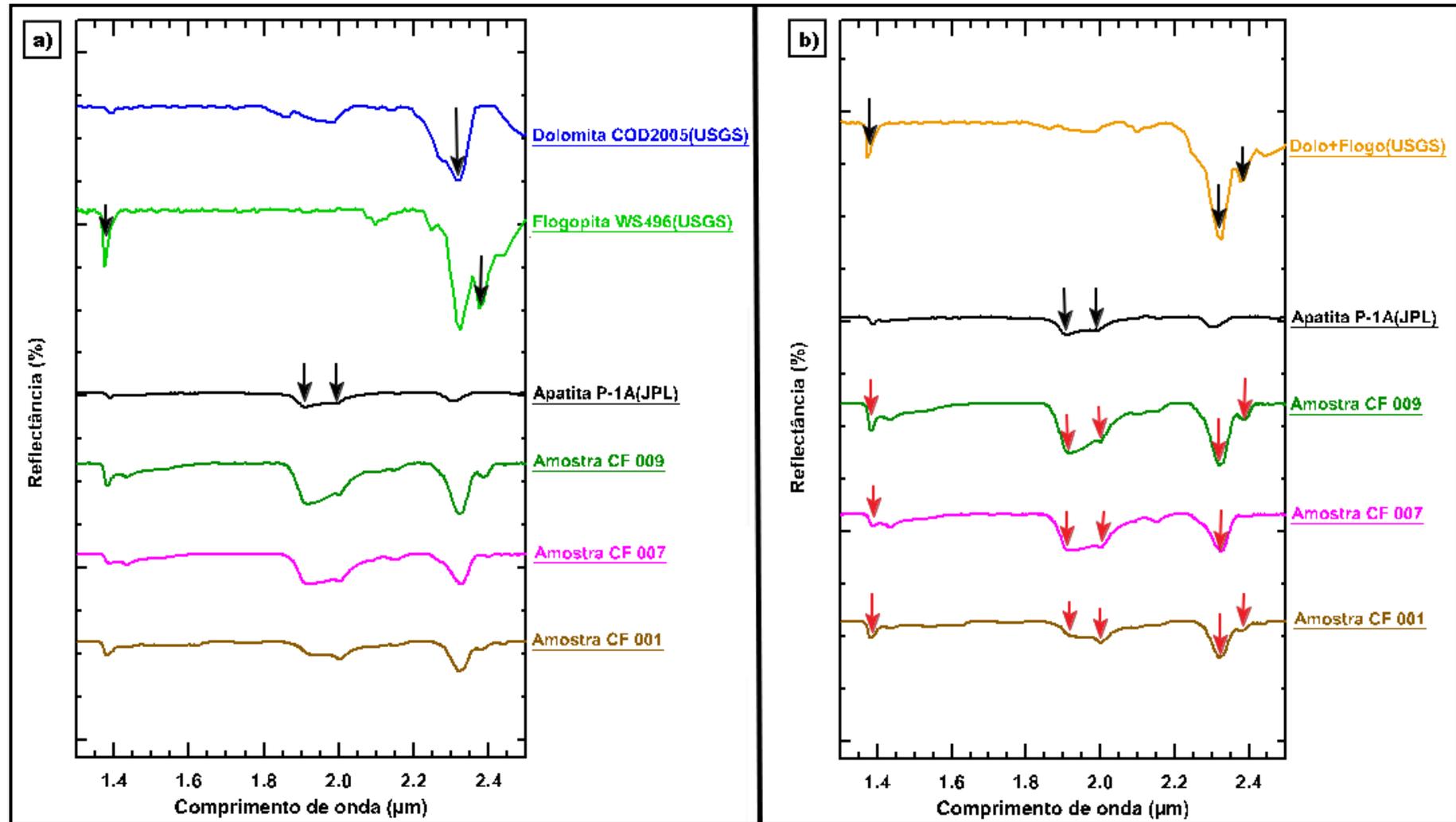


Figura 5.12. (a)Biblioteca espectral do grupo 1 vs espectros de referência do mineral apatita (JPL), dolomita e flogopita (USGS); b)curvas espectrais do grupo 1 com o assinatura da mistura espectral de dolomita + flogopita da biblioteca USGS e da apatita da JPL.

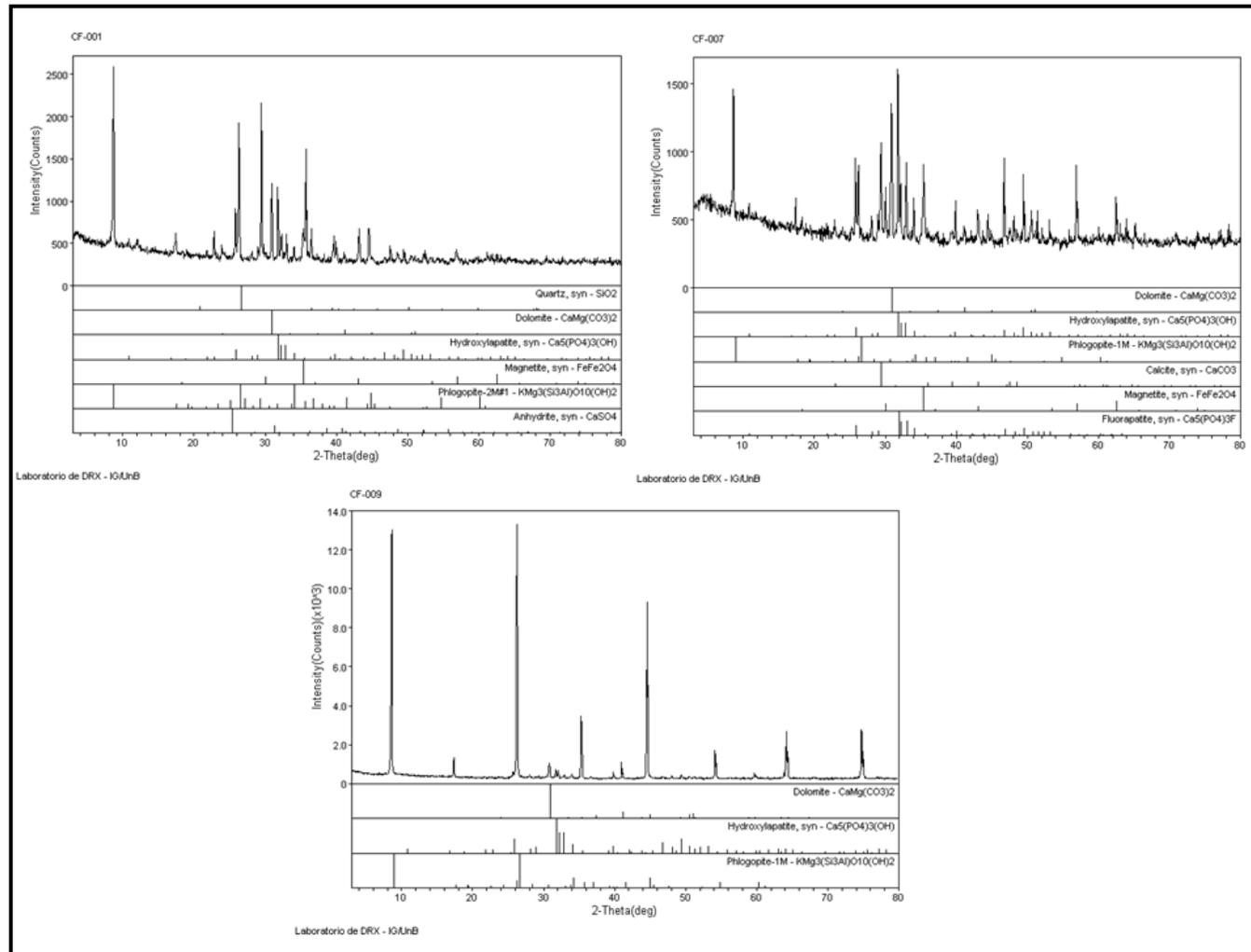


Figura 5.13. Resultado da análise de difração de raios-x das amostras do grupo 1, evidenciando a presença de minerais fosfáticos e outros que compõem a assembléia mineral das rochas.

O grupo 2 é formado pelo conjunto de amostras representadas pelas siglas CF 005, CF 008 e CF 010 (tabela 4.1, capítulo anterior), assim selecionadas devido à grande semelhança do comportamento espectral destas rochas. Este conjunto de espectros apresentou quatro picos de absorção principais em: 1,434 μm , 1,935 μm , 2,225 μm e 2,440 μm .

Neste grupo identificou-se padrões semelhantes apenas com os da biblioteca de referência do USGS, os quais correspondem às assinaturas espectrais dos minerais de quartzo, goetita e hidroxil-apatita. As absorções foram marcadas com as setas de coloração preta (Figura 5.14a). Os três minerais de referência foram selecionados e identificados com base na resposta da difração de raios-X (Figura 5.15).

O pico principal mais expressivo de absorção encontra-se em 1,935 μm , que corresponde a presença de OH^- , que em conjunto com a absorção em 1,435 μm estão relacionados com a presença de H_2O na estrutura das rochas. Secundariamente o pico de absorção a 1,935 μm é correlato com a presença dos minerais de apatita, goetita e quartzo, segundo os espectros de referência da USGS. As fracas absorções em 2,225 μm e 2,440 μm indicam a sutil e provável presença de PO_4^{3-} , levando em consideração Meneses (2001), que cita a existência deste elemento nesta faixa espectral e nestes comprimentos de onda, provavelmente ocasionados devido a movimentos vibracionais, envolvendo a ligação P-OH.

A amostra 005 apresenta no geral comportamento bastante similar as demais amostras que constituem o grupo 2 (CF 008 e CF 010), porém apresenta 2 picos de absorção em 2,0 μm e 2,15 μm , que as demais não apresentam. Tais feições podem estar relacionadas com a presença dos minerais derivados da apatita (hidroxil-apatita e fluoroapatita). E a amostra CF 010 foi a que se analisou com as imagens do VNIR, indicando a presença de minerais terras raras (monazita).

Ao analisar o comportamento espectral das amostras deste grupo, em conjunto com os minerais da biblioteca e a difração de raios-X, observou-se que os valores de absorções não resultavam apenas de uma única assinatura espectral, mas sim de uma assembléia mineral. Com base nesta hipótese foi realizada uma mistura espectral dos minerais de referência, aplicando o *spectral math* do ENVI. A curva espectral resultante desta mistura mostra um comportamento bastante semelhante com as amostras deste grupo e com os mesmos valores de absorção, que na figura estão apontados com as setas de coloração avermelhada. Classificou-se então este grupo em rochas Foscorito-hidroxilapatítico impuro, que apresenta secundariamente, minerais de goetita e quartzo (Figura 5.14b).

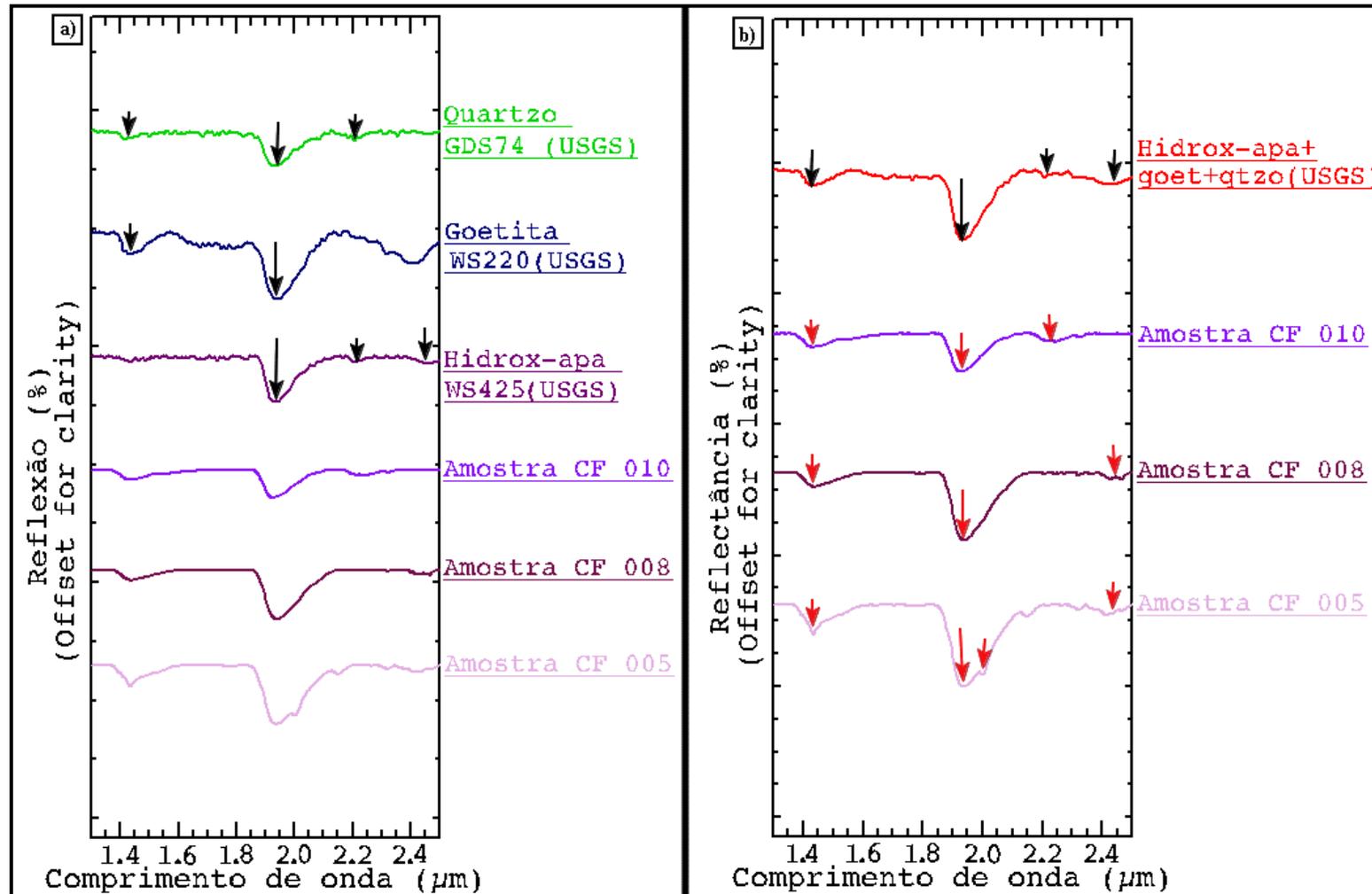


Figura 5.14. Biblioteca Espectral do grupo 2 vs biblioteca de referência: a) curvas espectrais do grupo 2 com as assinaturas espectrais da Hidroxil-apatita e goetita da biblioteca de referência USGS; b) curvas espectrais do grupo 2 com o assinatura da mistura espectral da biblioteca de referência.

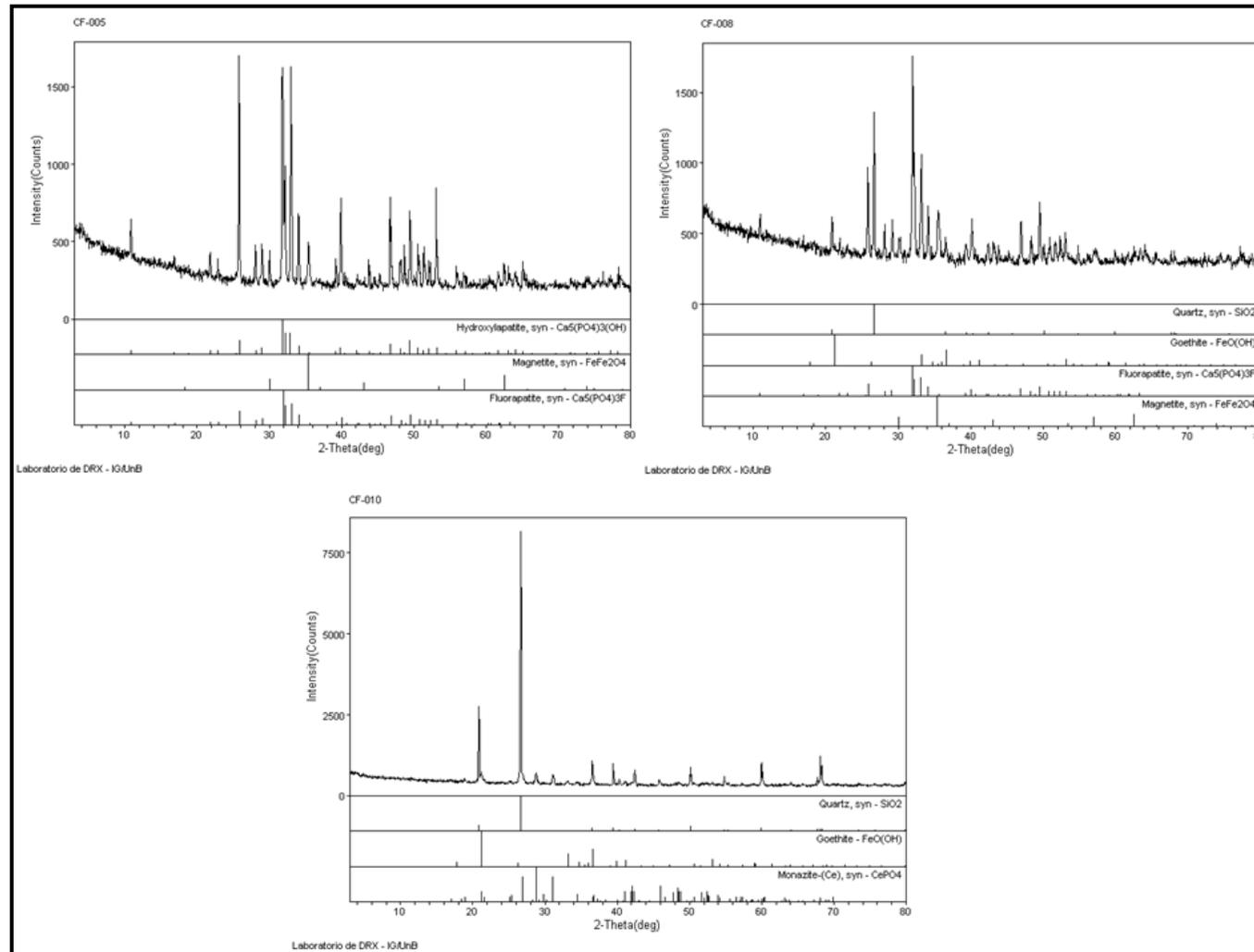


Figura 5.15. Resultado da análise de difração de raios-X vs das amostras do grupo 2, evidenciando a presença de minerais fosfáticos e outros que compõem a assembléia mineral das rochas.

O grupo 3 é composto por duas amostras, CF 002 e CF 004. Os picos de absorções situam-se em torno de 1,382 μm , 1,394 μm , 1,915 μm e 2,325 μm . A caracterização da assembléia mineral deste grupo mostra fortes similaridades espectrais com os minerais de dolomita, flogopita e hidroxil-apatita da biblioteca de referência do USGS. As absorções características dos minerais de referência são representadas por setas de coloração preta (Figura 5.16a). Esses minerais foram identificados nos difratogramas de raios-X, conforme ilustrados na figura 5.17.

Os dois primeiros picos de absorções com valores próximos de 1,382 μm , estão possivelmente relacionados com a presença do mineral flogopita e o pico de 1,394 μm com presença do mineral dolomita. A absorção em torno de 1,915 μm está relacionada aos minerais de flogopita, principalmente, e de rara hidroxil-apatita. Para a feição de absorção em 2,325 μm , considerada como a mais expressiva curva espectral neste grupo de amostra, sugere-se como sendo característica da presença do mineral dolomita, ocorrendo associada com a presença do mineral flogopita, que encontra-se marcadas pelos *shoulders* (“ombros”) do pico principal, em torno de 2,240 μm , 2,238 μm e 2,434 μm , como bem evidencia a amostra CF 002. Os valores de absorção das amostras são representados por setas vermelhas, que correspondem aos valores de absorção dos minerais utilizados como referência (Figura 5.16b).

Além das absorções que caracterizam a presença dos minerais de dolomita, flogopita e hidroxil-apatita, este grupo apresenta ainda H_2O na estrutura dos minerais das rocha, assim inferidos por possuírem valores de absorção bem próximos a 1,4 e 1,9 μm e um albedo característico, possivelmente derivado de intensos processos intemperícos ocorridos na área de estudo.

Com base na análise desta assembléia mineral efetuou-se uma mistura espectral dos minerais de referência (dolomita, flogopita e hidroxil-apatita), aplicando a expressão [*float* (S1+S2+S3)], cujo resultado desta mistura foi representado por uma curva espectral que caracteriza o conjunto de amostras do grupo 3 como foscorito flogopitito, contendo dolomito e hidroxil-apatita em suas estruturas (Figura 5.16b). m

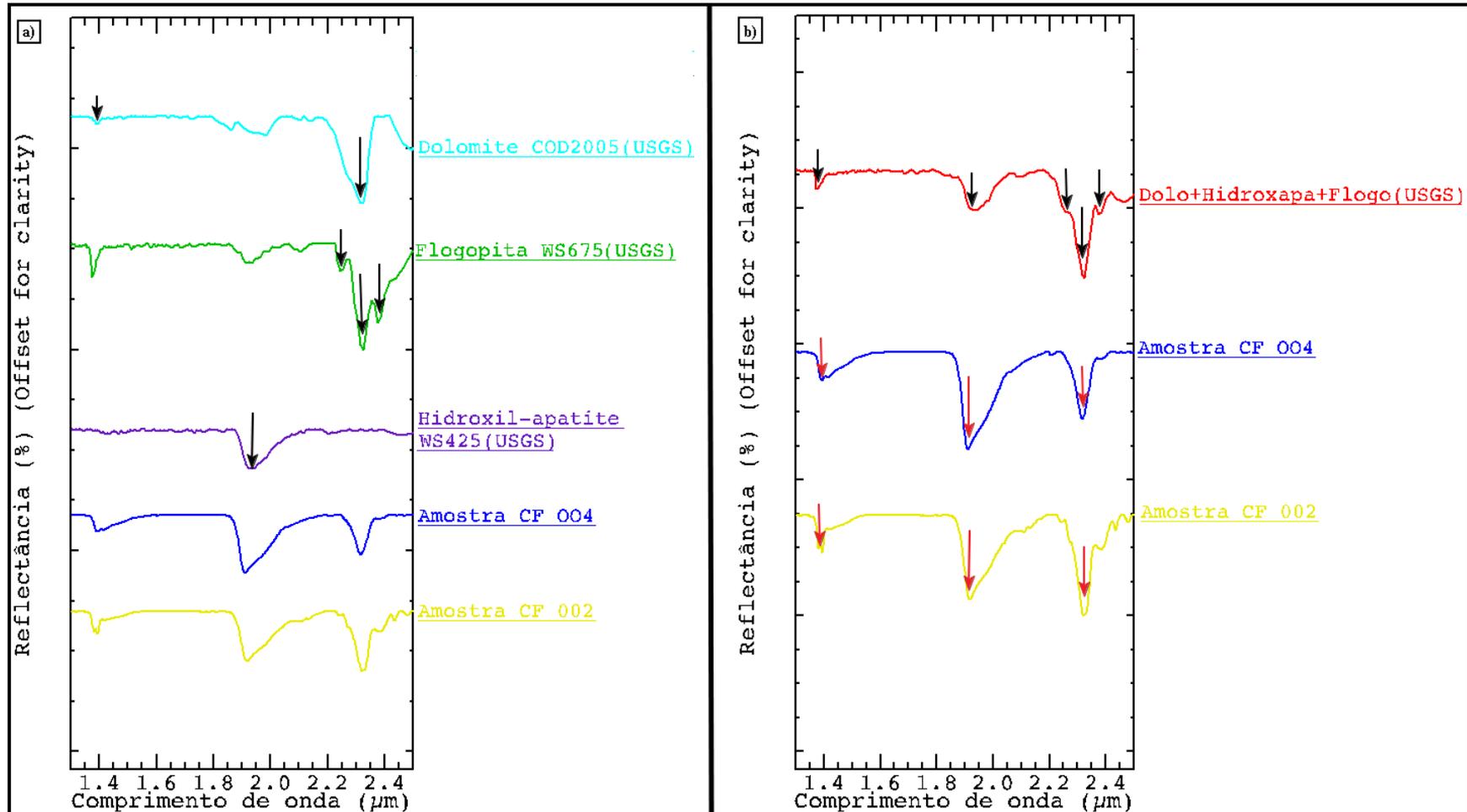


Figura 5.16. Biblioteca espectral do grupo 3 vs biblioteca de referência: a)curvas espectrais do grupo 3 com as assinaturas espectrais da flogopita, dolomita e hidroxil-apatita da biblioteca de referência USGS; b)curvas espectrais do grupo 3 com a assinatura da mistura espectral da biblioteca de referência, com as setas em vermelho indicando as principais absorções.

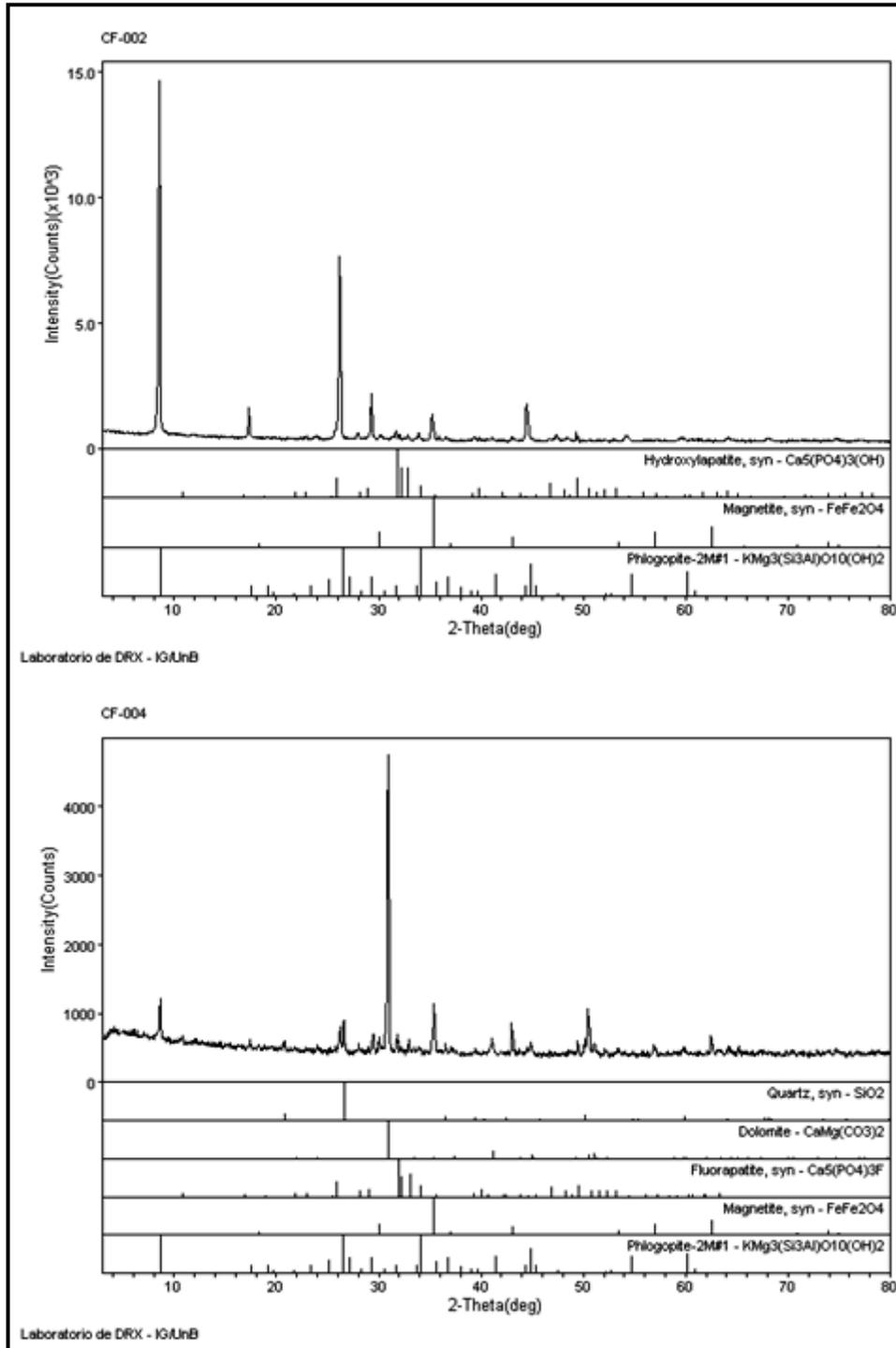


Figura 5.17. Resultado da análise de difração de raios-X das amostras do grupo 3, evidenciando a presença de minerais fosfáticos e outros que compõem a assembléia mineral das rochas.

O grupo 4 é formado por duas amostras, CF 003 e CF 006. Apresenta absorções em 1,384 μm , 1,436 μm , 1,862 μm , 1,928 μm , 2,136 μm , 2,264 μm , 2,32 μm e em 2,456 μm . Onde as 2 primeiras feições de absorção são distintas uma amostra da outra, a feição em 1,384 é referente a amostra CF 003 e a feição em 1,436 corresponde a amostra CF 006.

As amostras deste grupo foram analisadas com base na assembléia mineral identificada pela difração de raio-X e pelas informações das bibliotecas espectrais JPL e USGS. Baseando-se nestes fatores para identificar e caracterizar as feições de absorção das amostras de campo, utilizou-se os espectros minerais da magnesita, dolomita e calcita da biblioteca de referência da JPL, e os espectros minerais de dolomita e hidroxil-apatita da biblioteca USGS. Tais feições de absorção referentes a este conjunto de minerais são indicados por setas preta na figura 5.18a. Os difratogramas com a identificação dos minerais são ilustrados na figura 5.19.

A primeira feição de absorção foi identificada em 1,384 μm , a qual pode esta relacionada com a presença de Ca e Mg na estrutura da rocha, tornando o mineral dolomita responsável por esta feição. A absorção em 1,436 μm provavelmente corresponde a presença de calcita magnesiana, por apresentar picos de absorção característicos em torno destes valores. Para os valores de absorção em 1,862 μm e 1,928 μm são interpretados como sendo derivadas do mineral calcita que ocorre associado aos minerais de hidroxil-apatita e magnesita. A absorção em 2,32 μm é característico da presença de minerais carbonáticos, neste caso da dolomita, principalmente por apresentar “ombro” (*shoulder*) no pico de absorção, sendo o pico mais intenso das curvas espectrais deste conjunto de amostras. Por fim, o valor do pico de absorção em 2,456 μm , que ocorre de forma bem sutil, interpreta-se como sendo da dolomita (biblioteca JPL). (Figura 5.18b).

Foram efetuadas duas misturas espectrais. A primeira foi realizada com os minerais de magnesita, dolomita e calcita da biblioteca de referência da JPL e a segunda com os minerais de dolomita e hidroxil-apatita da biblioteca de referência USGS, que caracterizaram bem as feições de absorção das amostras do grupo 4.

Ressalta-se que tais misturas espectrais são realizadas apenas para tentar representar o máximo possível da real composição das amostras de foscoritos coletados em campo.

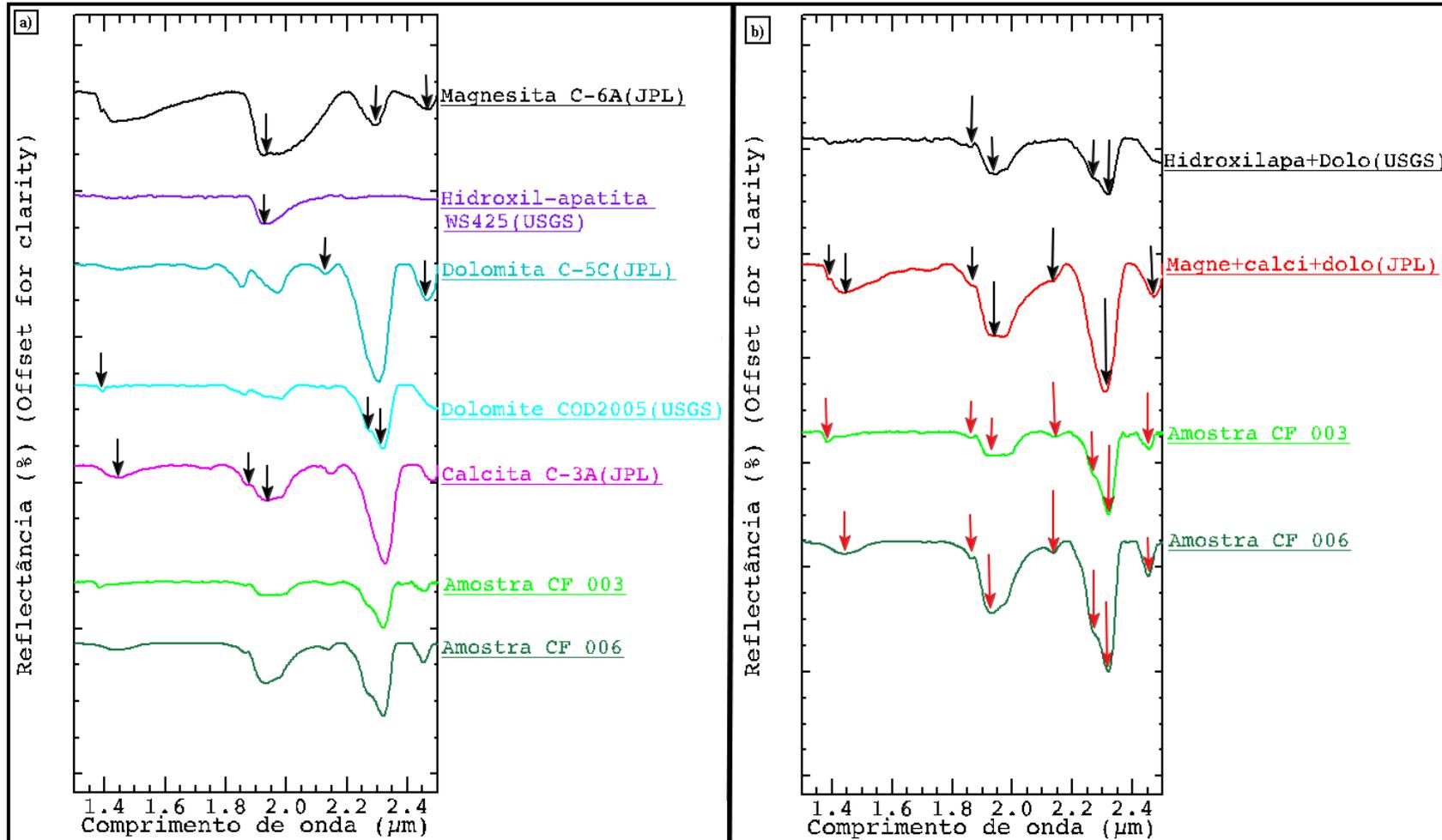


Figura 5.18. Biblioteca Espectral do grupo 4 vs biblioteca de referência: a)curvas espectrais do grupo 4 com as assinaturas espectrais de dois conjuntos de bibliotecas de referência diferentes (JPL e USGS); b)curvas espectrais do grupo 4 com o assinatura da mistura espectral da biblioteca de referência, com as setas em vermelho indicando as principais absorções.

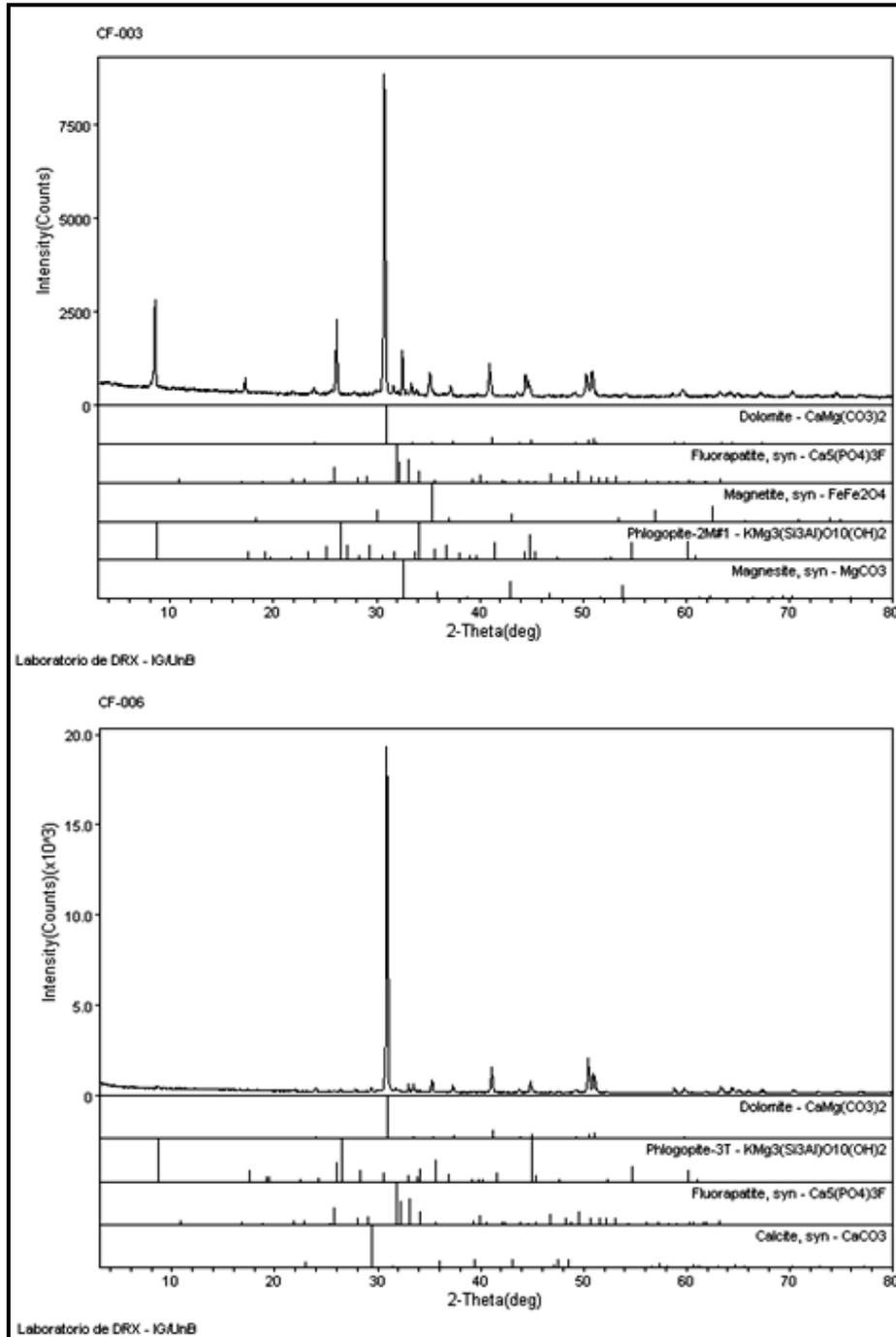


Figura 5.19. Resultado da análise de difração de raios-X das amostras do grupo 4, evidenciando a presença de minerais fosfáticos e outros que compõem a assembléia mineral das rochas.

Para as amostras de solo e concentrado, a análise espectral foi realizada individualmente, devido à particularidade que cada uma possui. Essa análise individual foi assim realizada em decorrência da natureza das amostras de solos estarem mais ligadas aos processos intempéricos. Já os concentrados são referentes aos produtos finais da empresa mineradora. As amostras de solos coletadas em campo foram informalmente denominadas por

observação macroscópica de material apatita-magnetita e com a presença residual de mica de base. (Figura 5.20).

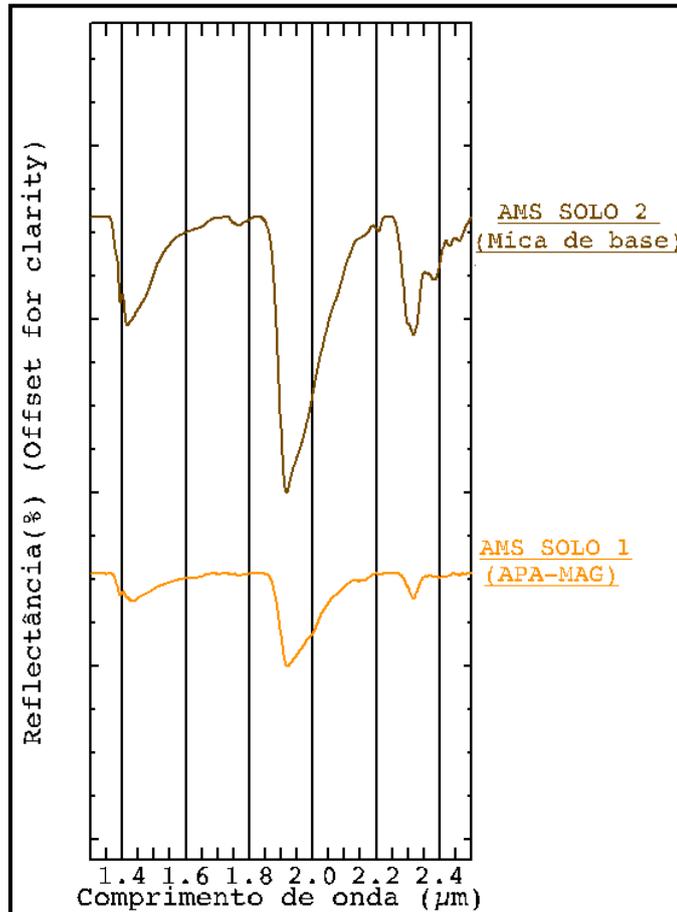


Figura 5.20. Comportamento espectral das amostras de solo do Complexo Carbonatífico de Catalão I.

A amostra de solo 1, denominada apatita-magnetita apresentou cinco feições de absorções, em torno de 1,394 μm, 1,432 μm, 1,918 μm, 2,0 μm e 2,32 μm. Os espectros de referência dos minerais apatita e dolomita são da biblioteca de referência JPL, cujos valores de absorção são identificados pelas setas pretas (Figura 5.21a). O difratograma desta mesma amostra de solo é ilustrado na figura 5.22.

Os primeiros picos de absorções presentes nas curvas espectrais da amostra de solo em torno de 1,432 μm e 1,918 μm, estão relacionados com a presença de H₂O na composição das rochas foscoríticas, além de possuir um albedo característico. As absorções em 2,0 μm e 2,32 μm são referentes à presença do mineral apatita e dolomita associada, sendo a primeira absorção com aspecto menos marcante que a segunda absorção. A mistura espectral envolveu os minerais de apatita e dolomita da biblioteca de referência JPL, resultado em um comportamento espectral bem similar à amostra de solo de apatita-magnetita. As absorções da amostra interpretadas são demonstradas por setas de coloração avermelhada (Figura 5.21b).

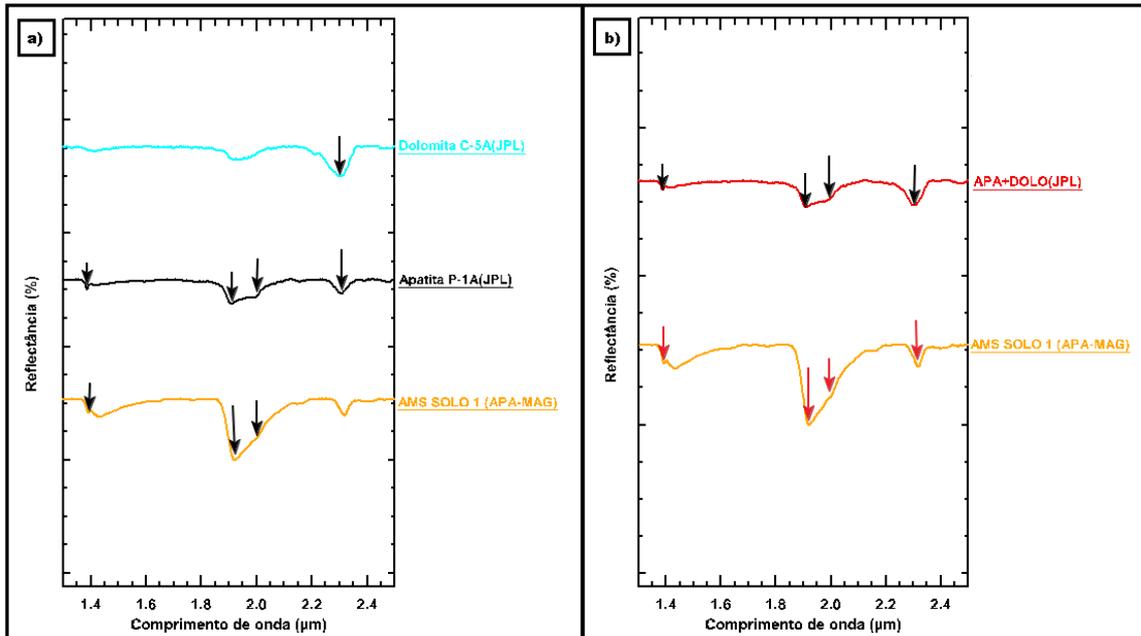


Figura 5.21. Biblioteca espectral da amostra de solo 1 vs bibliotecas de referências da JPL e USGS: a) curva espectral da amostra de solo 1 com as assinaturas espectrais dos minerais das bibliotecas de referência da JPL e USGS; b) curva espectral da amostra de solo 1 interpretada com a assinatura das misturas espectrais da biblioteca de referência, com as setas em vermelho indicando as principais absorções.

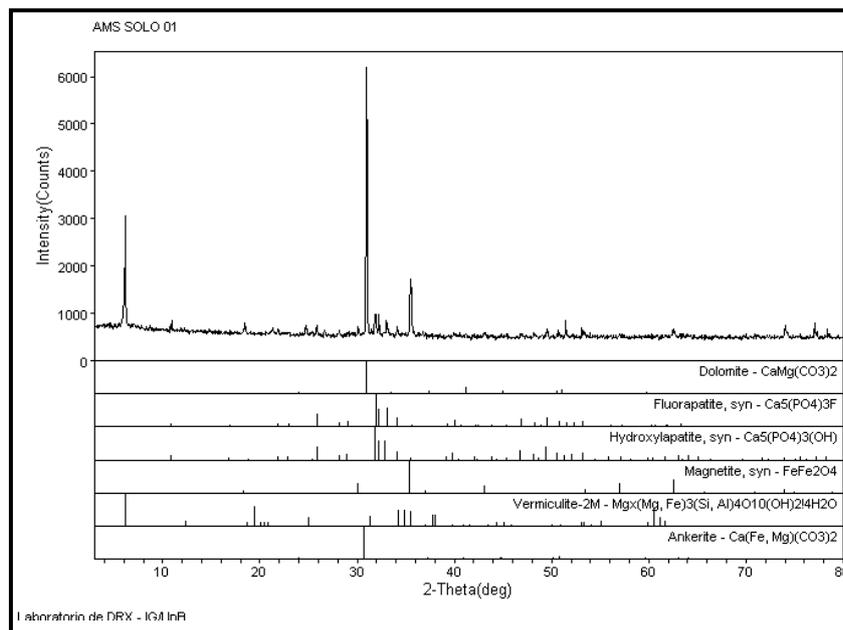


Figura 5.22. Difractograma da Amostra de solo 1 – apatita/magnetita.

A amostra de solo classificada como mica de base (AMS SOLO 2) apresentou valores de absorção em torno de 1,394 μm , 1,416 μm , 1,918 μm , 2,20 μm , 2,30 μm , 2,32 μm , 2,382 μm e 2,436 μm . Estas absorções foram mapeadas uma a uma com base na biblioteca espectral da USGS, tendo como referência a resposta mineral do difratograma adquirido pela análise de difração de raios-X (Figura 5.23).

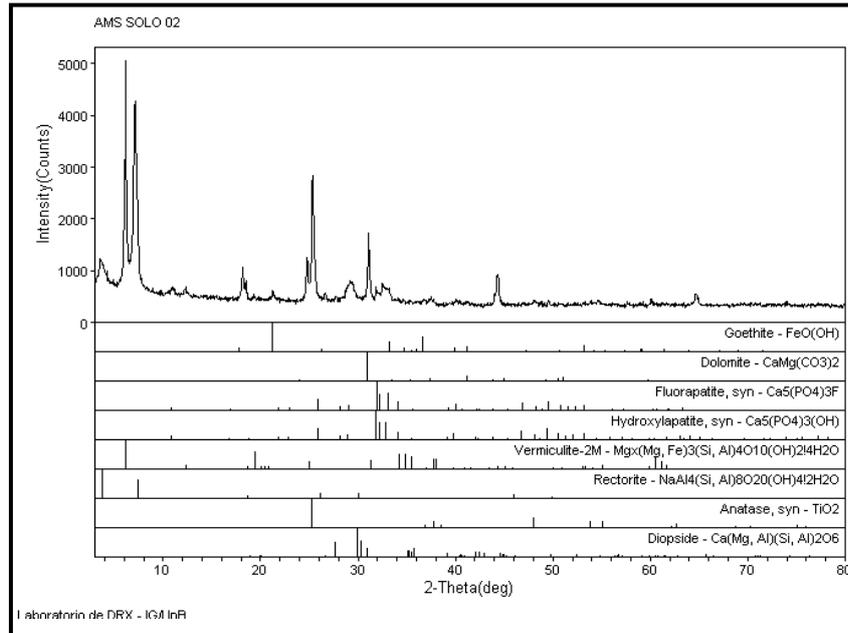


Figura 5.23. Difratoograma da Amostra de solo 2 – mica de base.

Através da biblioteca de referência pôde-se identificar os minerais que mais correspondiam aos valores de absorção da amostra de solo 2, abrangendo os minerais de vermiculita, goetita, hidroxil-apatita e diopsídio, cujas absorções características encontram-se destacadas com setas de coloração preta (Figura 5.24a).

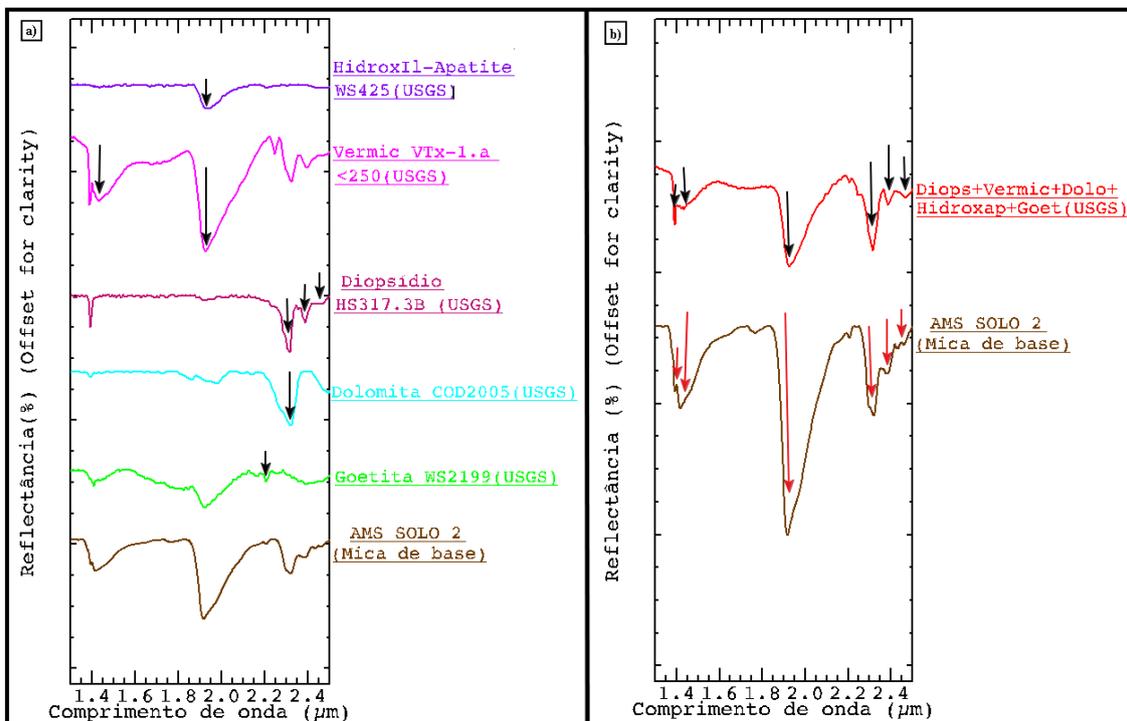


Figura 5.24. Biblioteca espectral da amostra de solo 2 vs biblioteca de referência da USGS: a) curva espectral da amostra de solo 2 com as assinaturas espectrais dos minerais da biblioteca de referência da USGS; b) curva espectral da amostra de solo 2 interpretada com a assinatura da mistura espectral da biblioteca de referência, com as setas em vermelho indicando as principais absorções.

As principais absorções desta amostra de solo foram divididas em quatro conjuntos de absorções, em consequência de alguns minerais terem mais de uma absorção (absorção dupla) em um mesmo pico. O primeiro conjunto de absorção possui valores em 1,394 μm e em 1,416 μm , os quais caracterizam a presença do mineral vermiculita. O segundo conjunto constitui o pico de absorção mais expressivo da curva espectral, em 1,918 μm de absorção, caracterizado como sendo típico do mineral vermiculita associado ao mineral de hidroxilapatita. O terceiro conjunto de absorção possuiu apenas uma sutil absorção a 2,20 μm , característico da presença do mineral goetita. E o último conjunto de absorção foi determinado como sendo diagnóstico do mineral diopsídio, associado à vermiculita, pois apresenta três absorções seguidas, a primeira (mais intensa) em 2,32 μm é seguida por dois *shoulders* (“ombros”) em 2,384 μm e 2,436 μm . Após esta análise interpretativa fez-se uma mistura espectral destas assinaturas espectrais de minerais de referência, cuja resposta é uma curva espectral contendo todas as absorções características dos minerais (Figura 5.24b).

Por fim, foram analisados os espectros dos concentrados de fosfato e barita, que são os produtos finais da empresa Fosfértil (Figura 5.25).

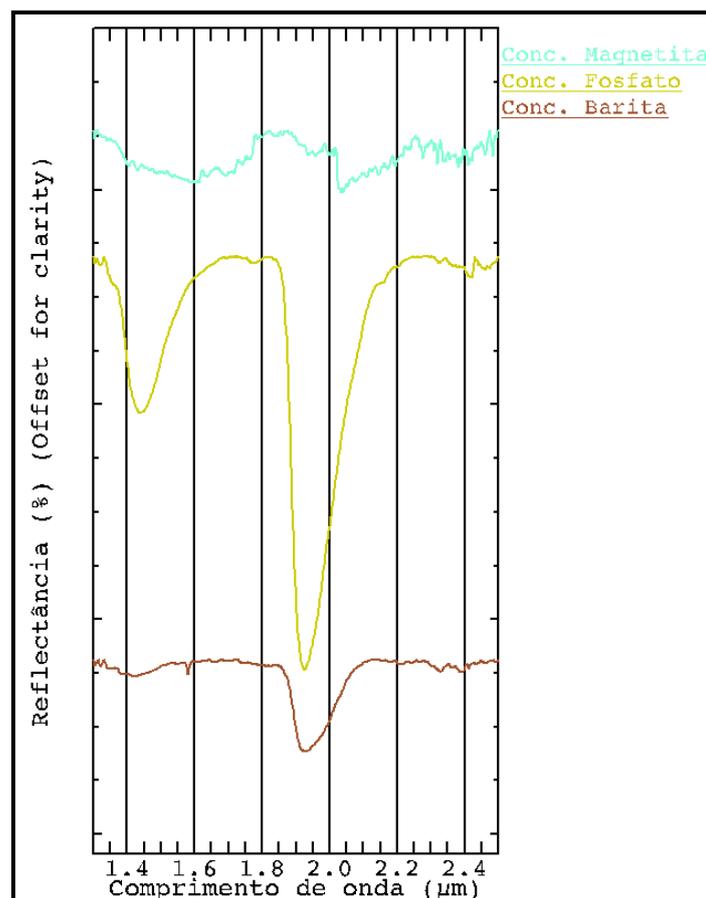


Figura 5.25. Comportamento espectral das amostras dos concentrados de fosfato e barita, cedidas pela mineradora Fosfértil.

Com a amostra de concentrado de barita identificou-se a existência de cinco picos de absorção, porém apenas três foram classificados. Os principais picos encontram-se em 1,424

μm , 1,926 μm , 2,208 μm , 2,330 μm e 2,390 μm . Procurou-se assinaturas espectrais da barita existente nas bibliotecas de referência, buscando localizar a que mais se assemelhava à amostra do concentrado, que neste caso foi a da USGS. Além da assinatura espectral do mineral barita, foram utilizadas assinaturas dos minerais de anidrita e quartzo. Estas assinaturas espectrais foram aplicadas com base na resposta da análise de difração de raios-X (Figura 5.26). O conjunto de assinaturas espectrais destes minerais com as indicações das absorções representados por setas de cor preta estão na Figura 5.27a.

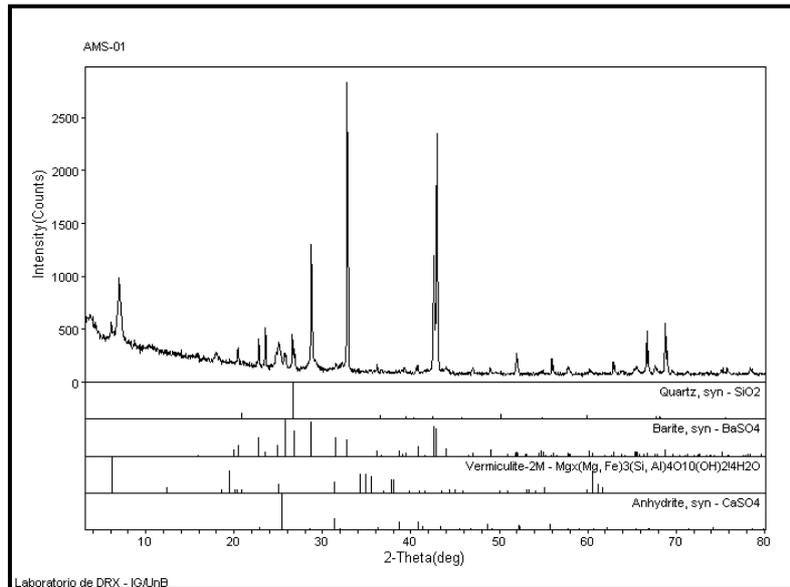


Figura 5.26. Difratograma do concentrado de barita.

A primeira absorção identificada em 1,424 μm foi interpretada como sendo da assinatura espectral do mineral quartzo. Já a segunda e mais significativa absorção em torno de 1,926 μm caracteriza a presença do mineral barita predominantemente, e de anidrita, secundariamente. A terceira e última absorção em 2,208 μm foi interpretada como sendo um conjunto de associação mineral de barita, anidrita e quartzo. Foi realizada ainda a mistura espectral entre estes minerais de referência, com intuito de apresentar uma curva que mais se aproximasse da curva espectral da amostra do concentrado de barita. Como resposta, a curva espectral descreve padrões de um concentrado de barita impuro contendo quartzo e anidrita (Figura 5.27b).

Uma importante observação neste resultado foi à semelhança ímpar e a observação de que nesta faixa do espectro (1,3 a 2,5 μm) o mineral apatita confunde-se por vezes, com o mineral anidrita, especulando assim, a provável existência de uma confusão mineral feita por uma análise estatística no PIMA, que indicava como mineral predominante em todos os dados a anidrita. Mas, os resultados da difração não apresentaram a existência de anidrita, a não ser em uma amostra. Ressalta-se também, que no mapeamento da anidrita realizado na difração de raios-X, ela se confunde com a vermiculita.

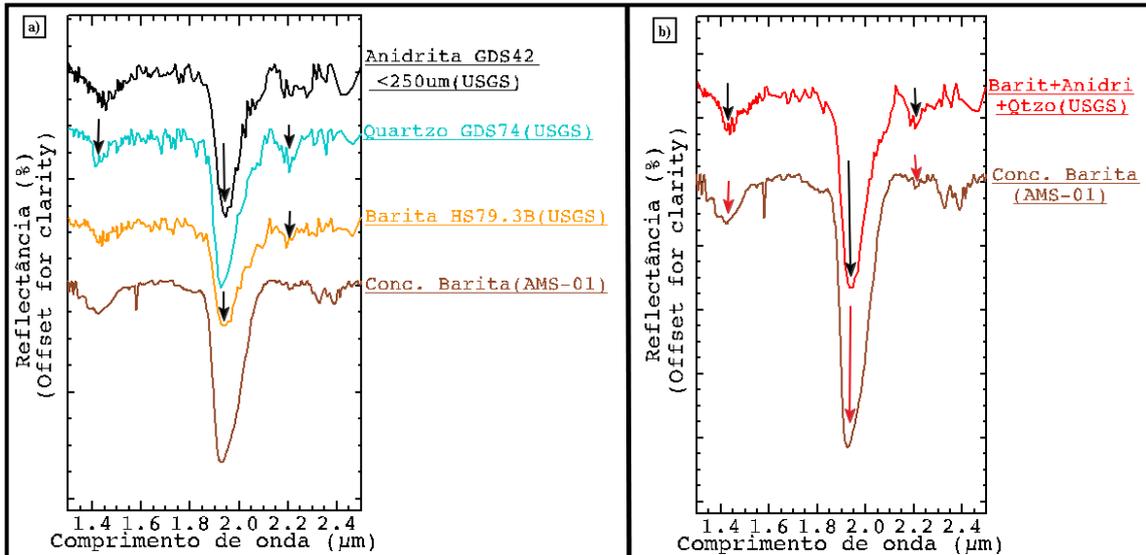


Figura 5.27. Comportamento espectral do concentrado de Barita: a) análise do espectro do concentrado com as assinaturas espectrais dos minerais de referência (anidrita, quartzo e barita); b) Resultado da mistura espectral dos minerais de referência e o espectro do concentrado de barita interpretado.

O concentrado de fosfato apresenta três marcantes valores de absorção em sua curva espectral, caracterizados em 1,442 μm , 1,988 μm e 2,422 μm . Ao realizar a análise da assinatura espectral utilizando a biblioteca de referência, chegou-se a conclusão que as assinaturas minerais que melhor definiram os valores destas absorções foram os minerais de vermiculita e hidroxil-apatita da USGS, os quais estão inclusos na assembléia mineral identificada na análise de difração de raios-X desta amostra (Figura 5.28).

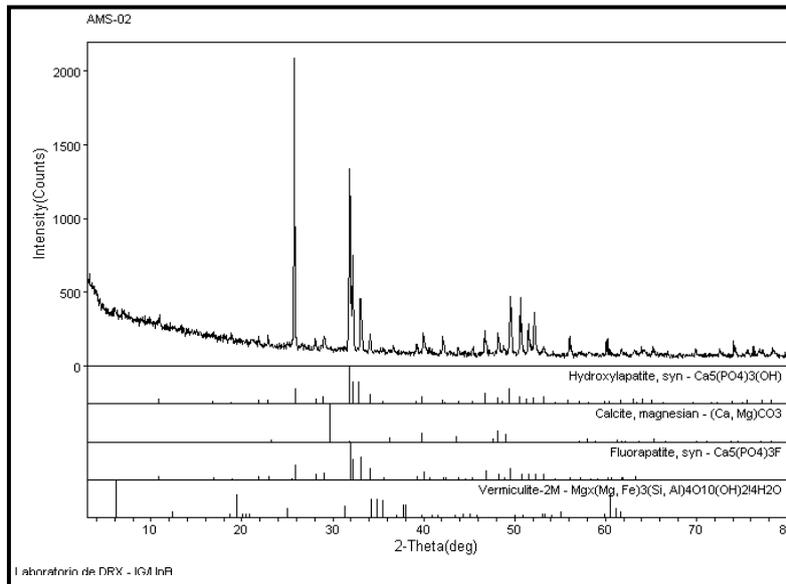


Figura 5.28. Difratoograma do concentrado de fosfato.

As absorções destas assinaturas espectrais são coincidentes com os valores das absorções do concentrado (Figura 5.29a). A absorção em 1,442 μm é coincidente com o mineral vermiculita. A segunda absorção, considerada a mais intensa da curva espectral, está

em 1,988 μm , caracterizada como sendo do mineral hidroxil-apatita. Já a absorção em 2,422 μm também está relacionada com o mineral vermiculita. Com base nestes resultados, realizou-se uma mistura espectral destes minerais de referência, resultando em uma curva espectral com comportamento bem similar ao concentrado de fosfato (Figura 5.29b).

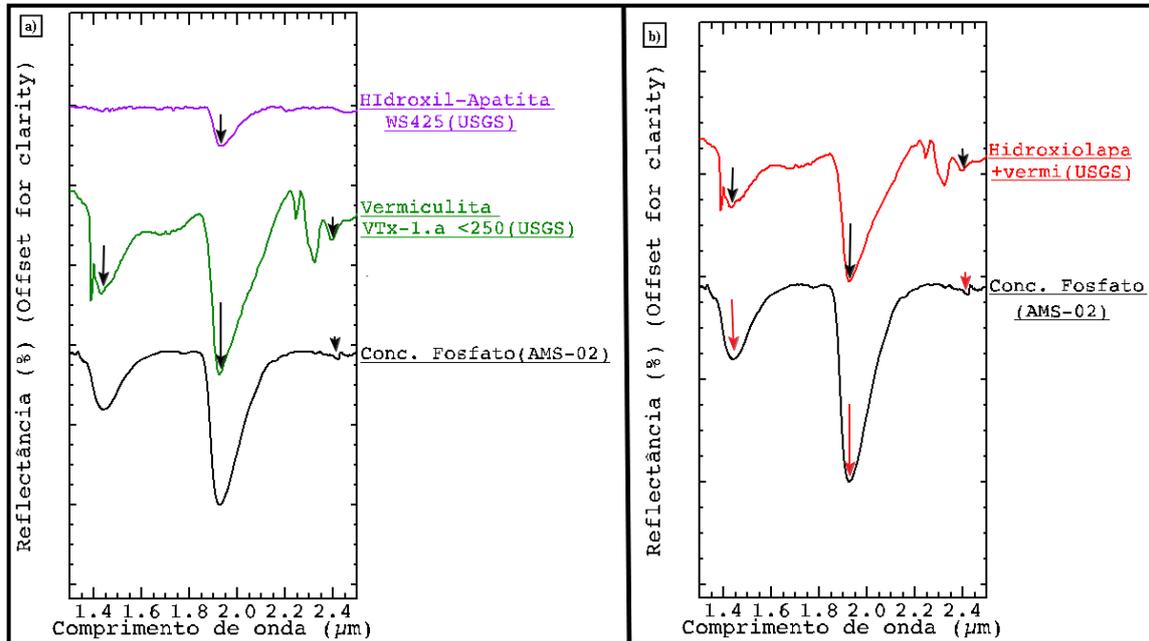


Figura 5.29. Comportamento espectral do concentrado de Fosfato: a) análise do espectro do concentrado com as assinaturas espectrais dos minerais de referência (vermiculita e hidroxil-apatita); b) Resultado da mistura espectral dos minerais de referência e o espectro do concentrado de fosfato interpretado.

Do exposto vemos que o concentrado de fosfato não foi totalmente caracterizado, provavelmente pela interferência de água na estrutura dos minerais envolvidos e de argilominerais não identificados.

A partir desta análise dos espectros foi realizada uma classificação SFF nas imagens do sensor ASTER da faixa do SWIR, utilizando como *endmembers* os minerais de referência das bibliotecas que contém as absorções que mais se assemelhavam aos conjuntos de espectros das amostras coletadas no campo.

Os dois conjuntos de misturas espectrais foram: flogopita, dolomita e hidroxil-apatita da biblioteca de referência da USGS; e apatita e dolomita da biblioteca de referência da JPL, cujos resultados foram considerados bastante satisfatórios, já que em todas as classificações a área de estudo ficou bem caracterizada. Para efeito de validação, as amostras correspondentes às absorções dos minerais de referência também passaram pelo processo da classificação SFF, que consistem da amostra CF 003 e da amostra de solo apatita-magnetita (AMS 01).

Na figura 5.30 podemos observar que na área de estudo, destacada por um retângulo de coloração avermelhada, obteve-se um bom resultado, levando em consideração a representatividade da cor vermelha como a indicação de regiões mais favoráveis à existência deste conjunto de minerais (flogopita, dolomita e hidroxil-apatita). Para tornar confiável esta afirmativa, pode ser observada na figura 5.31 a classificação SFF utilizando o espectro

reamostrado da amostra CF003, que confirma a relação entre as absorções dos minerais de referência com as amostras de campo.

Os minerais de referência da JPL, apatita e dolomita, também apresentaram bons resultados, como se vê na figura 5.32, que se confirma na classificação SFF da amostra de solo equivalente à mistura espectral destes minerais (Figura 5.33).

Nota-se que independente do tipo de biblioteca espectral, a classificação de depósitos de foscoritos em carbonatitos nesta faixa do espectro eletromagnético apresentou resultados significativos, incluindo o mapeamento de outras áreas sugestivas à prospecção de fosfato

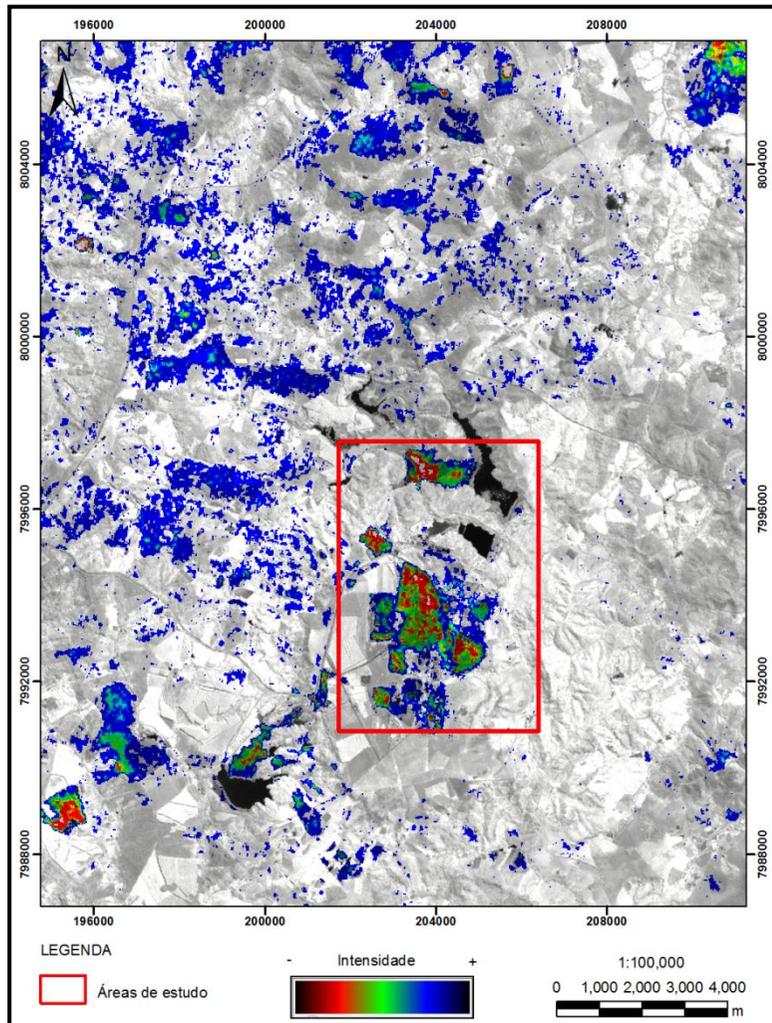


Figura 5.30. Fusão HSV da imagem ASTER 3N com o resultado SFF dos minerais de referência Flogopita, Dolomita e Hidroxil-apatita da USGS.

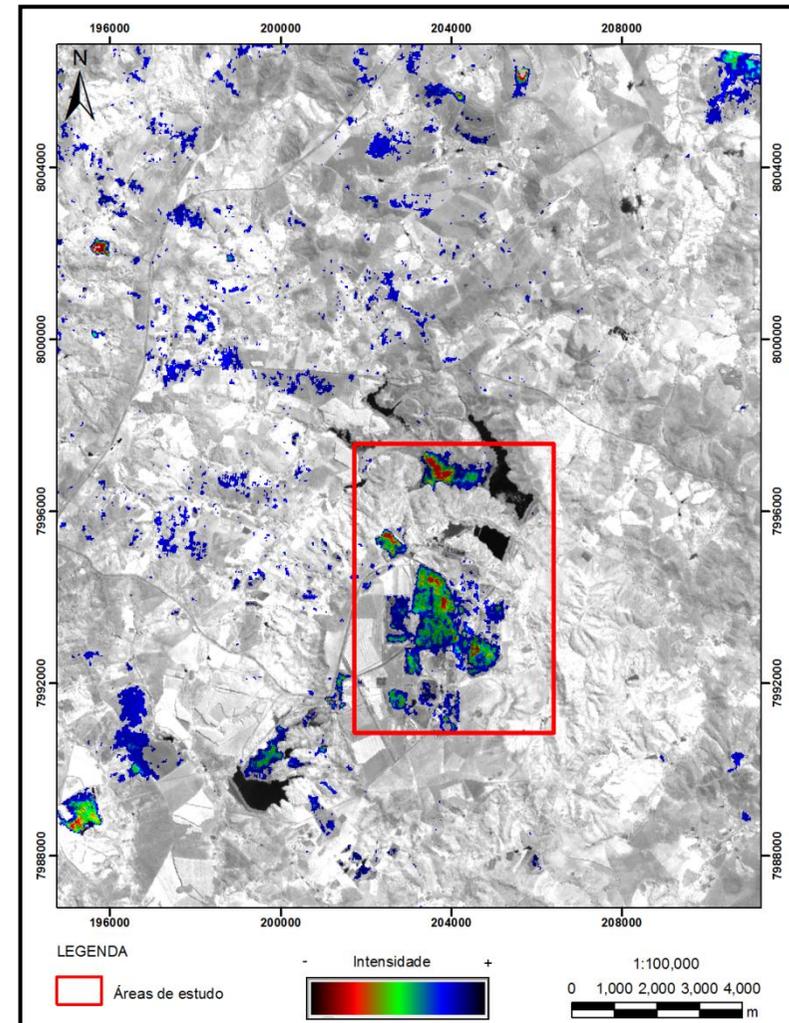


Figura 5.31. Fusão HSV da imagem ASTER 3N com o resultado SFF da amostra de Foscorito CF 003 do Complexo de Catalão I.

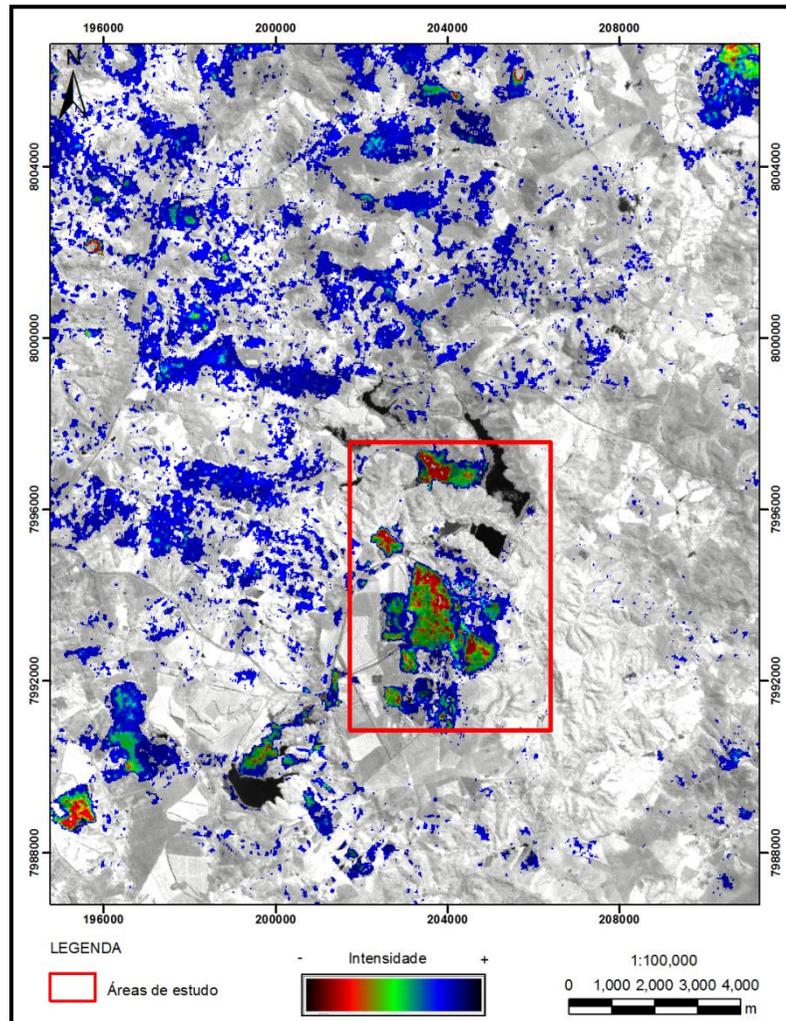


Figura 5.32. Fusão HSV da imagem ASTER 3N com resultado SFF dos minerais de referência Apatita e Dolomita da JPL.

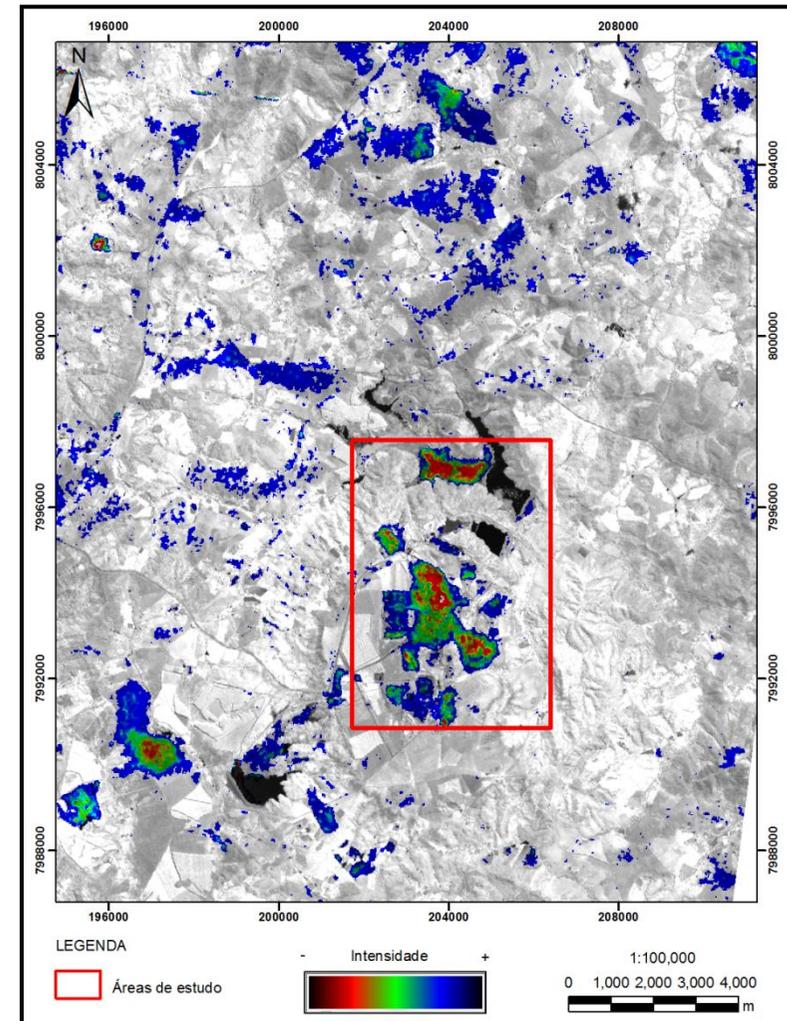


Figura 5.33. Fusão HSV da imagem ASTER 3N com resultado SFF da amostra de solo apatita-magnetita (AMS 01) do Complexo de Catalão I.

5.1.3 Dados TIR

Este subsistema diferente dos discutidos anteriormente, trabalha com a REM (radiação eletromagnética) emitida pelos objetos (minerais e rochas) em função da sua temperatura de superfície. Portanto, este subsistema (TIR) foi aplicado neste estudo, avaliando as respostas espectrais de emissividade na mina de Catalão I e adjacências. Onde a aquisição dos espectros das amostras coletadas em campo nesta faixa espectral, não foi possível obter, tendo em vista a indisponibilidade do espectrorradiômetro no faixa do termal.

Nesta faixa espectral foi apenas aplicada a classificação espectral SFF, com intuito de avaliar a potencialidade da imagem ASTER neste subsistema. Para tal foi utilizado como *endmembers* 3 espectros da apatita da biblioteca espectral do Arizona (ASU). Ao analisar o comportamento espectral desta biblioteca, observamos uma expressiva baixa no valor de emissividade a 9,1 μm , feição característica do mineral apatita. E para melhor representação gráfica e posterior utilização foi realizada uma média aritmética simples no ENVI 4.7 destes espectros da Apatita (Figura 5.34).

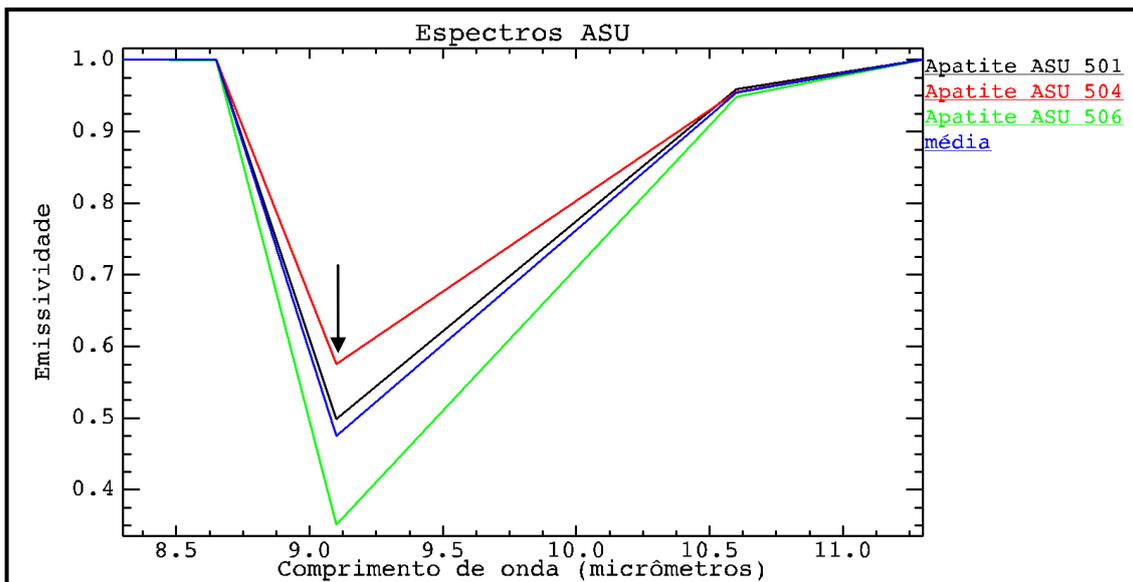


Figura 5.34. Espectro de emissividade da apatita da biblioteca de referência da ASU, reamostrados para as bandas termais do sensor ASTER, com espectro representando a média aritmética do mineral apatita.

Para melhor avaliação deste subsistema, foi realizado ainda, um teste aplicando o *z-profile* sob a imagem ASTER do termal, exatamente sob a região na mina de Catalão onde apresentam maior quantidade de minério fosfático (centro da mina), cuja resposta coincidiu com o valor de baixa emissividade a 9,1 μm , visualizada nos espectros da biblioteca ASU (Figura 5.35). Através desta forte feição de emissividade a 9,1 em ambos espectros (biblioteca de referência e imagem ASTER), podemos realizar uma classificação espectral utilizando o classificador SFF com mais confiabilidade nos dados.

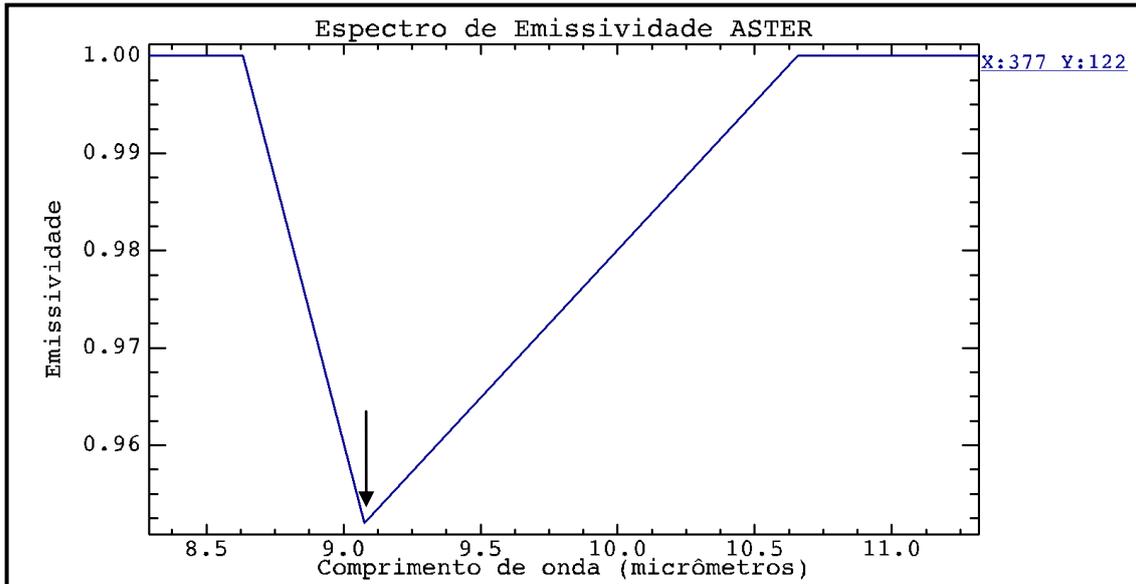


Figura 5.35. Z-Profile aplicado sob a mina de Catalão I na imagem ASTER – TIR.

Para realizar a classificação espectral foi utilizada a média aritmética dos espectros da Apatita da biblioteca de referência da ASU. Após aplicar o classificador sob a imagem ASTER do termal de Catalão I, foi realizado ainda ajustes histográficos e a aplicação de filtro, para melhor realçar as áreas propícias a ocorrência de fosfatos. O resultado desta classificação mostrou-se muito satisfatório, uma vez que realçou a área central da mina de Catalão I, onde localiza-se as reservas de fosfatos (Figura 5.36). Nesta figura podemos observar ainda, outras áreas de coloração avermelhada, que indicam a presença de fosfatos, como a área de rejeito da mina, localizado acima da mina de Catalão I, bem como em demais áreas nas adjacências da mina, localizados na região inferior do lado esquerdo da imagem SFF, tais áreas podem ser consideradas regiões propícias a ocorrência de fosfatos.

Com intuito de melhor visualizar os resultados desta classificação, a imagem SFF foi fusionado com a imagem 3N do visível, utilizando o aplicativo HSV existente no ENVI 4.7. Este resultado pode ser visualizado, na figura 5.37, onde mostra em detalhe as áreas promissoras de fosfato. Na figura 5.38A observa-se a área de estudo, com destaque em vermelho das regiões onde apresentam maior probabilidade da ocorrência de fosfato, bem como a área de rejeito acima da mina de Catalão I. Na figura 5.38B observa-se duas prováveis áreas com probabilidade relativamente alta da ocorrência de fosfatos. E na figura 5.38C destaca uma segunda área provável para ocorrência de fosfato, uma vez que a área apresenta solo exposto sem recobrimento da vegetação.

O processamento das imagens termais (TIR) gerou resultados promissores na identificação dos locais mais suscetíveis à ocorrência dos depósitos de fosfatos, ficando algumas “áreas prováveis” para estudos futuros. Acredita-se que o fato de a mina ser a céu aberto, tenha contribuído positivamente nos resultados.

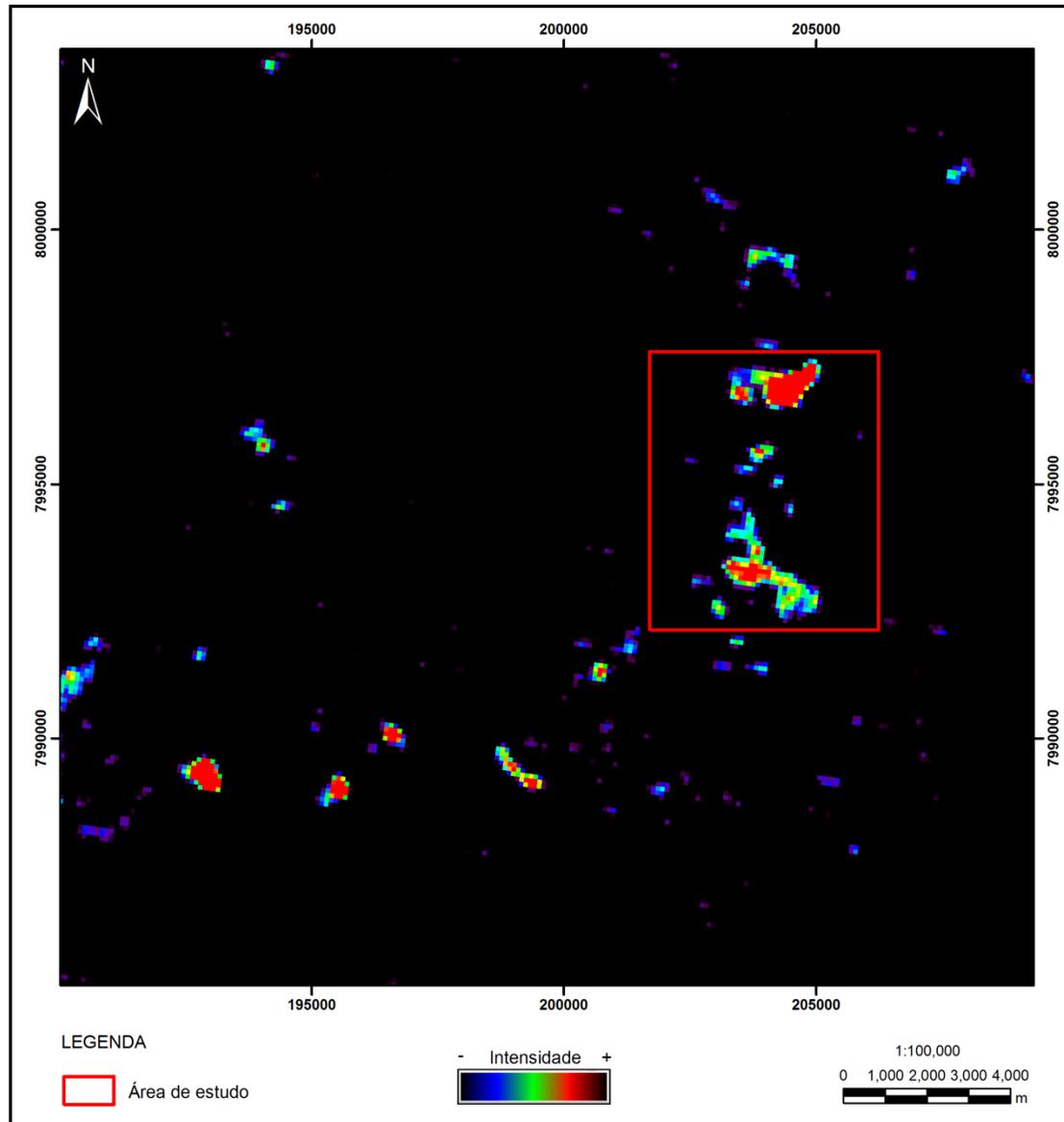


Figura 5.36. Classificação SFF aplicada sob a Mina de Catalão I utilizando a imagem termal do ASTER, em destaque a Mina de Catalão I e a área de rejeito da mina.

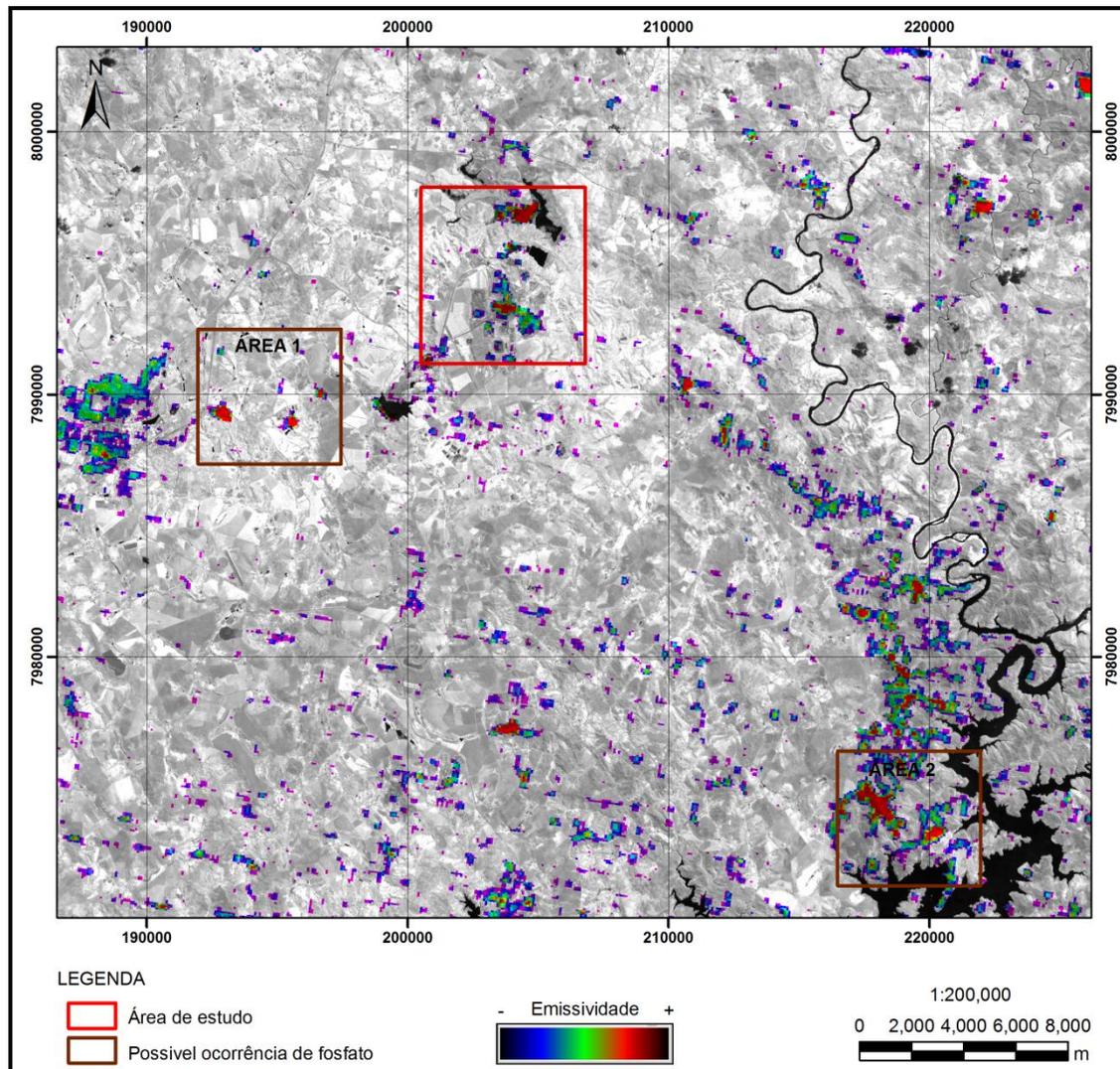


Figura 5.37. Resultado final da imagem ASTER na faixa do Termal: classificação SFF reamostrada para faixa do visível por meio da banda 3N, em detalhe a área de estudo e as áreas propícias a ocorrência de depósitos de fosfato.

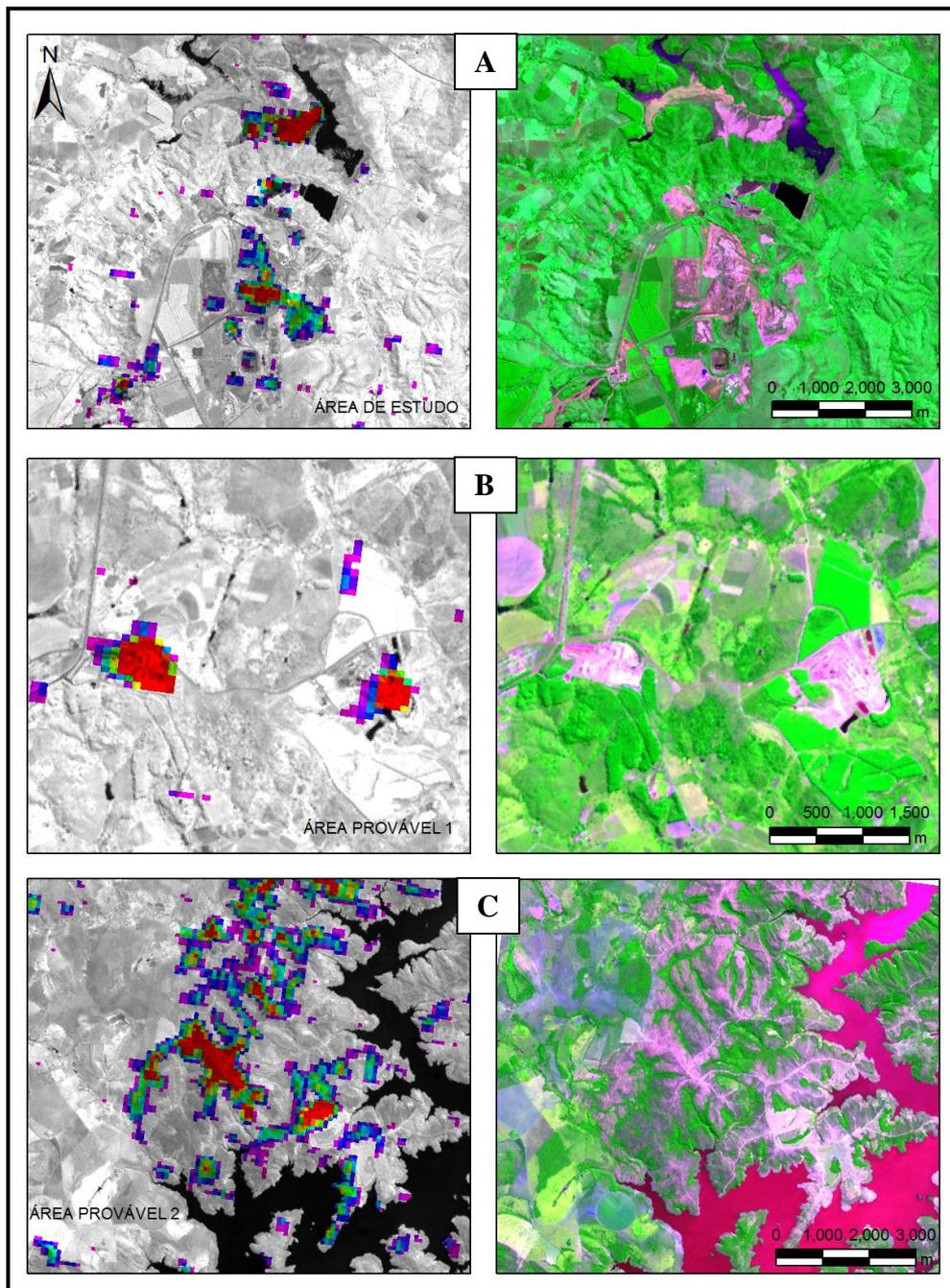


Figura 5.38. Fusão da classificação SFF com a imagem 3N do visível. Em destaque as regiões que obtiveram os melhores resultados: A - área de estudo (Mina Fosfertil); B - pequenas exposições de frente de lavras; C - solos sem cobertura vegetal.

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO DA REGIÃO DE CAMPOS BELOS

De acordo com o objetivo do trabalho e para melhor compreensão, os resultados foram divididos de acordo com os subsistemas existentes no sensor ASTER: VNIR (visível e infravermelho próximo), SWIR (infravermelho de onda curtas ou médio) e TIR (infravermelho termal).

5.2.1 Dados do subsistema VNIR

Os ROIs (regiões de interesse) aplicados sob as imagens do subsistema VNIR dessa região abrangeram duas categorias: a primeira envolvendo as áreas prospectáveis de fosfatos (frente de lavra), denominadas de São Bento (polígono vermelho-1) e Coité 1 e 2 (polígonos verde-2); e a segunda, abordando áreas circunvizinhas expostas e sem vegetação, representadas pelos polígonos amarelo (3), alaranjado (4) e magenta (5), conforme a figura 5.39.

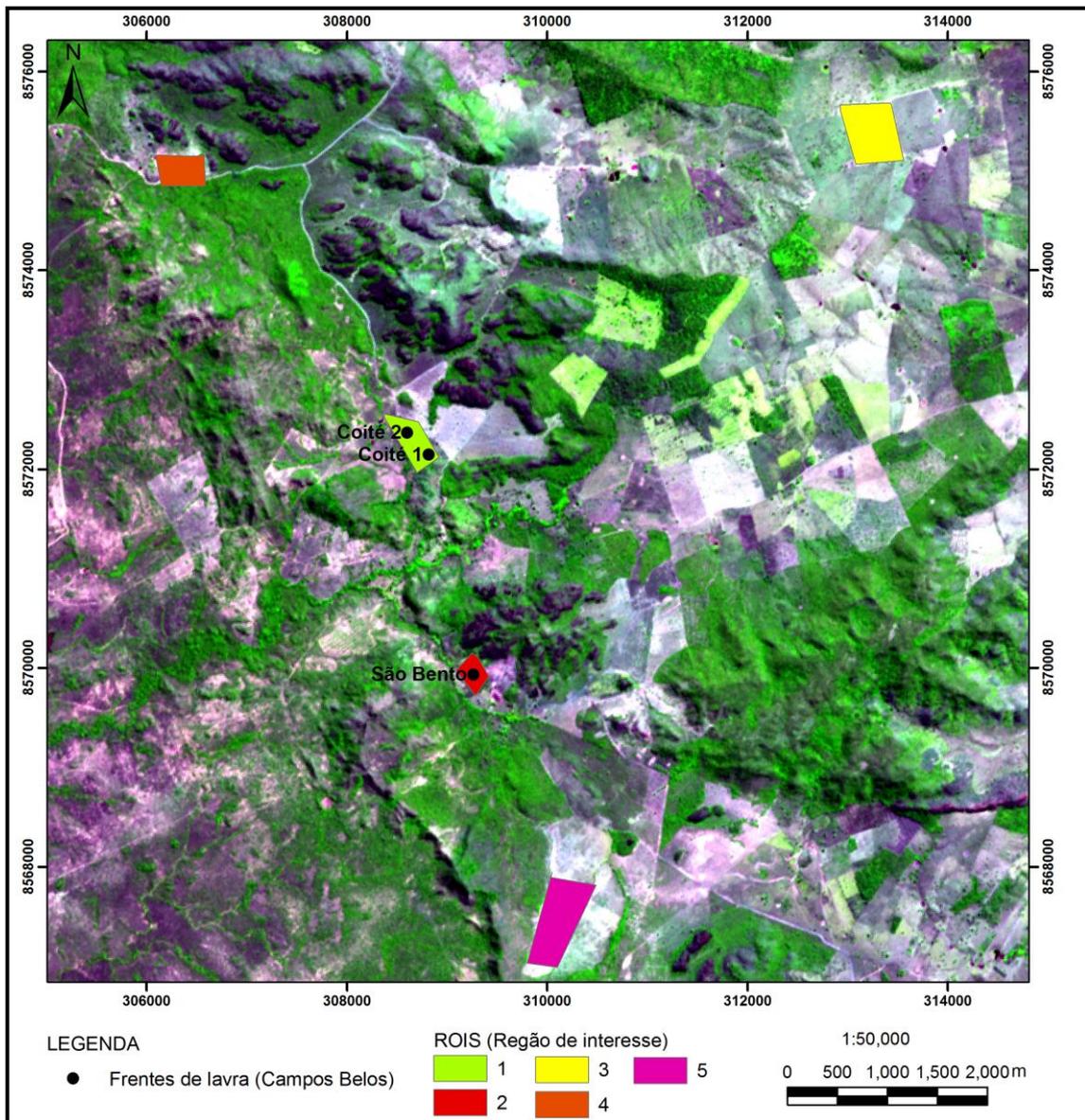


Figura 5.39. ROIs da região de Campos Belos sob imagem ASTER-R1G3B2.

Por meio dos *ROIs* foi adquirida a média aritmética destas áreas na imagem ASTER, as quais foram representadas por curvas espectrais, definindo o comportamento espectral das áreas de interesse, tornando possível a identificação da principal banda de absorção. Tais curvas são ilustradas separadamente, destacando a área de estudo (São Bento e Coité 1 e 2) e secundariamente as áreas de interesse do entorno, especificadas com a mesma cor dos *ROIs* descritos anteriormente (Figura 5.40).

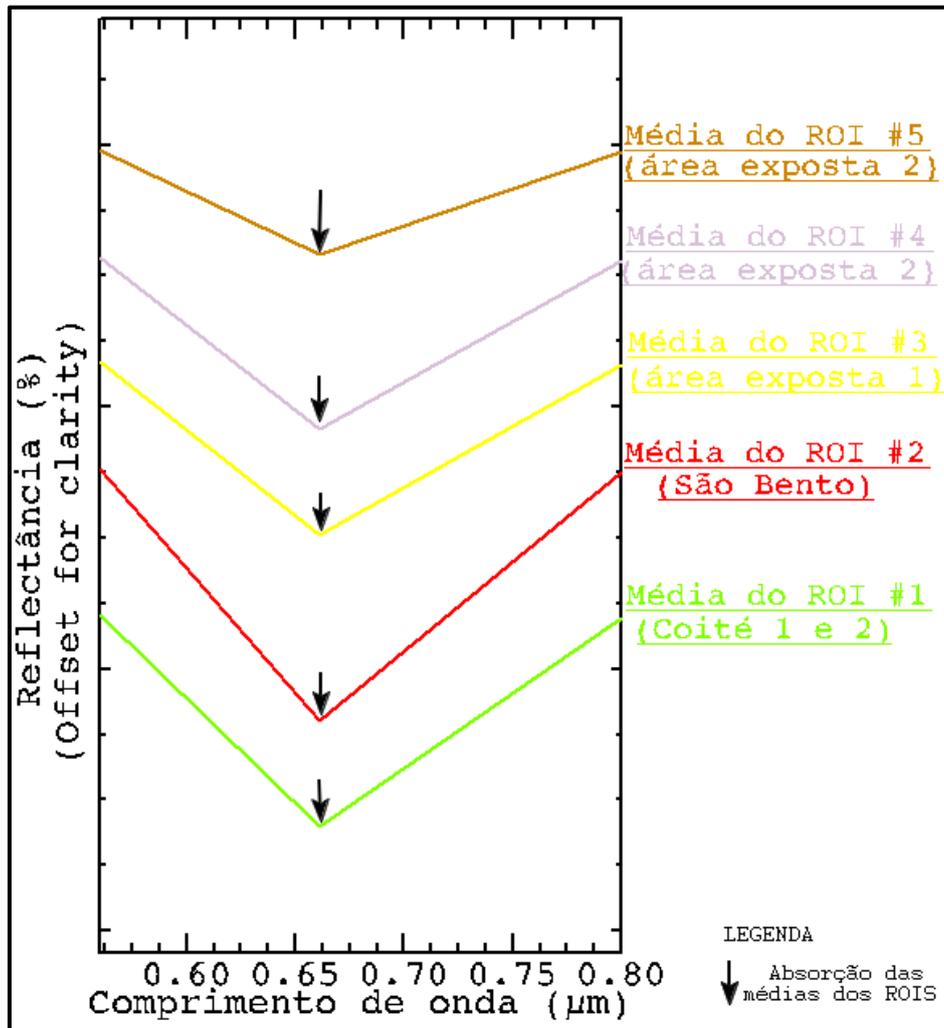


Figura 5.40. Espectros das médias aritméticas de cada *ROI*s de áreas específicas na imagem ASTER-VNIR.

De acordo com esses dados, a principal absorção nesse intervalo espectral ocorre em torno de 0,6610 μm, encontrado na banda 2 do subsistema VNIR da imagem ASTER. Infelizmente essa absorção forte identificada em todos os *ROIs* da imagem ASTER não foi verificada nos espectros das amostras de campo reamostrados para as bandas do ASTER, conforme a figura 5.41. Possivelmente essa feição não tenha sido verificada nas amostras de campo devido à forte presença de óxidos e íons ferrosos dos minerais de argila, que, segundo Hunt & Salisbury (1976), eventualmente podem mascarar absorções no visível e infravermelho (próximo), principalmente se forem argilas de coloração escura. Para evidenciar essa possibilidade, essas mesmas amostras adquiridas em campo foram analisadas espectralmente,

observando o comportamento espectral e as absorções existentes em cada amostra (Figura 5.42).

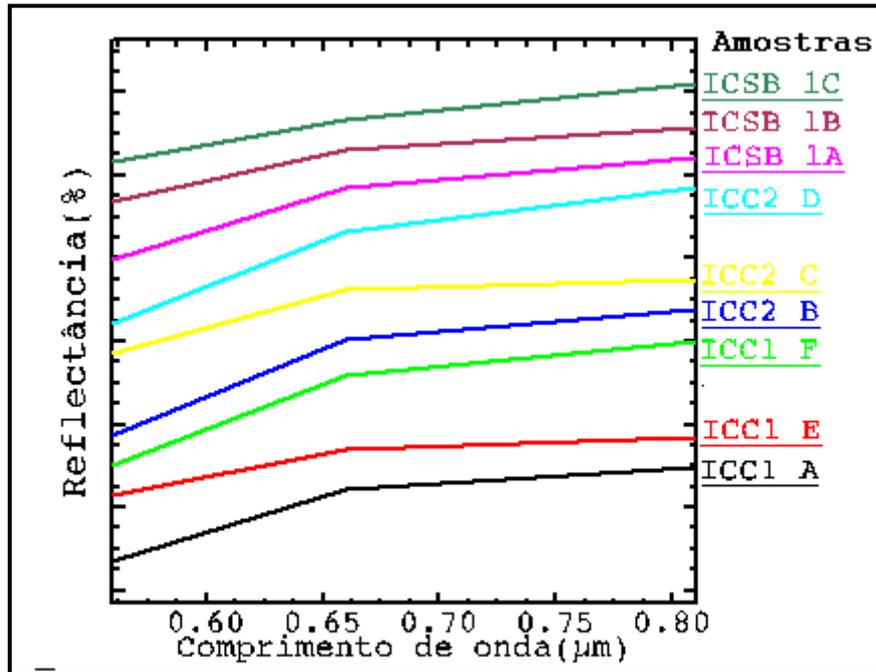


Figura 5.41. Espectros das amostras de campo reamostradas para as bandas do ASTER.

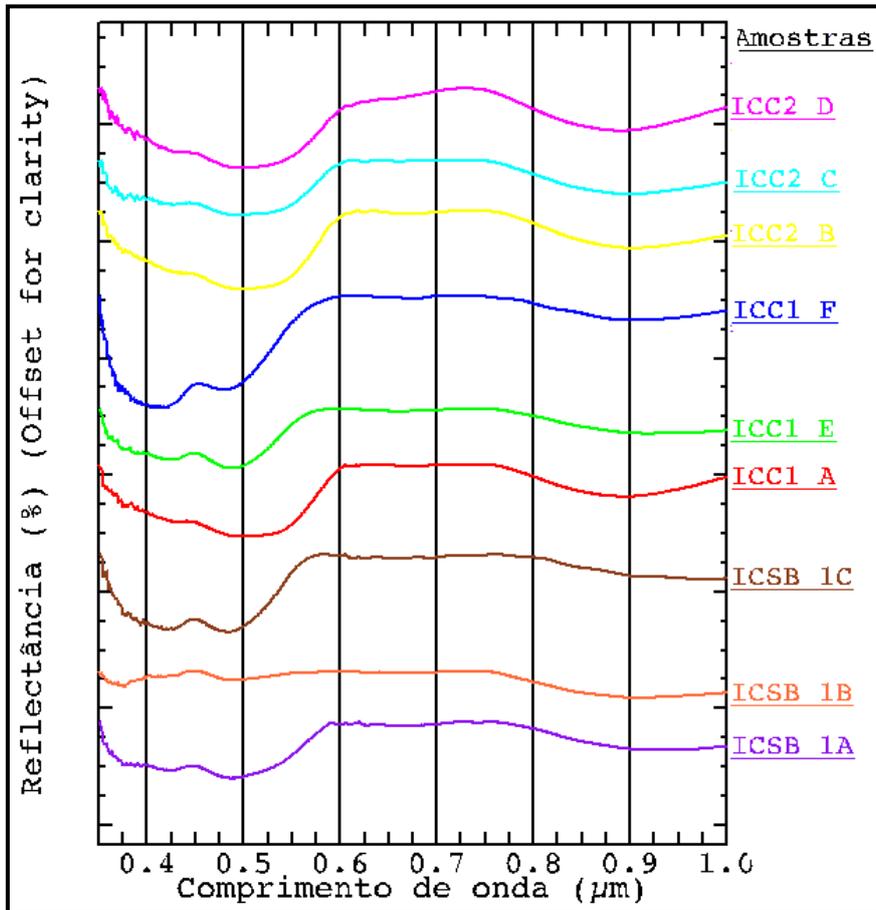


Figura 5.42. Espectros não reamostrados para as bandas do ASTER das amostras coletadas em campo na região de Campos Belos (GO).

Os espectros das amostras de campo foram divididos em dois grupos, de acordo com a similaridade do comportamento espectral e conseqüentemente seus valores de absorção. O primeiro grupo engloba as amostras definidas como ICC1 A, ICC2 B, C e D, cujos comportamentos espectrais mostraram-se bastante análogos, apresentando quatro absorções principais: 0,4278 μm , 0,5220 μm , 0,6792 μm e 0,8830 μm , sendo as duas primeiras provavelmente relacionadas à transferência de cargas entre ferro ferroso (Fe^{2+}) e férrico (Fe^{3+}). Essas absorções foram analisadas com auxílio das bibliotecas espectrais da USGS e JPL, nas quais se definiu que as absorções identificadas nesse grupo de amostras estavam relacionadas com a presença de óxido e hidróxido de ferro, caracterizados como minerais de limonita ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) da biblioteca de referência USGS e hematita ($x\text{-Fe}_2\text{O}_3$) da JPL (Figura 5.43).

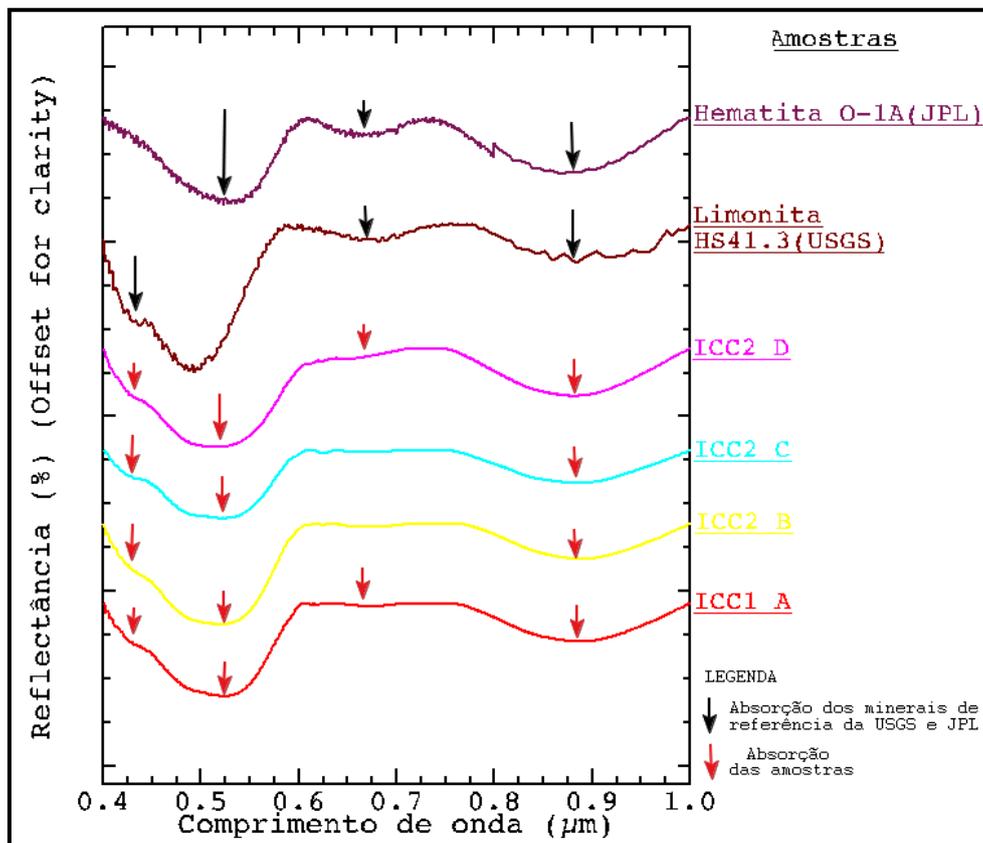


Figura 5.43. Curvas espectrais do primeiro grupo de amostras de campo com suas respectivas absorções (setas vermelhas) e minerais de referência Hematita e Limonita das bibliotecas USGS e JPL com suas principais absorções na faixa do visível e infravermelho próximo (VNIR).

O segundo grupo de espectros é constituído pelas amostras ICC1 E e F, ICSB 1A e 1C, possuindo comportamento espectral bem semelhante entre si, com absorções ocorrendo a 0,4308 μm , 0,4973 μm , 0,6792 μm e 0,8830 μm , que no geral são quase idênticos ao grupo anterior, principalmente nas duas últimas absorções, porém esse grupo de amostras apresenta um *shoulder* (“ombro”) mais expressivo a 0,4308 μm , característico dos minerais de goetita ($x\text{-FeOOH}$). Por esse grupo mineral apresentar assinaturas espectrais de uma mesma biblioteca de referência, realizou-se uma mistura espectral entre os minerais de goetita e limonita, já que

os mesmo representam melhor tais absorções. Como resultado obteve-se uma curva espectral de coloração verde, correspondendo às expectativas de similaridades com as amostras de campo (Figura 5.44).

Para análise de fosfatos na região do visível em depósitos sedimentares, a espectrorradiometria em conjunto com imagens ASTER na região do visível e do infravermelho próximo não apresentou resultados relevantes a esse tipo de prospecção, uma vez que as feições de absorção derivadas do ferro são mais marcantes do que as feições de fosfato, tornando assim este subsistema apenas atuante como suporte na fase interpretativa, para compreender as variações composicionais dos subsistemas.

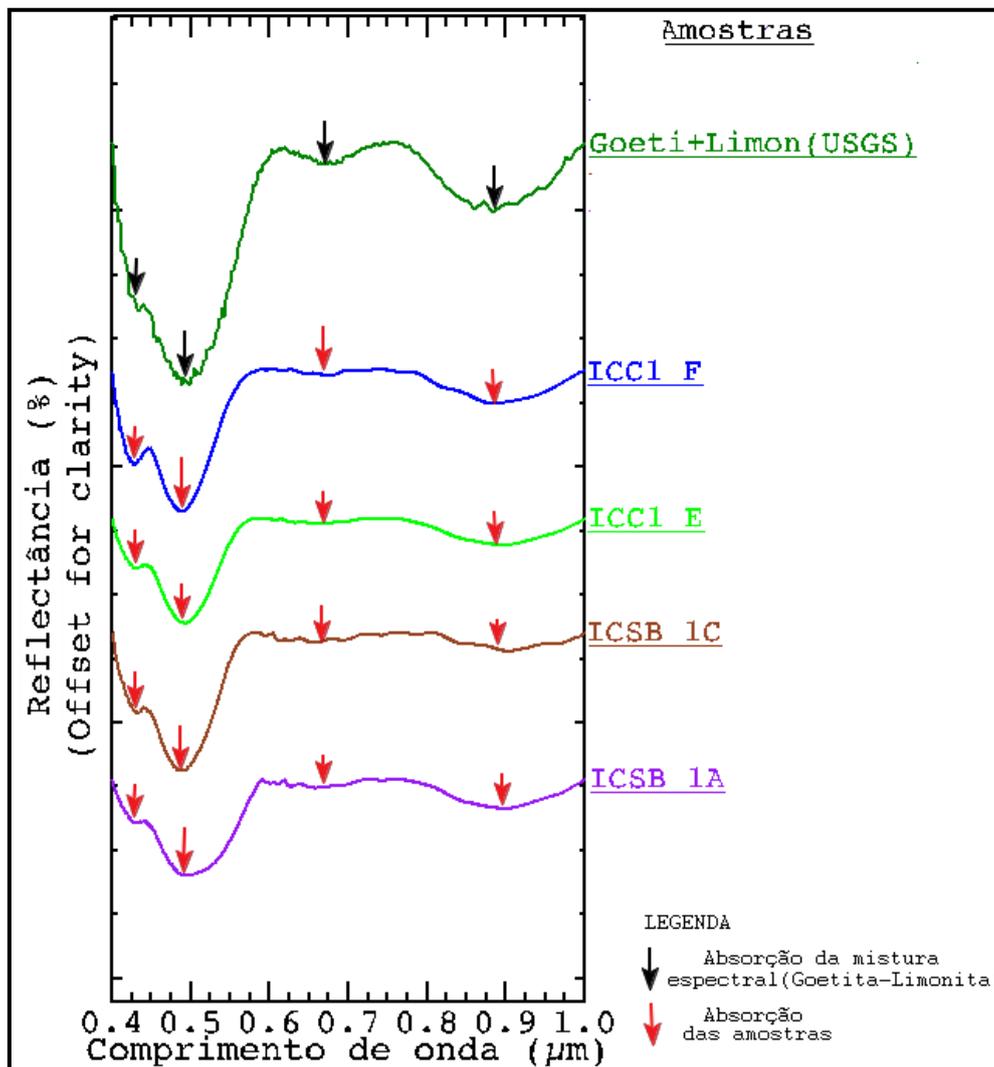


Figura 5.44. Curvas espectrais do segundo grupo das amostras de campo com suas absorções destacadas por setas vermelhas e a mistura espectral entre os minerais de referência Goetita e Limonita da biblioteca da USGS, correspondendo às expectativas de similaridades com as amostras de campo.

5.2.2 Dados do subsistema SWIR

As amostras coletadas em campo (fosforitos e siltitos fosfatados com teores variando de 11 a 34% de P_2O_5) apresentam no geral comportamentos e absorções espectrais bastantes similares, como feições próximas de 1,4 μm e 1,9 μm , que indicam presença de água molecular nos espectros, na faixa espectral do infravermelho de ondas curtas (SWIR), conforme a figura 5.45. Entretanto, possui algumas particularidades, como diferenças sutis de absorções em diferentes posições, relacionadas com a assembléia mineral das amostras, as quais são divididas em dois grupos, denominados A e B.

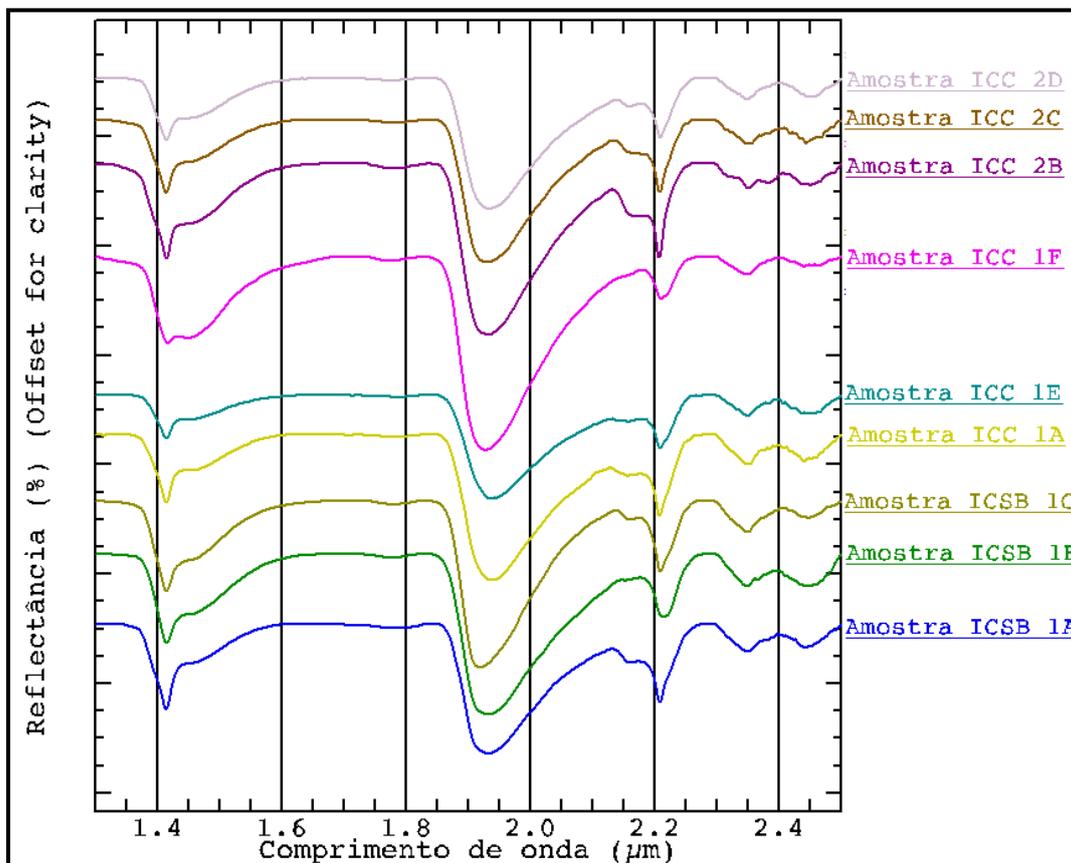


Figura 5.45. Comportamento espectral e feições de absorção dos espectros das amostras de Campos Belos (GO) na faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR).

O grupo A é constituído pelo conjunto de amostras representadas pelas siglas ICSB 1A, ICSB 1C, ICC 1A, ICC 2B, ICC 2C e ICC 2D, cuja classificação macroscópica encontra-se na tabela 4.2 do capítulo anterior. A análise espectral dessas amostras foi realizada com base na assembléia mineral identificada nos difratogramas adquiridos por meio da difração de raios-X (Figura 5.46).

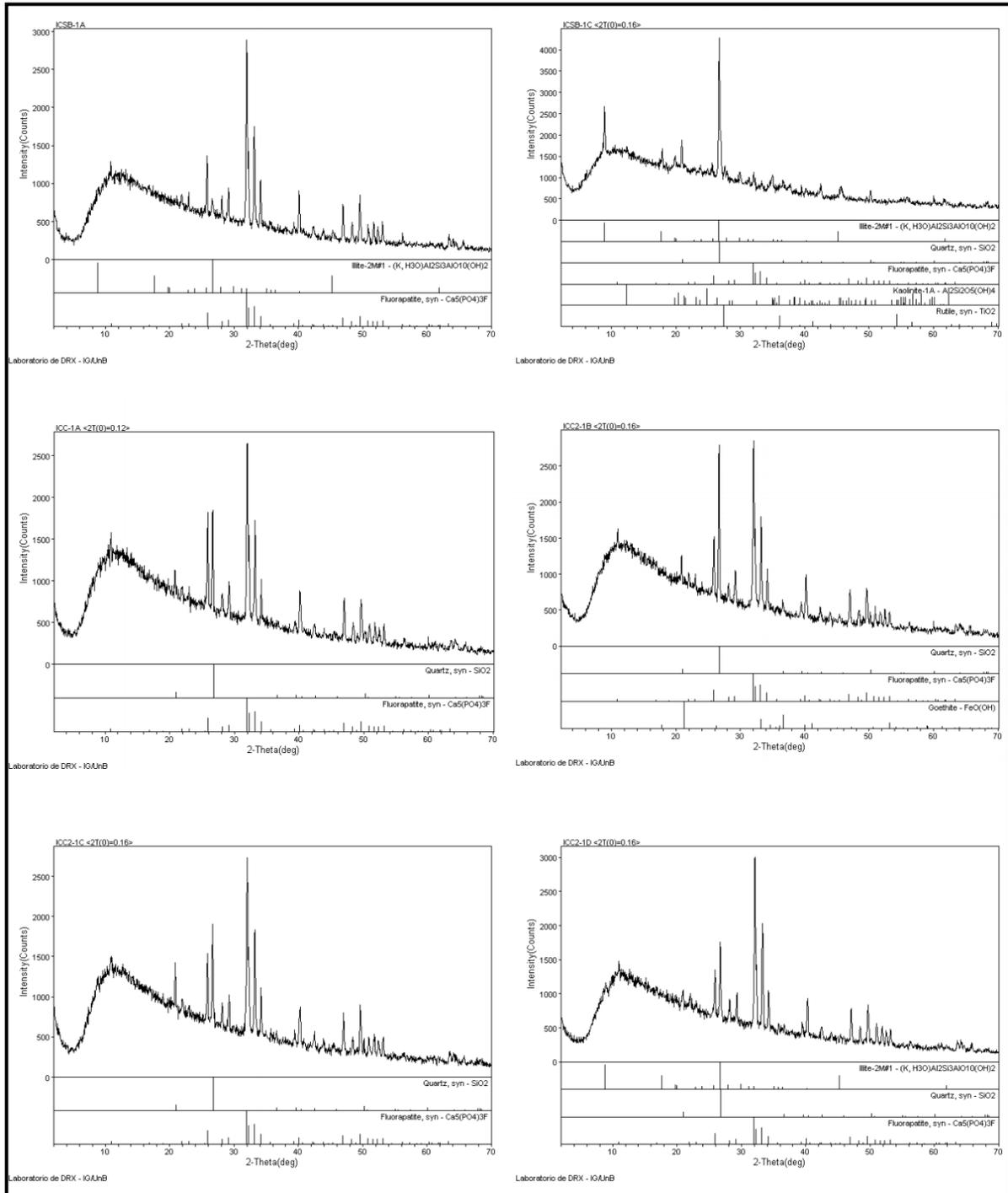


Figura 5.46. Difractogramas das amostras do grupo A (ICSB 1A, ICSB 1C, ICC 1A, ICC 2C, ICC 2D e ICC 2D, adquiridos por meio de difração de raios-X.

Esse grupo apresenta seis feições de absorção bem marcantes, em torno de 1,4140 μm , 1,9160 μm , 2,1600 μm , 2,2000 μm , 2,3500 μm e 2,4520 μm . Essas absorções foram investigadas comparando as assinaturas espectrais dos minerais de referência das bibliotecas da USGS e JPL, nos quais, de acordo com a análise espectral, os minerais que mais apresentaram feições similares às amostras de interesse foram os minerais de illita ($\text{KAl}_4(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo (SiO_2), hidroxil-apatita

($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) e rutilo (TiO_2), todos relacionados a processos de intenso intemperismo (Figura 5.47a).

A absorção em torno de 1,4140 μm foi relacionada, predominantemente, com a presença dos argilominerais de illita e caulinita, além de minerais de quartzo. As absorções em torno de 1,916 μm são constituídas por minerais hidratados como hidroxil-apatita e caulinita, além de apresentarem absorções coincidentes de illita e rutilo atuando como traço na amostra. A absorção 2,1600 μm ocorre na caulinita na forma de *shoulder* (“ombro”), bem próximo a uma feição de absorção intensa a 2,2000 μm , abrangendo minerais de illita e a própria caulinita. Já a absorção em torno de 2,3500 μm , muitas vezes confundida com a absorção dos carbonatos, está intimamente relacionada com a presença dos argilominerais illita e caulinita, com pouca presença de quartzo, sendo o argilomineral illita o mais característico para esses tipos de absorção. A última feição de absorção observada nesse grupo de espectros possui valor em torno de 2,4520 μm , referente a presença dos minerais de rutilo e argilominerais de caulinita com quartzo.

Por fim, com intuito de ressaltar e caracterizar melhor as assinaturas espectrais existentes nessa faixa espectral realizou-se uma mistura entre os espectros dos minerais de referência citados anteriormente, resultando em uma curva espectral heterogênea referente aos valores de absorção coincidentes com as amostras do grupo A (Figura 5.47b).

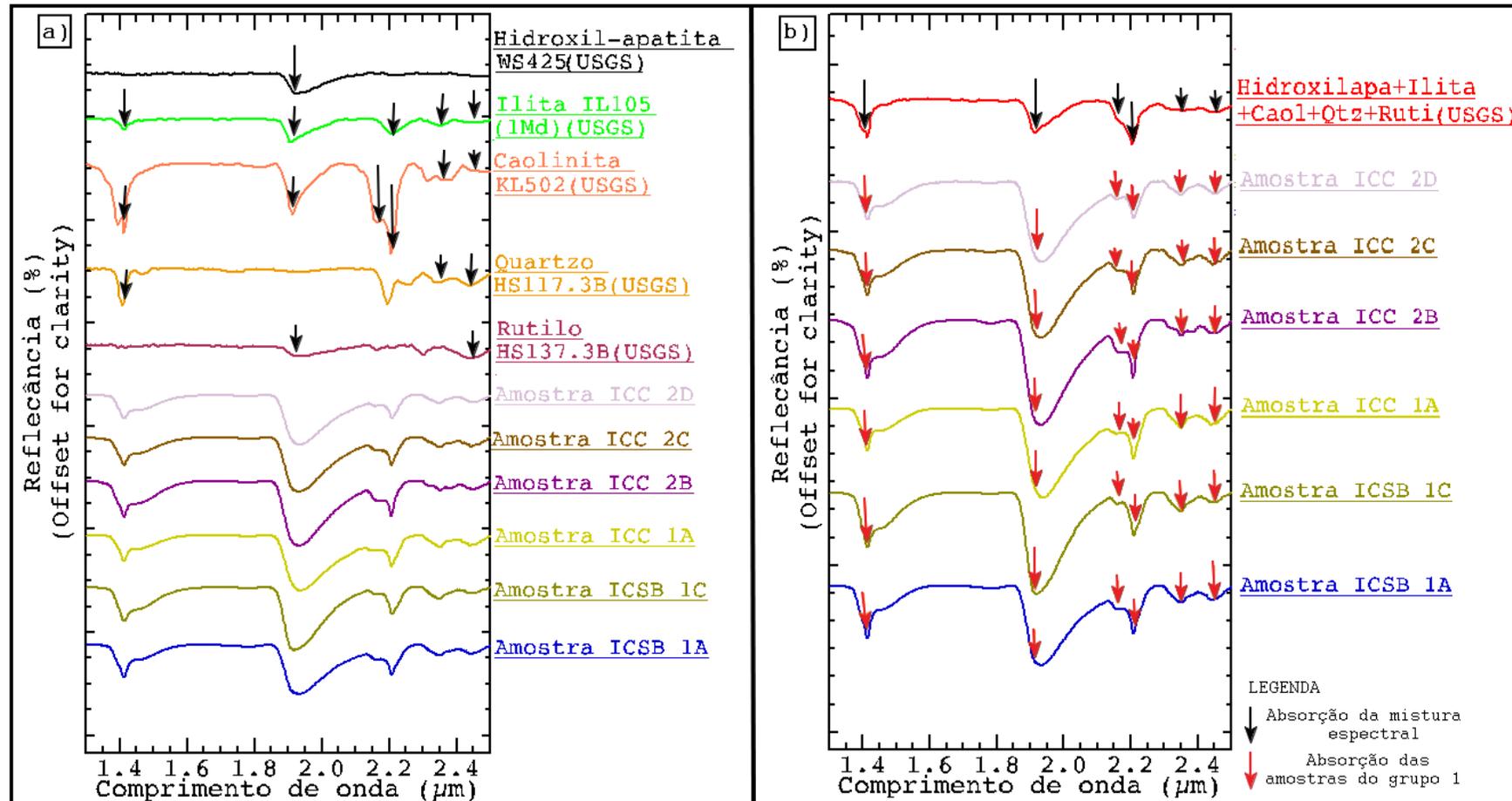


Figura 5.47. a) curvas espectrais do grupo A (ICSB 1A e 1C, ICC 1A, 2B, 2C e 2D) com as assinaturas espectrais do Rutilo, Quartzo, Caulinita, Illita e Hidroxil-apatita da USGS; b) curvas espectrais e as absorções das amostras do grupo A, com o assinatura da mistura espectral (vermelho) da biblioteca de referência (USGS).

Com base nessas respostas espectrorradiométricas, reamostrou-se essa mistura espectral para as bandas do ASTER no subsistema de infravermelho de ondas curtas (SWIR), com intuito de identificar espacialmente as amostras do grupo A. Para tal aplicou-se a classificação SFF (*Spectral Feature Fitting*) utilizando essa mistura espectral como *endmember*. Ao avaliar o espectro reamostrado (utilizado como *endmember*), observou-se que o espectro apresentava duas feições espectrais distintas, uma mais representativa a 2,2050 μm e outra a 2,3300 μm , menos expressiva, porém marcante (Figura 5.48).

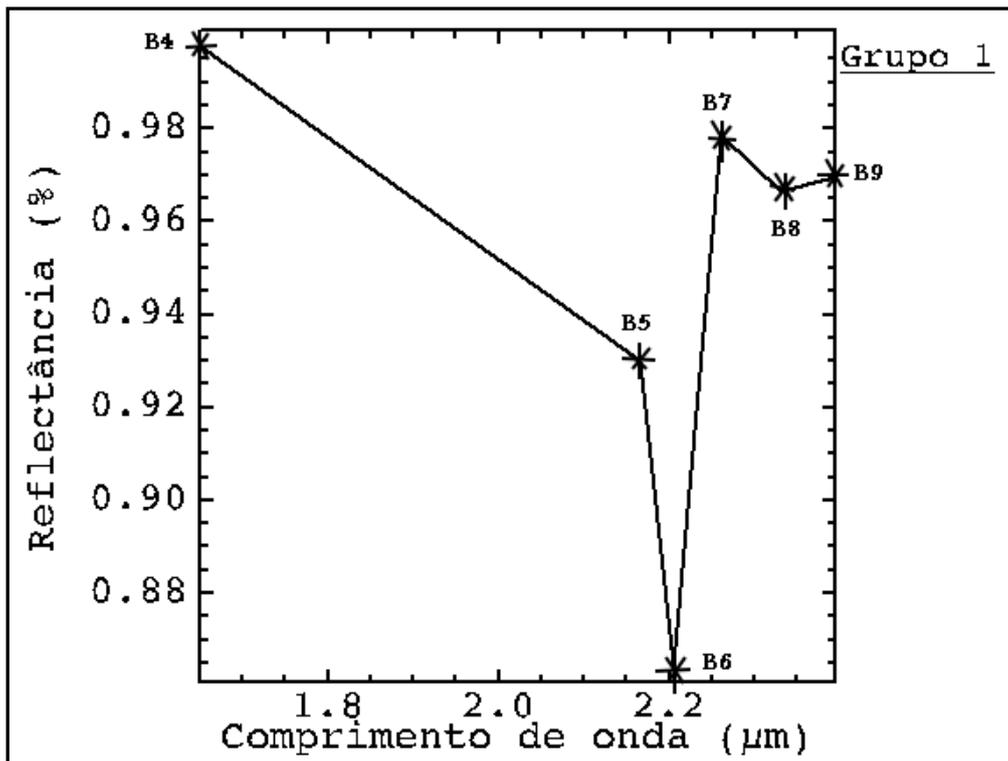


Figura 5.48. Feições de absorção do espectro reamostrado da mistura espectral do grupo A.

Tais feições podem estar relacionadas com a presença do PO_4^{-3} , ocasionadas devido a movimentos vibracionais, envolvendo a ligação P-OH, que geralmente ocorrem em feições de absorções próximas a 2,2 μm e 2,4 μm (Gaffey, 1987). Com o resultado dessa classificação efetuou-se uma fusão entre a banda 3N do VNIR (com resolução espacial de 15 metros) e o resultado da classificação SFF, buscando uma melhor visualização das possíveis áreas propícias a prospecção de fosfatos, destacadas pela cor vermelha na Figura 5.49.

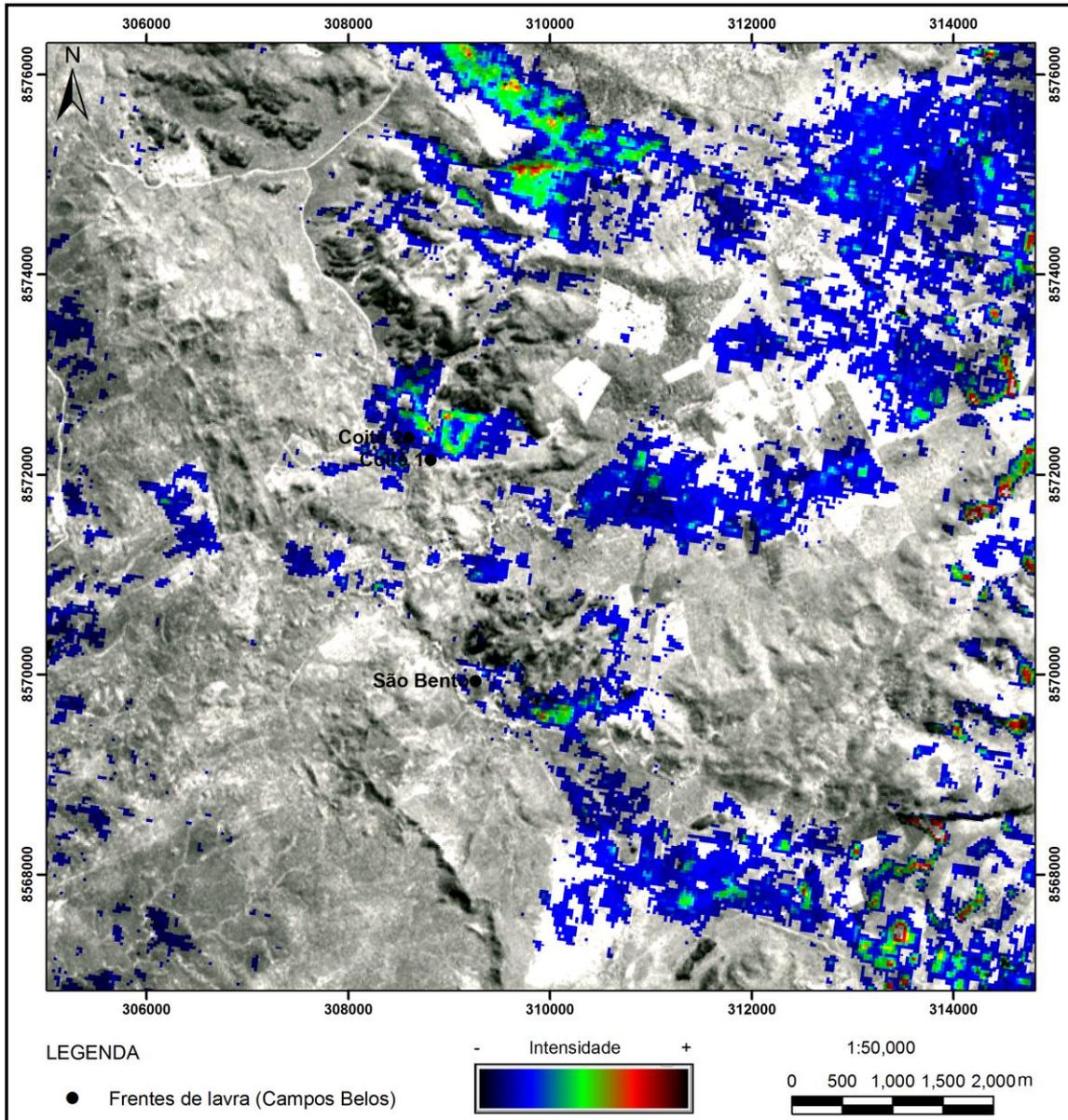


Figura 5.49. Fusão entre a banda 3N do VNIR com a imagem *Scale* da Classificação SFF sobre o SWIR.

As amostras do grupo B, representadas pelas siglas ICSB 1B, ICC 1E e 1F apresentam comportamento espectral e intensidades de absorção, bem próximos ao grupo A, e sua diferenciação decorre da presença de alguns argilominerais, conforme estabelecido pela análise de difração de raios-X (Figura 5.50).

As principais feições de absorção dessas amostras estão centradas em torno de 1,4140 μm , 1,4720 μm , 1,9180 μm , 2,2120 μm , 2,3460 μm e 2,4520 μm , visivelmente semelhantes as feições do grupo discutido anteriormente. Essas feições de absorção foram analisadas comparando as assinaturas espectrais dos minerais de referência da biblioteca da USGS, nas quais, de acordo com as respostas da difração de raios-X e os valores de absorção, os minerais mais característicos são: illita ($\text{KAl}_4(\text{Si}_{1,3}\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_{4-4}\text{H}_2\text{O}$), hidroxil-apatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) e quartzo (SiO_2) (Figura 5.51a).

A absorção que ocorre a 1,4140 μm está relacionada com a absorção em 1,4720 μm possuindo uma feição tipo *shoulder* ("ombro"), característico da presença de argilominerais de illita e secundariamente de minerais de quartzo. A feição que ocorre em torno de 1,9180 μm representa a existência de minerais de apatita, em sua variedade hidroxilados, denominados de hidroxil-apatita, ocorrendo em associação com os argilominerais de illita. A feição de absorção que ocorre a 2,2120 μm está diretamente relacionada com a presença da illita, tendo uma leve diminuição de albedo devido a mesma ser um argilomineral parcialmente expansivo mudando de posição freqüentemente a depender das trocas iônicas. Próximo à feição anterior ocorre uma absorção em torno de 2,3460 μm que esta diretamente interligada a presença da illita, possuindo ainda a presença dos minerais de quartzo. Tal absorção está associada à outra feição de absorção que ocorre a 2,4520 μm , apresentando como mineral principal a illita, secundariamente ao quartzo. Com base nessas respostas espectrais, efetuou-se uma mistura espectral entre os minerais de referência da biblioteca espectral da USGS, resultando em uma curva espectral de coloração avermelhada, representando o *endmembers* deste grupo, uma vez que possui o mesmo comportamento espectral e as mesmas feições de absorção das amostras desse grupo. Portanto, as curvas espectrais deste grupo são caracterizadas predominantemente pela presença da illita (Figura 5.51b).

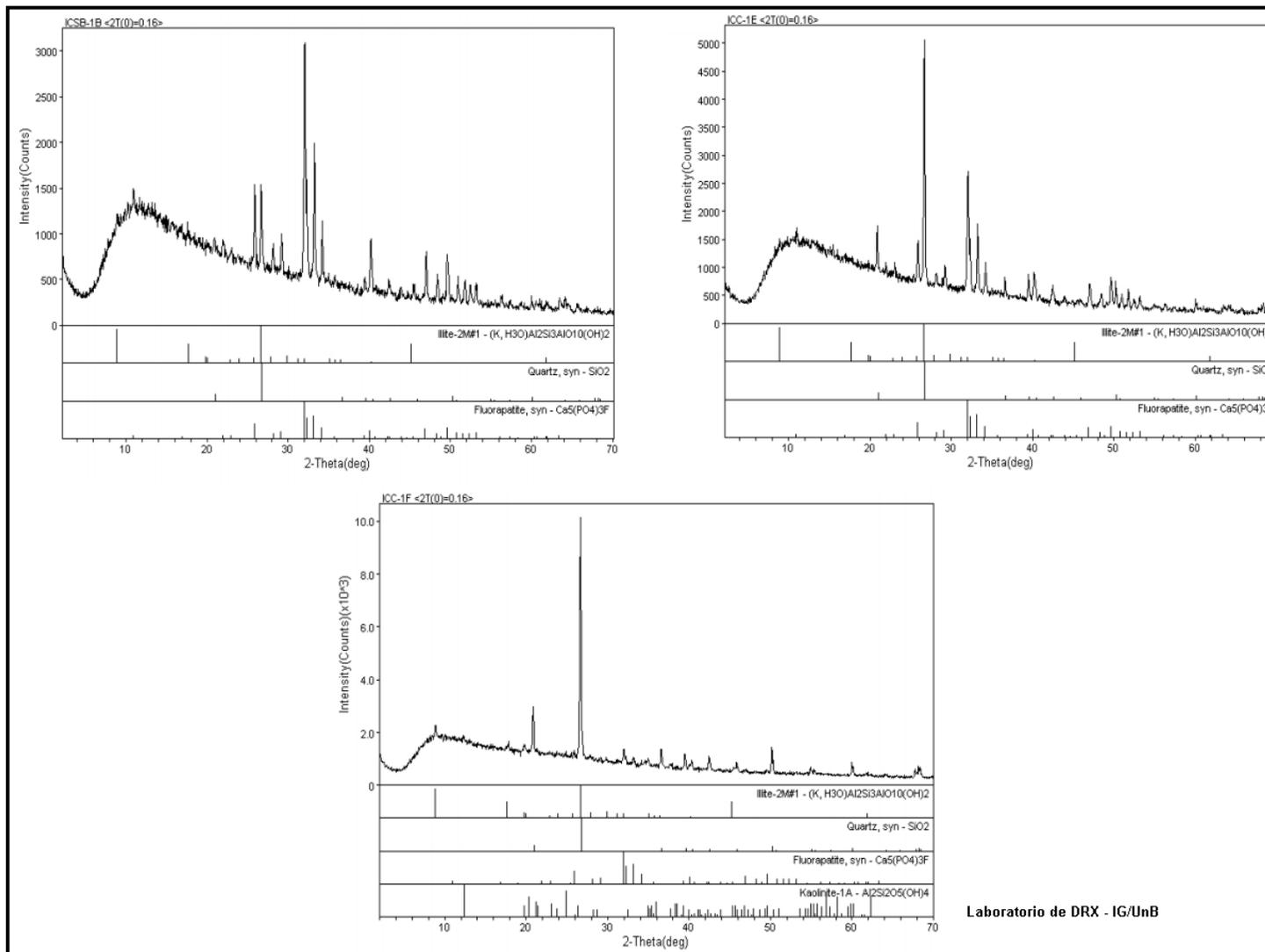


Figura 5.50. Difractogramas das amostras do grupo B (ICSB 1B, ICC 1E e 1F), adquiridos por meio da análise de difração de raios-X.

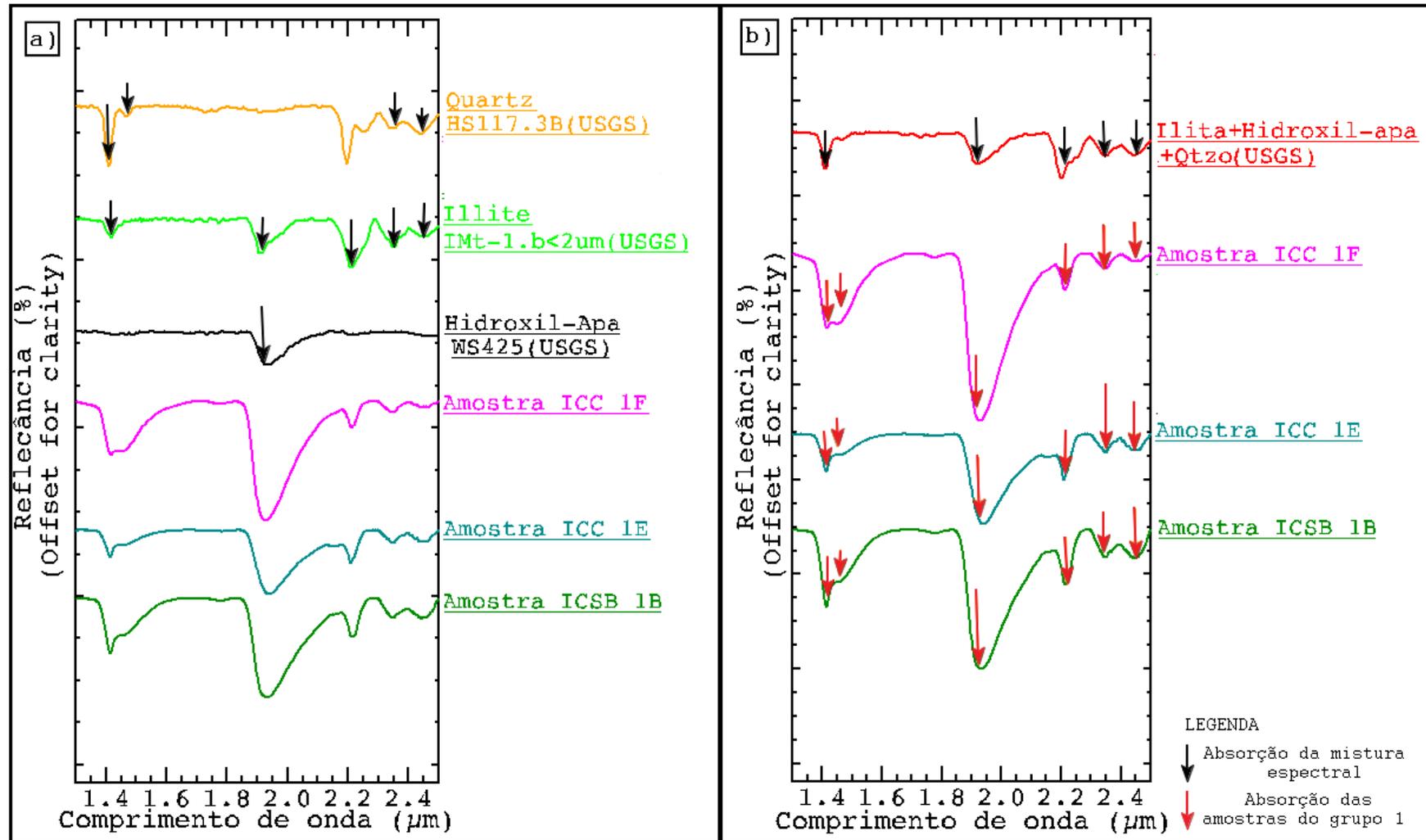


Figura 5.51. a) curvas espectrais do grupo B (ICSB 1B, ICC 1E e 1F) com as assinaturas espectrais da Hidroxil-apatita, Ilita e Quartzo da USGS; b) curvas espectrais e as absorções das amostras do grupo B, com a assinatura da mistura espectral (vermelho) da biblioteca de referência (USGS).

Por meio da mistura espectral, realizou-se uma reamostragem da assinatura espectral das amostras do grupo B para as bandas do ASTER, dentro da faixa espectral do SWIR, obtendo-se assim a feição de absorção diagnóstica em torno de 2,2050 μm , correspondendo à banda 6 do ASTER, podendo ser considerada uma resposta característica para essa área de estudo, nesse intervalo espectral da imagem (Figura 5.52).

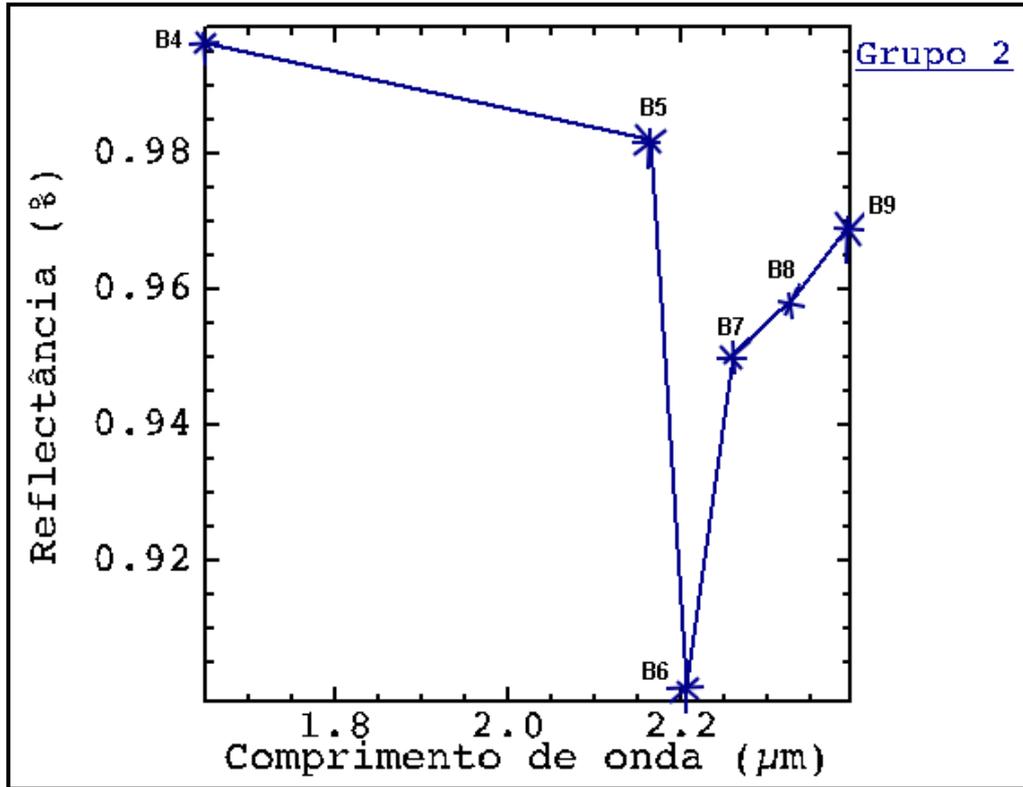


Figura 5.52. Feições de absorção do espectro reamostrado da mistura espectral do grupo B.

Por meio dessa reamostragem, aplicou-se sobre as imagens ASTER da faixa espectral do infravermelho de ondas curtas (SWIR) a classificação SFF, assim como efetuado no grupo anterior. A imagem *scale* da classificação SFF foi fusionada com a banda 3N do subsistema VNIR, ressaltando em tons avermelhados os *endmembers* (curva espectral do grupo B), espacializando espectralmente o grupo B e identificando áreas propícias à existência dessa associação mineral (Figura 5.53).

Essa classificação quando comparada com a classificação do grupo A, apresenta uma melhor resposta, pois separa melhor os *endmembers* na imagem. Porém, para estudos de prospecção mineral de fosfatos, a resposta espectral nessa faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR), não se mostrou muito satisfatória, por identificar em sua maioria argilominerais, mascarando as feições de absorção diagnósticas importantes nessa região do espectro eletromagnético. Isso poderia resultar em melhores respostas espectrais, mas ainda assim foi possível identificar algumas áreas, entretanto as regiões de interesse desse estudo não apresentaram respostas tão significativas.

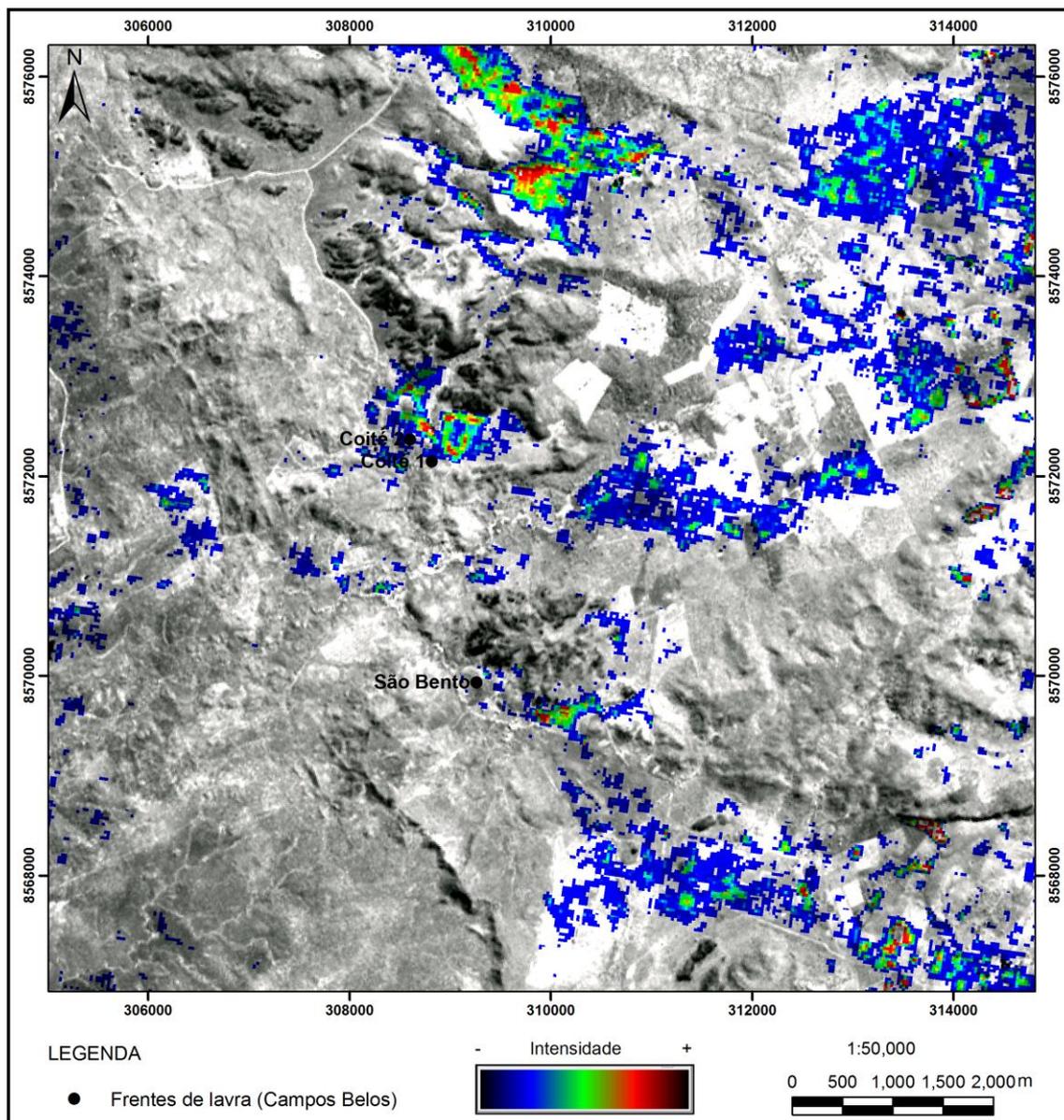


Figura 5.53. Classificação SFF do subsistema SWIR utilizando como *endmembers* à mistura espectral representativas das amostras de campo do grupo B.

5.2.3 Dados do subsistema *TIR*

Esse subsistema, diferentemente dos discutidos anteriormente, trabalha com emissividade ao invés de reflectância dos objetos (minerais e rochas). Sendo assim, para esta faixa espectral serão apenas apresentados resultados referentes ao processamento da imagem ASTER dentro da faixa espectral do infravermelho termal (*TIR*).

Para classificação SSF nessa faixa espectral foi utilizado como *endmembers* a média dos espectros de referência de emissividade da apatita da biblioteca ASU, cuja feição de absorção ocorre na faixa centrada de 9,1 μm . Tal feição está relacionada com a vibração entre as ligações iônicas do P-O, o qual apresenta mínima emissividade neste comprimento de onda (Figura 5.54).

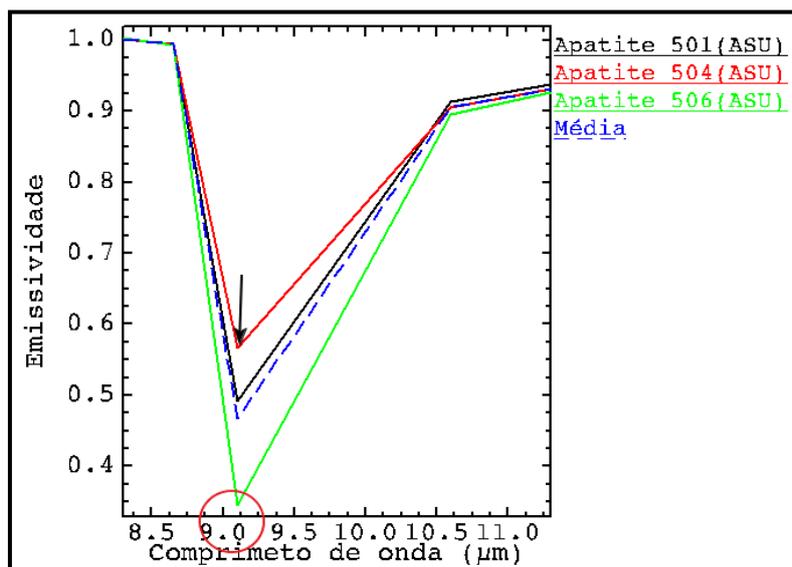


Figura 5.54. Espectros de emissividade da apatita da biblioteca de referência da ASU, reamostrados para as bandas termais do ASTER, destacando sua média.

Por meio dessa feição característica dos fosfatos foi possível realizar uma classificação mineral, com resultados consistentes, aplicando a classificação SFF sobre as imagens do infravermelho termal (8,125 a 11,65 μm) convertidas para emissividade, por meio do produto sobre demanda AST-05.

No resultado dessa classificação foi aplicada ainda uma escala de cores e expansão histogrâmica, em conjunto com dados geológicos e cartográficos, com intuito de correlacionar e destacar as áreas mais prováveis a existência de minerais apatíticos, os quais são extremamente importantes para prospecção de fosfato. Na figura 5.55, pode-se observar esse resultado, no qual as áreas de coloração mais avermelhadas correspondem aos valores mais elevados do *endmember* aplicado, no caso o espectro da apatita, que foi considerado razoável para essa área, já que nos demais subsistemas a resposta espectral não se mostrou tão representativa para esse estudo.

Por fim, para evidenciar melhor essa hipótese, a imagem *scale* da classificação SFF foi fusionada com a banda 3N visando apresentar o resultado da classificação com resolução espacial de 15m, representando assim, feições diagnósticas com mais detalhe sob a área de estudo (Figura 5.56).

Na figura 5.56a pode-se observar em detalhe a classificação fusionada da área de estudo, abrangendo as frentes de lavra São Bento, Coité 1 e 2, as quais podem ser claramente identificadas na imagem. As áreas com ocorrência de fosfato bem próximo as frentes de lavra de Coité 1 e 2, demonstram que a aplicabilidade dessa técnica é eficiente, uma vez que o resultado coincide com o estado real da área ou região, havendo sempre a necessidade de verificação de campo. Para melhor observação das áreas que apresentaram maiores respostas de apatita na imagem classificada, foi realizada uma composição R1G3B2 do subsistema VNIR (Figura 5.56b).

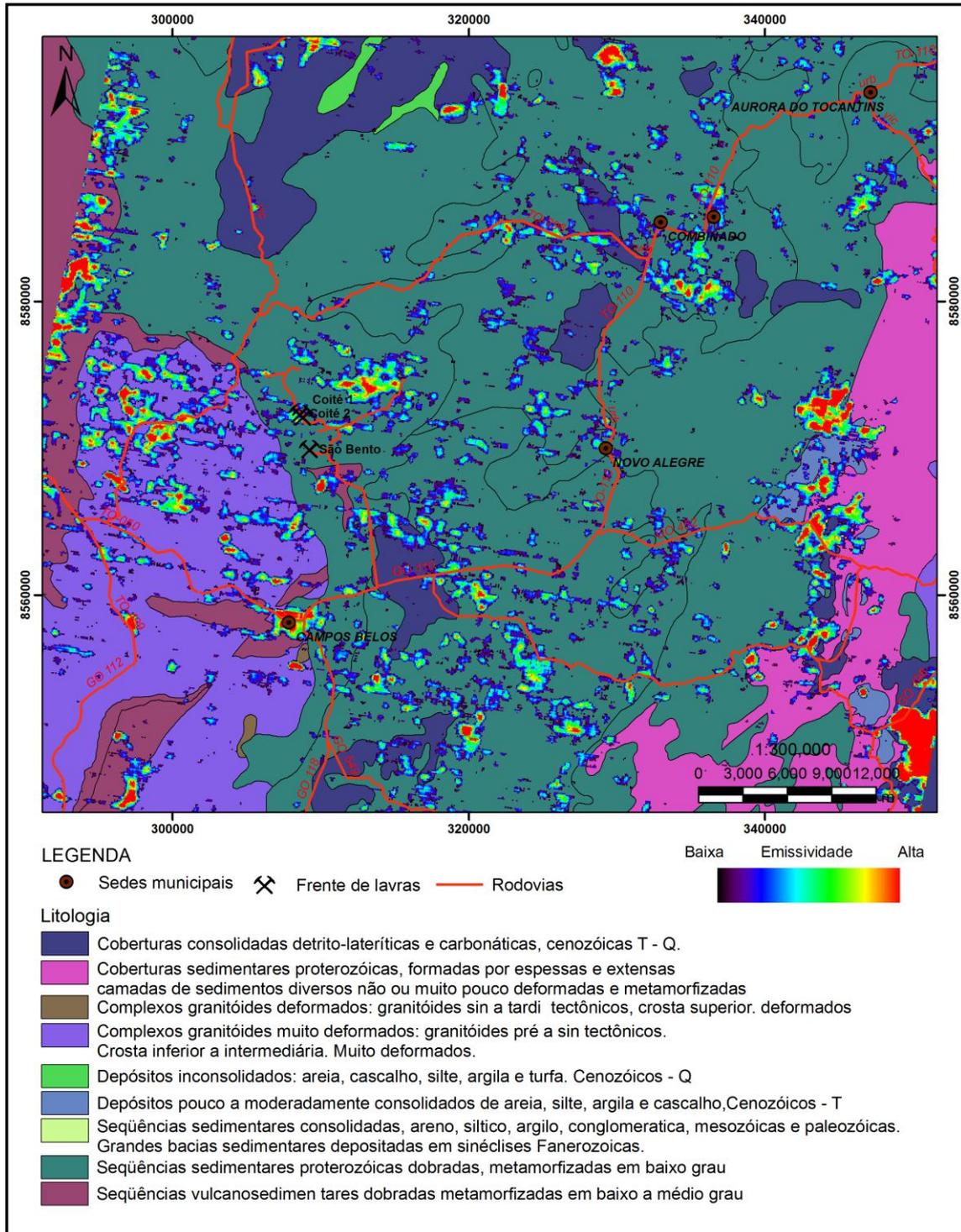


Figura 5.55. Resultado da classificação SFF - imagem Scale com aspecto litológico e base de dados cartográficos para melhor correlação, destacando em vermelho as áreas mais propícias à existência de minerais apatíticos na área de estudo e nas proximidades.

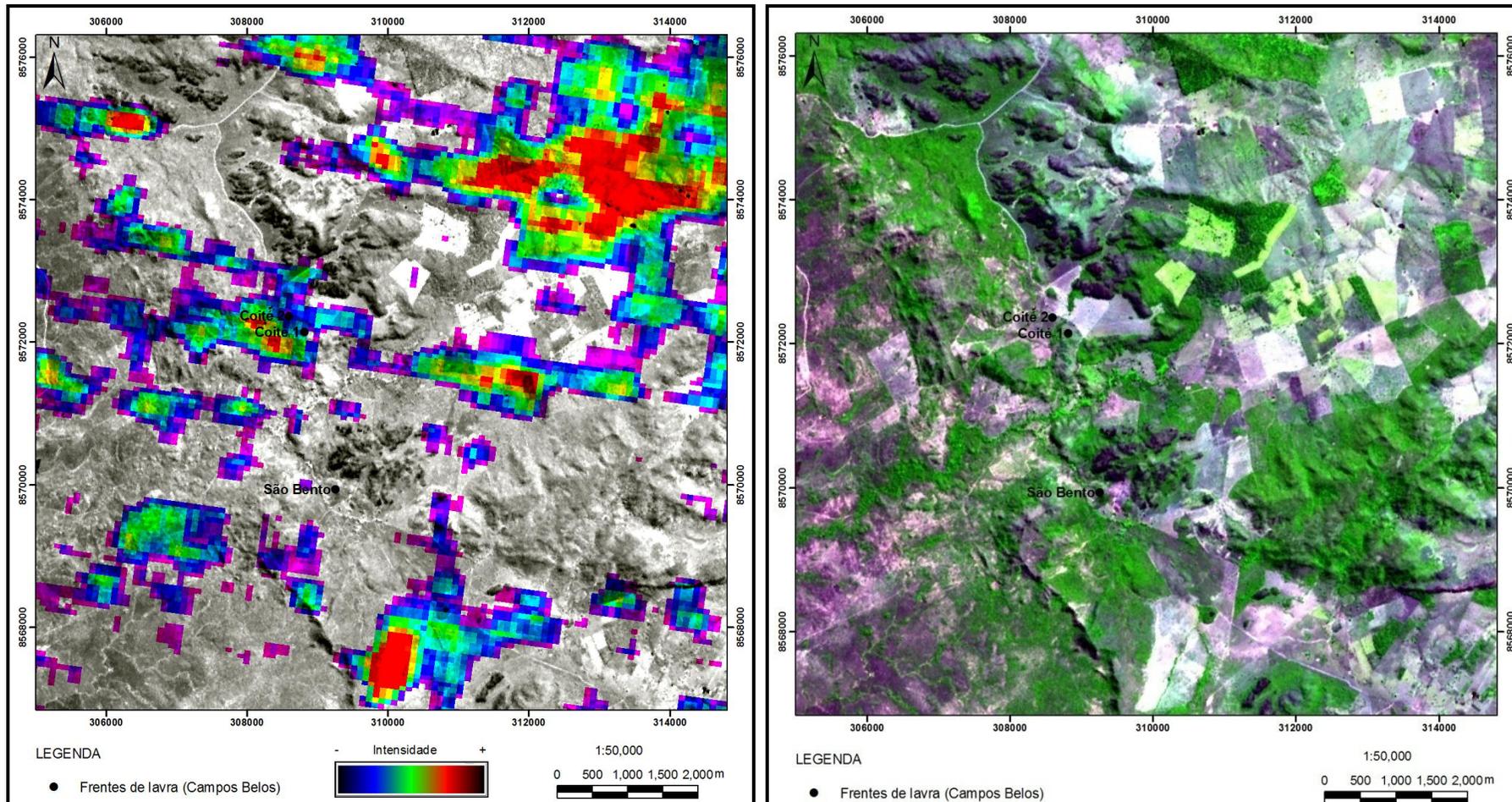


Figura 5.56. a) Classificação SFF fusionada com a banda 3N do visível, destacando em cores avermelhadas as áreas mais propícias a existência de apatita (Fosfato); b) Composição R1G3B2 do subsistema VNIR, proporcionando uma falsa coloração para melhor observação de regiões propícias à prospecção de depósitos de fosfatos.

6.1. CONCLUSÕES

A utilização de técnicas de espectrorradiometria obtidas em laboratório de amostras de campo em conjunto com a técnica de classificação espectral SFF, possibilitaram a identificação de feições relacionadas aos fosfatos, nos diferentes tipos de rochas (ígneo e sedimentar). Além de possibilitar a avaliação do subsistema do sensor ASTER que melhor responde a este tipo de estudo.

Na área 1 (Catalão), foi possível identificar feições características de foscoritos e rochas fosfatadas (carbonatitos e flogopitito), tanto na faixa do infravermelho próximo quanto na faixa do infravermelho de ondas curtas. Na faixa do visível e infravermelho próximo, a absorção a 0,66 μm (reamostrada), coincidente com a banda 2 do sensor ASTER (visível) foi caracterizada como sendo típico da feição mineral da goetita, mascarando assim, toda e qualquer feição diagnóstica do fosfato na faixa do visível. Porém na faixa do infravermelho próximo, apresentou um pico de absorção a 0,81 μm na banda 3 do sensor ASTER, característicos do mineral monazita, que é um mineral que contém fosfato em sua composição, e também apresenta em sua estrutura elementos terras raras (Sm e Nd), sendo esta área considerada por alguns autores riquíssimo neste elemento. Na faixa do infravermelho de ondas curtas, as feições de absorções ocorrem em 1,382 μm , 1,92 μm , 2,0 μm , e 2,32 μm , relacionam-se aos picos de absorção de minerais de flogopita, Apatita, hidroxil-apatita e dolomita, respectivamente, existentes em todas as amostras, validadas pelos resultados da DRX. Tais minerais ocorrem associados ao grupo da apatita, devido à mesma não ser considerada totalmente pura, provavelmente ocasionada em decorrência do intenso evento magmático que atuou nesta região. Nesta faixa espectral as feições mais características da apatita, ocorrem associadas aos constituintes da assembléia mineral, os quais favorecem indiretamente na identificação depósitos de fosfato: 1,382 μm , 1,916 μm , 2,0 μm , 2,1480 μm 2,225 μm e a feição a 2,3 μm . Esta última feição de absorção também é coincidente com a feição dos carbonatos, mas isto se dá devido às fortes vibrações e trocas iônicas entre os componentes minerais e por se tratarem de carbonatitos, os quais possuem 50% de carbonatos em sua composição. Tais feições interpretadas quando reamostradas para imagem ASTER, possuem absorções diagnósticas em 2,165 μm , 2,26 μm e 2,33 μm , principalmente.

Na área 2 (Campos Belos), os estudos espectrorradiométricos aplicados em fosforitos e rochas fosfatadas (siltitos), na faixa espectral do visível e infravermelho próximo não apresentaram resultados significativos, devido as feições diagnósticas do fosfato propriamente dito, estarem mascaradas, pela presença de óxidos e íons ferrosos, bem marcados em feições de 0,4278 μm e 0,5220 μm . Na faixa do infravermelho de ondas curtas, o que mascara a resposta espectral dos fosfatos é a forte presença dos argilominerais, illita e caolinita, ocorrendo em 1,4140 μm , 2,2 μm e 2,35 μm , principalmente. Esta faixa espectral, ainda é bastante caracterizada por apresentar nas estruturas das amostras (foscoritos e rochas fosfatadas) moléculas de água (H_2O), bem marcados a 1,4 e 1,9 μm . Estas feições quando reamostradas para imagem deste subsistema do sensor ASTER, apresentam feições diagnósticas a 2,165 μm , 2,20 μm e 2,33 μm , que são bem semelhantes as feições reamostradas da área 1.

A aplicação de técnicas hiperespectrais em imagens multiespectrais ASTER nos diferentes subsistemas, apresentou resultados bastante positivos, comprovando sua grande potencialidade,

incluindo assim, o sensor ASTER, como uma ferramenta auxiliar de grande utilidade em atividades de exploração mineral.

A avaliação individual dos três subsistemas do sensor ASTER (VNIR, SWIR, TIR) se torna necessária na prospecção mineral, uma vez que cada subsistema resalta características minerais distintas. A depender da gênese do depósito investigado, as respostas obtidas nos subsistemas serão mais precisas e detalhadas ou menos inconsistentes.

No subsistema VNIR a melhor resposta se deu para os depósitos carbonatíticos (origem ígnea), devido à presença de elementos terras raras (Figura 6.1), o que propiciou em uma melhor classificação espectral da área de estudo, diferente da região de origem sedimentar, que apenas apresentou absorção de minerais ferrosos, como goetita e hematita.

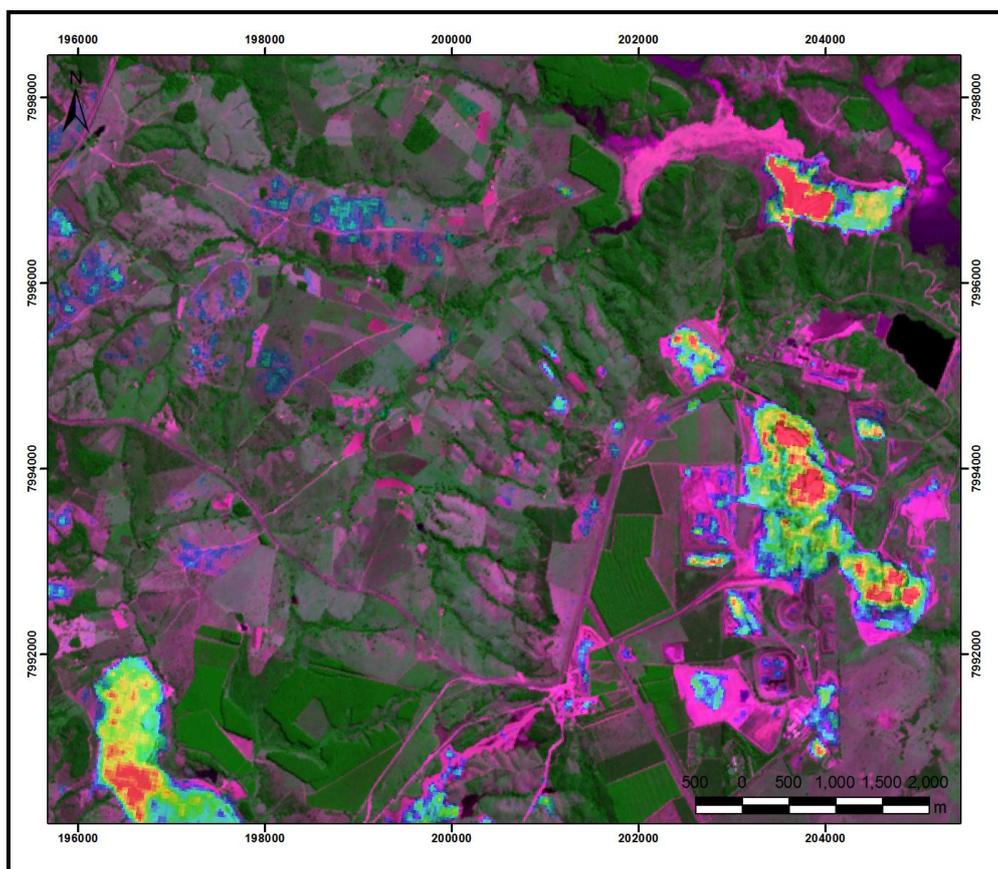


Figura 6.1. Resultado da Classificação SFF do subsistema VNIR da área 1 (Catalão), obtida por meio do mineral de referência da monazita (ETR).

No subsistema SWIR, a melhor resposta também foi nos depósitos de carbonatíticos, provavelmente ocasionados pela maior caracterização da assinatura espectral dos fosfatos, no caso do mineral apatita e suas variedades (Figura 6.2). Outro fator de influência deve-se ao fato deste depósito ocorrer a céu aberto, diferentemente das frentes de lavras de Campos Belos, de origem sedimentar. Ainda nesta faixa espectral, os fosfatos que ocorrem nos carbonatos são mascarados pela forte presença de argilominerais (illita), em decorrência da atuação dos processos de intemperismo atuantes na área.

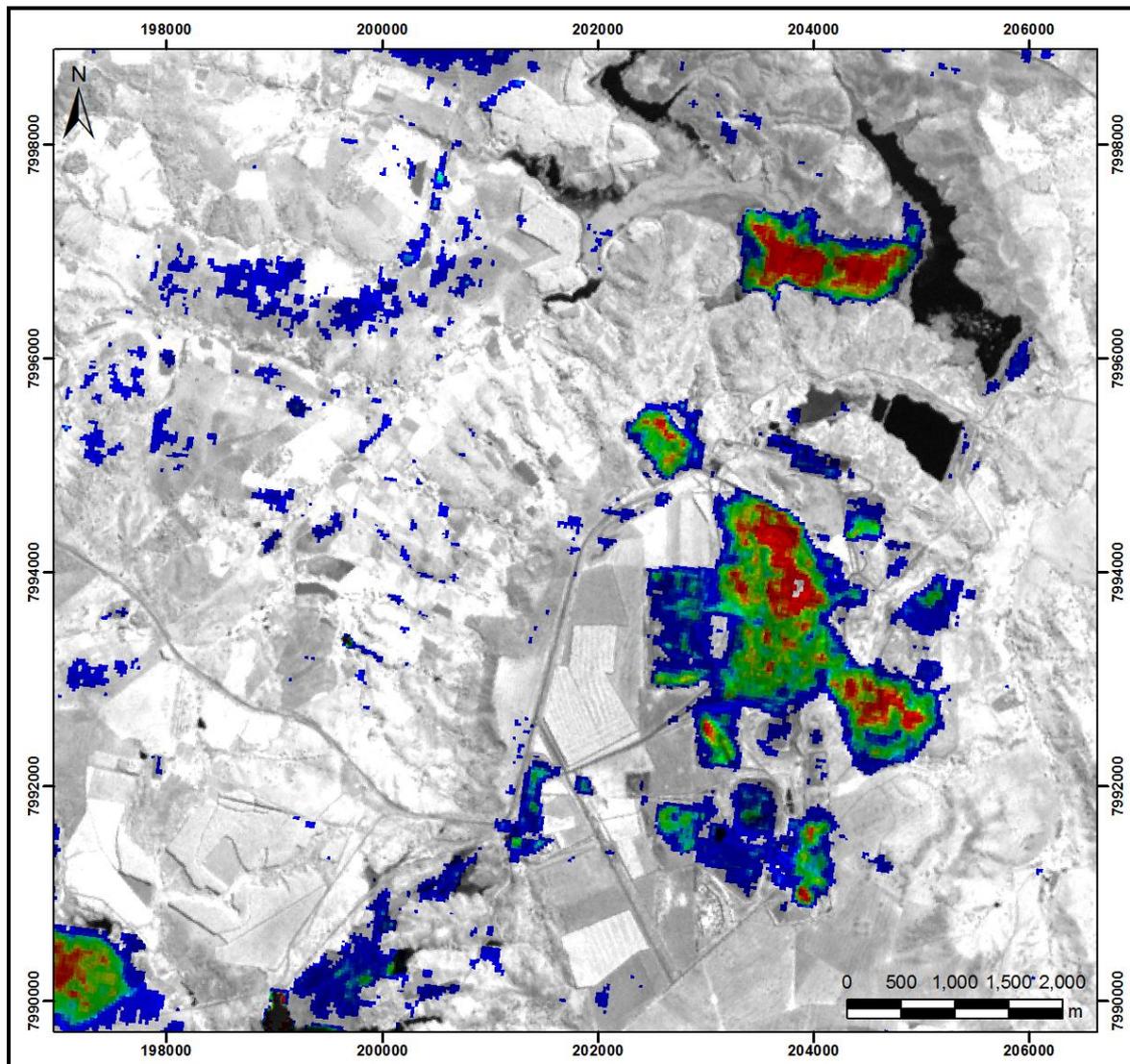


Figura 6.2. Resultado da Classificação SFF do subsistema SWIR da área 1 (Catalão), obtida por meio dos minerais de referencia coletados em campo (apatita, hidroxil-apatita, dolomita e flogopita).

No subsistema TIR, a feição de absorção dos fosfatos encontra-se a $9,1 \mu\text{m}$. Em ambas as áreas a resposta foi consideravelmente relevante, uma vez que o resultado foi coincidente com as áreas visitadas em campo (checagem). Entretanto, nos carbonatitos de Catalão (Fosforito) a classificação espectral (Figura 6.3) foi melhor representada do que nos carbonatos de Campos Belos (Fosforitos e Silitos fosfatados) (Figura 6.4).

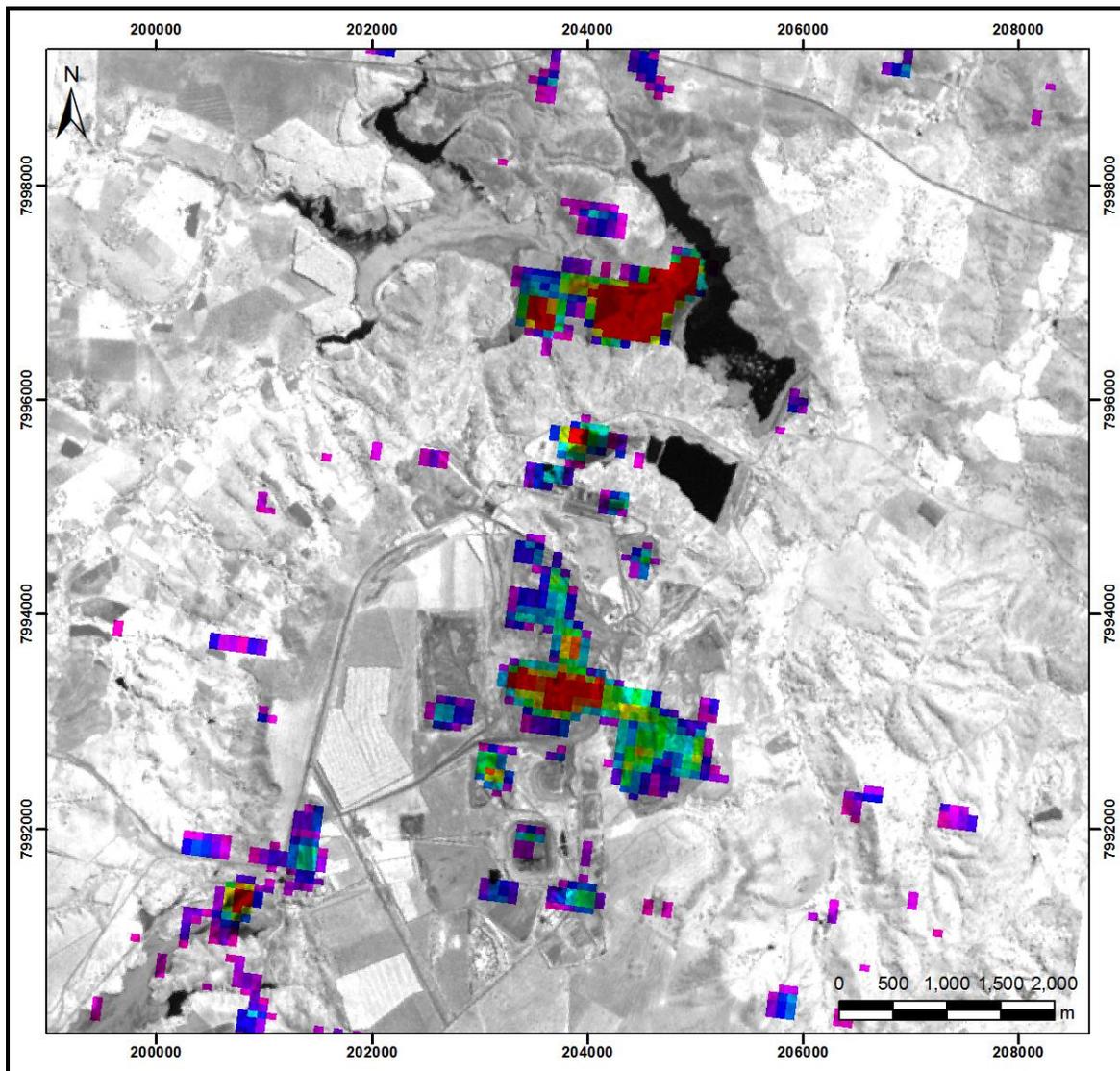


Figura 6.3. Resultado da Classificação SFF do subsistema TIR da área 1 (Catalão), obtida por meio do mineral de referência da apatita (ASU).

Nos depósitos de fosfatos aqui apresentados (Catalão e Campos Belos), os melhores resultados se restringiram aos subsistemas SWIR (infravermelho de ondas curtas) e TIR (infravermelho termal). Os depósitos de origem ígnea apresentaram resultados otimistas nos dois subsistemas, enquanto que os de origem sedimentar apresentaram apenas no subsistema TIR, o que comprova que a aplicação desta análise é mais eficiente para depósitos de origem ígnea, uma vez que a assembléia mineral é menos mascarada por minerais de alteração (óxidos, hidróxidos e argilominerais).

Com base nestas considerações, notou-se que quando comparamos os resultados destas duas áreas, chegamos à conclusão que o comportamento espectral dos fosfatos é totalmente diferente, devido à diferença da assembléia mineral, que torna a existência de valores de absorção distintos.

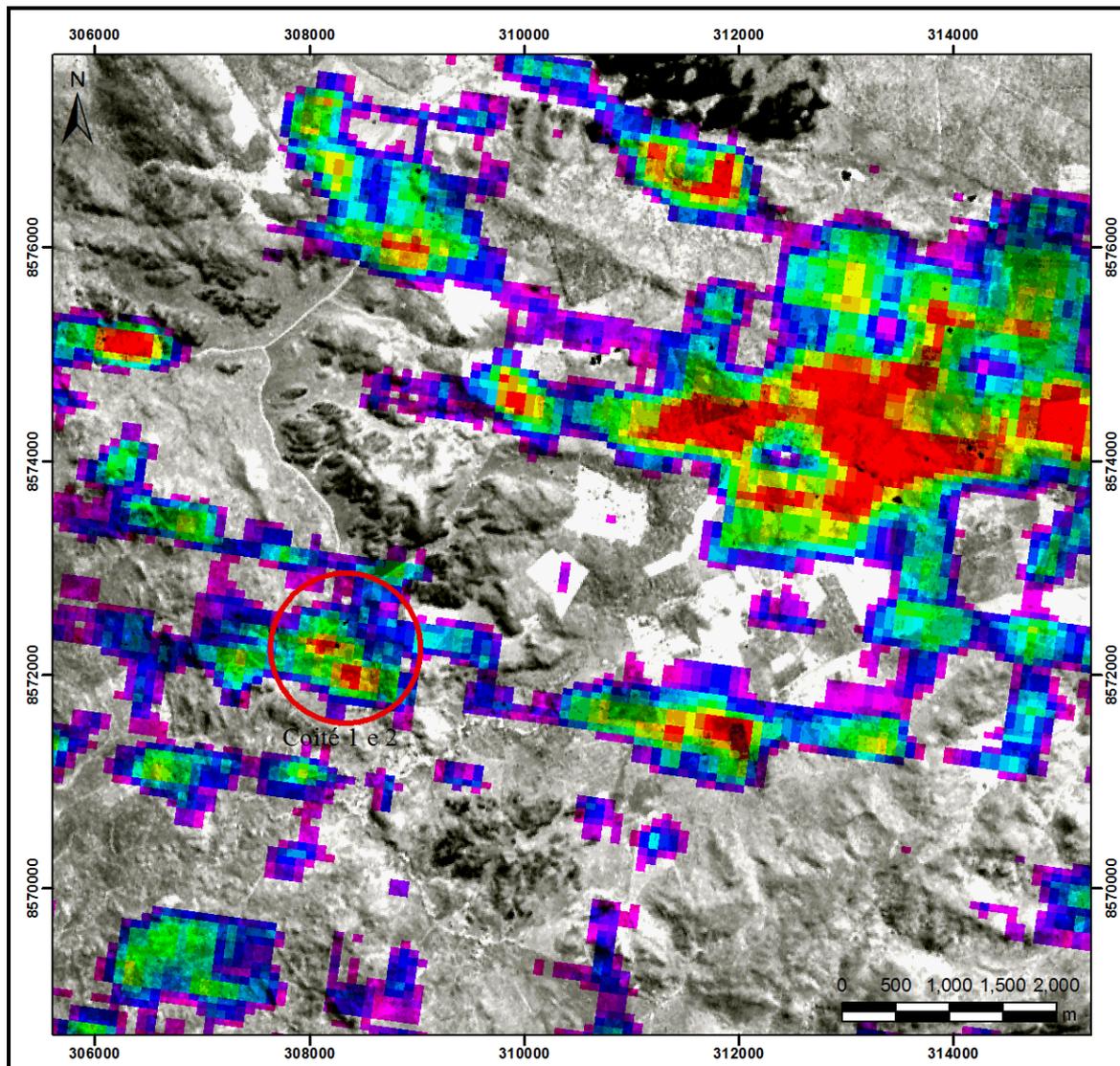


Figura 6.4. Resultado da Classificação SFF do subsistema TIR da área 2 (Campos Belos), obtida por meio do mineral de referência da apatita (ASU).

Por fim, pode ser dizer que a utilização de imagens ASTER em conjunto com estudos espectrorradiométricos são atualmente as melhores ferramentas de sensoriamento remoto disponíveis para detectar e discriminar ocorrências de depósitos minerais, como depósitos de fosfatos, carbonatos, carbonatitos, entre outros, pelo fato de as imagens ASTER apresentarem seis bandas espectrais na faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e cinco bandas espectrais na faixa do infravermelho termal (TIR), as quais ressaltam as feições de absorção que caracterizam estes grupos de minerais. Proporcionando assim, em uma técnica rápida e barata para a determinação da mineralogia das amostras e para obtenção de informações sobre a composição química. E a aplicação destas imagens podem servir como orientação em campanhas de prospecção de depósitos fosfáticos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; NEVES, B. B. B. & FUCK, R. A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. *In*: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, Campina Grande-PB. Atas, p.363-391.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; NEVES, B.B.B. AND FUCK, R.A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sciences Reviews*, 17. p.1-29.
- ALVARENGA, C. J. S.; DARDENNE, M. A.; BOTELHO, N. F.; MACHADO, M. A.; LIMA, O. N. B.; ALMEIDA, T. 2006. Relatório Final das Folhas SD.23:V:C:III – Monte Alegre de Goiás; SD.23:V:C:V – Cavalcante; SD.23:V:C:VI – Nova Roma. Convênio UnB/FINATEC/CPRM. Brasília, 67p.
- ALVARENGA, C. J. S.; DARDENNE, M. A. 1978. Geologia dos grupos Bambuí e Paranoá na Serra de São Domingos, MG. *In*: SBG, 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, Anais, 546:556.
- AMARAL, A. J. R. 1997. Geologia do Fosfato. *In*: SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E. T.; COELHO, C. E. S. (Coord.). Principais Depósitos Minerais do Brasil. Brasília: CPRM/DNPM, v. 4, parte c, p.3-16.
- BAECKER, M.L. 1983. A mineralização de nióbio do solo residual e a petrografia das rochas ultramáfico-alcálicas do domo de Catalão I, Goiás. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 113p.
- BARBOSA, O.; BATISTA, M. B.; BRAUN, O. T. G.; DYER, R. C.; COSTA, J. C. 1969. Geologia e Inventário dos Recursos Minerais do Projeto Brasília. PROSPEC. DNPM. Rio de Janeiro. 225 p.
- BRANCO, J.J.R. & COSTA, M.T. 1961. Roteiro da excursão Belo Horizonte – Brasília. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, Brasília. 1960. Instituto de Pesquisas Radioativas, UFMG, Publicação 15, Belo Horizonte, p.25.
- BROD J. A.; RIBEIRO C.C.; Gaspar J.C.; JUNQUEIRA-BROD T.C.; BARBOSA E.S.R.; RIFFEL B.F.; SILVA J.F.; CHABAN N.; Ferrari A.L.D. 2004. Excursão 1: Geologia e Mineralizações dos Complexos Alcalino-Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. *In*: 42 CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Araxá. Guias de Excursões. p. 1-29. 1 (CD-ROM).
- BERGMANN, M.; HAFF, R.; DUCATI J. R. 2008. Espectrorradiometria e Processamento de Imagem Aster para validação de dados geológicos e de solos como contribuição ao estabelecimento de terroirs na “metade sul”, RS. Brasil. *In*: 44º Congresso Brasileiro de Geologia, Curitiba, PR. Anais. SBG, p.26-31.
- BOTELHO, N. F.; SILVA, D. V. G. 2004. Caracterização mineralógica e química das mineralizações de ouro (\pm PGE) da suíte granítica Aurumina. Goiás. *In*: SBG, 42º Congresso Brasileiro de Geologia, Araxá, Resumos.
- BROD, J. A.; RIBEIRO, C.C.; GASPAS, J.C.; JUNQUEIRA-BROD, T.C.; BARBOSA, E.S.R.; RIFFEL, B.F.; SILVA, J.F.; CHABAN, N.; FERRARI, A.L.D. 2004. Excursão 1: Geologia e Mineralizações dos Complexos Alcalino-Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto

- Paranaíba. *In*: 42º Congresso Brasileiro de Geologia. Araxá. Guias de Excursões. p. 1-29. 1 (CD-ROM).
- CARMELO, A. C.; BARBOSA, I. O.; CAMPOS, J. E. G. 2009. Mapeamento estrutural e litológico a partir de imagens ASTER (TIR) para a região da bacia do Rio Preto (DF, GO, MG). *In*: Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil. p.3167-3171.
- CARRINO, T. A. & FILHO, C. B. S. 2007. Utilização de imagens multiespectrais termais do sensor ASTER para mapeamento remoto de prováveis áreas com feições de impacto em crateras africanas. *In*: Anais XIII, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, p. 1999-20062.
- CARVALHO, W. T. 1974. Aspectos geológicos e petrográficos do Complexo ultramáfico-alcalino de Catalão I, GO. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 28, Anais, Porto Alegre, v. 5:107-123.
- CERQUEIRA, D. B.; ABRAM, M. B. 2008. Mapeamento multiespectral aplicado à pesquisa para Au na Província Juruena-Teles Pires, Estado do Mato Grosso. *In*: 44º Congresso Brasileiro de Geologia, Curitiba, PR. Anais. SBG. p.26-31.
- CLARK, R. N.; KING, T. V. V.; KLEJWA, M.; SWAGE, G. A.; VERGO, N., 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research*. 95, nº B-8, 12653-12680.
- CLARK, R. N. 1995. Reflectance spectra. *In*: Ahrens, T.J. (ed), *Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constant*: (Washington, DC) Am. Geophy. Un., p: 178-188.
- CORDEIRO, P. F. O.; BROD, J. A.; SANTOS, R.V. 2009. Submetido - Stable O and C isotopes, and carbonate chemistry in phoscorites and Nb-rich nelsonites from the Catalão I carbonatite complex, central Brazil: implications for phosphate-iron-oxide magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*.
- CPRM, 2004. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Sistema de Informações Geográficas - SIG. Folha SE. 23 Belo Horizonte. Brasília: CPRM. 1CD ROM. Programa Geologia do Brasil.
- CPRM, 2010. Geologia, Sensoriamento Remoto. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=29>>. Acesso em 08 de janeiro de 2011.
- CRÓSTA, A.P.; SABINE, C.; TARANIK, J.V. 1998. Hydrothermal alteration mapping at Bodie, California, using AVIRIS hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 65:309-319.
- CRÓSTA, A.P.; SOUZA FILHO, C.R.; AZEVEDO, F. 2002. Caracterizando halos de alteração hidrotermal em depósitos auríferos epitermais com os sensores multiespectrais orbitais Landsat/TM e ASTER: o caso do Distrito de Los Menucos, Argentina. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 41. João Pessoa. Anais. Sociedade Brasileira de Geologia. p.157.

- DANNI, J. C. M.; GASPAR, J. C.; GONZAGA, G. M. 1991. The Fazenda Alagoinha intrusion. *In*: Leonardos, O. H. et al. International Kimberlite Conference, 5, 1991, Araxá. CPRM Special, v.3, 31-35 p.
- DARDENNE, M. A. 1978a. Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton São Francisco. *In*: SBG, 30 Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, Anais, 1: 299:308.
- DARDENNE, M. A. 1978b. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Mabuí no Brasil Central.. *In*: SBG, 30 Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, Anais, 2: 597:610.
- DARDENNE, M. A. 1979. *Les minéralisations de plomb, zinc, fluor du Protérozoïque Supérieur du Brésil Central, Tese de Doutorado. Université Paris Vi. 251 p.*
- 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. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, p.53-72.
- ENGESAT: imagens de satélites. Aster – Ficha técnica resumida. Disponível em: <<http://www.engesat.com.br/?system=news&action=read&id=529>>. Acesso em: 02 nov. 2009.
- ESRI. 2006. ArcGis – Versão 9.3.
- ENVI. 2009. Guia do ENVI em português – tratamento de dados hiperespectrais. 11-16 p. Disponível em: <<http://www.envi.com.br/index.php?link=Downloads>>.
- FAVA, N. 2001. O manto de intemperismo e a química do pirocloro de Catalão I (GO): um estudo preliminar. Tese de Mestrado, Universidade de Brasília.
- FLORENZANO, T. G. 2007. Iniciação em Sensoriamento Remoto. São Paulo, Brasil. 2º Edição do Imagens de Satélite para Estudos Ambientais. Editora Oficina de Textos. 11p.
- GAFFEY, S. J. 1987. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and nearinfrared (0.35–2.55 μm): Anhydrous carbonate minerals. *Journal of Geophysical Research*, 92, 1429–1440.
- GALVÃO, L. S.; ALMEIDA-FILHO, R & VITORELLO, I. 2005. Spectral discrimination of hydrothermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: Evaluation in a tropical savannah environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. p.107–114.
- GIBSON, S. A; THOMPSON, R.N.; LEONARDOS, O.H.; DICKIN, A.P.; MITCHELL, J.G. 1995. The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume - evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil. *J. Petrol.*, v.36, p. 189-229.
- GOETZ, A. F. H.; VANE, G.; SOLOMON, J. E.; ROCK, B. N. 1985. Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing. *Science*, 228: 1147-1153.
- HOFF, R.; TONIOLO, J. A.; CAPELETTI, I. 2004. Estudo da alteração hidrotermal associada à mineralização metálica pela aplicação de espectrorradiometria e processamento digital de imagens ASTER, na região de Vila Palma, RS, Brasil. *In*: 42 Congresso Brasileiro de Geologia. Anais: CD-ROM, SBG, Araxá.

- HOFF, R.; FREITAS, M. A.; DIAS, A. A.; IGLESIAS, C. M. D. 2005. Aplicação de espectrorradiometria e processamento de imagens ASTER no estudo de ocorrência de argilas (lamas medicinais) relacionadas às estações hidrominerais na Folha Iraí/Frederico Westphalen, RS e SC, Brasil. *In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, p. 1805-1806.
- HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W. 1971. Visible and near-infrared spectra of minerals and rock: II. carbonates. *Modern Geology*. Amsterdam, v.2, p.23-30.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. 1976. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: XI. Sedimentary Rocks. *Modern Geology*, **5**:211-217.
- HUNT, G. R. 1979. Near-infrared (1,3-1,4 micrometers) spectra of alteration minerals: potencial for use in remote sensing. *Geophysics*, Tulsa, OK, v. 44, p. 974-986.
- HUNT, G. R. 1980. Electromagnetic radiation: The communication link in remote sensing. *In: BS Siegal and AR Gillespie (Eds), Remote sensing geology*, John Wiley and Sons, N.Y., p 5-46.
- JENSEN, J. R. (2009). Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres / tradução José Carlos Neves Epiphany et al. São José dos Campos, SP. 2009
- 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*, v. 24, p. 31-52.
- KRUSE, F. A.; PERRY, S. L.; CABALLERO, A. 2002. Integrated Multispectral and Hyperspectral Mineral Mapping, Los Menucos, Rio Negro, Argentina. *In: 11th JPL Airbone Geoscience Workshop, Jet Propulsion Laboratory, Proceedings*.
- LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; MONTE, M. B. M.; NASCIMENTO, M. 2005. Fosfato. *In: LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Freitas (Org.). Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações*. Rio de Janeiro: CETEM. cap. 7, p.141-171. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2005-108-00.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2009.
- LIMA, V. S. 2003. Assinaturas espectrais de gossans associados à mineralizações de Pb-Zn-Ba na Bacia de Irecê (BA): um estudo baseado em dados de sensores TM e ASTER. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP. p.154.
- LIMA, B. E. M. 2004. Avaliação das imagens do sensor ASTER para discriminação espectral de variações faciológicas no granito serra branca, estado de Goiás. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Dissertação de Mestrado. São José dos Campos.
- LIMA, O.N.B.; UHLEIN, A. 2005. Estratigrafia e Sistemas Depositionais do Grupo Bambuí no Alto Rio São Francisco. *In: Simpósio Sobre o Cráton do São Francisco, 2005, Salvador*. Anais. Salvador: SBG.
- MACHADO, F. B. 2003. Banco de dados. Departamento de Petrologia e Metalogenia. UNESP. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/fosfatos/fosfatos.html>>. Acesso em: 11 out. 2009.

- MENESES, P. R & NETTO, J. S. M. 2001. Sensoriamento Remoto – Reflectância dos alvos naturais. Editora Universidade de Brasília. Embrapa Cerrados. Brasília, DF. p.15- 37.
- MENESES, P. R. 2006a. Fundamentos de Sensoriamento Remoto. *Texto Universitário*. Universidade de Brasília. p.138.
- MENESES, P. R. 2006b. Interpretação de Imagens. *Texto Universitário*. Universidade de Brasília, p.68.
- MENESES, P. R. 2011. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. 206 p. No prelo.
- MONTEIRO, C. F. 2009. Fosforitos do Grupo Bambuí na região de Campos Belos (GO) / Arraias (TO), na borda oeste do Cráton São Francisco. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- MORAES, E. C. 2002. Fundamentos de Sensoriamento Remoto – Capítulo 1. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos – SP. p.1-7.
- NASA. 2006. Banco de dados. Jet Propulsion Laboratory-Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). NASA. Disponível em: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov>>. Acesso em: 11 out. 2009.
- NOVO, E. M. L. M. 2008. Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações. São Paulo. Editora Edgard Blucher. p.308-311.
- PEDROSA, S. A.; MENESES, P. R.; CARMELO, A. C. 2010. Espectrorradiometria de reflectância de rochas carbonáticas na região do infravermelho de ondas curtas. *Revista de Geociências*, 40(4): p. 593-599.
- RIBEIRO, C.C.; BROD J.A.; BROD, T.C.J., GASPAR, J.C. & PETRINOVIC, I.A. 2005. Mineralogical and field aspects of magma fragmentation deposits in a carbonate-phosphate magma chamber: evidence from the Catalão Complex, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 18:355-369.
- RIBEIRO, C. C. 2008. Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforos, terras raras e titânio do Complexo carbonatítico Catalão I, GO. 473 p. Tese (Doutorado em Geologia Econômica e Prospecção) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- ROSSMAN, G.R. 1988. Optical spectroscopy *In*: Hawthorne, F.C. (Ed). *Reviews in mineralogy: spectroscopic methods in mineralogy and geology*. Michigan: Bookcrafters. P. 207-257.
- ROWAN, L. C.; KINGSTON, M. J.; CROWLEY, J. K. 1986. Spectral reflectance of carbonatites and related alkalic igneous rocks: Selected samples from four North American localities. *Economic Geology*, 81, 857–871.
- ROWAN, L. C.; 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 (3), 350-366.
- RSI (*Research System Inc.*). 2009. ENVI: Environment for Visualizing Images. Versão 4.7.

- SANTOS R.V., ALVARENGA C.J.S.DE, DARDENNE M.A., SIAL A.N., FERREIRA V.P. 2000. Carbon and oxygen isotope profiles across Meso: Neoproterozoic limestones from central Brazil: Bambuí and Paranoá Group. *Prec. Res.*104:107:122.
- SCHOWENGERDT, R. A. 1997. *Remote Sensing Models and Methods for Image Processing*, London, Academic Press. p. 521.
- SCHÖLL W.U., FOGAÇA A.C.C. 1979. Estratigrafia da Serra do Espinhaço na região de Diamantina (MG). *In: SBG:MG, Belo Horizonte, Boletim 1*, p. 55:71.
- SIEG, 2010. Sistema Estadual de Estatística e de Informação Geográfica de Goiás. Base cartográfica e mapas temáticos do Estado de Goiás. Disponível em: <<http://www.sieg.go.gov.br/>>. Acesso em 15 de agosto de 2010.
- SLATER, P.N. 1980. *Remote Sensing, optics and optical systems*. New York, Addison-Wesley.
- SOUZA A. E. 2001. Balanço Mineral Brasileiro de Fosfato. Brasília, DNPM/MME, p.1-3.
- SOUZA FILHO, C. R.; TAPIA CALLE, C. H.; CRÓSTA, A. P.; XAVIER, R.P. 2003. Infrared Spectroscopy and ASTER imagery Analysis of Hydrothermal alteration Zones at the Quellaveco Porphyry-Copper deposit, Southern Peru. *In: Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). Anual Conference*. P. 1-12.
- SOUZA, A. E. & CARDOSO, V. R. S. 2008. Fosfato. Sumário Mineral, Brasília. Fosfato. Sumário Mineral, Brasília, 2008. Disponível em: <www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/sumariomineral2008/fosfato.pdf>. Acesso em: 02 maio 2009.
- SOUZA, N. P. 2009. Espectrorradiometria em Depósito de Fosfato Magmatogênico: Aplicação para o Depósito de Catalão I – GO. Universidade Federal da Bahia – Instituto de Geociências. Dissertação de Mestrado. Salvador.
- THOMPSON, R. N. *et al.* 1998. Migrating Cretaceous-Eocene magmatism in the Serra do Mar alkaline province, SE Brazil: Melts from the deflected Trindade mantle plume? *Journal of Petrology*, v.39, p. 1493-1526.
- TOLEDO, M. C. M.; PEREIRA, V. P. 2001. A variabilidade de composição da apatita associada à carbonatitos. *Revista do Instituto Geológico, São Paulo*, 22(1/2). p.27-64.
- VAN DE MEER. 1999. Can we map swelling clays with remote sensing? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v.1, n.1, p.27-35.
- VICENTE, L. E., 2007. Caracterização de sistemas ambientais tropicais complexos utilizando análise sistêmica e classificação hiperespectral de dados do sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 192p.
- VAN DER MEER, F. 2000. Imaging spectrometry for geological applications. *In: The Encyclopedia of Analytical Chemistry*, Meyers R.A. (Ed.), John Wiley & Sons Ltd., Sussex, U.K., p. 8601-8638.

WALL, F.; ZAIISOV, A. N. 2004. Phoscorites and carbonites from mantle to mine: the key example of the Kola Alkaline Province. London: Mineralogical Society,. 503 p. (Mineralogical Society Series, 10).