

Mapeamento espectral de intrusões pegmatíticas relacionadas a mineralizações de lítio, gemas e minerais industriais na região do Vale do Jequitinhonha (MG) a partir de imagens ASTER

Mônica Mazzini Perrotta ¹
Carlos Roberto de Souza Filho ²
Carlos Augusto da Silva Leite ³

¹ CPRM – Serviço Geológico do Brasil – Divisão de Sensoriamento Remoto
Rua Costa, 55 – 01304-010, São Paulo, SP
perrotta@sp.cprm.gov.br

² Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)- Instituto de Geociências (IG)
Caixa Postal 6152 – Campinas – SP CEP: 13083-970
beto@ige.unicamp.br

³ CPRM – Serviço Geológico do Brasil – SUREG-BH
Av. Brasil, 1731 - 30140-002, Belo Horizonte, MG
leite@bh.cprm.gov.br

Abstract. The VNIR and SWIR ASTER sensor multispectral data from Vale do Jequitinhonha region were used to evaluate the spectral signatures of gems and Li-bearing pegmatite intrusions and their related alteration minerals. The results show five types of signatures, pointing out mineral alteration assemblages mainly dominated by kaolinite. Based on these five endmembers, a spectral classification was carried out, and ca. of 80 new probable deposits were found.

Palavras-chave: remote sensing, spectral mapping, geology, ASTER, sensoriamento remoto, mapeamento espectral, geologia, sensor ASTER.

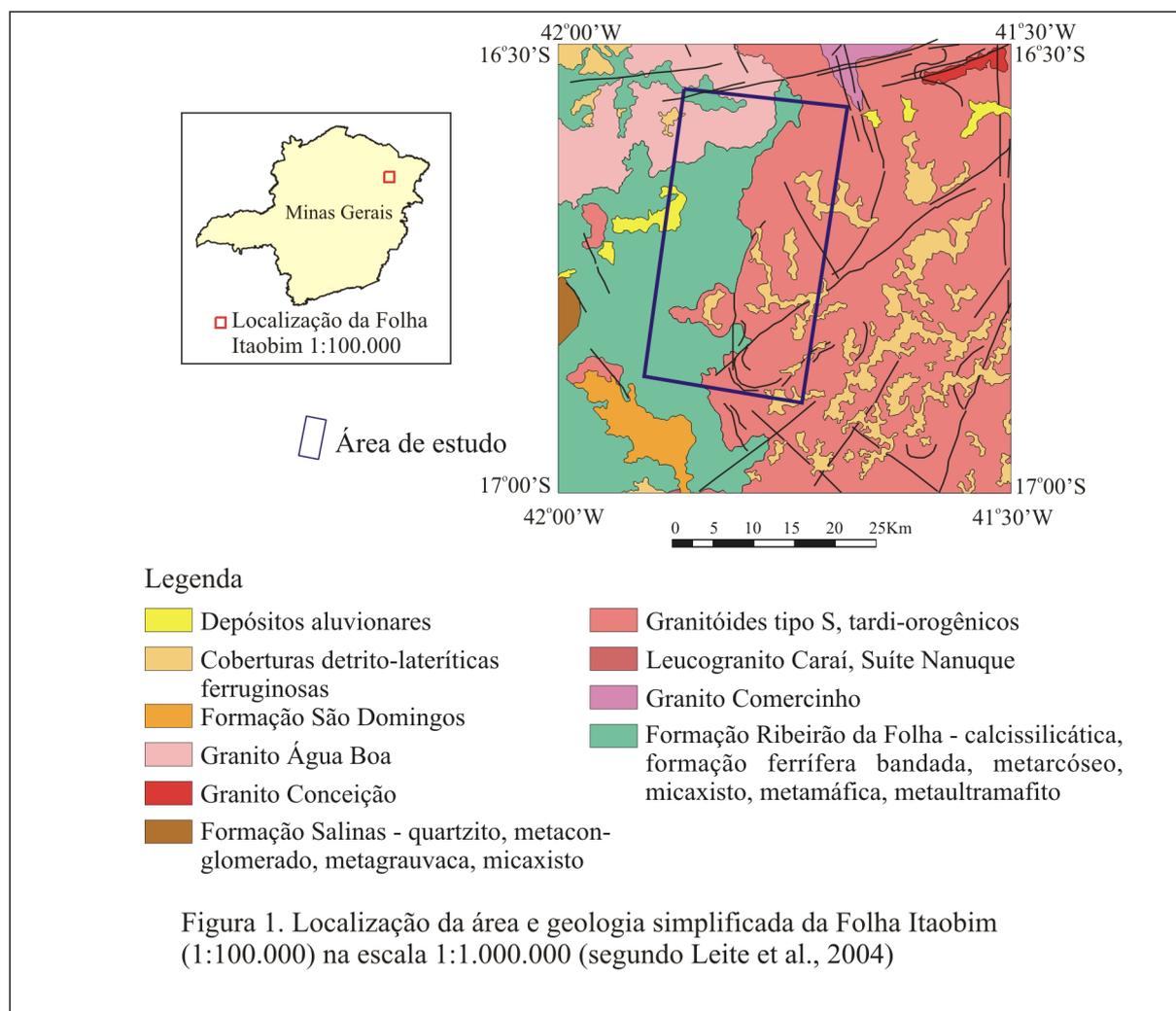
1. Introdução

Os dados multiespectrais do sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) têm sido utilizados, com sucesso, em diversas aplicações geológicas, principalmente na caracterização de minerais de alteração hidrotermal e gossans associados a depósitos minerais (e.g., Souza Filho *et al.* 2003; Crósta *et al.* 2003; Ducart, 2004; Lima & Souza Filho, 2004) além de mapeamento litológico (Rowan & Mars, 2003). Em vista destas experiências anteriores, uma cena do sensor ASTER na região do Vale do Jequitinhonha foi trabalhada na expectativa de que assinaturas espectrais de intrusões pegmatíticas mineralizadas pudessem ser definidas, e utilizadas na identificação de novos depósitos.

As intrusões pegmatíticas abordadas neste estudo, têm idade ediacariana e representam fases tardias do magmatismo tardi a pós-orogênico associado ao Orógeno Araçuaí (Pedrosa Soares *et al.* 2001). Afetam a Formação Ribeirão da Folha, constituída, na região, de (aluminossilicatos) (granada) (quartzo)-mica xisto feldspático e/ou carbonático, com intercalações de quartzito puro, micáceo ou arcoseano, e rocha calcissilicática (**figura 1**).

Os pegmatitos investigados fazem parte da província pegmatítica oriental (Paiva, 1946), no seu campo de Itinga. Este campo caracteriza-se por apresentar corpos pertencentes à classe de pegmatitos de elementos raros e estanífero-litíniferos (Romeiro, 1998). São corpos diferenciados, apresentando significativa abundância de albita, além de turmalina, berilo e topázio. Destaca-se a presença de minerais de lítio (espodumênio, petalita, ambligonita e lepidolita), de estanho (cassiterita) e de elementos raros (polucita e columbita-tantalita). As intrusões têm forma tabular ou lenticular, são homogêneas ou de zoneamento complexo. Podem ser concordantes com a xistosidade principal das encaixantes (orientada segundo

NE/SW), ou ainda discordantes, controlados por clivagens de fratura ou fraturas tardias (segundo ENE/subh, EW/subv e NW/subv).



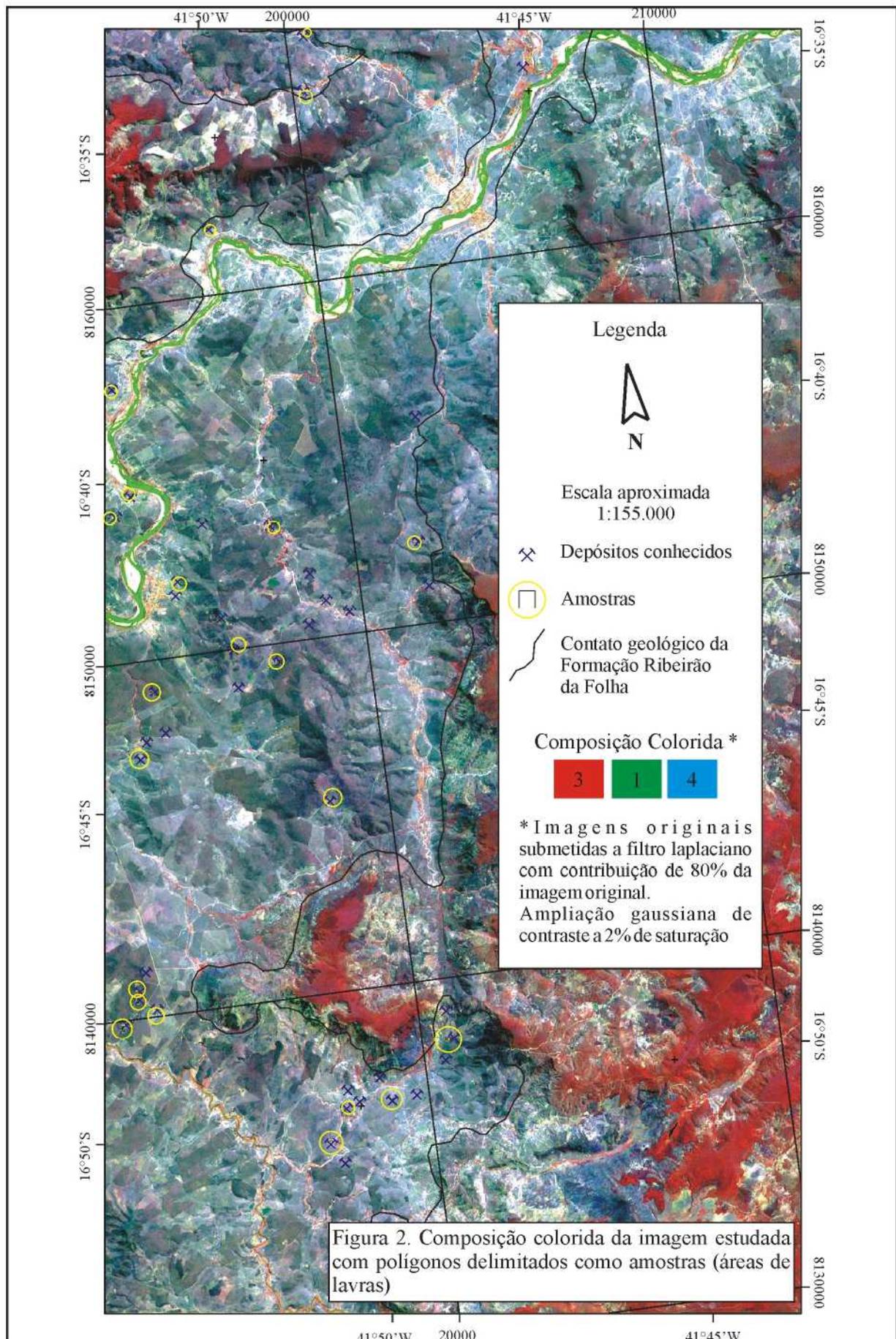
2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Utilizou-se nesta modelagem a cena AST_L1B_003_09102001131404_09242001043652 do sensor ASTER, nas suas três bandas do visível e infravermelho próximo (*VNIR*), com resolução espacial de 15 m e seis bandas do infravermelho de ondas curtas (*SWIR*), com resolução espacial de 30 m. As bandas, de 1 a 9, têm seus comprimentos de onda médios respectivamente em 0,556; 0,661; 0,807; 1,656; 2,167; 2,209; 2,262; 2,336 e 2,4 μm . As bandas do infravermelho termal (*TIR*) não foram utilizadas nesta análise.

2.2. Recorte da cena na área de interesse

A área escolhida para a aplicação das técnicas de mapeamento espectral engloba parte da área de afloramento da Formação Ribeirão da Folha, que possui 43 depósitos minerais associados a pegmatitos cadastrados, além de se tratar de um corte retangular, para otimização do processamento digital dos dados. A resolução espacial assumida foi de 15 m, de forma que as bandas do *SWIR* foram reamostradas para esta resolução (**Figura 2**).



2.3. Correção atmosférica da cena

A imagem recortada foi submetida à calibração radiométrica para conversão para valores de radiância ASTER e posteriormente os dados foram transformados em unidades de reflectância aparente através de correção atmosférica no aplicativo ACORN, segundo parâmetros atmosféricos que refletem as condições ambientais locais e da data de passagem do sensor.

2.4. Seleção das amostras na imagem

Conhecendo-se 43 depósitos cadastrados em campo, foram traçados 27 polígonos envolvendo áreas claramente reconhecidas como em estágio de lavra (**Figura 2**). Este procedimento levou em consideração a coloração esbranquiçada associada à alta reflectância das paragênese de alteração relacionadas aos pegmatitos, dominadas pela presença de caulinita, que são evidenciadas em várias composições coloridas sob vários níveis de ampliação de contraste.

2.5. Estudo da curva espectral de cada amostra

Os polígonos traçados foram transformados em 27 regiões de interesse (do tipo pontos), num total de 192 pixels na imagem. Cada pixel teve sua curva espectral analisada, e deste procedimento distinguiu-se 4 tipos de forma de curva espectral predominantes (**Figura 3**), 25 pixels de comportamento distinto foram desprezados. Os 167 pixels restantes foram agrupados nos 4 grupos (tipo 1, 2, 3 e 4). A distinção entre os grupos ficou mais bem evidenciada na medida em que as curvas espectrais foram normalizadas através da função de remoção do contínuo de forma a se isolar as feições de absorção espectral (**Figura 3**).

2.6. Mapeamento espectral

2.6.1. Mapeamento com assistente de classificação espectral

O mapeamento espectral foi processado com ajuda do assistente de classificação espectral do ENVI. Neste aplicativo inicialmente é processada uma transformação MNF (*minimum noise fraction*) para segregação do ruído nos dados e determinação de sua dimensionalidade através de uma análise por principais componentes, quando produz novo conjunto de 9 bandas decorrelacionadas. Na cena em estudo a última banda é praticamente dominada por ruído.

O próximo passo é a procura e determinação de espectros de referência na imagem MNF, através do cálculo do índice de pureza dos pixels. Neste procedimento alguns espectros de referência são determinados automaticamente, 9 neste caso, mas nenhum coincidiu com os definidos nas amostras. Assim, outros espectros, extraídos diretamente da imagem, foram utilizados no mapeamento espectral, através dos seguintes métodos:

- *Spectral Angle Mapper* (SAM) (Kruse *et al.*, 1993): esse algoritmo compara o vetor de cada pixel da imagem com os vetores relativos aos espectros de referência, definidos no espaço de n (9) bandas, classificando-os em algum deles, ou em nenhum, segundo uma diferença máxima angular definida em radianos.

- *Mixture-Tuned Matched Filtering* (MTMF) (Boardman *et al.*, 1995): esse algoritmo encontra nos pixels da imagem as abundâncias dos espectros de referência utilizando-se de uma aproximação de desmistura parcial através de um filtro de coincidência que maximiza a resposta dos espectros de referência conhecidos, ao mesmo tempo em que tende a eliminar a contribuição de um *background* desconhecido. Produz assim um grupo de bandas 'escore', que indicam o quanto cada pixel coincide com cada um dos espectros de referência e ainda um segundo grupo de bandas que traz um escore de improbabilidade baseado em misturas possíveis entre o *background* composto e o espectro de referência.

2.6.1.1. Determinação do índice de pureza dos pixels das amostras

Numa primeira tentativa de classificação espectral através dos métodos acima, os espectros médios de cada grupo de amostras foram coletados como espectros de referência. Este procedimento não forneceu um resultado satisfatório, já que sempre uma das amostras, tipo 1 no caso de SAM ou tipo 2 no caso de MTMF, predominavam na cena. Assim, alternativamente, foi avaliado o índice de pureza dos pixels das amostras, tanto relativamente aos dados com valores de reflectância aparente como às bandas MNF. Nas **figuras 4A e 4B** mostra-se os histogramas da frequência de pixels por valor de índice de pureza para ambos os casos, indicando-se o valor de corte a partir do qual se avaliou pixel por pixel, encontrando-se quais deles representavam o mais puro de cada conjunto. Nesta análise evidenciou-se uma variação importante no comportamento da banda 6 no grupo 3, que se subdividiu em 2 amostras. Os espectros destes 5 pixels (**figura 5**) serviram como referência em nova modelagem, com resultados muito mais consistentes.

2.6.2. Mapeamento pelo método do ajuste da feição espectral - Spectral Feature Fitting (SFF) (Clark *et al.*, 1990)

Nesta técnica avalia-se o ajuste entre os dados espectrais da imagem e espectros de referência com base em feições de absorção. Para isso, tanto os dados espectrais da imagem como os espectros de referência devem ser normalizados através de uma “remoção do contínuo”, possibilitando a comparação entre feições de absorção de ambos os conjuntos. As bandas *fit* produzidas representam um ‘escore’ da probabilidade do pixel corresponder ao espectro de referência. São definidas pela razão entre um valor de escala, tanto maior quanto menor o redimensionamento de escala do espectro do pixel para se ajustar ao espectro de referência, e um valor de erro médio quadrático derivado da comparação do valor espectral entre ambos os espectros a cada comprimento de onda. As curvas espectrais definidas pelos pixels mais puros de cada grupo de amostras foram utilizadas como espectros de referência nesta modelagem.

3. Análise dos resultados

3.1. Método SAM

A aplicação do método SAM resultou no mapeamento parcial ou total de todas as 27 áreas selecionadas na amostragem, mas apresentou muitos pixels mapeados conforme os espectros de referência, sendo grande parte deles nos arredores das drenagens principais, o que deve ser devido ao carreamento de material de alteração das próprias intrusões félsicas. Grupos de pixels em áreas cultivadas ou estradas não pavimentadas também foram mapeados.

3.2. Método MTMF

O resultado final da classificação pelo método MTMF (**Figura 6**) foi obtido através da análise dos histogramas dos dois conjuntos de bandas produzidos e de gráficos bidimensionais entre os pares *escore* e *inviabilidade* relativos a cada espectro de referência. Assim, definiram-se os limiares de corte para que os pixels mais coincidentes com os espectros de referência fossem localizados. O objetivo é a seleção de pixels de valores altos de *escore* e baixos de *inviabilidade*. O mapeamento produzido apresentou um bom resultado, já que nas bandas *inviabilidade*, pixels próximos às drenagens e de parte das estradas apresentaram valores altos. Apesar de ter mapeado 15 das 27 amostras e classificar, na área de afloramento da Formação Ribeirão da Folha, relativamente poucos pixels em alguma das assinaturas de referência (cerca de 2000), é o resultado mais coerente. Identificou 5 depósitos conhecidos e não amostrados e indicou aproximadamente 80 possíveis ocorrências não cadastradas.

2.6.1.1. Determinação do índice de pureza dos pixels das amostras

Numa primeira tentativa de classificação espectral através dos métodos acima, os espectros médios de cada grupo de amostras foram coletados como espectros de referência. Este procedimento não forneceu um resultado satisfatório, já que sempre uma das amostras, tipo 1 no caso de SAM ou tipo 2 no caso de MTMF, predominavam na cena. Assim, alternativamente, foi avaliado o índice de pureza dos pixels das amostras, tanto relativamente aos dados com valores de reflectância aparente como às bandas MNF. Nas **figuras 4A e 4B** mostra-se os histogramas da frequência de pixels por valor de índice de pureza para ambos os casos, indicando-se o valor de corte a partir do qual se avaliou pixel por pixel, encontrando-se quais deles representavam o mais puro de cada conjunto. Nesta análise evidenciou-se uma variação importante no comportamento da banda 6 no grupo 3, que se subdividiu em 2 amostras. Os espectros destes 5 pixels (**figura 5**) serviram como referência em nova modelagem, com resultados muito mais consistentes.

2.6.2. Mapeamento pelo método do ajuste da feição espectral - Spectral Feature Fitting (SFF) (Clark *et al.*, 1990)

Nesta técnica avalia-se o ajuste entre os dados espectrais da imagem e espectros de referência com base em feições de absorção. Para isso, tanto os dados espectrais da imagem como os espectros de referência devem ser normalizados através de uma “remoção do contínuo”, possibilitando a comparação entre feições de absorção de ambos os conjuntos. As bandas *fit* produzidas representam um ‘escore’ da probabilidade do pixel corresponder ao espectro de referência. São definidas pela razão entre um valor de escala, tanto maior quanto menor o redimensionamento de escala do espectro do pixel para se ajustar ao espectro de referência, e um valor de erro médio quadrático derivado da comparação do valor espectral entre ambos os espectros a cada comprimento de onda. As curvas espectrais definidas pelos pixels mais puros de cada grupo de amostras foram utilizadas como espectros de referência nesta modelagem.

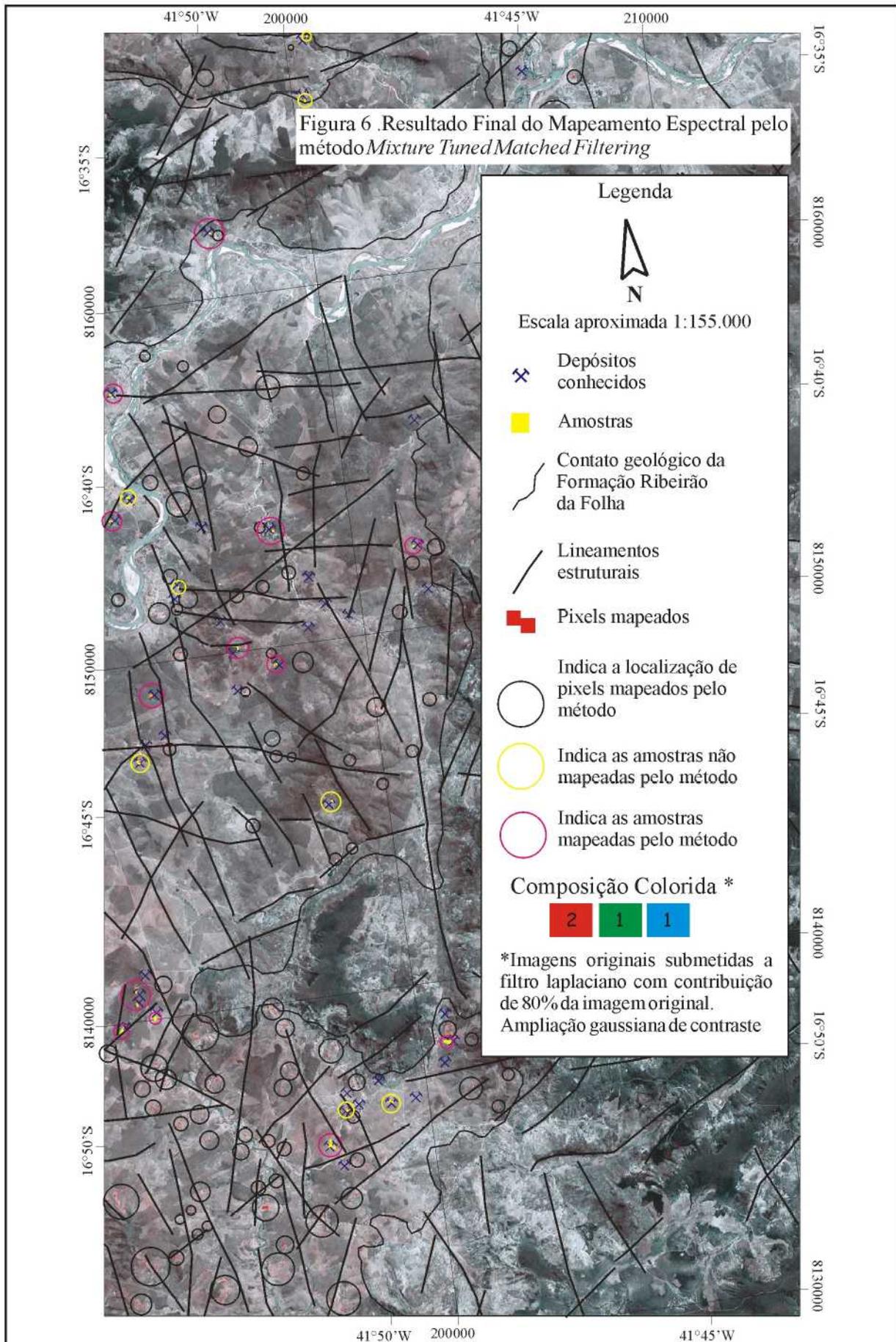
3. Análise dos resultados

3.1. Método SAM

A aplicação do método SAM resultou no mapeamento parcial ou total de todas as 27 áreas selecionadas na amostragem, mas apresentou muitos pixels mapeados conforme os espectros de referência, sendo grande parte deles nos arredores das drenagens principais, o que deve ser devido ao carreamento de material de alteração das próprias intrusões félsicas. Grupos de pixels em áreas cultivadas ou estradas não pavimentadas também foram mapeados.

3.2. Método MTMF

O resultado final da classificação pelo método MTMF (**Figura 6**) foi obtido através da análise dos histogramas dos dois conjuntos de bandas produzidos e de gráficos bidimensionais entre os pares *escore* e *inviabilidade* relativos a cada espectro de referência. Assim, definiram-se os limiares de corte para que os pixels mais coincidentes com os espectros de referência fossem localizados. O objetivo é a seleção de pixels de valores altos de *escore* e baixos de *inviabilidade*. O mapeamento produzido apresentou um bom resultado, já que nas bandas *inviabilidade*, pixels próximos às drenagens e de parte das estradas apresentaram valores altos. Apesar de ter mapeado 15 das 27 amostras e classificar, na área de afloramento da Formação Ribeirão da Folha, relativamente poucos pixels em alguma das assinaturas de referência (cerca de 2000), é o resultado mais coerente. Identificou 5 depósitos conhecidos e não amostrados e indicou aproximadamente 80 possíveis ocorrências não cadastradas.



3.3. Método do ajuste da feição espectral

A análise dos histogramas de frequência de pixels por valores de ajuste de cada amostra dos 5 grupos definiu os valores de corte para a reclassificação de cada banda produzida. A classificação resultante, menos dispersa que a produzida no SAM, também selecionou áreas próximas às drenagens principais e estradas. Mapeou 17 das áreas traçadas como amostras.

4. Considerações finais

Os resultados obtidos reforçam conclusões de estudos anteriores, comprovando que o sensor ASTER possui características espectrais e espaciais capazes de identificar feições espectrais significativas para o mapeamento de minerais específicos e de interesse na exploração mineral. Verificou-se ainda que técnicas de processamento de dados hiperespectrais podem ser adaptadas ao processamento de dados ASTER, sendo que, no caso do mapeamento das intrusões pegmatíticas em estudo, a técnica MTMF gerou resultados mais consistentes com as assinaturas espectrais dos alvos, extraídas da imagem e com dados verificados em campo.

Referências

- Boardman, J. W.; Kruse, F. A.; Green, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. In Summaries, Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop. **JPL Publication 95-1**, v. 1, pp. 23-26, 1995.
- Clark, R. N.; Gallagher, A. J.; Swayze, G. A. Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using the complete band shape least-squares algorithm simultaneously fit to multiple spectral features from multiple materials. In Proceedings of the Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop. **JPL Publication 90-54**, pp. 176–186, 1990.
- Crósta A.P.; Souza Filho C.R.; Azevedo F.; Brodie C. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 21, p. 4233–4240, 2003.
- Ducart D.F. **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. UNICAMP, 86 p, 2004.
- Kruse, F. A.; Lefkoff, A. B.; Boardman, J. B.; Heidebrecht, K. B.; Shapiro, A. T.; Barloon, P. J.; Goetz, A. F. H. The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 145–163, 1993.
- Leite *et al.* Folha SE24-Rio Doce. In: Schobbenhaus, C. *et al.*(eds), **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**, Sistema de Informações Geográficas, Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD-ROM, 2004.
- Lima, V. S. & Souza Filho. Assinaturas Espectrais de Gossans Associados a Mineralizações de Pb-Zn-Ba na Bacia de Irecê (Ba): Um Estudo Baseado em Dados do Sensor ASTER. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 42, 2004, Araxá. **Anais...** CD-ROM, 2004.
- Paiva, G. Províncias Pegmatíticas do Brasil. **Boletim DNPM/DFPM**, v. 78, p. 13-21, 1946.
- Pedrosa Soares, A.C.; Noce, C.M.; Wiedemann, C.M.; Pinto, C.P. The Araçuaí-West Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. **Precambrian Research.**, v. 10, p. 307-323, 2001.
- Romeiro, J.C.P. **Controle da Mineralização de Lítio em Pegmatitos da Mina da Cachoeira, Companhia Brasileira de Lítio, Araçuaí, MG**. 94p. Dissertação de mestrado – UFMG, Belo Horizonte. 1998.
- Rowan L.C. & Mars J.C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 350–366, 2003.
- Souza Filho C.R.; Tapia Calle, C.H.; Crósta A.P.; Xavier R.P. Infrared Spectroscopy and ASTER imagery Analysis of Hydrothermal alteration Zones at the Quellaveco Porphyry-Copper deposit, Southern Peru. In: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) 2003 Annual Conference. **Proceedings ...**, p. 1-12. 2003