

Mapeamento de alteração hidrotermal no distrito Los Menucos, Argentina, por meio de imagens multiespectrais ASTER

Diego Fernando Ducart^{1,2}

Álvaro Penteado Crósta¹

Carlos Roberto de Souza Filho¹

¹ Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/IG
Caixa Postal 6152 - 13083-970 - Campinas - SP, Brasil

² ducart@ige.unicamp.br

Abstract. This paper describes the application of image processing techniques to ASTER satellite data with the objective of mapping alteration mineralogy at Los Menucos district, Argentinean Patagonia. By using advanced hyperspectral processing techniques, it has been demonstrated that, despite the relatively reduced number of bands available in this sensor, it is possible to identify the presence of some key alteration minerals, such as kaolinite/dickite, alunite, illite, sericite/muscovite and quartz. This makes ASTER an orbital sensor of choice for mineral exploration of epithermal deposits.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, ASTER sensor, spectral classification, hydrothermal alteration, sensoriamento remoto, processamento de imagens, sensor ASTER, alteração hidrotermal.

1. Introdução

A identificação e mapeamento das assembléias superficiais de minerais de alteração são utilizados como principais guias de exploração para depósitos minerais do tipo epitermal. Este é o caso do distrito epitermal Los Menucos, cujas zonas de alteração hidrotermal foram inicialmente descobertas por meio do uso de imagens do sensor orbital Landsat TM.

O lançamento do sensor multiespectral ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer*), em 1999, trouxe benefícios significativos para esse tipo de aplicação de sensoriamento remoto. O ASTER possui 14 bandas espectrais, distribuídas entre as faixas do visível e do infravermelho termal do espectro eletromagnético. Destas, as bandas 4 a 9, compreendidas no infravermelho de ondas curtas (SWIR), foram selecionadas com o propósito de caracterização de argilas, sulfatos, filosilicatos e carbonatos, minerais comumente encontrados em zonas de alteração hidrotermal. Os dados do sensor ASTER têm sido utilizados com sucesso em diversos estudos voltados à caracterização de minerais associados a depósitos minerais e mapeamento geológico (Crósta et al. 2003, Rowan et al. 2003).

O processo de aquisição de imagens em centenas de bandas espectrais registradas e contíguas, de forma a possibilitar que para cada pixel das mesmas seja possível derivar uma curva de reflectância espectral completa, recebe as denominações de ‘espectroscopia de imageamento’ (*imaging spectrometry*), ou ‘sensoriamento remoto hiperespectral’ (*hyperspectral remote sensing*) (Crósta et al. 1997; van der Meer 2000) (**Figura 1**). Sensores hiperespectrais são caracterizados por bandas espectrais estreitas e contíguas, permitindo a extração de espectros de reflectância a partir de cada pixel componente da imagem. Estes espectros extraídos podem ser comparados diretamente com espectros medidos no campo ou em laboratório.

As técnicas utilizadas no processamento de imagens hiperespectrais possuem diferenças com relação às técnicas utilizadas com dados multiespectrais, notadamente quanto ao seu caráter eminentemente quantitativo (Rubin 1991). Contudo, estas técnicas também mostram resultados satisfatórios quando aplicadas a imagens multiespectrais ASTER (Kruse et al. 2002b, Souza Filho et al. 2003).

Os aspectos fisiográficos favoráveis (clima árido, vegetação escassa e pouca alteração intempérica), aliados às características geológicas e de tipologia das mineralizações

encontradas em Los Menucos, fazem desta área uma locação ideal para a avaliação de técnicas de mapeamento mineral por meio de sensores remotos.

O objetivo deste trabalho é avaliar o uso de técnicas de classificação hiperespectral adaptadas às imagens multiespectrais do sensor ASTER para o mapeamento de zonas de alteração hidrotermal do distrito Los Menucos.

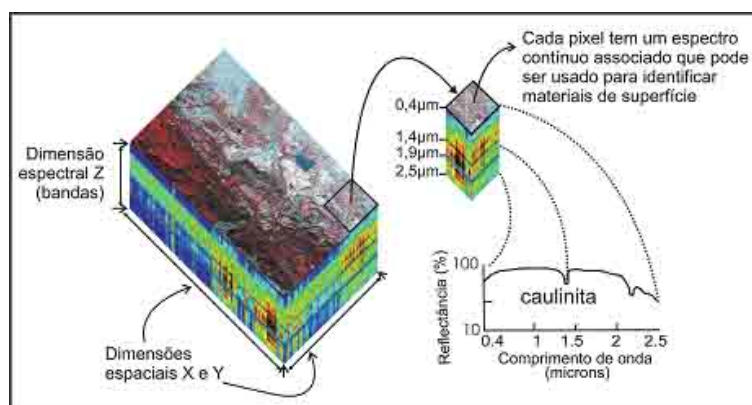


Figura 1: Conceito da espectroscopia de imageamento (adaptado de Vane et al. 1985). Na porção esquerda da figura, é apresentado um cubo de dados hiperespectrais (datacube) de uma imagem AVIRIS, com 224 bandas, da área de Jasper Ridge (Califórnia, USA).

2. Aspectos geológicos

O distrito Los Menucos localiza-se no setor norte do Maciço de Somún Curá. Este distrito abrange dois prospectos mineiros, onde são desenvolvidas atualmente atividades exploratórias: Cerro Abanico (2 x 4 km) e Cerro La Mina (3 x 7 km) (**Figura 2**).

A geologia destes prospectos é composta principalmente por seqüências quase horizontais de ignimbritos riolíticos-riodacíticos, domos riolíticos, tufos e rochas sedimentares clásticas e vulcanoclásticas, reunidos baixo o nome de Grupo Los Menucos, de idade Neo-Triássica (Labudía et al. 1995).

Mineralizações de Au-Ag epitermal (com teores variando entre 0,7 e 11 g/t Au, e centenas de g/t Ag) apresentam-se em veios de quartzo e na forma disseminada no prospecto Cerro Abanico; em Cerro La Mina, elas se associam a brechas hidrotermais (Ducart 2004). Cerro La Mina é caracterizado por alteração argílica avançada, argílica e silicificação, conformando um sistema epitermal de alta sulfetação. Cerro Abanico é caracterizado por alteração fílica, rodeada por alteração argílica, exibindo características de um sistema epitermal de baixa sulfetação.

3. Métodos

Um conjunto de técnicas de processamento, originalmente desenvolvidas para imagens hiperespectrais, foi adaptada para os dados multiespectrais do ASTER, no sentido de mapear a distribuição superficial das diferentes zonas de alteração. De forma geral, as técnicas de classificação hiperespectral se baseiam na análise da similaridade entre os espectros de um conjunto de materiais de referência, ou *endmembers*, e as curvas espectrais correspondentes a cada pixel da imagem. A metodologia do processamento hiperespectral utilizada foi proposta por Boardman & Kruse (1994), Boardman et al. (1995) e Kruse et al. (1996), e encontra-se implementada no programa ENVI[®] (RSI 2003):

- correção atmosférica dos dados ASTER;
- transformação linear dos dados de reflectância para minimizar o ruído e determinar a dimensionalidade dos dados por meio da técnica MNF (*Minimum Noise Fraction*);

- c) caracterização espectral de campo, com o objetivo de criar uma biblioteca espectral de referência;
- d) mapeamento espacial pela técnica MTMF (*Mixture Tuned Matched Filtering*) e estimativa da abundância para espectros específicos.

No processamento foram utilizadas apenas as bandas espectrais 4 a 9 cobrindo a região espectral de 1,600 a 2,430 μm (SWIR) de uma sub-cena ASTER de 1019 x 940 pixels (equivalentes a 15,2 x 14,1 km). Neste intervalo ocorrem as feições espectrais diagnósticas das argilas, sulfatos e filossilicatos de interesse (Clark et al. 1990), além de ser o intervalo equivalente à cobertura espectral do instrumento PIMA, utilizado na caracterização espectral dos materiais de alteração hidrotermal.

4. Correção atmosférica

Dados ASTER são fornecidos pela NASA em valores de radiância. A atmosfera contém gases e partículas (especialmente vapor de água, O_2 , e CO_2) que provocam absorção e espalhamento da radiação disponível para o sensor remoto. Esses efeitos, que resultam na diminuição da qualidade da imagem e modificam significativamente a resposta espectral dos alvos, podem ser corrigidos por meio da correção atmosférica de imagens (Green et al. 1993).

A correção atmosférica é um passo fundamental para a classificação espectral dos alvos, permitindo comparar os valores de reflectância dos pixels das imagens com os espectros de reflectância medidos na superfície. Para a correção dos dados do ASTER foi utilizado o programa ACORN (Atmospheric CORrection Now). Este programa oferece uma série de estratégias para a correção atmosférica de imagens hiperespectrais e multiespectrais, e para transformação dos valores de radiância dos pixels da imagem em reflectância aparente.

Na **Figura 2** são apresentadas comparações, para as mesmas localizações geográficas, entre os espectros de reflectância de campo da biblioteca (re-amostrados para a resolução espectral do sensor ASTER), e os espectros obtidos dos pixels da imagem ASTER, transformados em reflectância aparente. Apesar do espectro de reflectância de um pixel do ASTER ser o resultado da reflectância de uma área de 15 x 15 m no terreno, neste caso há uma razoável coincidência com o espectro de campo de localização pontual.

5. Transformação MNF

A transformação MNF (*Minimum Noise Fraction*) é usada para determinar a dimensionalidade espectral inerente aos dados, segregar o ruído e reduzir os requisitos computacionais para o processamento subsequente (Green et al. 1988).

Para propósito do processamento espectral posterior, a dimensionalidade inerente dos dados é determinada por exame dos autovalores e das imagens associadas (Green et al. 1988). A diminuição dos autovalores, conforme aumentam as bandas MNF, mostra que a quase totalidade da informação está contida nas bandas 1 a 5, ao passo que o ruído concentra-se principalmente na última (banda MNF 6) (**Figura 3**). Por essa razão, a última banda foi eliminada do processamento posterior.

6. Caracterização espectral de campo

Um conjunto de aproximadamente 1.100 espectros de reflectância, adquiridos de amostras coletadas na superfície de ambos prospectos, foi analisado com o intuito de identificar a mineralogia de alteração. Os espectros foram obtidos em laboratório usando os espectroradiômetros PIMA e FieldSpec FR. Para a análise espectral foram utilizados os programas FeatureSearch 1.6 e ENVI 4.0.

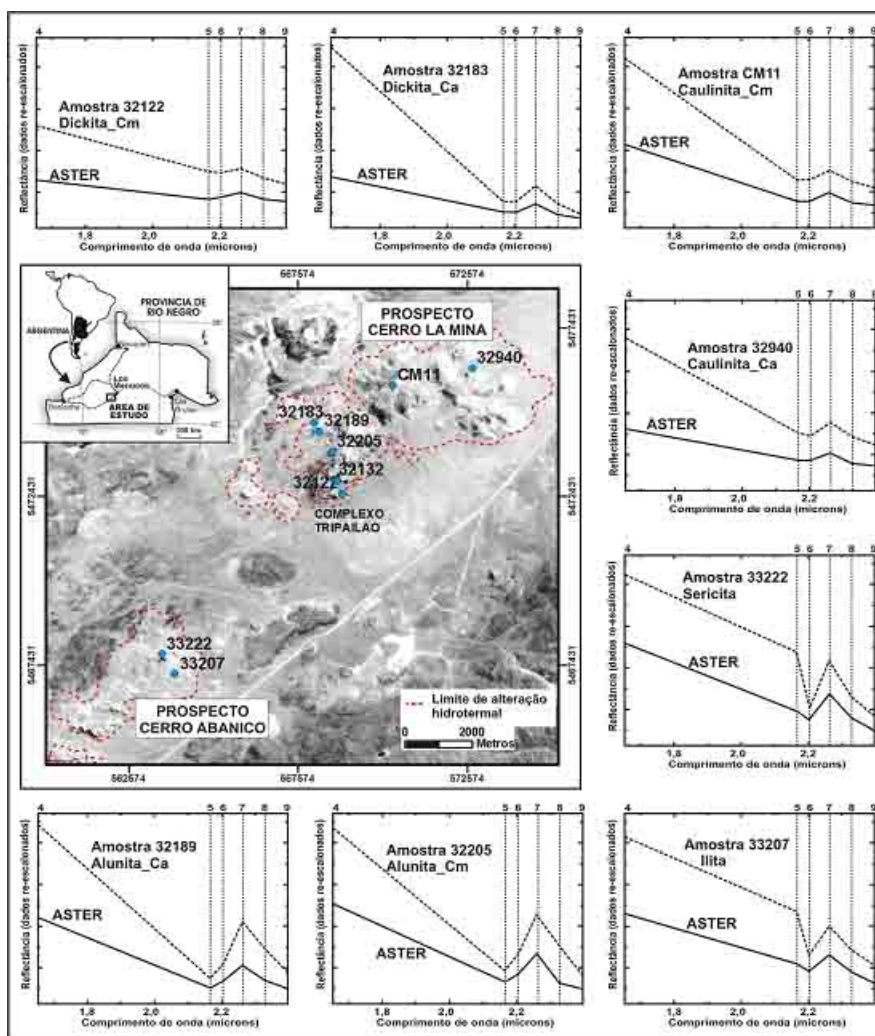


Figura 2: Comparações dos espectros de campo (linhas tracejadas), com os espectros dos pixels da imagem ASTER (linhas contínuas), junto com sua localização na banda 3 do ASTER. Legenda dos minerais: Dickita_Ca e Dickita_Cm (dickita de cristalinidade alta e cristalinidade média, respectivamente), Alunita_Ca e Alunita_Cm (alunita de cristalinidade alta e média, respectivamente), Caulinita_Ca e Caulinita_Cm (caulinita de cristalinidade alta e média, respectivamente).

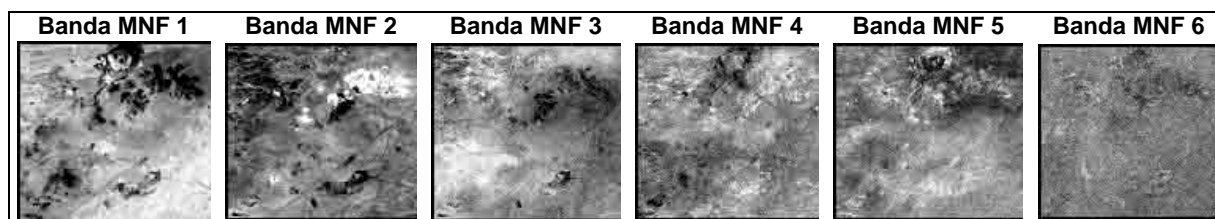


Figura 3: Bandas resultantes da transformação MNF da imagem ASTER de Los Menucos.

Os resultados obtidos da análise espectral permitiram a identificação dos seguintes minerais no prospecto Cerro La Mina: quartzo+alunita+caulinita+dickita (alteração argílica avançada) no setor sudoeste; dickita, dickita+caulinita, caulinita, ilita (alteração argílica) nos setores central e nordeste, além de intensa silicificação conformada por quartzo±pirita no setor centro-sul do prospecto (**Figura 4**). No prospecto Cerro Abanico foi identificada a presença de uma zona central com sericita+quartzo (alteração fílica), tendo ao seu redor uma extensa zona com ilita±esmectita±caulinita (alteração argílica).

Os espectros de reflectância correspondentes aos minerais mais representativos das zonas de alteração foram selecionados para a criação de uma biblioteca espectral de referência

(Figura 5a) que foi utilizada posteriormente na classificação espectral da imagem ASTER. Para permitir essa classificação, os espectros foram re-amostrados para a resolução espectral do ASTER (Figura 5b).

Uma análise comparativa entre os espectros re-amostrados para a resolução espectral do ASTER mostra que, apesar da aparente similaridade, existem diferenças importantes entre eles, principalmente nos comprimentos de onda correspondentes às bandas espectrais 5, 6 e 7, o que potencialmente pode ser reproduzido nos espectros associados a cada pixel das imagens. Estes dados de espectroscopia de reflectância de campo também serviram de ‘verdade terrestre’ para avaliar posteriormente os resultados obtidos com a classificação espectral.

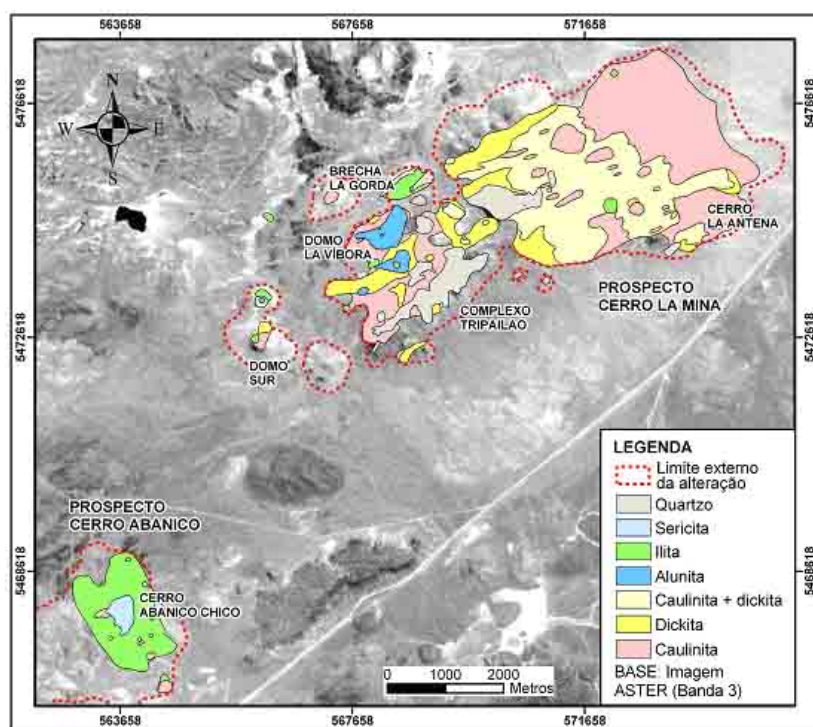


Figura 4: Mapa da alteração hidrotermal dos prospectos Cerro La Mina e Cerro Abanico, região de Los Menucos, elaborado a partir da caracterização espectral.

7. Mapeamento mineral com MTMF

O MTMF (*Mixture Tuned Matched Filtering*) é uma técnica de classificação hiperespectral que mapeia abundâncias de *endmembers* na escala de sub-pixel. Esta técnica utiliza um filtro de ajuste (*Matched Filter*) para maximizar a resposta do *endmember* conhecido e suprimir a resposta dos minerais desconhecidos considerados de fundo (Harsanyi & Chang 1994). Isso fornece um meio rápido de detecção de materiais específicos com base no ajuste a espectros provenientes de bibliotecas ou imagens e não requer conhecimento de todos os *endmembers* de uma imagem (Boardman 1998).

Os resultados do MTMF são apresentados na forma de imagens em escala de cinza com valores entre 0,0 e 1,0 (não mostradas aqui) as quais fornecem um meio de estimar a abundancia mineral, ou como mapas minerais em cores mostrando os minerais que predominam espectralmente em cada pixel (Figura 6).

8. Discussão

A comparação visual do mapeamento mineral com ASTER (Figura 6) e da caracterização espectral de campo da área Los Menucos (Figura 4), mostra uma significativa correlação

espacial no mapeamento dos principais minerais de alteração hidrotermal. No entanto, algumas limitações são observadas no mapeamento de minerais com espectros quase semelhantes, quando re-amostrados para a resolução espectral do ASTER.

O mapeamento mineral com ASTER foi satisfatório com relação à identificação geral dos minerais do grupo da caulinita (neste caso caulinita ou dickita, sem distinção), mas mostram a incapacidade do sensor para mapear diferenças na estrutura cristalina neste grupo (caulinita x dickita). Também há limitações na identificação das diferenças no grau de ordenamento estrutural (cristalinidade alta x cristalinidade média de caulinitas e dickitas).

Resultados positivos foram obtidos no mapeamento de alunita no prospecto Cerro La Mina. Foi possível registrar a variação na profundidade das feições de absorção, como mostrado na **Figura 6** (ampliação mostrada na janela A), correspondente a uma zona central com alunita de maior cristalinidade tendo ao seu redor alunita de menor cristalinidade. Resultados similares foram também obtidos no mapeamento de illita e sericita em ambos prospectos. Em Cerro Abanico Chico a sericita ocorre com illita ao seu redor, padrão mostrado também pela espectroscopia de campo.

A técnica MTMF também conseguiu mapear quartzo de forma condizente com os resultados da espectroscopia de campo, apesar deste mineral não apresentar feições marcantes de absorção características na região do SWIR do espectro, utilizada nesse estudo.

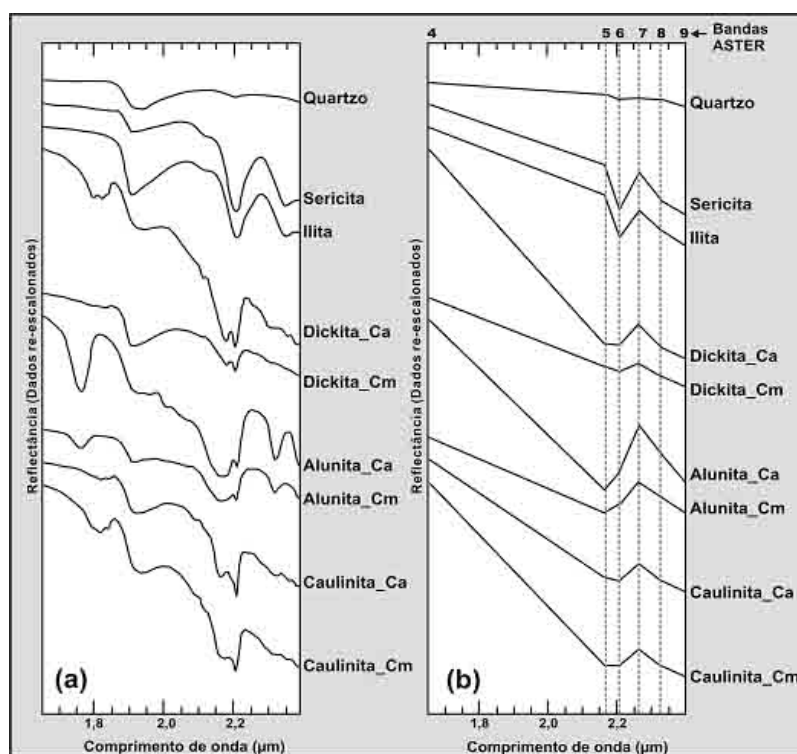


Figura 5: (a) Espectros de campo dos principais minerais de alteração hidrotermal de Los Menucos considerando o intervalo de 1,600 a 2,430 nm, que coincide com as bandas utilizadas do ASTER (4 a 9)..

Legenda dos minerais: Dickita_Ca e Dickita_Cm (dickita de cristalinidade alta e cristalinidade média, respectivamente), Alunita_Ca e Alunita_Cm (alunita de cristalinidade alta e média, respectivamente), Caulinita_Ca e Caulinita_Cm (caulinita de cristalinidade alta e média, respectivamente). (b) Os mesmos espectros da figura (a) re-amostrados para a resolução espectral do ASTER.

9. Conclusões

Resultados obtidos no distrito Los Menucos demonstram que dados do sensor ASTER podem ser usados para produzir informação geológica/mineralógica básica muito útil para exploração mineral, particularmente em terrenos áridos.

Demonstrou-se, assim, que apesar do número relativamente reduzido de bandas espectrais disponíveis neste sensor, é possível discriminar e mapear os principais minerais de alteração hidrotermal presentes em zonas epitermais mineralizadas. Neste caso, foi possível mapear caulinita/dickita, alunita, ilita, sericita/muscovita e quartzo nos prospectos.

Os resultados positivos obtidos com o sensor ASTER no mapeamento mineralógico de zonas de alteração, aliados à ampla disponibilidade de suas imagens em nível mundial, tornam este sensor uma ferramenta de grande utilidade nas atividades de exploração mineral para depósitos de metais preciosos.

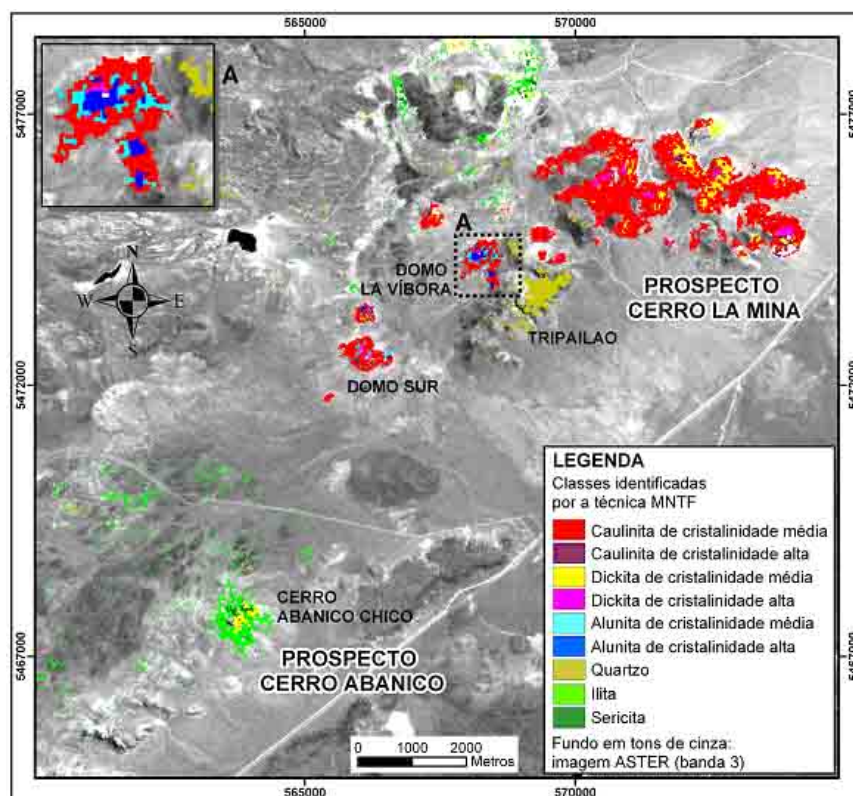


Figura 6: Resultado da classificação MTMF (em cores), tendo como fundo a banda 3 do ASTER. Na janela A é apresentada uma ampliação dos resultados no Domo La Víbora, prospecto Cerro La Mina.

10. Referências bibliográficas

Boardman, J.W. Leveraging the High Dimensionality of AVIRIS Data for Improved Sub-Pixel Target Unmixing and Rejection of False Positives: Mixture Tuned Matched Filtering. **AVIRIS Proceedings JPL Publication 1998.** v. 97, Part 21. Disponível em: ftp://popo.jpl.nasa.gov/pub/docs/workshops/98_docs/8.pdf. Acesso em: 29/10/2004

Boardman, J.W.; Kruse, F.A. Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, North Grapevine Mountains, Nevada. **Proceedings of the Tenth Thematic Conference on Geological Remote Sensing**, Environmental Research Institute of Michigan, San Antonio, 1994. TX, pp. 407-18.

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, 1995, JPL Publication 95-1, 1:23-26..

Clark, R.N.; King, T.V.V.; Klejwa, M.; Swayze, G.A.; Vergo, N.. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. **Journal of Geophysics Research**. v. 95, No. B-8, p. 12653-12680, 1990.

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

Crósta A.P., Sabine C., Taranik J.V. Hydrothermal alteration mapping at Bodie, California, using AVIRIS Hyperpectral Data, **Remote Sensing of the Environment**, v. 65, p. 309-319. 1998

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 (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**. 86 p. (313/2004). Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2004.

Green, A.A.; Berman, M.; Switzer, P.; Craig, M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26 (1), p. 65- 74, 1988.

Green, R.O.; Conel, J.E.; Roberts, D.A. Estimation of Aerosol Optical Depth, and Additional Atmospheric Parameters for the Calculation of Apparent Reflectance from Radiance Measured by the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer. **In: Fourth Annual Airborne GeoScience Workshop, JPL Public**, 1993, 93-26, Proceedings, 83-86.

Harsanyi, J.C.; Chang, C.I. Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: An orthogonal subspace projection approach: **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 1994, v. 32, p. 779-785.

Kruse, F.A.; Perry, S.L.; Caballero, A. Integrated Multispectral and Hyperspectral Mineral Mapping, Los Menucos, Rio Negro, Argentina, Part II: EO-1 Hyperion/AVIRIS Comparisons and Landsat TM/ASTER Extensions. **In: JPL Airborne Geoscience Workshop, Jet Propulsion Laboratory, 2002, 11, Proceedings**. Disponível em: <ftp://popo.jpl.nasa.gov/pub/docs/workshops/02_docs/2002_Kruse_Perry_Part2_web.pdf>

Kruse, F.A.; Huntington, J.H.; Green, R.O. Results from the 1995 AVIRIS Geology Group Shoot. **Proceedings, 2nd International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition: Environmental Research Institute of Michigan (ERIM)**, 1996, Ann Arbor, v. 1, p. 211-220.

Rowan, L.C.; Hook, S.J.; Abrams, M.J; Mars, J.C. Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. **Economic Geology**, v. 98, p. 1019-1027, 2003.

Research System Inc. **ENVI User's Guide**. ASPRS, Washington DC. 25 p. (Suplemento). ENVI Version 4.0, September, 2003 Edition, 1084 p.

Rubin, T.D. Spectral alteration mapping with Imaging Spectrometers. **In: Eighth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing**, 1991, Denver, Colorado, p. 13-25.

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. **Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)**, 2003, Annual Conference, 1-12 (CD-ROM).

Van der Meer, F. 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, 2000.

Vane, G.; Gregg; Goetz A.F.H. Introduction to the proceedings of the Airborne Imaging Spectrometer (AIS) data analysis workshop. **Proceedings of the Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop**, JPL Publication, 1985, 85-41, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA. p. 1-21.