



Caracterização da alteração hidrotermal no depósito de Cu-pórfiro de El Salvador, Chile, por meio de processamento de imagens multiespectrais ASTER

D.B. Cardoso & A.P. Crósta

Instituto de Geociências - UNICAMP. R. João Pandiá Calógeras 51, CEP 13084-970.
daniele.cardoso@ige.unicamp.br, alvaro@ige.unicamp.br

Abstract Exploration techniques for hydrothermal alteration characterization were employed at Indio Muerto Porphyry-Copper deposit, located in the El Salvador mining district, Chile. Reflectance spectroscopy analysis of 148 samples with hydrothermal alteration, covering part of the Indio Muerto deposit, was conducted. The results were used in the characterization of the hydrothermal alteration mineralogy related to the formation of the porphyry-Cu deposit, indicating the spatial distribution of the hydrothermal mineralogical assembly on the surface. The deposits of El Salvador are associated with Paleocene andesitic lavas and breccias. These deposits include lavas, dikes, pyroclastic and epiclastic rocks that intrude and cover Cretaceous andesitic lava and breccias. These rocks built a rhyolitic dome that makes up the majority of the Indio Muerto region. The analyses were conducted using reflectance spectroscopy in the short infrared wavelength range (SWIR), for the identification and characterization of main mineral absorption bands, based on reference spectral libraries. Two types of hydrothermal alteration were identified at Indio Muerto based on the reflectance spectroscopy results: argillic and advanced argillic. A study of the hydrothermal alteration distribution of the entire El Salvador district was also done, using orbital ASTER images. Using SAM (Spectral Angle Mapper) and FPCS (Feature Oriented Principal Component Selection) spectral classifications techniques, the characterization of hydrothermal zones was also conducted.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, espectroscopia de reflectância, Cu-pórfiro.

INTRODUÇÃO Entre os diversos tipos de depósitos minerais encontrados na Cordilheira dos Andes, os do tipo cobre pórfiro se destacam pela sua importância econômica e por seu volume de reservas. Dentre os muitos depósitos desse tipo já descobertos nos Andes encontram-se os do distrito de El Salvador no Chile, como Índio Muerto. Esses depósitos são formados por meio de processos de alteração hidrotermal agindo sobre rochas ígneas de natureza félsica. Por esse motivo, as zonas de alteração que comumente envolvem esse tipo de mineralização constituem alvos preferenciais para a exploração mineral utilizando técnicas de sensoriamento remoto (Sabine 1999).

Alguns depósitos do tipo Cu-pórfiro são detectados primeiramente por meio do reconhecimento das rochas hospedeiras alteradas hidrotermalmente e que tipicamente são distribuídas segundo zonas de alteração, representadas por halos, aflorantes em superfície.

Os minerais de alteração que compõem os halos de alteração hidrotermal, chamados comumente de argilo-minerais (embora compreendam outros minerais), podem ser usados tanto para a identificação, como também para caracterização de depósitos de Cu-pórfiro, auxiliando na elaboração de modelos de formação e desenvolvimento desse tipo de depósito, bem como na definição de estratégias

exploratórias para depósitos dessa natureza.

ETAPAS E MÉTODOS DE TRABALHO A metodologia empregada foi baseada inicialmente na pesquisa documental por meio de relatórios. As propriedades de reflectância de rochas que passaram por processos de alteração hidrotermal são distintas das rochas hospedeiras. Desse modo, tanto a determinação do tipo de alteração dessas rochas, associada à formação do depósito mineral, como o mapeamento dos minerais de alteração, podem ser eficazmente determinados por técnicas de espectroscopia de reflectância e sensoriamento remoto.

As amostras de rochas alteradas hidrotermalmente provenientes do depósito de Índio Muerto utilizadas neste estudo foram coletadas e cedidas por Y. Watanabe (*Geological Survey of Japan*) e J. Hedenquist (*Univ. Colorado/Boulder*), tendo sido utilizadas num estudo cujos resultados foram publicados por Watanabe & Hedenquist (2001).

Por se tratar de amostras de pequenas dimensões, remanescentes da confecção de lâminas petrográficas, as medidas de reflectância foram realizadas na superfície plana referentes ao corte das amostras de rocha. Tal procedimento foi efetuado nos laboratórios de espectroscopia de reflectância do Instituto de



Geociências da UNICAMP e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, utilizando espectro-radiômetro de reflectância *FieldSpec Full Resolution*®, fabricado pela *Analytical Spectral Devices*.

Após a obtenção das medidas espectrais passou-se à fase de análise dos resultados, com o intuito de identificação da mineralogia de alteração principal em cada amostra. Os métodos utilizados nessa etapa do trabalho consistiram inicialmente na identificação das principais bandas de absorção a partir da curva espectral de cada amostra e a sua comparação com curvas espectrais de referência, provenientes de bibliotecas espectrais em formato digital. Para este projeto foi utilizada a biblioteca espectral digital do USGS (Clark *et al.* 1993). Os minerais selecionados para compor a biblioteca foram definidos com base nos trabalhos prévios sobre a área de estudo e extraídos da biblioteca espectral da USGS. Essa etapa do trabalho foi desenvolvida com o auxílio dos aplicativos de software específicos SIMIS® *Field* 2.9, e ENVI®, disponíveis no Laboratório de Processamento de Informações Geo-Referenciadas (LAPIG) do IG-UNICAMP.

A etapa seguinte constituiu na orto-retificação da cena ASTER onde está inserida a região de estudo, seguida da correção atmosférica da mesma, utilizando o software ENVI® e o módulo adicional de correção atmosférica FLAASH® (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*). Em seguida, a resolução espacial das bandas da porção do espectro correspondente ao infravermelho de ondas curtas (SWIR) foi re-amostrada de 30 para 15 metros, agregando-as em seguida às bandas correspondentes à porção do espectro correspondente ao visível-infravermelho próximo (VNIR), as quais já possuem resolução espacial de 15 metros. A partir desses procedimentos foi possível analisar a composição e distribuição da alteração hidrotermal de El Salvador utilizando a informação espectral das imagens ASTER, analisada por meio das técnicas de classificação espectral SAM (*Spectral Angle Mapper*) e FPCS (*Feature-Oriented Principal Component Selection*) (Crósta *et al.*, 2003), com o auxílio do aplicativo de software específico e ENVI®.

ASPECTOS GEOLÓGICOS A região de El Salvador – Chile Os depósitos de cobre pórfiro que formam o distrito de Indio Muerto encontram-se associados a lavas e brechas de composição andesítica do Paleoceno, incluindo lavas, diques, rochas piroclásticas e epiclásticas, que intrudem e recobrem lavas e brechas andesíticas do Cretáceo. Essas rochas formam um domo riolítico complexo, que compõe a maior parte das rochas na região do depósito de Indio Muerto e foram datadas por Cornejo *et al.* (1997) em

58 a 60 Ma.

Um pórfiro riolítico foi datado em 44 Ma. por Gustafson *et al.* (2001) e denominado de Quartzo-Pórfiro, ao qual se associa a intrusão vulcânica de Cerro Pelado, além de diques e *sills*. A essa sequência magmática associam-se alteração hidrotermal e mineralizações de cobre.

Ocorre ainda um complexo pórfiro granodiorítico datado em 43 a 41 Ma (Cornejo *et al.* 1997), que abrange várias unidades intrusivas. Quatro centros principais de intrusões, brechação, alteração e mineralização são identificados dentro desse complexo por Gustafson *et al.* (2001), que os denominou de Gulch-Copper Hill, O Nose, Turquoise Gulch e Granite Gulch, todos eles na área central de Indio Muerto.

ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS ESPECTRAIS

Os resultados da classificação espectro-mineralógica das 148 amostras do depósito de Indio Muerto foram comparados com as análises mineralógicas, obtidas por meio de petrografia e raios-X, realizadas por Watanabe e Hedenquist (2001). Como esperado, as curvas espectrais das amostras não se ajustam perfeitamente às dos minerais provenientes da biblioteca espectral de referência. As principais causas dessa variação se devem à presença de misturas de minerais nas amostras, diferente grau de ordenamento cristalino, bem como pequenas variações na composição química das mesmas.

A análise espectral apontou para algumas fases minerais principais, caracterizadas pela presença dos seguintes minerais: paragonita, alunita, ilita e montmorilonita. As curvas espectrais obtidas foram comparadas aos espectros correspondentes presentes na biblioteca, considerando as misturas de minerais presentes nas amostras, de modo a se alcançar uma correlação bastante próxima entre a curva experimental e a mistura de minerais da biblioteca de referência.

De posse desses dados realizou-se a interpretação espectral detalhada de todas as amostras, e a posterior classificação das mesmas quanto ao tipo de alteração hidrotermal das quais são representativas. A partir desses dados foi possível determinar a distribuição espacial dos diferentes minerais e dos tipos de alteração hidrotermal (argílica e argílica avançada).

Caracterização espectral dos minerais de referência

Para o presente trabalho foram montadas duas bibliotecas espectrais, uma contendo os espectros de referência dos minerais alunita, ilita e caulinita, coletados a partir da biblioteca da USGS (Clark *et al.* 1993), e outra onde os espectros de reflectância

correspondentes aos mesmos minerais da biblioteca anterior, foram obtidos segundo medidas laboratoriais, a partir das amostras cedidas por Watanabe & Hedenquist.

CLASSIFICAÇÃO ESPECTRAL SAM (SPECTRAL ANGLE MAPPER) A classificação hiperspectral da imagem multiespectral ASTER foi realizada com o auxílio de ferramentas espectrais do programa de processamento de imagens ENVI®. O assistente de classificação disponível no programa, usado para identificar os pixels da imagem espectralmente semelhantes aos *endmembers* de

referência foi o *Spectral Angle Mapper* (SAM). Esse assistente compara as curvas espectrais da biblioteca de referência re-amostrada para o sensor ASTER, com os espectros de reflectância dos pixels, e identifica similaridades entre eles. Desse modo é possível reconhecer e localizar na imagem os materiais desejados. Utilizou-se esse método buscando identificar os minerais de alteração hidrotermal e sua respectiva distribuição espacial na área do depósito e seu entorno. As figuras 1 e 2 apresentam a distribuição espacial para cada um dos principais minerais de alteração, alunita, ilita e caulinita, respectivamente nas cores vermelho, verde e azul.

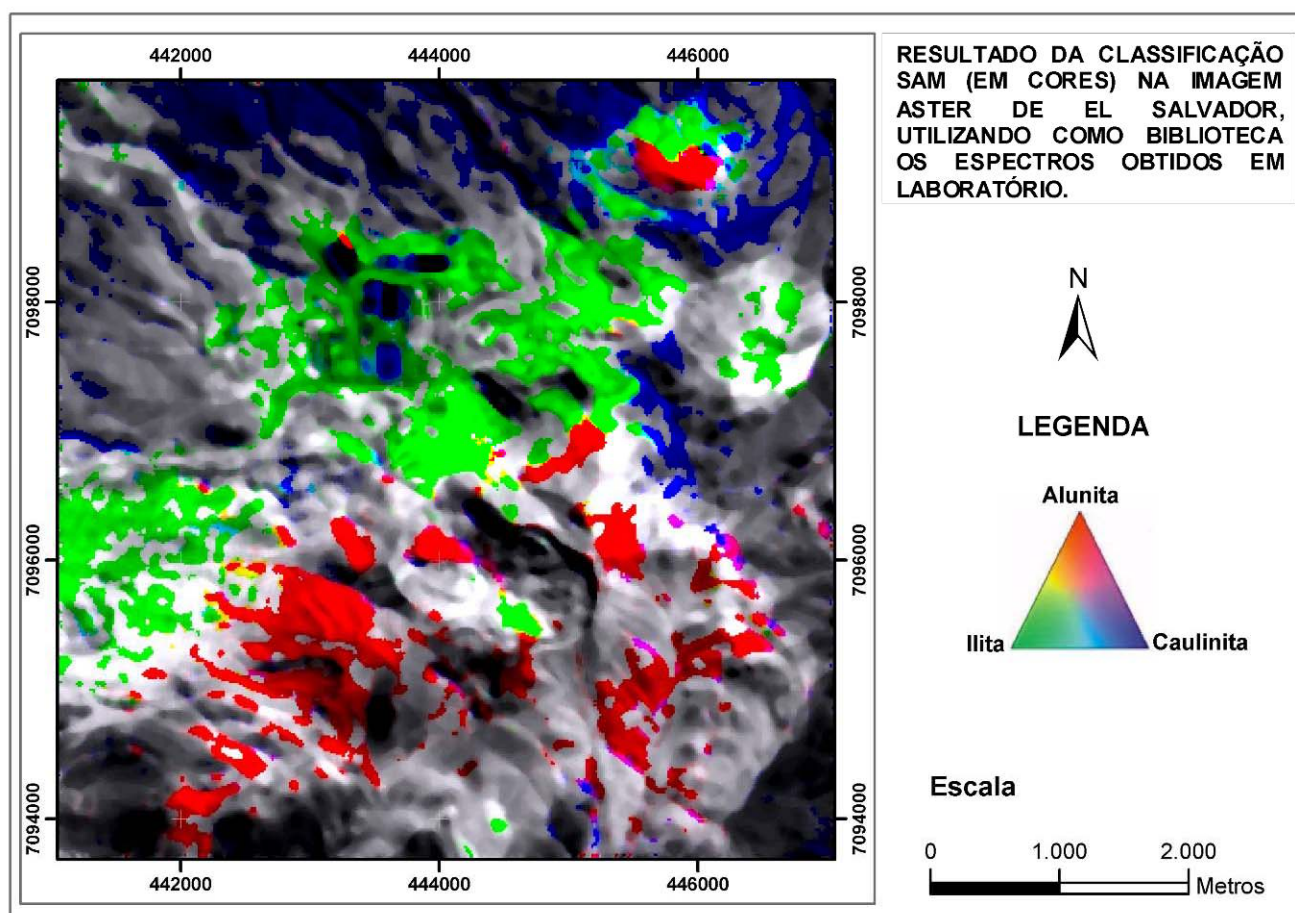


Figura 1. Resultado da classificação SAM na imagem ASTER de El Salvador, utilizando como *endmembers* os espectros obtidos em laboratório a partir da análise de amostras de campo

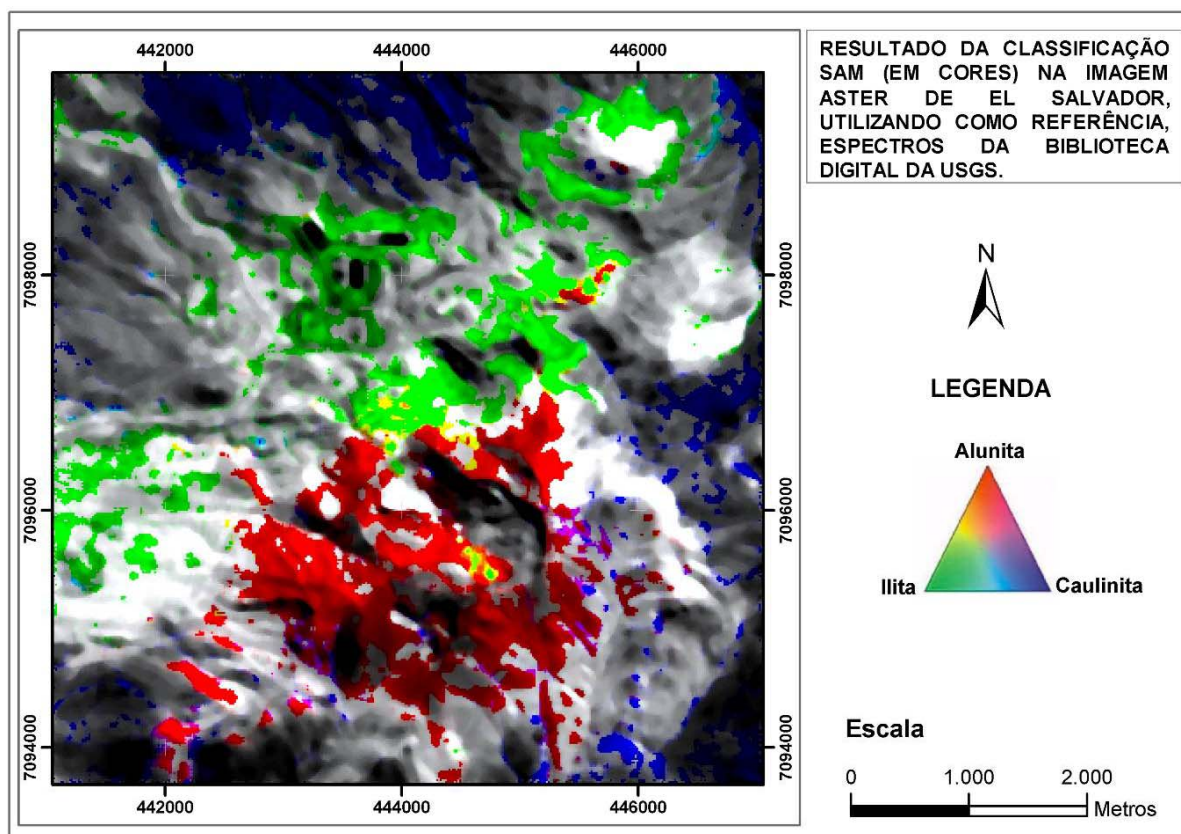


Figura 2. Resultado da classificação SAM (em cores) na imagem ASTER de El Salvador, utilizando como endmembers os espectros da biblioteca digital do USGS

Uma comparação entre as figuras 1 e 2 revela que ambas apresentam uma distribuição espacial para cada mineral bem definida, ou seja, é possível estabelecer um zoneamento dos mesmos. Destaca-se ainda a correlação e similaridade espacial entre a distribuição dos respectivos minerais nas duas figuras, o que corrobora para uma avaliação positiva da técnica de mapeamento espectral empregada e indica a possibilidade de se utilizar essa metodologia em atividades exploratórias sem que, obrigatoriamente, se disponha previamente de dados espectrais de campo.

CLASSIFICAÇÃO ESPECTRAL FPCS (FEATURE-ORIENTED PRINCIPAL COMPONENT SELECTION) Crósta & Moore (1989) desenvolveram a técnica FPCS para separar e realçar a resposta espectral de minerais utilizando imagens multiespectrais do sensor TM do satélite Landsat. Essa técnica, posteriormente adaptada para imagens ASTER por Crósta *et al.* (2003), se baseia no método estatístico multivariado de análise por principais componentes e possui como vantagens, o fato de não requerer a aplicação prévia de correção atmosférica da imagem e de poder ser aplicada sem conhecimentos *a priori* de dados de espectroscopia terrestre.

A classificação multiespectral por FPCS se baseia nas diferenças de radiância medidas por um sensor, independentemente dos efeitos da irradiância solar e do albedo da superfície. A análise das principais componentes (APC) é uma técnica multivariada eficiente para suprimir os efeitos da radiância que eventualmente mascaram feições dos espectros de reflectância de materiais geológicos, aos quais se têm interesse em mapear. As principais componentes (PCs) também são úteis na redução do elevado grau de correlação entre os dados de cada banda dos sensores multiespectrais (Sabine 1999).

As imagens de abundância dos minerais de alteração da região do depósito de El Salvador foram produzidas por meio da análise por componentes principais, utilizando as bandas VNIR e SWIR do sensor ASTER. Cada imagem exposta na Fig.3 representa a abundância de um dos minerais alunita, illita, caulinita, caulinita + esmectita e limonita, onde as cores “quentes” (vermelho, laranja e amarelo) indicam uma maior abundância do respectivo mineral na imagem. Já a Fig. 4 apresenta um mapa da distribuição dos principais minerais, integrando a interpretação dos resultados para cada mineral de alteração, obtidos pela aplicação da técnica FPCS.

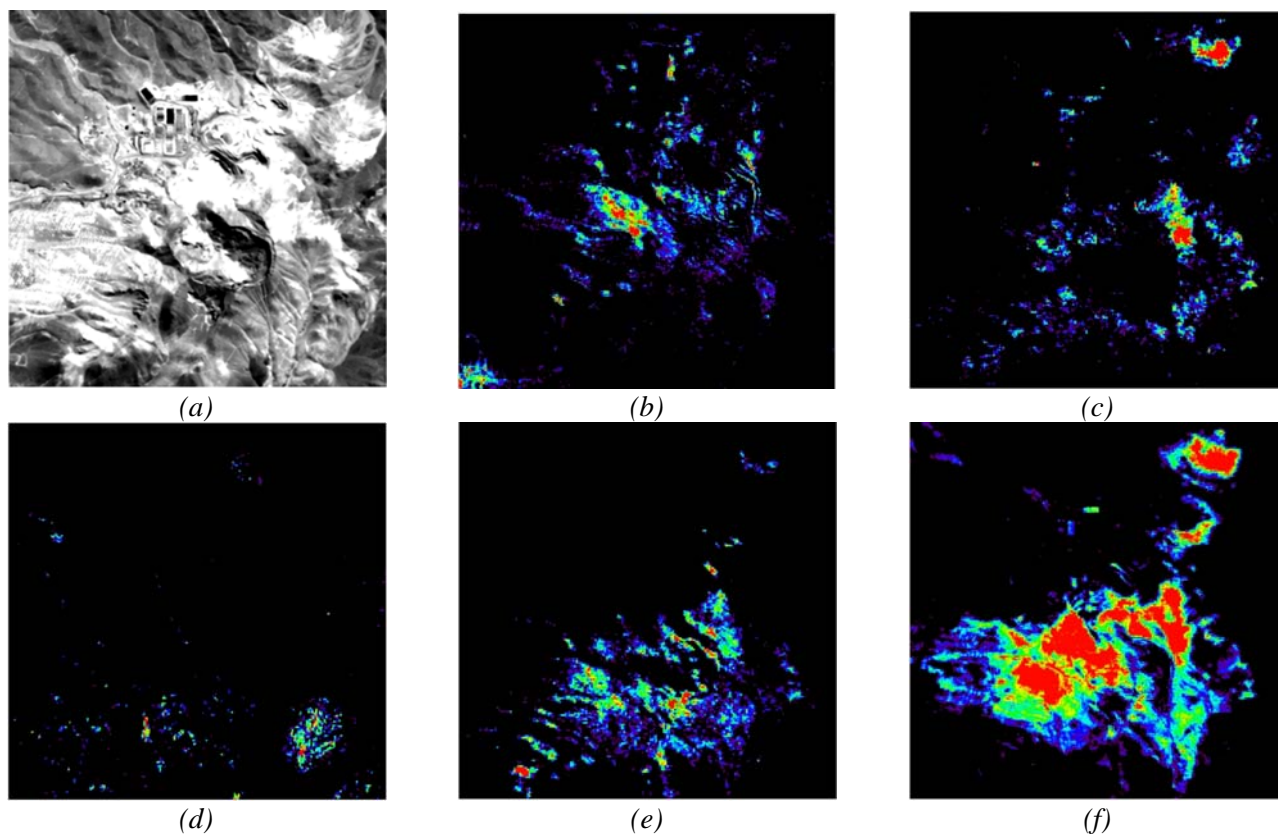


Figura 3. Imagens de abundância dos minerais de alteração da região do depósito de Cu-pórfiro de El Salvador: (a) vista geral da área do depósito por meio da banda 3 do sensor ASTER, (b) alunita, (c) illita, (d) caulinita, (e) caulinita + esmectita e (f) limonita

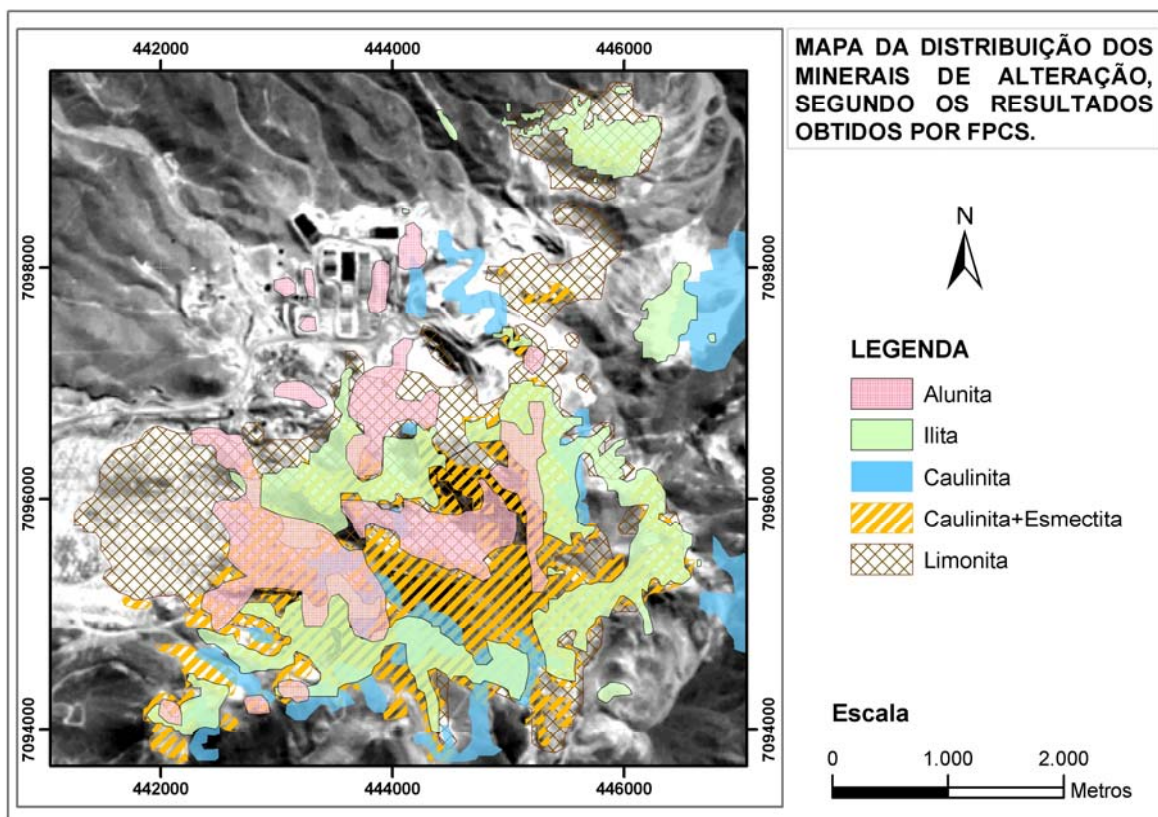


Figura 4. Resultado da distribuição dos minerais de alteração na imagem ASTER de El Salvador, segundo os resultados obtidos pela técnica FPCS, tendo como fundo a banda 3



CONCLUSÕES Com base nos resultados obtidos é possível afirmar que as análises feitas por espectroscopia de reflectância, a partir das amostras coletadas em campo, possuem significativa correlação com as informações espectrais alcançadas pelos dados do sensor ASTER. Essa correlação espacial é observada nos diversos mapas gerados como produtos finais, por distintas técnicas, os quais mostram a correspondência espacial de áreas de ocorrência dos principais minerais de alteração.

Os métodos de classificação espectral testados, aplicados às imagens ASTER, SAM e FPCS permitiram identificar o zoneamento da alteração hidrotermal associado a toda a área do depósito de Índio Muerto.

O presente trabalho avalia positivamente o uso do sensor ASTER para o mapeamento de zonas de alteração em situações de exposição favorável do substrato geológico (relativa ausência de vegetação). O fato de se ter obtido resultados bastante semelhantes com e sem o uso de espectros coletados em campo no distrito de El Salvador demonstra que o uso desse sensor, combinado com técnicas de processamento digital voltadas para a análise espectral das imagens, representa um passo importante para o avanço da exploração mineral por sensoriamento remoto em regiões do mundo ainda pouco conhecidas e desprovidas de informações geológicas.

Referências

- CLARK R.N., SWAYZE G.A., GALLAGHER A.J., KING T.V.V., CALVIN W.M. 1993. *The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1 (0.2 to 3.0µm)*. U.S. Geological Survey, Open File Report 93-592, 1326 pp.
- CORNEJO P., TOSDAL R.M., MPODOZIS C., TOMLINSON A.J., RIVERA O., FANNING C.M. 1997. El Salvador, Chile porphyry copper deposit revisited: geological and geochronologic framework. *International Geology Review*. **39**:22-54.
- CRÓSTA A.P. & MOORE J.M.C.M. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in Greenstone Belt terrain. In: *Proceedings of the Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*, Calgary, Alberta, Canada, p 1173-1187.
- CRÓSTA A.P., SOUZA FILHO C.R., AZEVEDO F. & BRODIE C., 2003, Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, **24**:4233-4240.
- GUSTAFSON L.B., ORQUERA W., MCWILLIAMS M., CASTRO M., ROJAS G., MALUENDA J. & MENDEZ M. 2001. Multiple centers of mineralization in the Indio Muerto District, El Salvador, Chile. *Economic Geology*. **96**(2):325-350.
- PONTUAL S., MERRY N.J., GAMSON P. 1997. *Practical Applications Handbook*, Vol. 1-4, GMEX spectral analysis guide for mineral exploration. Ausspec International Publications.
- SABINE C. 1999. Remote Sensing Strategies for Mineral Exploration. In: A.N. RENCZ (Ed.), *Remote Sensing for Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*. John Wiley and Sons, Inc., pp. 375-447
- WATANABE Y. & HEDENQUIST J.W. 2001. Mineralogic and Stable Isotope Zonation at the Surface over the El Salvador Porphyry Copper Deposit, Chile. *Economic Geology*. **96**:1775-1797.