

Integração e análise de imagens ASTER e Ikonos para identificação de sítios de exploração mineral com características de alterações hidrotermais

Paulo Roberto Alves dos Santos^{1,2}
José Carlos Sícoli Seoane¹
Manoel do Couto Fernandes¹

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ - Instituto de Geociências
Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Ilha do Fundão, Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ,
Brasil.

cainho@geologia.ufrj.br, manoel.fernandes@ufrj.br

² Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE
Av. República do Chile 500, 15º, Centro – Rio de Janeiro - RJ, Brasil.
paulo.alves@ibge.gov.br,

Abstract. Remote Sensing Technology comprises imaging and non-imaging sensors and is a valuable tool in mineral exploration contributing in the identification, mapping and evaluation of different types of mineral deposits. The current airborne and orbital sensors allow spectral signatures to identify the presence of minerals formed by hydrothermal alteration concomitant to deposition of metals such as gold, silver, copper and others. The current study aimed to generate a classification model that allows the identification of areas likely for mineral exploration of Copper (Cu) and Gold (Au) based on the application of Principal Components Analysis (PCA) techniques to the spectral bands of the multispectral ASTER sensor. The study was conducted in the Carajás Mineral Province (PMC), in Parauapebas, State of Pará, Brazilian Amazon, based on ground-truthing data obtained from publicly available literature on the Bacaba, Serra Verde, Alvo 118 deposits and more importantly on the Sossego copper mine, as guides to the proposed classification model.

Palavras-chave: remote sensing, hydrothermal alteration, ASTER, principal components analysis, sensoriamento remoto, alteração hidrotermal, ASTER, análise de principais componentes.

1. Introdução

O Sensoriamento Remoto agrega tecnologia de sensores imageadores e não imageadores, e é uma ferramenta de grande valia no auxílio da pesquisa mineral contribuindo para a identificação, mapeamento e avaliação de diferentes tipos de depósitos minerais. Os sensores orbitais e aerotransportados atuais permitem obter assinaturas espectrais que podem contribuir na identificação da presença de minerais formados por processos de alteração hidrotermal com deposição de metais como ouro, prata, cobre entre outros.

A integração de dados de sensoriamento remoto, geológicos e geofísicos, através de Sistema de Informações Geográficas (SIG) vem sendo cada vez mais utilizada nas pesquisas minerais, como uma técnica exploratória capaz de revelar informações até então não percebidas pelo exame isolado. Assim, os sistemas de informações geográficas (SIG) surgem como um conjunto de técnicas matemáticas e computacionais que possibilitam o tratamento da informação georreferenciada permitindo a modelagem de dados espaciais e análises complexas, subsidiando as tomadas de decisões.

O presente trabalho busca utilizar as pesquisas científicas publicadas sobre a Província Mineral de Carajás (PMC), sobretudo os trabalhos de Monteiro et al. (2008), que pesquisaram a alteração hidrotermal da mina de Sossego, Augusto et al. (2008), que descreveram a mineralização do alvo Bacaba, Reis e Villas (2002), descreveram a alteração hidrotermal de Serra Verde e Torresi (2009) que descreveu a alteração hidrotermal do alvo 118. Os resultados destas pesquisas foram extrapolados para a área de estudo (Figura 1),

possibilitando a modelagem do conjunto de minerais sinalizadores na biblioteca espectral do USGS.

Os minerais escolhidos como indicadores de áreas prováveis para prospecção de Cu e Au foram a Marialita, Actinolita, Epidoto, Clorita, Biotita e Albita. Cada um destes minerais teve sua curva espectral identificada na Biblioteca Espectral de Minerais do USGS as quais foram posteriormente reamostradas para o comprimento de onda das bandas do sensor ASTER, ou seja, nove bandas do SWIR e VNIR. Estas respostas espectrais possibilitaram determinar os seis conjuntos de quatro bandas cada, que melhor caracterizassem os minerais indicadores.

Os resultados apontam que o modelo de classificação aplicado identificou anomalias minerais reconhecidas no terreno, além das já conhecidas na área da pesquisa. Além disso, mostrou eficiência na identificação de áreas que já vêm sendo exploradas como garimpos, pois nestas áreas a movimentação de solo torna abundante em superfície a presença dos minerais indicadores, o que facilita muito o imageamento pelo sensor e conseqüentemente a classificação.

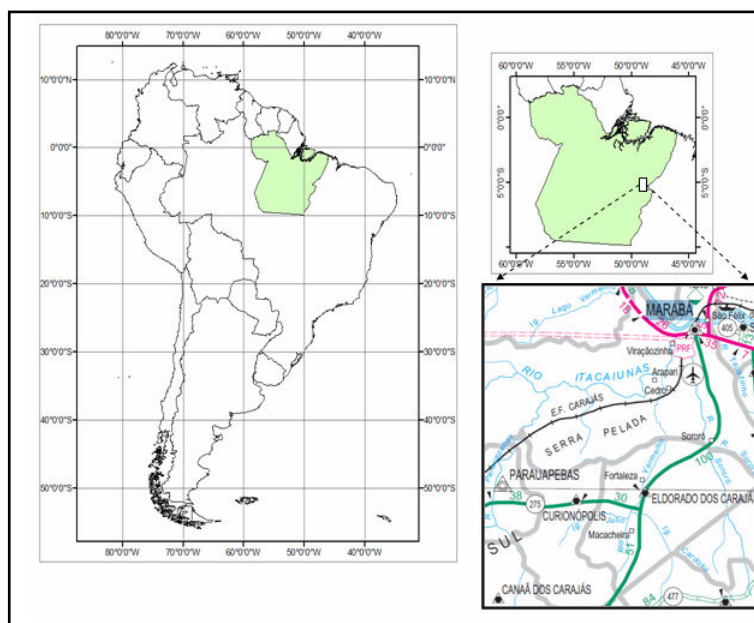


Figura 1: Área de estudo (fonte: adaptado do mapa rodoviário do Pará do DNIT).

2. Metodologia de Trabalho

Esta pesquisa foi desenvolvida tomando como base a bibliografia mencionada sobre os depósitos de Serra Verde, Bacaba, Alvo 118 e principalmente o zoneamento realizado na mina de Sossego por Monteiro et al. (2008) onde foi definida a característica das alterações hidrotermais da área conforme mostrado na Figura 2.

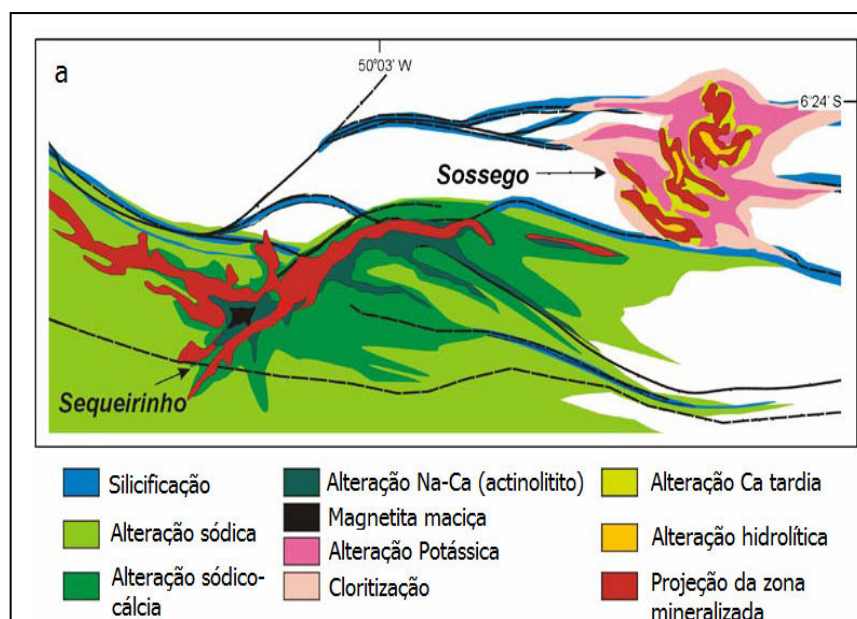


Figura 2 - Zoneamento das alterações hidrotermais da Mina de Sossego, segundo medições de espectroradiometria em amostras de afloramento. Fonte: Monteiro et al. (2008).

A imagem do sensor ASTER utilizada foi adquirida em 17/10/2007 com nível 1B, corrigida para geometria e radiometria. As bandas do SWIR (4, 5, 6, 7, 8, 9), originalmente com 30 metros de resolução espacial, foram reamostradas para a resolução das bandas do VNIR (1, 2, 3) ou seja 15 metros.

As imagens utilizadas na confecção do mosaico Ikonos foram adquiridas ao longo do ano de 2007, nas melhores condições atmosféricas possíveis. Foi utilizada a projeção Equi-Retangular Cilíndrica Normal (sistema de coordenadas geodésicas - latitude/longitude), datum WGS 84.

Os minerais escolhidos como sinalizadores no processo de identificação de áreas prováveis para prospecção de Cu e Au, foram escolhidos no zoneamento da Mina de Sossego, conforme a identificação de sua curva espectral na biblioteca do USGS (420 bandas) e a reamostragem para as bandas do sensor ASTER (9 bandas). Estes minerais são denominados sinalizadores: Marialita, uma Na-escapolita, e Albita (alteração sódica), Actinolita e Epidoto (alteração sódico-cálcica), Biotita (alteração potássica) e Clorita (cloritização). Embora os processos de intemperismo e laterização possam mascarar e mesmo modificar a mineralogia original, há evidências de que ao menos parte da mineralogia original esteja preservada em superfície (Monteiro et al. (2008) e observações efetuadas em campo).

Cada um destes minerais teve sua curva espectral identificada na biblioteca espectral de minerais do USGS (420 bandas) a qual foi posteriormente reamostradas para o comprimento de onda das bandas do sensor ASTER, ou seja nove bandas do SWIR e VNIR. Estas respostas espectrais possibilitaram determinar os seis conjuntos de quatro bandas cada, que melhor caracterizassem os minerais indicadores. Os conjuntos de bandas foram definidos como Marialita (bandas 3, 5, 6 e 7), Actinolita (bandas 2, 6, 8 e 9), Epidoto (bandas 2, 5, 8 e 9), Clorita (bandas 2, 4, 6 e 8), Biotita (bandas 4, 7, 8 e 9) e Albita (2, 4, 6 e 7) (Tabela. 1).

Posteriormente criou-se uma máscara sobre a imagem para neutralizar a influência dos pixels de nuvem e sombra no processamento. Após esta escolha, as bandas foram submetidas à Análise de Principais Componentes (APC), conforme descrita por Crósta (1992). A técnica Crósta et al. (1989), modificada por Loughlin (1991), entre outras vantagens, dispensa a necessidade de correção atmosférica para sensores multiespectrais (CRÓSTA et al., 2009).

Esta análise resultou em quatro novas bandas (bandas PC's) para cada conjunto de quatro bandas espectrais processados. A análise dos conjuntos de 4 bandas PC's para cada mineral foi feita visando identificar a que contém as informações espectrais relacionadas ao mineral específico, com base nas estatísticas fornecidas. Em geral são as bandas PC3 e PC4 que possuem mais informação sobre o mineral de interesse, embora esta última também inclua ruído (CRÓSTA et al., 2003). Esta informação normalmente representa, em termos quantitativos, uma fração muito pequena do total das informações contidas nas quatro bandas originais, entretanto tem grande importância para a extração seletiva da resposta espectral do mineral procurado.

Tabela 1: Conjunto de bandas utilizado na análise de principais componentes (APC) para gerar mapas de abundância mineral da região de Carajás.

Alteração mineral	Marialita	Actinolita	Epidoto	Clorita	Biotita	Albita
Bandas	3	2	2	2	4	2
ASTER	5	6	5	4	7	4
	6	8	8	6	8	6
	7	9	9	8	9	7

A partir das áreas identificadas como de provável presença dos minerais indicadores, foram delimitadas as anomalias com maiores indicativos da presença dos seis minerais classificados, que foram vetorizadas, delimitando os polígonos das anomalias da área.

Para a classificação das anomalias, considerou-se a presença simultânea dos seis minerais indicadores e a respectiva área, com limiar de 0,75 km². Após esta classificação foram selecionadas cerca de trinta anomalias que foram visitadas em campo, para verificação dos resultados da classificação e coleta de amostras, para posteriormente submetê-las às análises laboratoriais.

Os computadores de mão com GPS (Mio 550 B) e os Laptops foram carregados com os arquivos dos mapas geológicos, classificação das anomalias, estradas, imagens ASTER e Ikonos e pontos levantados em pesquisas anteriores. Estes dados possibilitaram que os deslocamentos no campo transcorressem sem imprevistos, já que toda navegação foi feita sobre as imagens da área e as anomalias selecionadas com o GPS navegador (Mio 550 B) e o topográfico (ProMark II), acoplados respectivamente aos computadores de mão e laptops.

O levantamento de campo foi feito no período de 4/8 à 14/8/2009, onde foram visitadas cerca de 30 anomalias selecionadas como prioritárias em função de sua classificação quanto ao número de minerais indicadores, bem como a possibilidade de acesso. Neste período percorreram-se aproximadamente 1400 km de estradas e caminhos na área da pesquisa abrangendo partes dos municípios de Marabá, Parauapebas, Canaã dos Carajás e Curionópolis, visando validar as informações obtidas da interpretação.

3. Resultados e Discussão

Após confrontar os dados da classificação baseada na Análise de Principais Componentes com o Zoneamento da Mina de Sossego, de Monteiro et al. (2008), foi possível extrapolar a classificação para toda a área pesquisada. Entretanto, para avaliar de modo mais rigoroso o método proposto, utilizou-se dados sobre as mineralizações conhecidas, tais como Serra Verde, Alvo 118, Cristalino e Alvo Bacaba para controlar os resultados encontrados.

Em uma área de aproximadamente 4000 km² foram identificadas cerca de 90 anomalias, classificadas de acordo com o grau de prioridade, sendo 18 de 1ª ordem, 48 de 2ª ordem e 24 de 3ª ordem de prioridade para investigação. Todas as principais ocorrências minerais conhecidas na área foram identificadas, e novas ocorrências foram confirmadas nos trabalhos iniciais de verificação de campo.

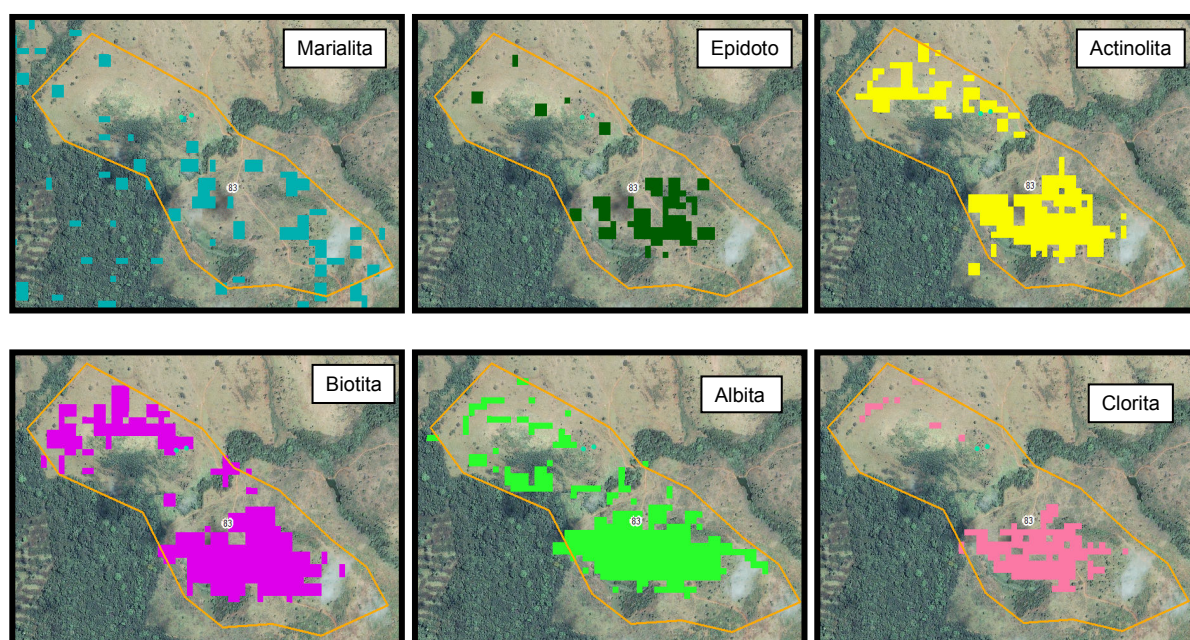


Figura 3: Anomalia 83 (Cristalino) com a classificação da Análise de Principais Componentes, para os minerais sinalizadores marialita, epidoto, actinolita, biotita, albita e clorita, sobre imagens Ikonos e o contorno da anomalia.

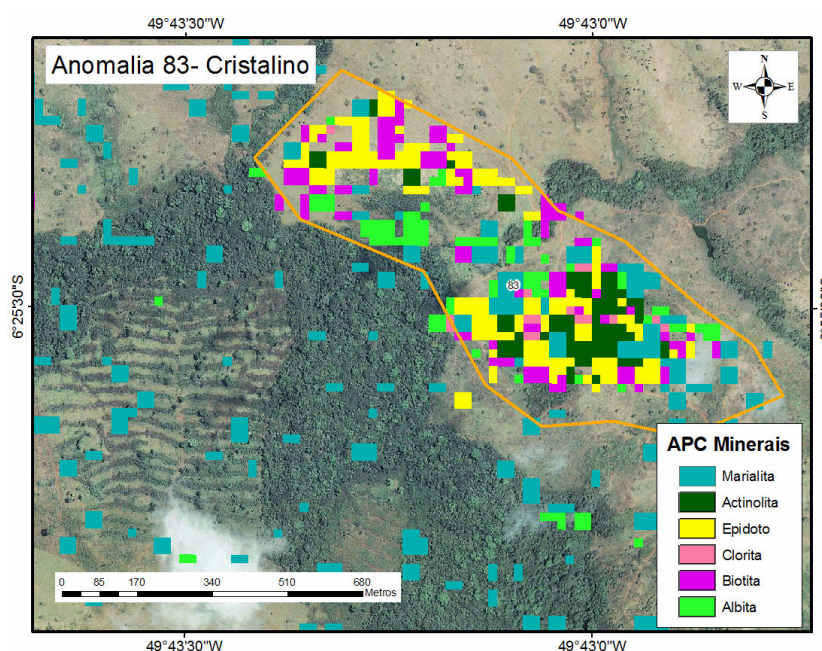


Figura 4: - Anomalia 83 (Cristalino) com a classificação da Análise de Principais Componentes sobre imagens Ikonos e o contorno da anomalia onde se pode notar a revegetação a sudoeste da anomalia indicando trincheiras ou outras obras de pesquisa mineral.

Embora esta pesquisa tenha como resultado inúmeras áreas indicativas da presença dos minerais pesquisados, inclusive com visita de campo e coleta de amostras em cerca de trinta delas. Neste trabalho mostra-se como resultado a anomalia 83, no cristalino, onde se pode observar o resultado da Análise de Principais Componentes (APC) para os minerais sinalizadores separadamente, sobre imagens Ikonos (Figura 3). Na figura 4, a concentração das classificações de APC dos minerais sinalizadores sobrepostas às imagens Ikonos

delineando de forma concisa a anomalia, onde constata-se a presença de trincheiras de estudos minerais à sudoeste da imagem. O que de certa forma serve como uma primeira validação.

Este trabalho é parte de um estudo mais amplo desenvolvido na Universidade federal do Rio de Janeiro (UFRJ) para tese de doutorado, sendo importante ressaltar que para conclusão desta pesquisa estão previstas ainda análises das curvas espectrais das amostras recolhidas em campo, com intuito de corroborar com as identificações visuais que foram feitas no campo. Também esta prevista a realização de análise petrográfica das amostras.

4. Conclusões

Os resultados alcançados mostraram-se bastante animadores, embora ainda estejamos processando dados de respostas espectrais das amostras obtidas em campo, que foram medidos no Laboratório de Espectroradiometria da Unicamp. Estes dados vão possibilitar a comparação entre as respostas da classificação de APC e as curvas espectrais das amostras. Da mesma forma está sendo realizada a petrografia para confirmação dos minerais observados na etapa de campo, assim como sua gênese e relação com as mineralizações.

De maneira geral os minerais identificados do centro para a borda da anomalia foram a Actinolita e Epidoto na porção central da anomalia (alteração sódico-cálcica); Clorita (cloritização), Biotita (potassificação) e Albita na porção intermediária e Marialita no halo mais externo (indicando alteração sódica), o que vem corroborar com os resultados previamente encontrados no zoneamento da Mina de Sossego.

A principal conclusão deste estudo é mostrar que é possível identificar alvos para pesquisa mineral a partir de dados bibliográficos e espaciais existentes, confirmando os trabalhos anteriores para outras localidades, diminuindo o tempo e o investimento necessários para descobertas que possam representar novos depósitos minerais.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da VALE pela cessão do mosaico de imagens Ikonos, e em especial aos geólogos Benevides Aires e José Antonio Garbellotto de Matteo pela visita à Mina de Sossego e ao Alvo 118. Ao IBGE pelo empréstimo dos computadores de mão com GPS Mio, e também a FAPERJ pelo auxílio financeiro concedido à pesquisa de campo, que possibilitaram a realização deste estudo.

Referências bibliográficas

- Augusto, R. A., Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Souza Filho, C. R.- Zonas de alteração hidrotermal e paragênese do minério de cobre do Alvo Bacaba, Província Mineral de Carajás (PA). **Revista Brasileira de Geociências**, n.32, p. 263-277, 2008.
- Crosta, A., P. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, Campinas-SP, 1992.
- Crosta, A., P., and Moore, J. Enhancement of landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrain. **International Journal of Remote Sensing**, 23, 4827-4852, 1989.
- Crosta, A., P., and Moore, J. Enhancement of landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrain. **International Journal of Remote Sensing**, 23, 4827-4852, 1989.
- Crosta, A.P., Ducarte, D.F, Souza Filho, C.R. Mineral exploration for epithermal gold in northern Patagonia, Argentina: from regional to deposit-scale prospecting using landsat TM and terra ASTER. **Remote Sensing and Spectral Geology. Reviews in Economic Geology**, vol. 16 (8): 97-108, 2009.
- Crosta, A.P., Souza Filho, C.R., Azevedo, F., and Brodie E, 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, no. 21, p. 4233-4240, 2003.

Loughlin, W.P, Principal component analysis for alteration mapping. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 57, p. 1163-1170, 1991.

Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Carvalho E.R., Hitzman m.W., Johnson C.A., Souza Filho C.R., Torresi, I. Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: Paragenesis and stable isotope constraints. *Mineralium Deposita*, 43:129-159, 2008. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-006-0121-3>.

Monteiro L.V.S., Xavier, R.P., Souza Filho, C.R., Augusto, R.A. Aplicação de isótopos estáveis ao estudo dos padrões de distribuição das zonas de alteração hidrotermal associados ao sistema de óxido de ferro-cobre-ouro Sossego, Província Mineral de Carajás. **In**: SBGq, Congr Bras. Geol., 8, Atibaia, CD-Rom, 2007.

Reis, F. N. e Villas R. N. Mineralização e alteração hidrotermal no depósito cupro-aurífero de Serra Verde, Província Mineral de Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, n.32, pgs. 69-86, 2002.

Torresi, I., Evolução química e isotópica dos fluidos associados à mineralização de Fe-Cu-Au do depósito Alvo 118, Província Mineral de Carajás (PA). Tese de Mestrado do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas, SP, 2009.