

Utilização de Dados Hiperspectrais do Sensor AVIRIS para Identificação da Feição Espectral da Ligação Magnésio-Hidroxila em Lateritos Niquelíferos

OSMAR ABÍLIO DE CARVALHO JR.¹
GUSTAVO MACEDO DE MELLO BAPTISTA¹
JOSÉ DA SILVA MADEIRA NETTO²
ÉDER DE SOUZA MARTINS^{1&2}
ANA PAULA FERREIRA DE CARVALHO¹
PAULO ROBERTO MENESES¹

¹IG/UnB-Instituto de Geociências da Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil
gustavom@cdsid.com.br; lsrnub@guarany.unb.br

²Embrapa/CPAC-Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados
Caixa Postal 08223, BR 020, km 18, Rodovia Brasília/Fortaleza, 73301-970, Planaltina, DF, Brasil
{madeira; eder}@cpac.embrapa.br

Abstract. Laterites containing nickel and occurring in the Votorantim mine in Niquelândia, GO, were sampled for mineral composition and reflectance spectra determinations in the laboratory. AVIRIS data of the sampled area, after atmospheric correction and reduction of radiance to scaled surface reflectance, were also used, with the objective of determining the spatial occurrences of this nickel bearing minerals. Besides ferric oxides, the lateritic material were rich in pimelite a clay mineral of the montmorillonite group presenting Mg-OH. In the reflectance spectra the Mg-OH bond is clearly identified by a sharp feature centered at 2300 nm regardless of the iron oxides occurrence. This feature could also be identified in the AVIRIS data. A simple arithmetic operation with two bands of the Mg-OH feature was useful in the determination of the occurrences of the pimelite rich laterites.

Keywords: Hyperspectral Remote Sensing, AVIRIS, Pimelite, Nickel deposit.

1 Introdução

O aprimoramento dos métodos prospectivos por intermédio de sensoriamento remoto óptico tem sido importante devido à maior rapidez, operacionalidade e cobertura total de vastas áreas a baixos custos. Nas últimas décadas, sua aplicabilidade para fins geológicos tem aumentado com a evolução do ramo da ciência que estuda a espectrorradiometria de reflectância. Apesar dos avanços obtidos nos estudos do comportamento espectral dos minerais, o sensor multiespectral apresenta limitações no que diz respeito à identificação mineralógica mais acurada. Os sensores hiperspectrais têm como objetivo preencher esta lacuna.

Até então, sucessos limitados foram obtidos com os sensores multiespectrais na identificação

de assembléias minerais. A resolução espectral limitada desse tipo de sensor restringe a identificação genérica de algumas espécies minerais (Vane & Goetz, 1993). Este fato conduziu ao desenvolvimento da espectrometria de imageamento, na qual as imagens são coletadas em bandas espectrais estreitas e contínuas, possibilitando a melhor caracterização do comportamento espectral dos alvos. Apesar da motivação inicial para o desenvolvimento da espectrometria de imageamento ter sido para a identificação mineral (Goetz *et al.* 1985), recentes experimentos também têm sido feitos na botânica (Peterson *et al.*, 1988, Wessman *et al.*, 1988), hidrologia (Carder *et al.*, 1993), oceanografia (Hamilton *et al.*, 1993; Nolin & Dozier, 1993) e ecologia (Gamon *et al.*, 1993; Rock *et al.*, 1988; Miller *et al.*, 1990) com bons resultados.

Com os sensores hiperespectrais a estratégia das técnicas de análise de dados muda devido ao grande volume de informação. A alta resolução espectral torna a informação de um dado pixel próxima à obtida por meio de medições espectrorradiométricas realizadas em laboratório e/ou campo (Abrams, 1986; Vane & Goetz, 1988; Kruse *et al.*, 1990). Mesmo com a riqueza de informações dos sensores hiperespectrais deve-se considerar que nas condições intertropicais a extração das informações das litologias e corpos de minério torna-se, em alguns casos, dificultada devido ao intenso processo intempérico das rochas e à eventual cobertura vegetal. Desta maneira, pouco se sabe ainda sobre o potencial de uso de dados hiperespectrais em atividades de mapeamento geológico e de prospecção mineral nessas áreas, o que compreende um amplo campo de pesquisa.

Em função do exposto o presente trabalho tem por objetivo caracterizar as feições espectrais advindas da ligação magnésio-hidroxila típica em lateritos niquelíferos, como subsídio para a identificação de garnieritas, que apresentam importância econômica devido aos elevados teores de níquel. Para tal adotaram-se os dados do sensor AVIRIS (Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer, JPL/NASA) de 16 de agosto de 1995, obtidos sobre o município de Niquelândia, Goiás (Fig. 1).

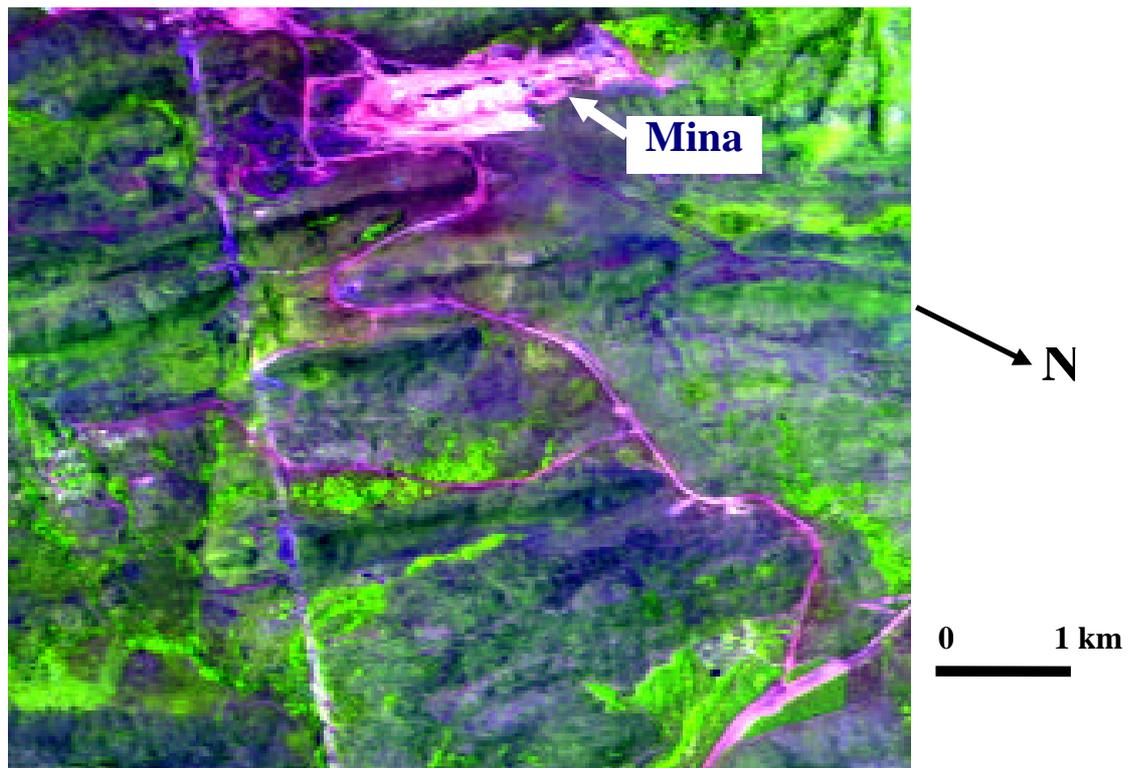


Figura 1 - Área de estudo. Composição colorida R (1212,4 nm) G (924,2 nm) B (657,9 nm)

2 Composição mineralógica das Garnieritas encontradas no município de Niquelândia

Garnieritas são silicatos básicos de níquel e magnésio com coloração predominante verde. Brindley et al. (1973) consideram as garnieritas como misturas de dois tipos distintos de silicatos: serpentina e talco-saponita. Apresentam gênese associada a alterações meteóricas de rochas peridotíticas.

Adotaram-se neste trabalho três amostras de garnierita, coletadas na área da mina do grupo Votorantim, em Niquelândia, Goiás, sendo uma representativa do minério esverdeada (GM1) e duas não mineralizadas de colorações verde (GE1) e verde esbranquiçada (GE2). Para a análise mineralógica das amostras supracitadas, adotou-se o procedimento de difratometria de raios-X, utilizando-se o método do pó, entre 2 e 70° 2θ, com passo de varredura de 0,5° 2θ, usando um aparato de tubo de cobre e filtro de níquel, num difratômetro da marca Shimadzu, modelo XD - 610.

A amostra mineralizada, GM1 é constituída predominantemente por pimelita - $(\text{Ni, Mg})_3 \text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ - que é um silicato básico hidratado de níquel e magnésio do grupo da montmorilonita. Como traço estão presentes o talco (silicato básico de magnésio - $\text{Mg}_3 \text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH})_2$) e a tosudita (mineral interestratificado de clorita e esmectita). Para GE1, amostra não mineralizada verde, verificou-se a mesma constituição mineralógica de amostra mineralizada GM1, no entanto com menor conteúdo de níquel presente na esmectita. A amostra não mineralizada verde esbranquiçada, GE2, apresenta em sua constituição mineralógica serpentina como mineral predominante e quartzo, pimelita e talco, sendo este último de menor proporção. A

presença de coloração verde esbranquiçada é devida ao teor elevado de serpentina encontrada nesta amostra.

3 Reflectância bi-direcional das Garnieritas

Para a determinação dos espectros de reflectância bi-direcional das garnieritas utilizou-se um espectrorradiômetro da marca GER (Geophysical & Environmental Research Corp.), modelo MARK V. Este instrumento opera na faixa espectral de 300 a 2500 nm, com larguras de bandas de 2 nm no intervalo de 300 a 1000 nm e de 4 nm, entre 1000 a 2500 nm.

Após a obtenção dos espectros para as três amostras de garnieritas descritas no item anterior, realizou-se o cálculo da derivada segunda para determinar exatamente os pontos de inflexões das feições espectrais, tanto ocasionadas por transições eletrônicas como por vibrações moleculares, conforme a Figura 2. O algoritmo utilizado para o cálculo da derivada segunda foi proposto por Savitzky e Golay (1964) e implementado em linguagem FORTRAN.

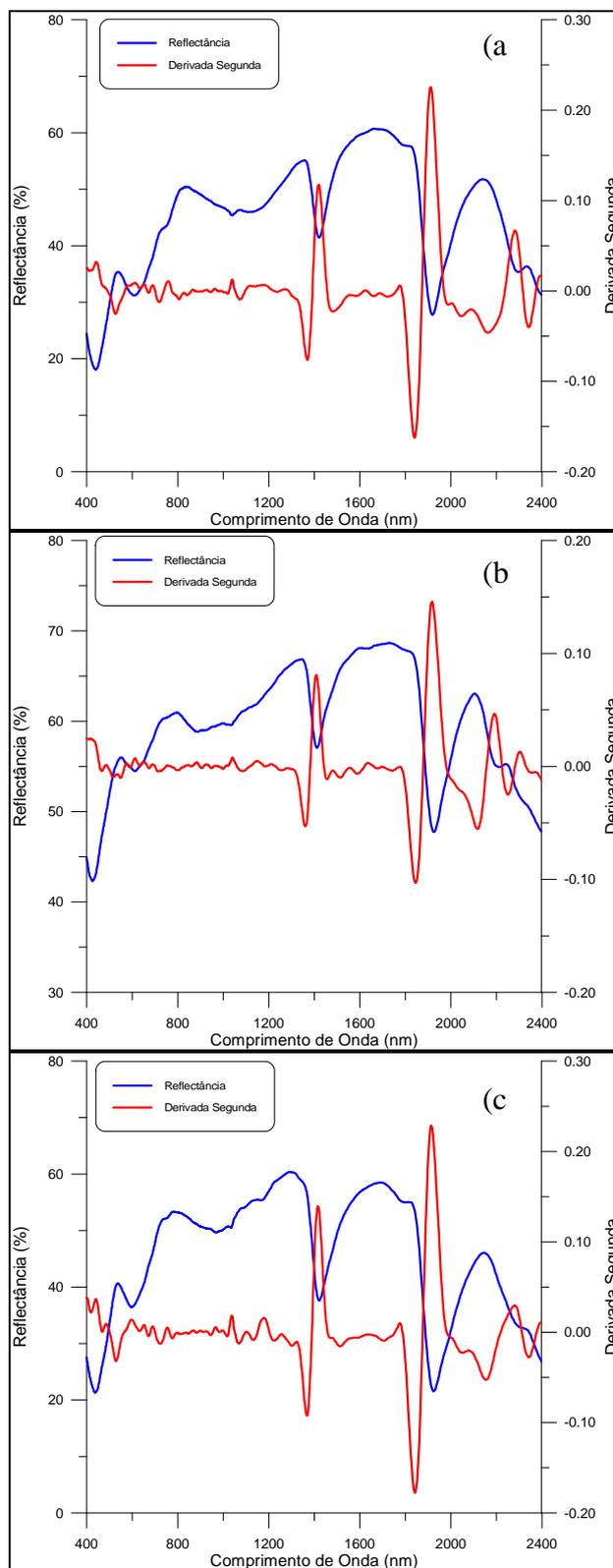


Figura 2 - Espectros de reflectância bi-direcional (azul) e derivada segunda dos espectros (vermelho) identificando os pontos de inflexão, das amostras de garnierita GM1 (a), GE2 (b) e GE1(c).

Faye (1974) e Maquet et al. (1981) descrevem as feições espectrais decorrentes da presença de níquel em garnieritas, na faixa do visível e infravermelho próximo, de acordo com as seguintes transições eletrônicas do íon Ni^{2+} : ${}^3\text{A}_2 \rightarrow {}^3\text{T}_1$ (P) em 390 nm; ${}^3\text{A}_2 \rightarrow {}^3\text{T}_1$ (F) em 660 nm; ${}^3\text{A}_2 \rightarrow {}^3\text{T}_2$ (F) em 1100 nm.

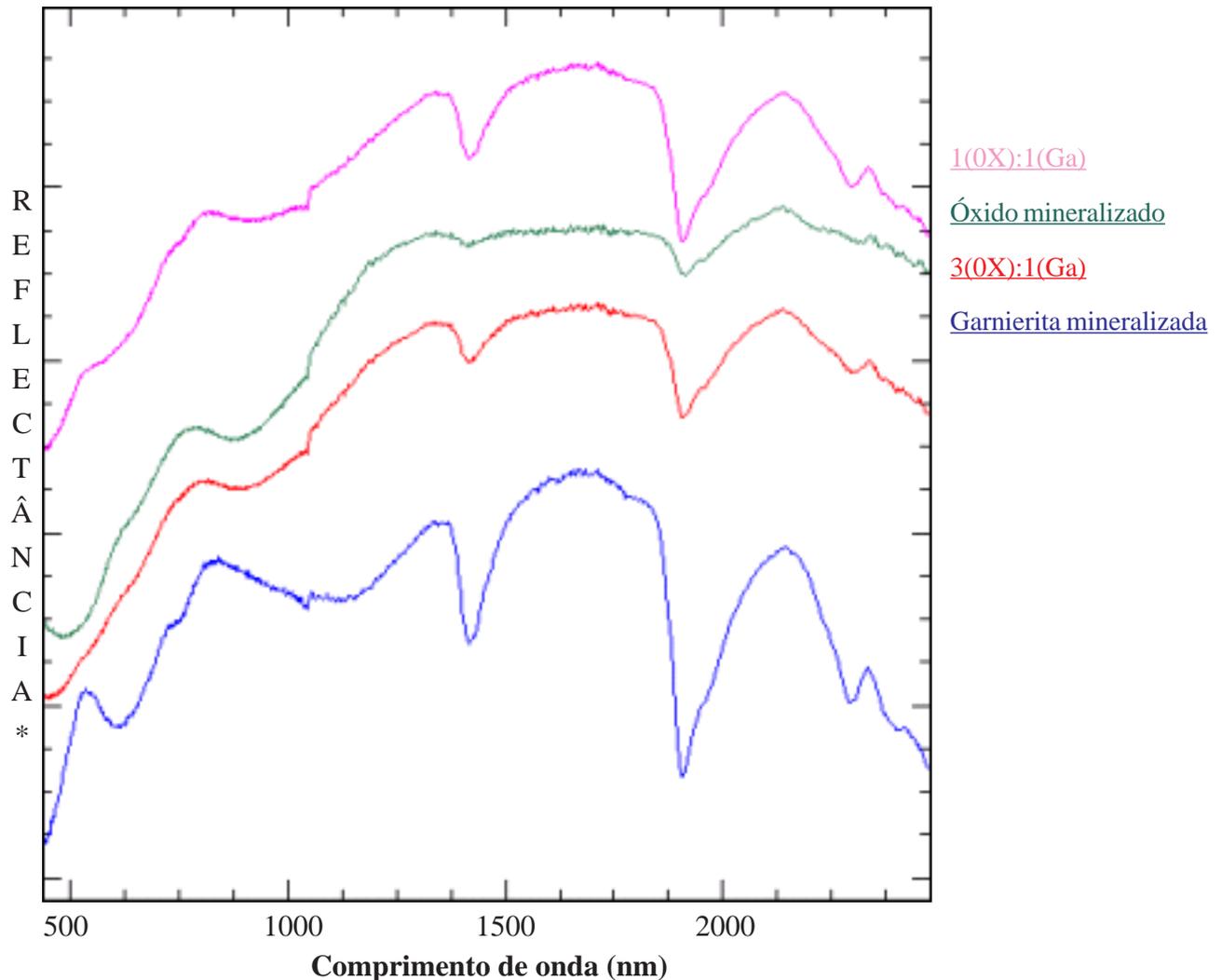
Na análise da derivada segunda dos espectros obtidos em laboratório, chegou-se à conclusão que as garnieritas de Niquelândia analisadas, apresentam feições espectrais em 444, 613, 1116, 2295 nm, além das bandas de absorção ocasionadas pela presença de água na estrutura mineral a 1400 e 1900 nm. Convém ressaltar que a feição existente à 444 nm não pode ser adotada tendo em vista que nesta faixa do espectro os radiômetros desta marca apresentam problemas de calibração que geram feições côncavas do ultravioleta até 450 nm, no visível (Baptista et al. 1998a).

Um outro aspecto importante na análise dos espectros é a presença da banda de absorção situada a 2295 nm, região do espectro na qual as feições são atribuídas ao movimento vibracional da hidroxila, neste caso ligada ao magnésio. Hunt et al. (1971) apresentam esta feição quando descrevem o comportamento espectral da brucita que é um hidróxido de magnésio.

4 Identificação da feição espectral da ligação Mg-OH

Conforme foi salientado, a presença da ligação Mg-OH presente nas garnieritas niquelíferas (pimelita) ocorre em 2300 nm aproximadamente. A identificação de feições atribuídas ao níquel na região do visível é possível nos espectros obtidos em laboratório, porém, nos dados hiperespectrais essa informação não se encontra definida. A explicação para este fato pode ser em função da incorporação de óxidos de ferro na superfície devido à movimentação de solo pela atividade mineradora. Essa hipótese é bastante viável pois, como pode ser vista na Figura 3, a mistura da garnierita e minério oxidado com presença de ferro, mesmo na proporção 1:1, o pico de reflectância em 529 nm, que representa a cor verde do níquel é fortemente obliterado pelas feições do Fe^{3+} . Esses espectros foram obtidos por meio do módulo *spectral math* do ENVI®, manipulando matematicamente os espectros dos dois materiais.

MISTURA DE MATERIAIS



* Deslocamento vertical da curva de reflectância para melhor visualização

Figura 3 - Espectros resultantes de misturas de garnieritas e de minério oxidado em diferentes proporções apresentando a obliteração do pico de reflectância a 529 nm.

Devido à interferência ocasionada pelo Fe^{3+} , a feição mais representativa para identificação das garnieritas niquelíferas passa a ser a relativa à ligação Mg-OH em 2300 nm aproximadamente. Convém ressaltar que essa banda de absorção ocorre tanto nos espectros obtidos em laboratório como nos advindos dos dados do AVIRIS, conforme pode ser visualizado na figura 4.

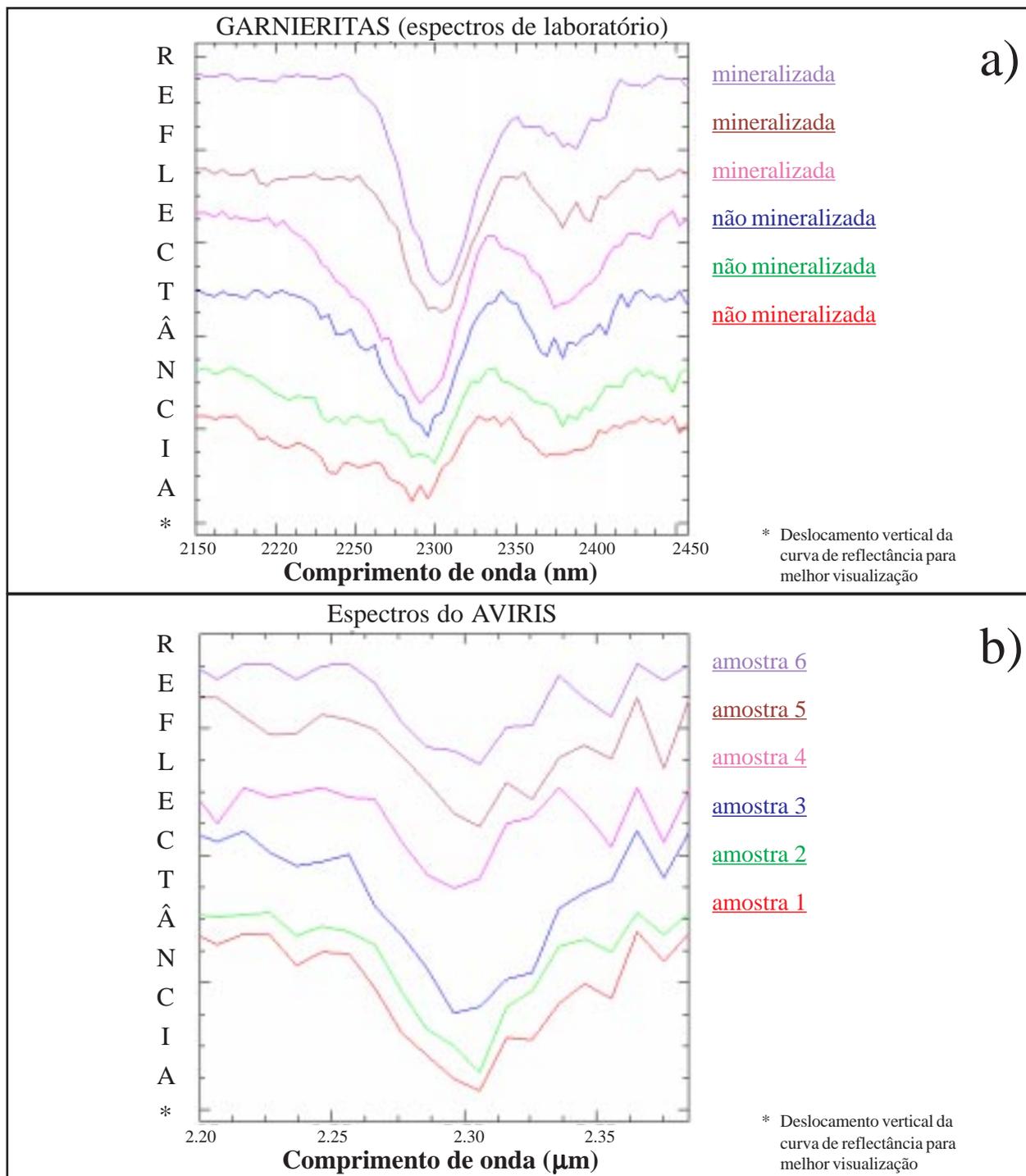


Figura 4 - Espectros obtidos em laboratório (a) e pelo AVIRIS (b) mostrando a feição espectral da ligação Mg-OH nas garnieritas.

Devido à coerência entre os espectros obtidos em laboratório e nos dados do AVIRIS, essa feição e sua intensidade de absorção foram utilizadas para a espacialização de prováveis locais de garnierita.

5 Identificação da ligação Mg-OH nos dados AVIRIS

A determinação espacial da feição magnésio - hidroxila, em 2300 nm, foi realizada por meio da adoção de pontos de máxima e mínima reflectâncias, como propõem Madeira Netto et al. (1995), conforme pode ser visualizado na Figura 5.

Madeira Netto et al. (1995) determinaram os conteúdos de caulinita e gibbsita em função das intensidades de absorção das feições nos espectros desses minerais e propuseram um índice proporcional a relação molecular sílica-alumina (K_i) de solos tropicais. Baptista et al. (1998b) espacializaram este índice utilizando os dados do AVIRIS para o município de São João D'Aliança, Goiás.

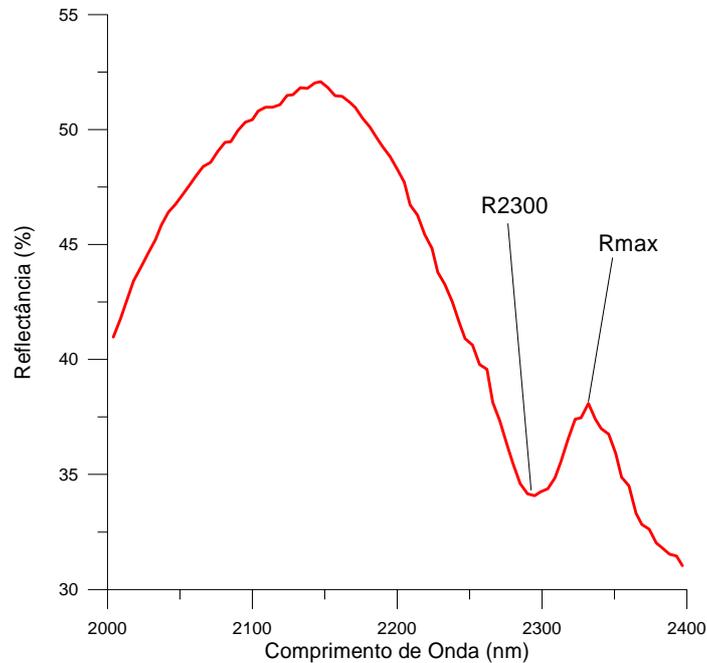


Figura 5 - Espectro apresentando os pontos de mínima e máxima reflectâncias utilizados para a determinação da intensidade da feição

Para determinação da intensidade da feição adotou-se um procedimento de subtração do valor de reflectância no ponto de mínima pelo o valor no de máxima, conforme a expressão $I(Mg - OH) = R_{max} - R_{2300}$.

Esse modelo foi aplicado nos dados do AVIRIS, buscando-se no resultado, os maiores valores, ou seja, os pontos que realmente apresentam a ligação Mg-OH, indício da presença de garnierita níquelífera. O resultado foi agrupado em duas classes: presença e ausência da feição, baseando-se na análise dos resultados da modelagem com os espectros obtidos pelo sensor e com dados de campo, conforme pode ser observado na figura 6.

Espacialização da Feição Espectral Mg - OH

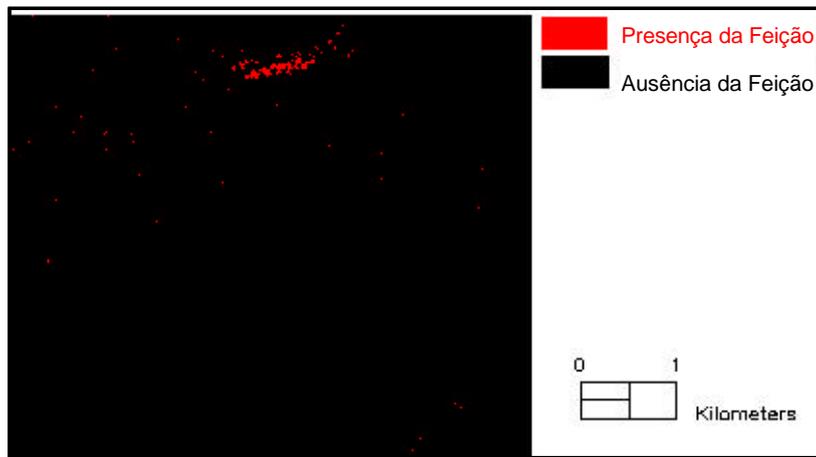


Figura 6 - Espacialização da ligação Mg-OH

Na área da mina, onde apresenta-se a maior quantidade de pixels relativos à presença da feição é justamente o local de presença significativa de garnieritas, conforme pode ser constatado *in loco*, durante a realização da etapa de campo.

6 Conclusão

O presente trabalho mostrou a viabilidade da utilização de sensoriamento remoto hiperespectral para a compreensão da disposição espacial dos componentes minerais. No entanto salienta-se que em regiões tropicais observa-se uma forte influência de processos intempéricos que obliteram as feições dos materiais, principalmente na faixa do visível pela presença de ferro.

A partir do conhecimento do espectro eletromagnético ótico pôde-se determinar a faixa do infravermelho de ondas curtas como a de menor alteração das feições de interesse da garnierita (pimelita). Adotou-se a feição relativa à ligação Mg-OH como melhor identificador possível do alvo e por meio da determinação matemática de sua identidade pôde-se espacializar as áreas mais prováveis de ocorrência do minério. A etapa de campo comprovou a eficiência do método desenvolvido.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Moacir Godoy Júnior e Cristina P. Bicho pelo apoio na etapa de pré-processamento dos dados hiperespectrais.

Referências

- Abrams, M. G. Imaging Spectrometry: Aircraft and Space Program. Proceedings of International Goscience and Remote Sensing Symposium, Zurich, ESA, v.1, 1986, pp.231-234.
- Baptista, G.M.M.; Madeira Netto, J.S.; Meneses, P.R. Determinação da Relação Sílica - Alumina a partir dos Dados do Sensor AVIRIS (JPL/NASA), para Discretização Espacial do Grau de Intemperismo de Solos Tropicais. IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. (submetido), 1998b,

- Baptista, G.M.M; Martins, E.S.; Madeira Netto, J.S.; Carvalho Jr., O.A.; Meneses, P.R. Use of AVIRIS Data for Mineralogical Mapping in Tropical Soils, in the District of São João D'Aliança, Goiás. Proceedings of the Seventh Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, JPL Publications (no prelo), 1998a,.
- Brindley, G. W.; Pham T.H. The nature of garnierites: I. Structure chemical composition and color characteristics. *Clays and Clays Mineral* 21:17-40, 1973.
- Carder, K. L.; Reinersman, P.; Chen, R. F.; Muller-Karger, F., Davis, C. O.; Hamilton, M. AVIRIS calibration and application in coastal oceanic environments, *Remote Sens. Environ.* 44:205-216, 1993.
- Faye, G.M. Optical absorption spectrum of Ni²⁺ in garnierite, a discussion. *Canad. Mineralogist* 12:889-893, 1974.
- Gamon, J. A., Field, C. B., Roberts, D. A., Ustin, S. L. & Valentini, R. Functional pattern in a annual grassland during a AVIRIS overflight, *Remote Sens. Environ.* 44:239-253, 1993.
- Goetz, A., F. H., Vane, G., Solomon, J. E. & Rock, B. N. Imaging spectrometry for earth remote sensing, *Science* 228:1147-1153, 1985.
- Hamilton, M. K.; Davis, C. O.; Rhea, W. J.; Pilorz, S. H. & Carder, K. L. Estimating chlorophyll content and bathymetry of Lake Tahoe using AVIRIS data, *Remote Sens. Environ.* 44:217-230, 1993.
- Hunt, G.R.; Salisbury, J.W.; Lenhoff, C.J. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. III. Oxides and hydroxides. *Mod. Geology*, 3: 195-205, 1971.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B. & Diez, J. B. Expert system – based mineral mapping in Northern Death Valley, California/Nevada, using the Airborne/ Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing of Environment*, 44(2/3):309-336, 1993.
- Madeira Netto, J. S.; Bédidi, A.; Cervelle, B.; Flay, N.. Spectral (MIR) Determination of Kaolinite and Gibbsite Contents in Lateritic Soils, *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 321, série II a, pp. 119-128, 1995.
- Maquet, M.; Cervelle, B.D; Gouet, G. Signatures of Ni²⁺ and Fe³⁺ in the optical spectra of limonitic ore from New Caledonia: Application to the determination of the nickel content. *Mineralium Deposita* 16:357-373, 1981.
- Nolin, A. W. & Dozier, J. Estimating snow grain size using AVIRIS data, *Remote Sens. Environ.* 44:231-238, 1993.
- Peterson, D. L.; Aber, J. D. & Matson, P. A. Remote Sensing of forest canopy and leaf biochemical content, *Remote Sens. Environ.* 24:85-108, 1988.
- Rock, B. N., Hozhizaki, T., & Miller, J. R. Comparison of *in situ* and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline, *Remote Sens. Environ.* 24:109-128, 1988.
- Savitzky, A. & Golay, M.J.E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, *Analytical Chemistry*, Vol. 36 n°.8 1627-1639, 1964.

Vane G. & Goetz, A., F. H. Terrestrial Imageing Spectrometry, Remote Sens. Rem. 24:1-29, 1988.

Vane, G. & Goetz, A., F. H. Terrestrial Imageing Spectrometry: Current Status, Future Trends, Remote Sens. Rem. 44:117-126, 1993.

Wessman, C. A.; Aber, J. D.; Peterson, D. L. & Melillo, J. M. Remote sensing of canopy chemistry and nitrogen cycling in temperate forest ecosystems, Nature 335:154-156, 1988.