

Caracterização espectral do depósito de fosfato de Araxá (MG)

Joyce Rodrigues da Cruz¹
Carlos Roberto de Souza Filho¹
Maísa Bastos Abram²
Rogério Marcon¹

¹Instituto de Geociências - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Caixa Postal 6152 - 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
joyce.cruz,beto@ige.unicamp.br, , ¹rmarcon@mpcnet.com.br

²Divisão de Avaliação de Recursos Minerais, CPRM - Serviço Geológico do Brasil
maisa@sa.cprm.gov.br

Abstract. This objective of this study is twofold. Firstly, we aim to spectrally characterize the Araxá phosphate deposit (located in the Minas Gerais State) on the basis of laboratory-based visible and infrared reflectance spectroscopy, supported by X-ray diffraction (XRD) data. Secondly, we seek to re-sample these spectral data to the equivalent spectral response functions of the ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) sensor in order to establish criteria to foresee key spectro-mineralogical associations that could be detected by such optical remote sensing data. Soil and rock samples representative of the deposit were measured with the FieldSpec-3 Hi-Res instrument, a portable high-resolution spectrometer in the region of the short wave infrared (SWIR) with 8.5 nm resolution in the range of 1000-1800 nm and 6.5 nm resolution in the range 1800-2500 nm. Redundant samples were analyzed by X-ray diffraction (XRD). The spectra derived from these measurements were classified according to their mineral content (qualitative and semi-quantitative) and assessed based on the results of XRD analysis. From this reasoning, a spectral library for the Araxá deposit was conceived. The re-sampling of spectra from this library to ASTER's spectral resolution revealed that key associations can be potentially mapped by this sensor – a notion that can be applied to the Araxá and for the regional prospection of similar deposits.

Palavras-chave: phosphate, Araxá, reflectance spectroscopy, ASTER sensor, remote sensing, fosfato, Araxá, espectroscopia de reflectância, sensor ASTER, sensoriamento remoto.

1. Introdução

O depósito de fosfato de Araxá (alvo deste estudo) está localizado no município homônimo, no sudoeste do estado de Minas Gerais, na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Parnaíba (Figura 1). Este depósito está inserido no Complexo Carbonatítico do Barreiro (CCB), constituído por rochas ultramáficas metassomatizadas, cortadas por carbonatitos (Torres, 1996), com enriquecimento residual de fosfato e espesso manto de intemperismo. O Complexo possui estrutura dômica, de formato semi-circular e tem aproximadamente 4,5 Km de diâmetro.

Segundo Issa Filho (1984), o CCB é formado por flogopititos cortados por 'necks', 'plugs', veios carbonatíticos, veios e diques de apatitito, nelsonito e magnetitito, além de veios tardios de barita e silexito. O pirocloro e apatita correspondem aos minerais de interesse econômico (Schnellrath *et al.* 2002).

O Brasil é atualmente o maior produtor de fosfato da América do Sul e está entre os 10 principais produtores do mundo (Anuário Mineral do DNPM, 2008). Essa posição de destaque é devida principalmente a produção oriunda dos depósitos magmáticos associados a complexos alcalinos/carbonatíticos, como o de Araxá.

O fosfato é utilizado como um importante insumo agrícola. A produção brasileira, entretanto, ainda não satisfaz a demanda interna, visto a vasta produção agrícola do país. Dessa forma, o Brasil é obrigado a importar uma quantidade significativa de fertilizante fosfático, o que gera uma indesejável vulnerabilidade para a agricultura brasileira.

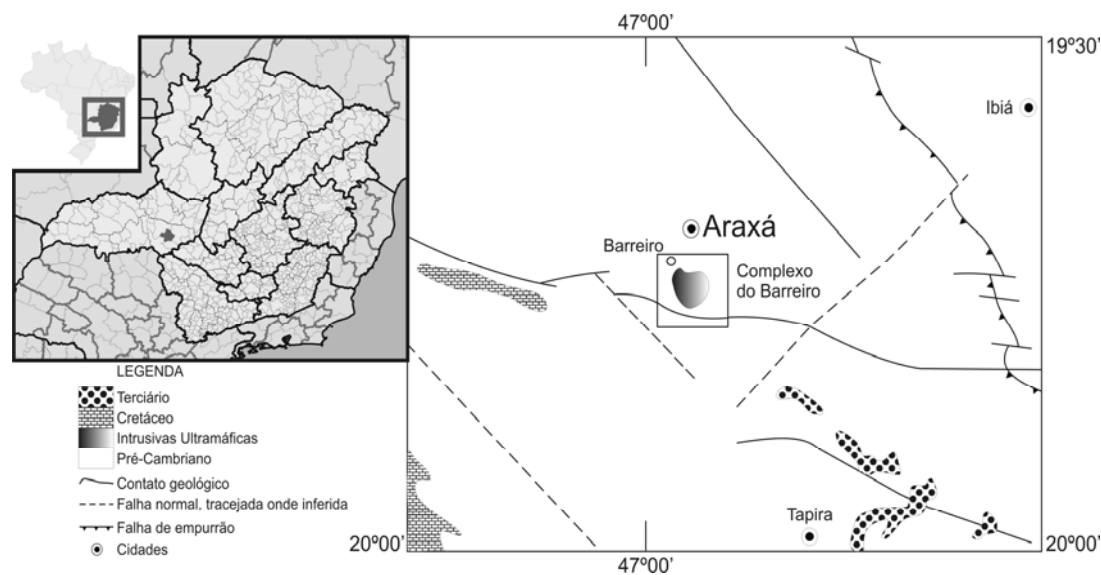


Figura 1. Localização da área de estudo

Neste cenário, considerando-se o depósito de minério fosfático de Araxá como área-tipo, a existência potencial de proto-minérios apatíticos na região (Torres *et al.* 2009) e a possibilidade de uso de dados e técnicas de sensoriamento remoto para a vetorização de metalotectos associados a esse tipo de mineralização, esse trabalho tem como objetivo caracterizar a assinatura espectral do depósito de fosfato de Araxá, tendo como base dados espectrais de laboratório, dados de difratometria de Raio-X (DRX) e dados do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) (Abrams & Hook, 2002). O trabalho está compreendido e é apoiado por um projeto mais amplo, denominado “Projeto Fosfato Brasil”, coordenado pela Companhia de Pesquisa e Recursos Naturais (CPRM)/Serviço Geológico do Brasil (SGB).

O trabalho foi desenvolvido com base no reconhecimento de assinaturas geológicas e espectrais da mineralização e rochas adjacentes, visando a avaliação de critérios espectrais para definição de alvos potenciais com assinaturas semelhantes.

2. Métodos

A caracterização espectral do depósito de fosfato de Araxá compreendeu o uso de um conjunto de dados, instrumentos analíticos e ferramentas computacionais, entre as quais estão incluídas as seguintes:

- amostras de solo e rocha da área do depósito fosfático;
- dados de Difratometria de Raios-X (DRX), obtidos pelo método pó. As análises foram feitas com base num difratômetro Philips PW1050, com geometria Bragg-Brentano vertical, e num difratômetro X’Pert Philips MRD, com geometria Bragg-Brentano horizontal, ambos operando com tubos de Cobre ($\lambda=1,54\text{Å}$). As análises qualitativas foram feitas utilizando-se o banco de dados mineralógicos do programa X’Pert Highscore v1.0b.
- espectrorradiômetro *FieldSpec-3 High Resolution* (da *Analytical Spectral Devices* – ASD), pertencente ao Laboratório de Espectroscopia de Reflectância (LER), do Instituto de Geociências da Unicamp;
- imagens digitais do sensor ASTER

A espectroscopia de reflectância é uma técnica analítica que tem a função de medir, em diferentes comprimentos de onda, a REM refletida da superfície dos objetos e representá-la na forma de um gráfico, denominado curva de reflectância espectral (reflectância vs comprimento de onda). Essa técnica proporciona uma medida quantitativa da reflectância espectral do material, resultado da razão entre a quantidade de energia refletida (radiância) e a

quantidade de energia incidente (irradiância) em uma amostra, a partir da qual é possível estabelecer-se os tipos e proporções de seus constituintes mineralógicos (Clark 1999).

O comportamento espectral de um determinado alvo é diretamente relacionado às suas características físico-químicas (Hunt 1980) e pode ser definido como a medida de reflectância do material. Esta medida de reflectância é representada por feições na forma de linhas, bandas, depressões ou mudanças de inclinação das curvas espectrais, cujas posições, formas e intensidade são uma consequência da constituição química do material e da geometria do arranjo de seus átomos (Hunt 1980). Apesar da principal faixa de detecção dos materiais não-metálicos encontrar-se no infravermelho, os detectores atuam na região do ultra violeta próximo (NUV) ao infra vermelho de onda curtas (SWIR). A análise é realizada através de uma varredura contínua compreendendo a região do espectro correspondente ao intervalo 0.35-2.50 μm , sendo subdividida em: NUV-ultra violeta próximo (0.35-0.40 μm), VNIR-visível e infra vermelho próximo (0.40-1.30 μm) e SWIR-infra vermelho de ondas curtas (1.30-2.50 μm). As feições espectrais são produzidas nessas faixas como consequência de transições eletrônicas (atômica) e de transições vibracionais (molecular) (e.g., Menezes & Netto 2001). As transições eletrônicas controlam as feições no VNIR (0.35-1.30 μm) e as transições vibracionais no SWIR (1.30-2.50 μm). Minerais contendo moléculas de Fe, OH, H₂O, SO₄, CO₃ em sua composição apresentam feições espectrais na região entre 0.40-2.50 μm , resultado das duas transições (Hunt, 1980).

2.1 Geologia da Área

O Complexo Carbonatítico do Barreiro (CCB), encontra-se intrudido em quartzitos e xistos do Grupo Araxá, possui forma estrutura dômica, aproximadamente circular, com cerca de 4,5 km de diâmetro (Figura 2). O CCB é formado por uma seqüência de eventos intrusivos divididos em dois ciclos principais. A primeira fase culminou com o posicionamento de rochas ultramáficas (piroxenitos e peridotitos) nos metassedimentos proterozóicos. A segunda fase ocorreu ao longo de um ciclo intrusivo acompanhado de alteração metassomática, causada por fluídos ricos em álcalis gerados a partir de um magma carbonatítico originalmente alcalino (Silva *et al.* 1979).

Segundo Torres (2006), na área da lavra da mina de Araxá são descritas as seguintes unidades litológicas: wherlitos (constituídos essencialmente por olivina e piroxênio; geralmente mostra-se alterado por eventos metassomáticos tardios), bebedouritos (constituídos por diopsídio, flogopita, magnetita, apatita e perovskita; representa uma porção parcialmente preservada do processo de intensa flogopitização das rochas ultramáficas do complexo), flogopitito (formado por flogopita, carbonato, olivina, magnetita e apatita; foi gerado à partir das transformações metassomáticas tardias a que foram submetidos os wherlitos e bebedouritos), carbonatito (intrudido nas unidades silicatadas máficas-ultramáficas; são constituídos essencialmente por calcita com dolomita subordinada, além de cristais de apatita) e foscorito (formados basicamente por apatita, magnetita e um silicato magnésiano, geralmente flogopita, olivina e piroxênio; corta tanto o carbonatito quanto as rochas ultramáficas) (Figura 2).

As principais mineralizações encontradas no CCB são nióbio na porção central, fosfato na porção nordeste, urânio e ETR na porção norte. Tais depósitos estão associados a materiais em processo de alteração, sendo concentrados por processo de enriquecimento supergênico (Torres, 2009 *apud* Grossi Sad e Torres, 1976). São encontradas rochas extremamente intemperizadas, que formam coberturas lateríticas que podem atingir até 230m de espessura. A jazida de fosfato de Araxá, foco desse estudo, ocorre nesse contexto. Seu minério é do tipo apatítico e classificado como oxidado, cimentado/bitolado, silicatado e sílico-carbonatado, com base nos teores de P₂O₅ total e P₂O₅ apatítico, CaO, MgO e a relação CaO/P₂O₅.

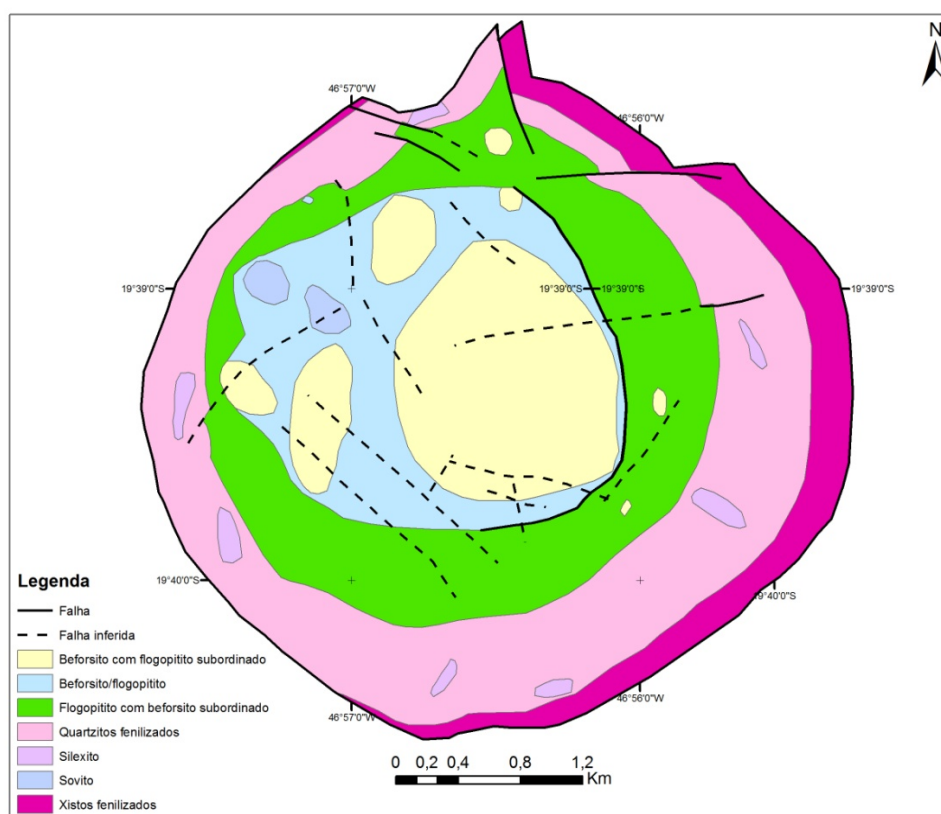


Figura 2: Mapa Geológico do Complexo Carbonatítico do Barreiro (Adaptado de Silva *et al.* 1979)

3. Resultados e Discussões

Neste trabalho, análises de Difractometria de Raios X foram realizadas para subsidiar os estudos petrográficos e espectrorradiométricos (Figuras 3a e 4a), auxiliando na descrição mineralógica das rochas amostradas na área de estudo (Tabela 1). Visando proporcionar maior confiabilidade aos resultados do processo classificatório, um conjunto de minerais foram simulados para a verificação da equivalência dos principais picos identificados nos difratogramas via software (Figuras 3b e 4b).

Tabela 1: Minerais identificados por DRX e análise visual de amostras representativas.

Amostras	Minerais identificados
MA10	Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Hidroxilapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) e Calcita (CaCO_3)
MA10A	Calcita (CaCO_3), Ankerita ($\text{CaFe}^{2+}_{0.6}\text{Mg}_{0.3}\text{Mn}^{2+}_{0.1}(\text{CO}_3)_2$) e Fluorapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2.5(\text{CO}_3)_{0.5}\text{F}$)
MA10B	Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e mica
MA11C (solo)	Fluorapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2.5(\text{CO}_3)_{0.5}\text{F}$), Goethita ($\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$) e Calcita (CaCO_3)
MA11D (solo)	Goethita ($\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$) e Analcime ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot (\text{H}_2\text{O})$)
MA12 (solo)	Hematita ($\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3$), Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e Goethita ($\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$)

A construção da biblioteca espectral do depósito de fosfato de Araxá seguiu os métodos descritos em Clark (1999). A classificação espectro-mineralógica dos dados espectrais foi feita através do software ENVI 4.6.1., considerando-se as observações da livreria espectral GMEX (Pontual *et al.*, 1997). As principais feições de absorção espectral e respectivos intervalos de comprimento de onda de moléculas potencialmente relacionadas aos minerais identificados através de DXR estão listados na tabela 2.

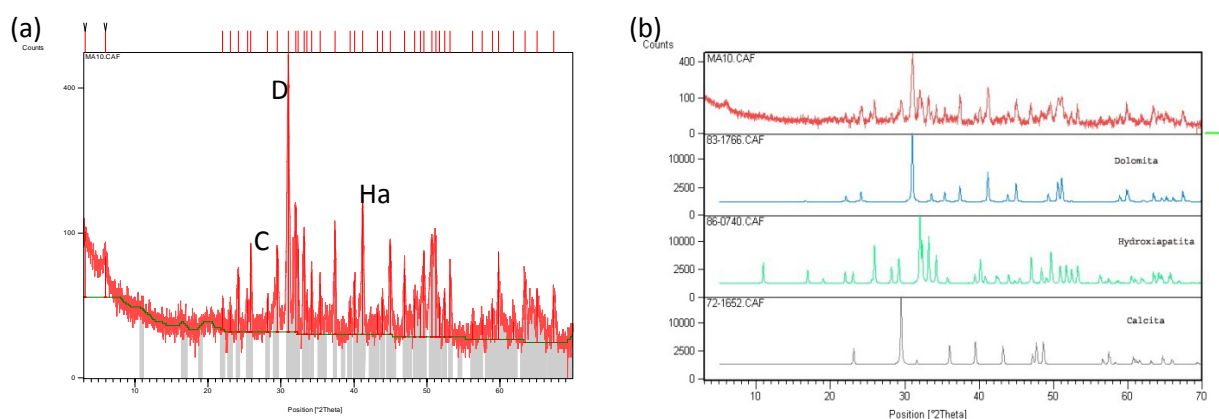
Tabela 2: Intervalos de comprimentos de onda nos quais ocorrem as feições de absorção espectral características das moléculas OH, água, Al-OH, Fe-OH, Mg-OH e CO₃.

Moléculas	Comprimento de onda das feições de absorção características
OH	~1400 nm (também ~ 1550 nm e ~1750-1850 em alguns minerais)
Água	~ 1400 nm e ~ 1900 nm
Al-OH	~ 2160-2220 nm
Fe-OH	~2230-2295 nm
Mg-OH	~2300-2360 nm
CO ₃	~2300-2350 nm (também em 1870 nm, 1990 nm e 2155 nm)

A caracterização dos materiais à partir da interpretação dos espectros envolveu a análise qualitativa, chamada também de interpretação empírica. Para tanto, os espectros foram inicialmente submetidos à remoção do contínuo. Essa operação favorece o realce das feições de absorção, auxiliando na interpretação visual do espectro e na conseqüente detecção da mineralogia associada (Clark *et al.* 1999) (Figuras 3c e 4c). A remoção do contínuo consiste na remoção do *foreground*, ou seja, no ajuste ascendente de uma linha convexa do espectro em um patamar retilíneo (Pontual *et al.* 1997). Após a remoção do contínuo, os espectros foram interpretados visualmente. As principais características investigadas nos espectros foram a posição e a geometria das feições de absorção e a relação destas com a proporção dos membros presentes na mistura espectral. Essa análise permitiu a confirmação de todas as fases minerais determinadas pela DRX.

Foi também realizada uma interpretação semi-automática e uma análise semi-quantitativa dos espectros a partir das técnicas *Spectral Angle Mapper* (Kruse *et al.* 1993) e *Spectral Feature Fitting* (Clark *et al.* 1990), tomando-se como base a biblioteca espectral do USGS (Clark *et al.* 1999b). Nesse caso, a análise foi orientada pela maior similaridade dos espectros decorrentes da mistura com a assinatura espectral da amostra.

Uma simulação do potencial de detecção das assinaturas espectrais determinadas para o no depósito de Araxá com base em dados do sensor multiespectral ASTER foi também aqui experimentada. A simulação foi concentrada no mapeamento espectral de associações carbonáticas (calcita e dolomita), silicáticas ferro-magnesianas hidratadas (talco, argilo minerais do grupo da clorita, vermiculita, hidroxibiotita) e de minerais de rochas fosfatadas (apatitas) na resolução espectral do sensor ASTER, considerando suas 9 bandas posicionadas no intervalo do espectro refletido (Figuras 3d e 4d).



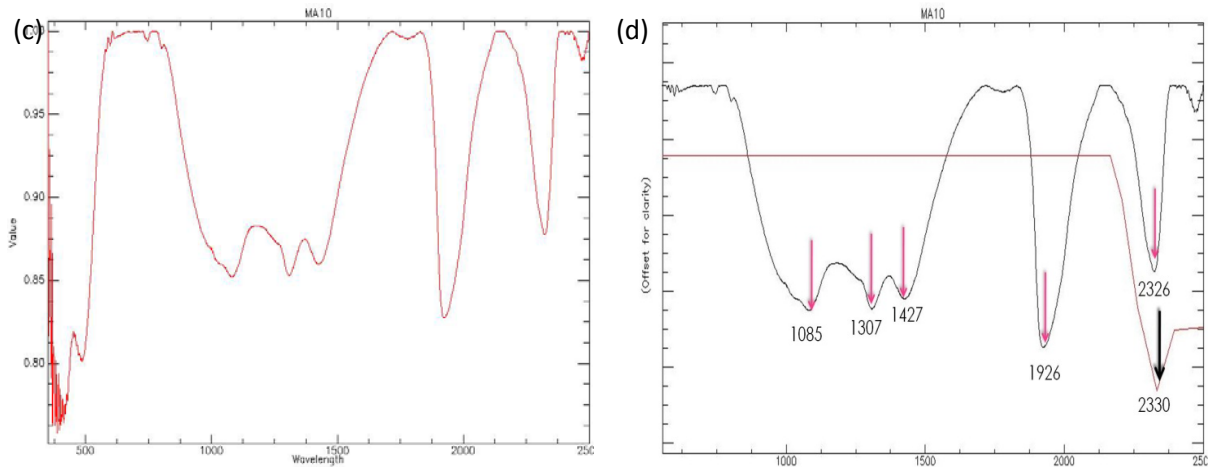


Figura 3: (a) Difratoograma da amostra (MA10), composta por Dolomita (D), Hidroxilapatita (Ha) e Calcita (C). (b) Simulação de correspondência dos picos dos principais minerais o DXR. (c) Reflectância espectral da amostra medida com o espectrorradiômetro FieldSpec Hi-Res. (d) Espectro re-amostrado segundo as bandas do sensor ASTER (vermelho). As setas na core magenta no diagrama indicam os comprimentos de onda das principais feições de absorção realçadas nos espectros de reflectância. A seta preta indica a principal feição equivalente realçada na resolução espectral do ASTER.

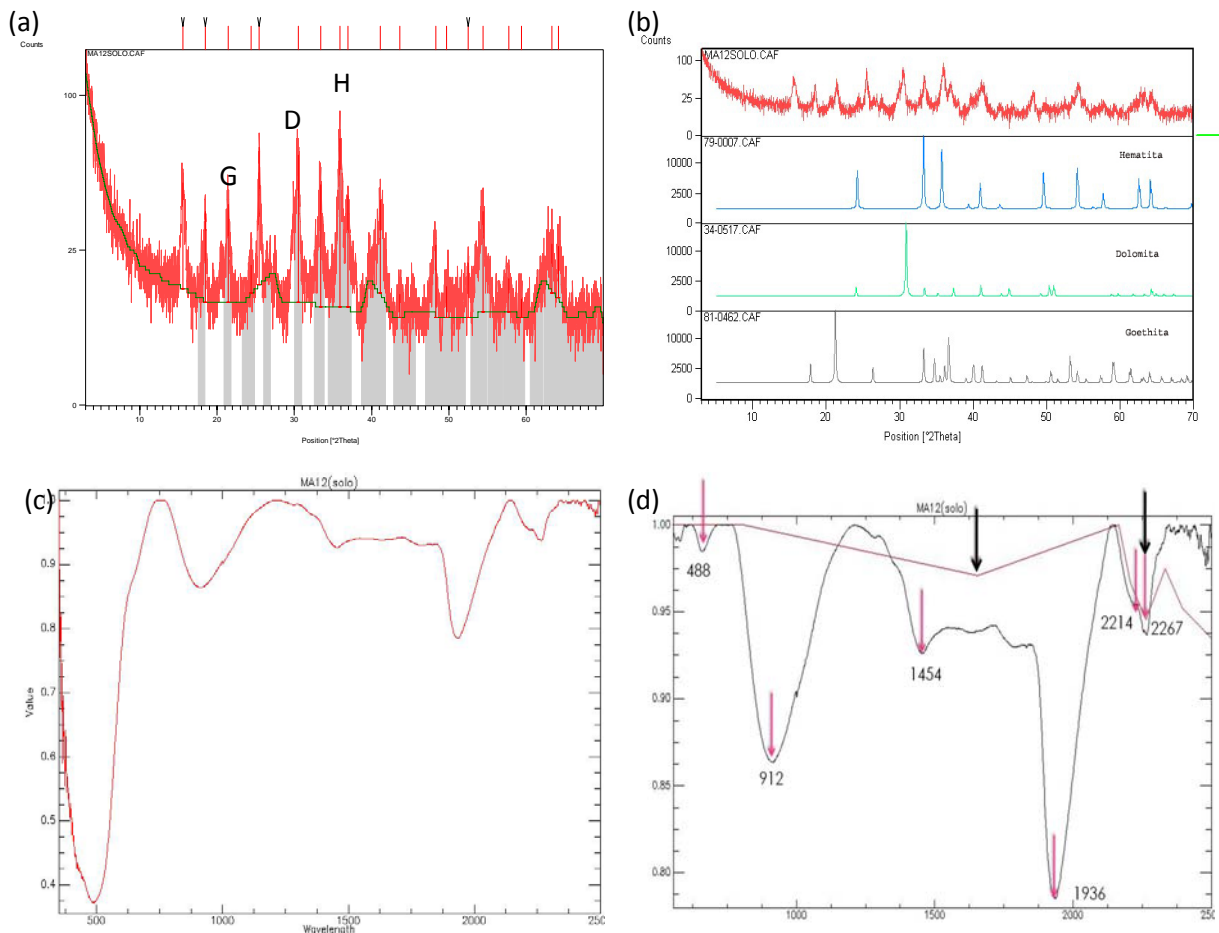


Figura 4: (a) Difratoograma da amostra (MA12-solo), composta por Hematita (H), Dolomita (D) e Goethita (G); (b) Simulação de correspondência dos picos dos principais minerais o DXR. (c) Reflectância espectral da amostra medida com o espectrorradiômetro FieldSpec Hi-Res. (d) Espectro re-amostrado segundo as bandas do sensor ASTER (vermelho). As setas na core magenta no diagrama indicam os comprimentos de onda das principais feições de absorção realçadas nos espectros de reflectância. As setas pretas indicam as principais feições equivalentes realçadas na resolução espectral do ASTER.

4. Conclusões

Neste estudo foi possível constatar que a espectroscopia de reflectância é uma importante ferramenta para identificar e caracterizar os diferentes minerais presentes em amostras geológicas do depósito de fosfato de Araxá. Curvas espectrais características relevaram uma importante gama de minerais, corroborados por dados obtidos por meio de Difração de Raios X, os quais podem ser utilizados para vetorização dessa tipologia de depósito. Visto a observação de feições que aparecem destacadas na resolução espectral do sensor ASTER, é plausível que *pixels* de imagens desse sensor ASTER possam relevar algumas das principais assinaturas descritas para o depósito de Araxá, ofertando uma ferramenta adicional para a prospecção de depósitos similares em escala regional.

Agradecimentos

Agradecimentos: (1) a CPRM, pelos dados e amostras do Projeto Fosfato Brasil; (2) ao Prof. Dr. Lisandro Pavie Cardoso pela autorização para uso dos Difratômetros de Raios-X do Laboratório de Preparação e Caracterização de Materiais do Instituto de Física Gleb Watagin (LPCM-IFGW) da UNICAMP.

Referências bibliográficas

- ABRAMS, M., & HOOK, S. J. Aster User Handbook: **Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer**. USA: NASA/Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2, 2002.
- Anuário Mineral do DNPM, 2008.
- CLARK, R. N., GALLAGHER, A. J., AND 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.
- CLARK, R. N.; SWAYZE, G. A. **Mapping minerals, amorphous materials, environmental materials, vegetation, water, ice, and snow, and other materials: The USGS Tricorder Algorithm**. In Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 95-1, 39 – 40, 1995.
- CLARK R.N. **Spectroscopy of Rocks And Minerals, And Principles of Spectroscopy**, chapter 1. In: A.N. Rencz (eds.) Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing, 3ed., vol. 3, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.: 03-58, 1999.
- HUNT G.R. **Electromagnetic Radiation, The communication link in Remote Sensing**, Chapter 2. In: Siegal B.S. and Gillespie A.R. (eds) Remote Sensing in Geology, John Wiley & Sons, New York, pp.: 5-45, 1980.
- ISSA FILHO, A. *et al.*; **Complexos Carbonatíticos do Brasil**. CBMM, 44p, 1994.
- KRUSE, F. A. ; LEFKOFF, A. B. ; BOARDMAN, J. B. ; HEIDEBRECHT, K. B. ; SHAPIRO, A. T. ; MENESES P.R. & MADEIRA NETO J.C. **Sensoriamento Remoto: reflectância de alvos naturais**. Ed. UnB & Embrapa, Brasília, 262 pp, 2001.
- PONTUAL, S., MERRY, N., GAMSON, P., **G-Mex Volume 1: Special Interpretation Field Manual**. Ausspec International, Kew, Victoria 3101, 55 p, 1997.
- SCHNELLRATH, J.; CORREIA, J. C. G.; GUIMARÃES, R.C.; TEIXEIRA, S.H.A.; **Fosfato – Mina de Araxá – Serrana. Comunicação Técnica Elaborada para o Livro Usina de Beneficiamento de Minérios do Brasil**. CETEM, Centro de tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, 2002.
- SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E.T. de.; COELHO, C.E.S.; **Principais depósitos minerais do Brasil: Rochas e Minerais Industriais**. V. 4. DNPM e CPRM, Brasília, 1997.

SILVA, A.B.; MARCHETTO, M & SOUZA, O.M. **Geology of Araxá (Barreiro) carbonatite**. S.N.T., Anais. 1979. p.17.

TORRES, M.G. et al.; **Composição Química de Superfície e Nanotopografia da apatita proto-minério da Mina do Barreiro Araxá-MG**. II Simpósio Brasileiro de Metalogenia, Gramado, RS, 2009.

TORRES, M.G.; **Caracterização Mineralógica do Minério Fosfático da Mina da Arafertil S.A no Complexo Carbonatítico do Barreiro, Araxá-MG**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.