

Caracterização Espectro-Mineralógica, do Depósito de Agalmatolito Mateus Leme (Quadrilátero Ferrífero/MG), por Espectroscopia de Reflectância e dados ASTER.

Juliano Alves de Senna ¹
Carlos Roberto de Souza Filho ¹

¹Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/IG/DGRN
Caixa Postal 6152 - 13083-870 - Campinas - SP, Brasil
{jsenna, beto}@ige.unicamp.br

Abstract. Agalmatolite is a peculiar rock known by its high concentration of pyrophyllite and used worldwide in the ceramic industry. In Brazil, agalmatolites resources are hosted by meta-volcanic-sedimentary rocks of the Rio das Velhas greenstone belt that occur NW of Belo Horizonte (MG). The deposits are placed along a SE-NW, strike-slip fault, which cross-cuts the Archaean stratigraphy and is associated with metamorphic-metassomatic-hydrothermal events. Considering the complexities involved in characterizing such materials by conventional methods, and using this type area of occurrence of agalmatolites as a control, this work aims to: (i) evaluate the potential of reflectance spectroscopy (RS) as an expedite, portable method to characterize agalmatolites; (ii) to seek a relationship between spectral characteristics of these minerals and their use in the ceramic industry, and (iii) to evaluate the potential of ASTER data and image products to map agalmatolite-related minerals remotely. RS allowed the distinction of several minerals, including pyrophyllite, kyanite, diaspore, micas, dumortierite and tourmaline, grouped into three zones. These zones typified in the agalmatolite deposits have a specific application in the ceramic industry, indicating the suitability of RS to characterize such industrial materials and help defining their use. Information extracted from ASTER data, comprising visible-infrared wavelengths, allowed the mapping of podiform structures along the shear zone containing similar mineral zoning. These results have important implications for regional exploration of these agalmatolite bodies and to detailed mapping of mine faces and boreholes, with vast potential benefits for the ceramic industry.

Palavras-chave: pyrophyllite, ceramic raw material, high-aluminum zone, hydrothermal-metassomatic-metamorphic; pirofillita, matéria-prima cerâmica, zona aluminosa, hidrotermal-metassomático-metamórfico.

1. Introdução

Agalmatolito é a designação econômica para uma rocha peculiar, amplamente utilizada pelo setor industrial como matéria-prima (MP) cerâmica. As vantagens decorrem do controle granulométrico, fator lubrificante na extrusão e baixa retração na sinterização, o que gera produtos brancos, com baixa porosidade e superfícies de alto brilho (Carmo e Romano 1996, Ciullo 1996). Esta rocha é produto da superposição de processos metamórfico-metassomático-hidrotermais em protólitos vulcanossedimentares do *greenstone belt* Rio das Velhas (GRV) (Jordt-Evangelista e Delgado 2005, Romano 1993). Apesar do termo agalmatolito ser associado à concentração de pirofillita, há uma vasta assembléia mineral associada à sua ocorrência. No entanto, a distribuição espacial dos minerais de minério, constituintes dos corpos mineralizados, ainda é pouco conhecida, principalmente no sentido de amparar a extração planejada destes minerais, visando o controle de qualidade da MP.

Os depósitos estão distribuídos ao longo de um lineamento de direção SE-NW, denominado de Faixa Agalmatolítica Mineira (FAM) (Figura 1a), localizada no noroeste do Quadrilátero Ferrífero (QF). O Sítio Mateus Leme (SML) é situado no sul da FAM. O Depósito de Agalmatolito Mateus Leme (DAML), foco desta pesquisa, está contido no SML, e dista 10 km a noroeste da cidade homônima (Figura 1b). Considerando as complexidades envolvidas na caracterização dos agalmatolitos por métodos convencionais, os objetivos desse trabalho foram: (i) avaliar o potencial da espectroscopia de reflectância (ER) como um método eficaz, capaz de caracterizar as diversas faciologias do minério; (ii) verificar a capacidade da ER como uma ferramenta portátil, expedita e alternativa para a caracterização de minerais, incluindo definição de tipos e composição; (iii) estabelecer um zonamento mineralógico do jazimento; (iv) avaliar a possibilidade de mapeamento remoto de minerais associados ao agalmatolito através de dados do

sensor ASTER; e (v) determinar parâmetros espectrais que possam auxiliar na classificação desse minério para aplicação industrial.

2. Cenário Geológico do Depósito de Agalmatolito Mateus Leme (DAML)

No SML (Figura 1b) a litoestratigrafia é composta pelo Complexo Metamórfico Divinópolis, e o GRV (*greentone*) arqueanos, e os granitóides paleoproterozóicos. O GRV é composto pelos Grupos Nova Lima (GNL) na base e Maquiné (GM) no topo. O GNL é dividido em associações vulcânicoquímica e sedimentar (CPRM 2004), e/ou unidades: (i) metavulcanoclástica (pacotes delgados basais de serpentinitos e metabasaltos, e espessos de topo de metandesito e metariolitos, com esteatitos, anfibolitos, xistos anfibolíticos e talcíferos, metakomatiitos, metatufos e formações ferríferas-BIF); (ii) metaclastoquímica (*metacherts*, BIF, quartzo-mica xistos, metagrauvas, quartzitos e metaconglomerados); e (iii) filítica (quartzosa, carbonosa e grafítica) (Romano 1993). Circundando esta seqüência ocorrem os corpos granitóides Florestal (GF) ao norte e Mateus Leme (GML) a oeste, além do tonalito Bom Jardim (TBJ), confinado no SW da área (Figura 1b). A zona de alteração hidrotermal (aluminosa), hospedeira dos corpos de agalmatolito, ocorre em terrenos (GRV) adjacentes ao contato cisalhado com o GML (fácies Granodiorito Barro Preto). Nesta região verifica-se uma série de litologias associadas (e.g., quartzo-cianita xisto, BIF, *metachert*, turmalinito-exalativo, fuchsita xisto, quartzito, cianitito), estruturadas em sinclínórios (NW-SE) obliterados e portadores dos corpos agalmatolíticos. Essas rochas dispõem-se em geometria anastomosada (cisalhamento dúctil), e sustentam relevos elevados (insolubilidade dos minerais aluminosos, Carmo e Romano 1996). Filossilicatos e hidróxidos de alumínio (típicos de agalmatolitos), comuns em sistemas hidrotermais de alto alumínio, são muito comuns nesta zona mineralizada. No DAML (Figura 2a) os corpos (hectométricos) de agalmatolito, alongados (NW-SE) em conformidade com a estruturação das encaixantes, apresentam forma de *boudins* e possuem zoneamento interno característico.

3. Aspectos Metodológicos & Procedimentos Analíticos

Esta etapa envolveu desde a aquisição de materiais e dados georreferenciados, passando pela análise, caracterização e classificação (local e remota) das amostras selecionadas. Apesar, desta etapa ter envolvido métodos de validação (microscopia óptica-MOp e difratometria de raios DRX) somente a ER será discutida neste documento. Em todo o depósito foram coletadas 35 amostras, sendo 15 representativas do minério, apreciando várias características (cor, textura, composição, posição, utilidade industrial e peculiaridade mineralógica. Todas as amostras foram preparadas por cominuição, na fração pó, para possibilitar análises de calibração (DRX), complementarmente as leituras de ER das amostras brutas. O espectrorradiômetro *FieldSpec FR* (0.35 μ m - 2.5 μ m) foi utilizado para as medidas espectrais, realizadas em dois estágios: (i) configuração em tripé de bancada: arranjo para leitura de amostras brutas, com geometria controlada; (ii) acessório *muglight*: arranjo para leitura de amostra em pó, com uso de obturador que captura a reflectância da amostra inserida a um “porta amostra”, através de um orifício transparente. A classificação dos materiais a partir da interpretação dos espectros envolveu 2 etapas mutuamente classificatórias: (i) análise qualitativa, onde os espectros foram submetidos à remoção do contínuo (Pontual et al. 1997), para favorecer a interpretação visual do conjunto das feições de absorção (posição e geometria) de cada espectro; e (ii) análise semi-quantitativa, onde as curvas espectrais foram interpretadas semi-automaticamente com o auxílio de um algoritmo apropriado e da biblioteca espectral do USGS (Clark et al. 1990).

Na etapa de Mapeamento Remoto, foram utilizados dados do sensor multiespectral ASTER (Abrams et al. 2002) e bibliotecas espectrais de referência. Os dados multiespectrais referentes a área do depósito foram ajustados em duas formatações distintas: (i) operação conjunta das faixas do visível e infravermelho próximo (VNIR: bandas B1-B3), com 15 m de resolução, e do infravermelho de ondas curtas (SWIR: bandas B4-B8), com 30 metros de resolução, realizando

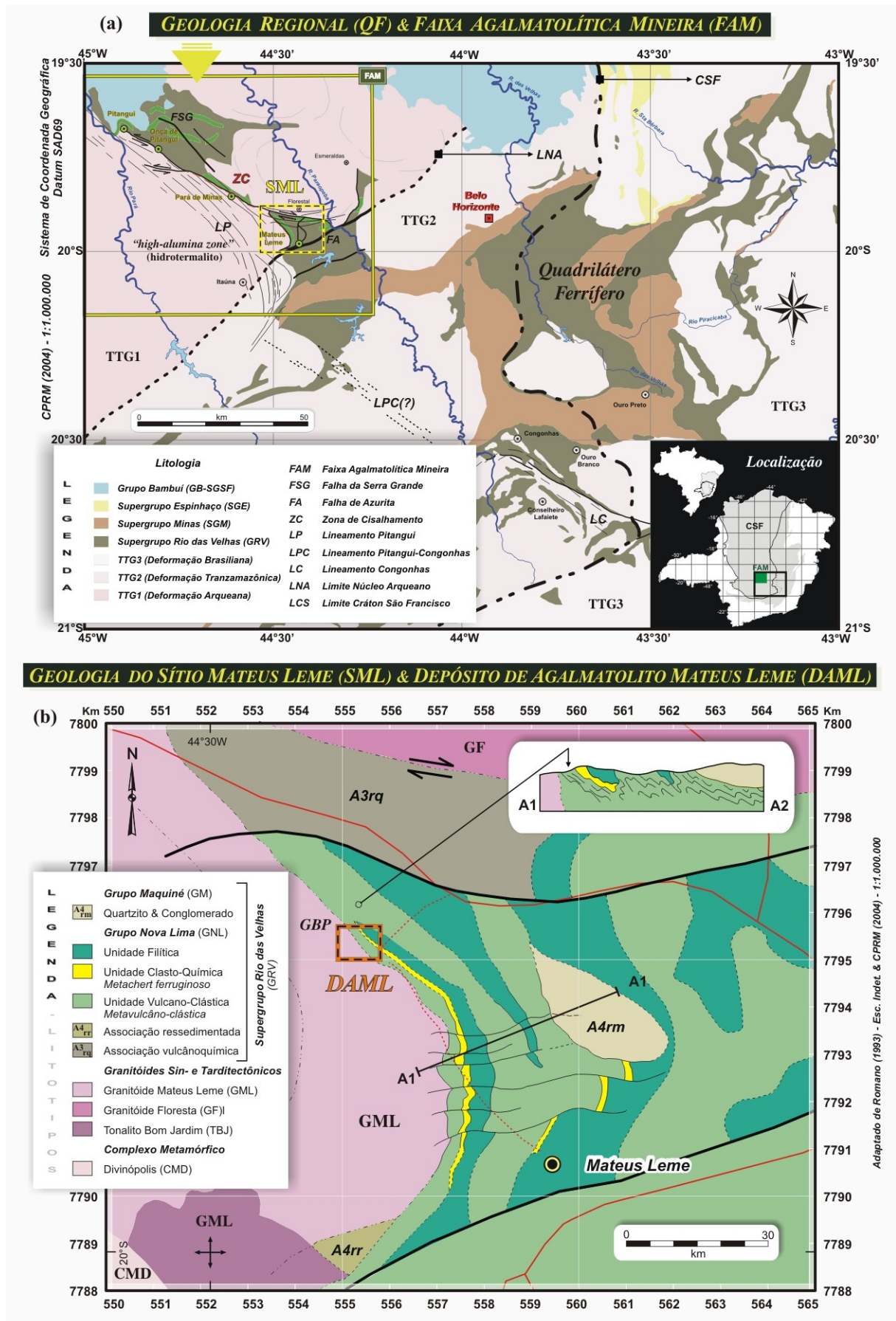


Figura 1: a) Geologia Regional da Faixa Agalmatolítica Mineira no contexto do Quadrilátero Ferrífero e b) Geologia do Sítio Mateus Leme com localização do Depósito de Agalmatolito Mateus Leme.

uma reamostragem espacial das bandas do SWIR para aumentar artificialmente sua resolução para 15m, o que permitiu a composição de uma base (8 bandas) com a mesma resolução espacial; e (ii) integração das bandas B5, B6 e B7, favorecendo o processamento com as classes típicas do depósito, relacionadas às suas principais feições de absorção. As assinaturas espectrais (*endmembers*) obtidas para os agalmatolitos, foram reamostradas para a resolução espectral do ASTER (0.56, 0.66, 0.81, 1.65, 2.165, 2.205, 2.260 e 2.330 μm), em duas reduções de registro distintas: (i) para a posição no centro das 8 bandas espectrais, e (ii) para a posição no centro das bandas B5-B7. Os *endmembers* utilizados incluem membros da biblioteca espectral da USGS e assinaturas de misturas típicas do depósito. O PDI foi implementado a partir de uma das técnicas hiperespectrais adaptada aos dados do sensor ASTER, com ênfase no método de classificação espectral SAM (*Spectral Angle Mapper*). Esta técnica de classificação supervisionada, compreende a comparação dos espectros de uma biblioteca de referência com os espectros dos *pixels* da imagem. O SAM determina a similaridade espectral entre esses espectros, que são convertidos em vetores num espaço n-dimensional (n= número de bandas), com base no ângulo entre os mesmos, medido em radianos (Kruse et al. 1993). A aplicação da técnica resulta em imagens-produto (*rule*), nas quais os valores dos *pixels* correspondem ao ângulo espectral. Como os *pixels* claros nas imagens correspondem aos ângulos grandes (menor similaridade) e os escuros correspondem a ângulos pequenos (maior similaridade entre os *pixels* de referência), foi necessário inverter os histogramas destas imagens por uma questão visual. Deste modo, atribuem-se aos melhores resultados *pixels* claros e aos resultados de menor interesse *pixels* escuros. No intuito de isolar a informação de maior interesse, seus histogramas ainda foram criteriosamente ajustados, destacando apenas *pixels* associados a um intervalo pequeno de valores de ângulo. As imagens *rule* dos *endmembers* de interesse, foram conjugadas na forma de uma composição colorida RGB, visando ilustrar a distribuição de áreas dominantes e de mistura espectral entre esses *endmembers*.

4. Caracterização & Classificação Espectro-Mineralógica

As análises por ER (Figura 2b) na faixa do VNIR-SWIR (0.4-2.5 μm) e técnicas associadas (DRX, MOp), permitiram a caracterização de todas as fácies do depósito. A classificação espectro-mineralógica do corpo agalmatolítico, favoreceu a distribuição de 3 classes distintas de minério: AGL1 (agalmatolito lamelar ou foliado, branco e verde), AGL2 (maciço ou pirofillita fels) e AGL3 (silicoso a caulínico). Cada tipo apresenta uma variedade de espécimes (quartzo, cianita, pirofillita, diásporo, mica branca, caulinita, turmalina, dumortierita e fuchsita), que são resultado de alternâncias composicionais ao longo do corpo mineralizado. No entanto, quartzo, cianita e dumortierita, não possuem feições características que os distingam dos outros minerais por ER ou há *overtone* de algumas absorções (pirofillita e dumortierita). O corpo agalmatolítico apresenta um zoneamento mineralógico (auréolas aluminosas bordejando um núcleo silicoso), cujas fácies ocorrem dispostas concêntricamente. Verifica-se neste zoneamento (Figura 2b), um gradiente da relação pirofillita (py) *versus* muscovita (mb), onde as feições espectrais características de cada espécime, descrevem uma progradação ao longo do corpo mineralizado. Esta gradação (AGL3→AGL1) é observada pelas seguintes feições de absorção: 0.952 (py)→0.965 (mb) μm , 1.395 (py)→1.408 μm (mb), 2.166 (py)→2.195 μm (mb) e 2.315 (py)→2.343 μm (mb). Também é notável o desaparecimento da absorção centrada em 2.07 μm (py) e o aprofundamento da absorção da água centrada em 1.9 μm (mb) nos litotipos micáceos. A pirofillita, o diásporo (feição de absorção centrada em: 1.8 μm) e a cianita ocorrem na maioria das faciologias exceto na fácies micácea da borda sudeste. O quartzo é abundante no núcleo do depósito (silicoso), onde também há a maior concentração de cianita e menor de mica, resultado amparado pelas técnicas validatórias. A caulinita ocorre principalmente nas bordas do depósito, haja vista sua feição em 2.205 μm . Em contra partida, a turmalina representada por assinaturas com absorções características (0.75, 1.15, 2.2, 2.25 e 2.37 μm), ocorre em fácies intermediárias à classe AGL2. Os enclaves fuchsíticos (cor verde), disseminados pelo depósito possuem feições

GEOLOGIA DO DAML & ZONEAMENTO ESPECTRO-MINERALÓGICO DO CORPO AGALMATOLÍTICO

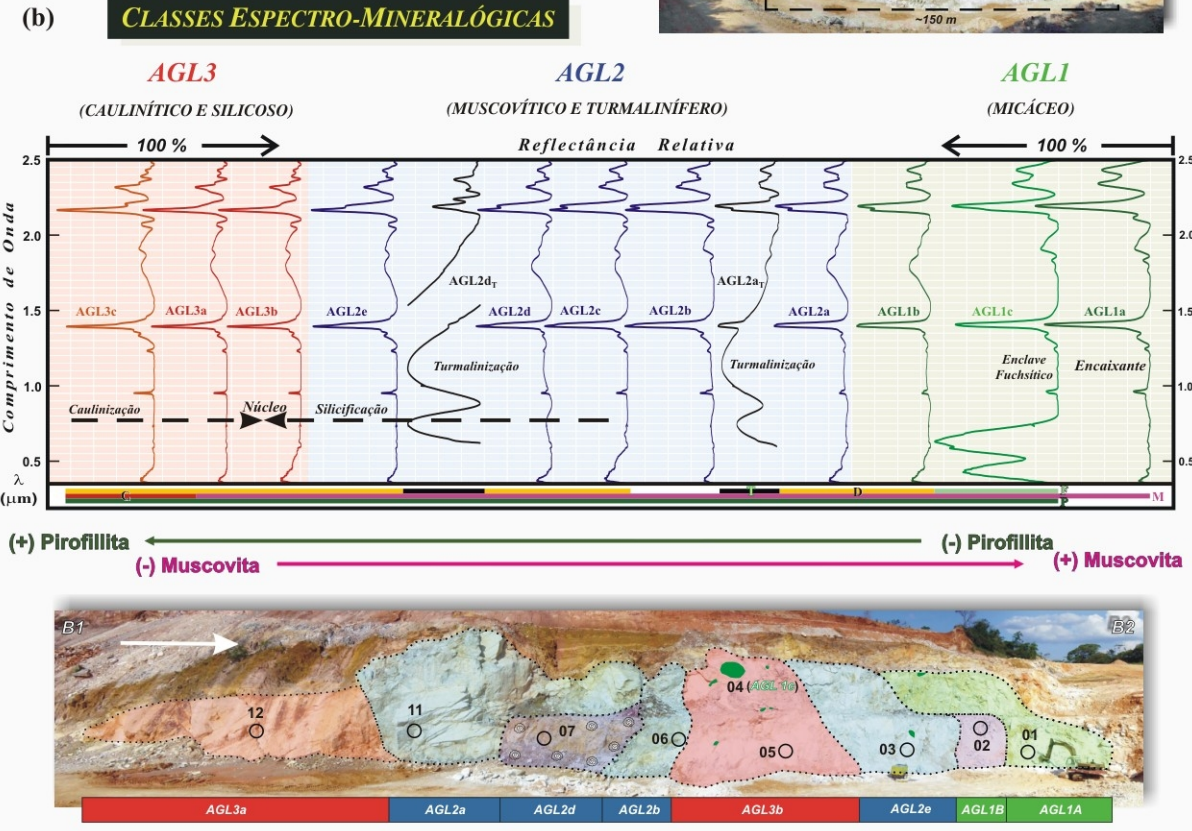
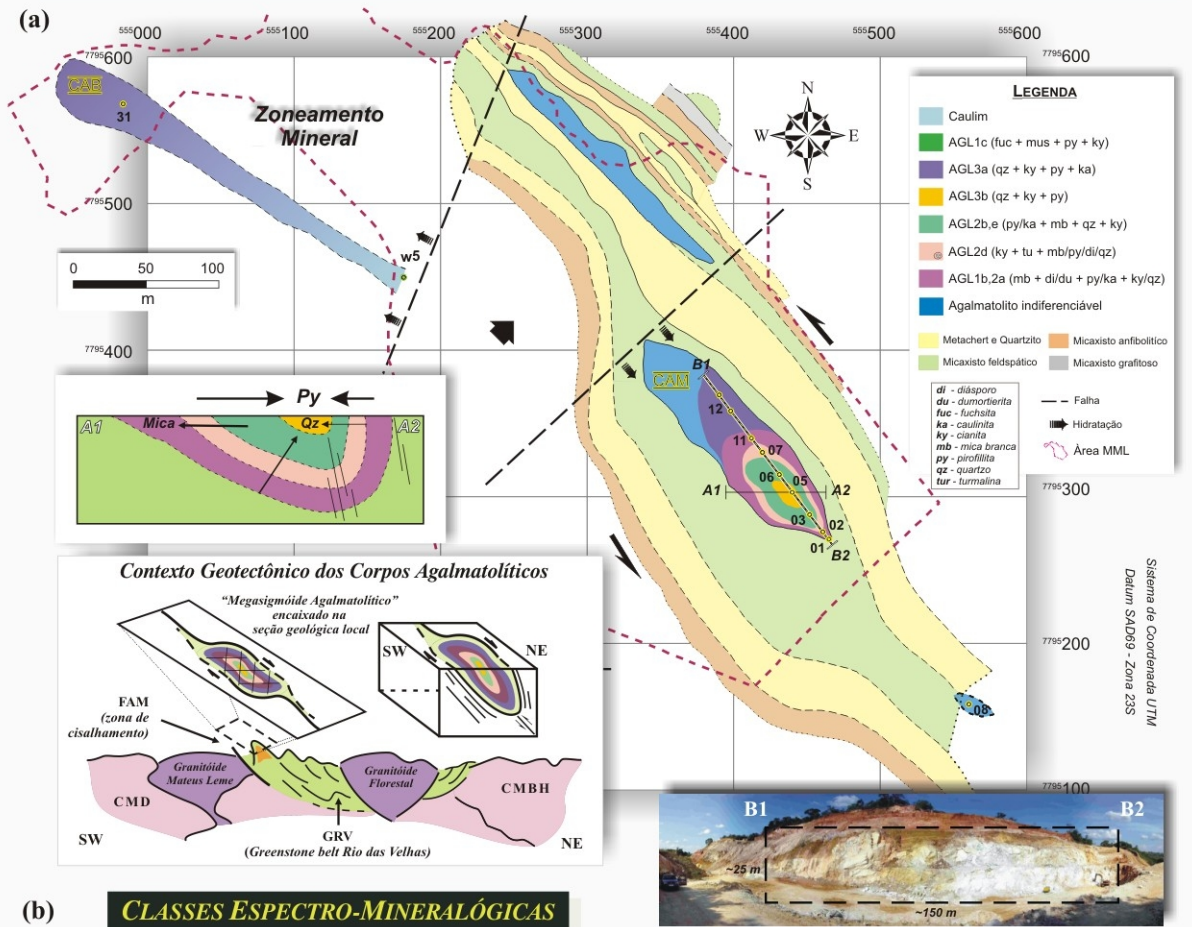


Figura 2: a) Geologia do entorno do depósito (DAML) e zoneamento espectro-mineral do corpo agalmatolítico, b) distribuição das classes espectro-mineralógicas (AGL1,2,3), com gradiente py x mb.

de absorção do Cr^{3+} (0.44 e 0.62 μm), juntamente com as do Al-OH (e.g., 2.195 μm), do OH e da água, haja visto, que este espécime é uma muscovita de cromo. A discriminação das classes fica evidente, quando visualizadas a partir da relação das profundidades das principais feições de absorção da mica (2.195 μm) e da pirofillita (2.167 μm) (Figura 3a).

5. Mapeamento Remoto Espectro-Mineralógico por Classificação SAM (ER-ASTER)

Os dados do sensor ASTER foram processados visando avaliar a possibilidade de mapeamento remoto dos minerais constituintes das principais fases minerais detectadas por ER: pirofillita (py), mica (mb), caulinita (ka) e diásporo (di). Nas duas primeiras aproximações (SAM1,2), foram utilizados espectros de amostras consideradas mais típicas do depósito, principalmente quanto à mistura de fases. Para a classificação SAM1, foram utilizados espectros medidos em amostras moídas, enquanto que para SAM2, utilizou-se espectros de amostras brutas. Na última aproximação (SAM3,4,5) o experimento foi realizado com base em espectros de quatro minerais na sua forma pura (biblioteca USGS): pirofillita, paragonita (em lugar das muscovitas, pouco aluminosas nesta biblioteca), diásporo e caulinita. Todos estes espectros foram reamostrados para a resolução espectral do sensor ASTER e utilizados como espectros de referência (*endmembers*) para a classificação (Figura 3b), considerando as bandas B5-B7 do SWIR para SAM1, e as bandas B1-B8 do VNIR-SWIR para SAM (2,3,4 e 5). As imagens *rule* derivadas para cada *endmember* foram combinadas, após inversão do histograma original, numa composição colorida RGB, onde cada canal foi atribuído à imagem do espectro de um litotipo. Resultado SAM1 (Figura 3c-SAM2): para o canal vermelho foi atribuída a imagem do espectro da amostra AGL3a (py+ka), para o verde a da AGL1a (mb) e para o azul a da AGL2b (py+mb). Neste caso o ajuste do histograma obedeceu um padrão de faixas de variância para todos os canais, mas não a posição dos máximos e mínimos. Foram detectadas as fases mais puras assim como suas misturas em proporções variadas ao longo de depósito. Observa-se predominância da classe AGL1 (verde) no setor sudeste e da AGL3 (vermelho) no setor noroeste, com nítida graduação. Esta graduação é composta pela classe AGL2 (azul) e sua mistura com as classes AGL1 (ciano) e AGL3 (magenta). Quando o ajuste do histograma foi equalizado pelos máximos e mínimos de variância, ocorreu uma sutil modificação nos gradientes. Nestes caso, observa-se uma maior abundância da classe AGL3 (vermelho) e menor da AGL1 (verde), mas com uma mistura evidente dos três membros (branco) na porção centro-sul do depósito e uma curiosa geometria em sigmóide do corpo mineralizado. **Resultado SAM2** (Figura 3c-SAM2): para o canal vermelho foi atribuída a imagem do espectro da amostra AGL3c (py+ka), para o verde a da AGL1a (mb) e para o azul a da AGL3a (py+di). Foram detectadas as porções das fases puras, assim de misturas variadas. Observa-se em todo o limite NE do depósito a correlação com o AGL1 e na porção central verifica-se uma graduação dos litotipos AGL3a para AGL3c, de sudeste para noroeste. **Resultados SAM3,4,5** (Figura 3c-SAM3,4,5): na classificação SAM3, o canal vermelho foi atribuído a imagem da pirofillita, o canal verde a imagem da mica e o canal azul a imagem da caulinita. Similarmente à SAM3, na classificação SAM4, o canal azul foi atribuído ao diásporo em lugar da caulinita. Da mesma forma que para a SAM4, na SAM5, atribui-se a caulinita ao vermelho, em lugar da pirofillita. Porções onde as fases mais puras ocorrem foram detectadas, assim como setores onde essas mesmas fases encontram-se misturadas em proporções variadas. Nos três resultados, a mica branca, que aparece em verde, ocorre bordejando o depósito, em maior ou menor proporção, a depender da mistura. No caso do SAM4, é evidente a mistura da mica com a pirofillita, o que resulta em tons verdes mais amarelados na imagem. Em contraste, quando a caulinita é classificada ao invés da pirofillita (SAM5) a mistura é sutil. **Resultado Integral** (Figura 3c-SAM1,2,3,4,5): a feição circular da porção centro-norte das figuras SAM (2,3,4,5), contendo a mistura (mb+py+ka: SAM3), ora não é observada (SAM1), não possui relação direta com o corpo agalmatolítico. A pirofillita, possui maior associação com o diásporo (SAM4), do que com a caulinita (SAM3). Esta relação sustenta a hipótese de que a “ka” é produto

ESPECTROS DE REFERÊNCIA, CLASSIFICAÇÃO ESPECTRAL & MAPEAMENTO REMOTO

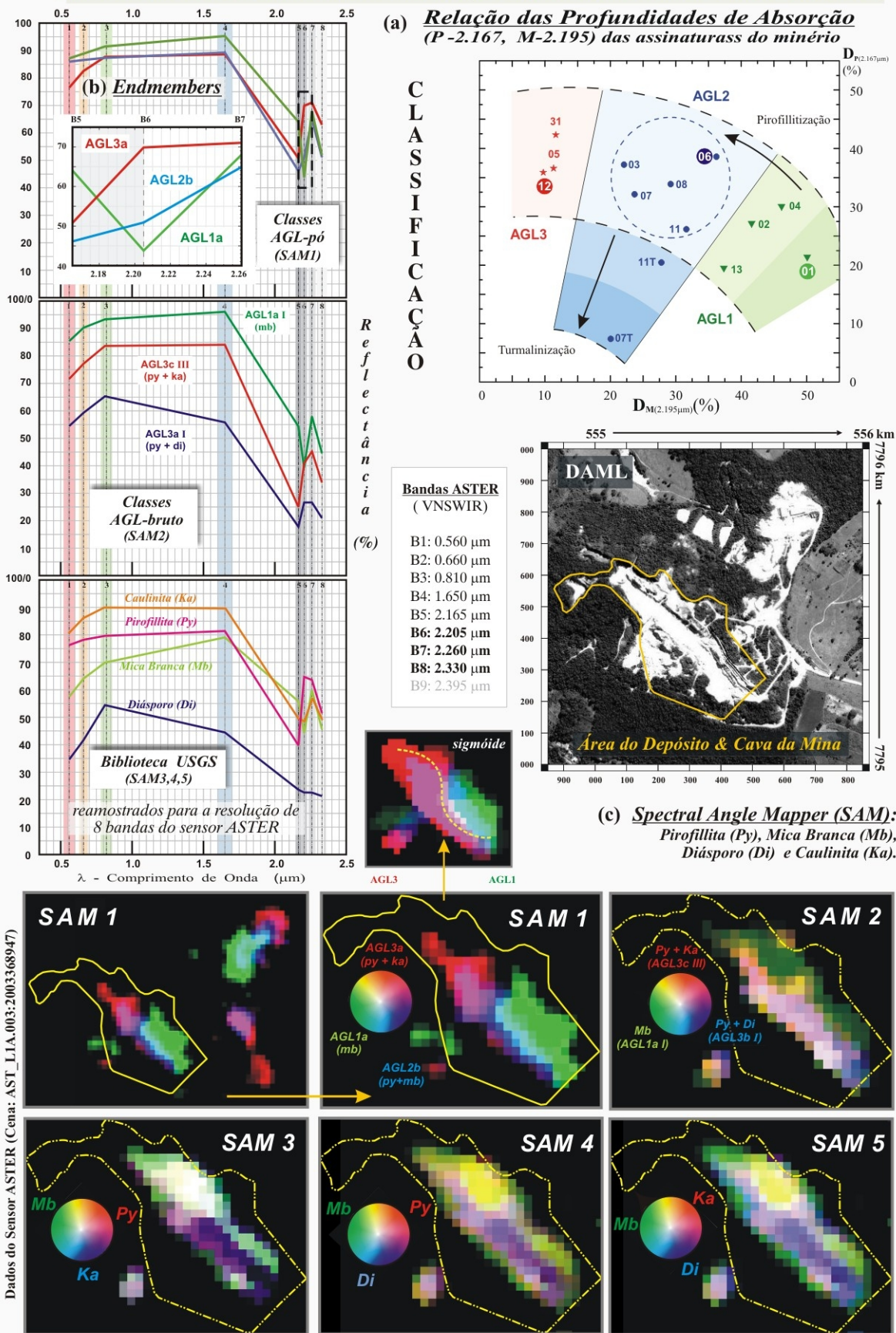


Figura 3: a) Classificação espectral do minério (mb x py), b) espectros de referência das classes de agalmatolito, reamostrados, e c) mapeamento remoto por classificação supervisionada SAM.

da alteração da “py”, ou secundária na transformação da cianita, principalmente nas fácies em que a “py” está associada ao “di” (SAM3). Por outro lado, o “di” (SAM4,5), está preferencialmente disposto na região interna do depósito. Todos os resultados obtidos na área principal do depósito apontam a correlação entre os mapas espectro-mineralógicos derivados por ER e pelo método SAM.

6. Discussões & Conclusões

A investigação do DAML através da ER permitiu a discriminação entre as zonas mineralizadas de forma inédita. A caracterização da MP por ER possibilitou a separação entre as diversas faciologias do corpo zonado e o estabelecimento de classes minerais (AGL1, AGL2 e AGL3). De acordo com as classes propostas foi possível determinar parâmetros espectrais auxiliares na classificação deste minério. Estes parâmetros foram oriundos da relação entre as características espectrais dos minerais e sua distinta aplicação na indústria de cerâmica. A ER demonstrou o seu potencial como uma ferramenta para o mapeamento do minério, na medida em que permitiu a discriminação de minerais e associações mineralógicas distintas. O mapeamento remoto de minerais (e/ou fácies) associados ao agalmatolito através de dados do sensor ASTER foi atingido com sucesso. O uso destes dados, baseado na técnica SAM, mostrou potencial para o mapeamento da ocorrência dos minerais do agalmatolito, possibilitando o reconhecimento da geometria do depósito. Neste contexto, verificou-se que as classes estão distribuídas concentricamente ao longo do corpo de agalmatolito, além de apresentarem uma gradação metassomática-hidrotermal em direção a zona de cisalhamento e ao GML. Embora tenha resolução espectral e espacial limitada, em se tratando de escala de mina, esses dados foram suficientes para a separação de setores com composição controlada pelo gradiente pirofillitâmica, em consonância aos resultados obtidos por mapeamento de campo e análises espectrais de detalhe. O sucesso na caracterização do agalmatolito, demonstrou a viabilidade e a versatilidade da técnica para possíveis e futuras aplicações multidisciplinares no setor industrial cerâmico.

Referências Bibliográficas

- Abrams, M.; Hook, S.; Ramachandran, B. **ASTER User Handbook: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer**. Caltech/JPL/EROS Data Center/NASA, 2002. v. 2, 135 p.
- Carmo, J.C.C.; Romano, A.W. O Algamatolito de Minas Gerais e sua Utilização como Rocha. **Revista da Escola de Minas**, 49(4):39-44, 1996.
- Ciullo P.A. (ed.). **Industrial Minerals and Their Uses**, A Handbook and Formulary. Westwood, New Jersey, William Andrew Publishing/Noyes, 1996, 689 p.
- Clark, R.N.; King, T.V.V.; Klejwa, G.A.; Swayze, G.A. High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals. **Journal of Geophysical Research**, 95(B8): 12.653-12.680, 1990a.
- CPRM. **Folhas Belo Horizonte (SE-23) e Rio de Janeiro (SF-23)**. Carta Geológica ao Milionésimo, SIG. 2004.
- Kruse, F.A.; Leflcoff, A.B.; Boardman J.W.; Heidebrecht K.B.; Shapiro A.T.; Barloon P.J.; Goetz A.F.H. The spectral image processing system (SIPS) - Interactive visualization and analysis of imagin spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**. 44: 145-163, 1993.
- Jordt-Evangelista, H.; Delgado, D.E.R. Algamatolito do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Simp. sobre o Cráton do São Francisco, 3, 2005, Salvador, **Anais...**, Salvador: SBG,p. 316-319.
- Pontual, S.; Merry, N.; Gamson, P. **Spectral Interpretation Field Manual, G-Max**. Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration. Ferny Creek: AusSpec Int. Pty.Ltd.. 1997. v.1 1169 p.
- Romano A.W. O Supergrupo Rio das Velhas da Faixa Mateus Leme-Pitangui - Parte Meridional do Cráton São Francisco, MG - E seu Sistema de Ateração Hidrotermal. **Geonomos**, 1(1):16-32, 1993.
- Senna J.A. **Caracterização Espectro-Mineralógica e Aspectos sobre a Gênese de Matérias-Primas Cerâmicas Clássicas do Brasil: Estudos de Caso em Depósitos de Pirofillita, Talco e Caulinita**. 2008. 211 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Unicamp, Campinas. 2008.