Ciências da Terra (UNL), Lisboa, nº esp. V, CD-ROM, pp. M33-M36

Utilização de imagens hiperespectrais na avaliação da contaminação mineira em S. Domingos, Faixa Piritosa, Alentejo

L. Quental[a,1], M. G. Brito[b,2], A. J. Sousa[c,3], M. M. Abreu[d,4], M. J. Batista[a,5], V. Oliveira[a,6], M. Vairinho[a,7] & T. Tavares[c,8]

Projecto MINEO (V Programa Quadro de Investigação, CE).
a - Instituto Geológico e Mineiro; b - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
c - Instituto Superior Técnico – UTL; d - Instituto Superior de Agronomia – UTL.
1 - lidia.quental@igm.pt; 2- mgb@mail.fct.unl.pt; 3- ajsousa@ist.utl.pt; 4- manuelaabreu@isa.utl.pt;
5- mariaj.batista@igm.pt; 6- igmbeja2igm.pt; 7- margarida.vairinho@igm.pt, 8- teresa.tavares@ist.utl.pt

RESUMO
Palavras-chave: drenagem ácida mineira; imagens hiperespectrais; espectros de campo; mapeamento de ângulo espectral.

O objectivo deste estudo é a detecção de contaminação superficial resultante da antiga actividade mineira em S. Domingos (MSD), Alentejo, utilizando técnicas avançadas de Observação da Terra, *i.e.* imagens hiperespectrais. A MSD, Faixa Piritosa Ibérica, foi sujeita a uma exploração a longo termo de sulfuretos maciços polimetálicos, com primórdios pré-romanos e romanos (*gossan*) e posteriormente em tempos recentes até 1966. Compatível com o volume explorado e processado, a Drenagem Ácida Mineira (DAM) teve uma dimensão significativa remanescente até hoje. Adicionalmente, as escórias e escombreiras dispersas na área, estimadas em milhões de toneladas, podem constituir presentemente focos de DAM e consequente dispersão de elementos poluentes nelas incluídos. A metodologia envolveu a aquisição de dados aero-transportados (sensor *HyMap*™, 450-2500nm, 126 bandas), medições espectro-radiométricas (GER Mark V e ASD FieldSpec) no terreno feitas pelo BGR nos principais tipos de materiais relacionados com a actividade mineira, e geoquímica de solos e sedimentos. A classificação na imagem de reflectância baseou-se num algoritmo que compara espectros de cada pixel da mesma com espectros de campo. Os resultados mostram a dispersão e tipologia de materiais presentes, apoiados por dados geoquímicos, sendo os tipos fundamentais associados ao enxofre, definindo potenciais focos de DAM e poluentes. O mapeamento comprova o potencial discriminatório do sensor hiperespectral na detecção de assinaturas específicas de contaminação, evidenciando também outros focos para pesquisa pormenorizada além dos espetáveis pelo historial mineiro. Fornece também novas bases de investigação das características espectrais dos materiais.

Introdução

As técnicas de Observação da Terra (OT), têm provado a sua eficácia na avaliação e monitorização ambiental com diminuição efectiva de custos e tempo comparativamente aos métodos de amostragem tradicionais. Conquanto alguns métodos de classificação tenham sido desenvolvidos (redes neuronais, algoritmos genéticos e lógica vaga) em OT, a nova vaga de sensores hiperespectrais apela a uma abordagem distinta. As imagens resultantes destes sensores permitem discriminar a composição mineralógica e/ou geoquímica da superfície terrestre, devido à alta resolução espectral e espacial. A complexidade e o grande volume de dados inerentes, exigem *software* adequado para a sua análise (Zhang *et al.*, 2000) e a utilização de algoritmos de classificação apropriados.

As crescentes pressões ambientais e legislativas, neste caso específico relacionadas com actividade mineira, requerem novas estratégias de avaliação e monitorização que permitam um desenvolvimento sustentável. Neste contexto, no projecto MINEO (http://www.brgm.fr/mineo), financiado parcialmente pelo V Programa Quadro de Investigação da CE, avaliam-se as potencialidades dos sensores hiperespectrais para detectar e discriminar poluentes maiores e consequentemente contribuir para uma gestão ambiental realista, sustentável e coerente, favorecendo uma estratégia de monitorização com a aquisição regular deste tipo de imagens. Para testar os desenvolvimentos propostos vários alvos foram seleccionados para avaliação, reflectindo a diversidade climática, geográfica e sócio-económica europeia, que pelo seu historial mineiro e indústrias associadas tenham sofrido alteração das suas características naturais. O sítio teste português corresponde à Mina de S. Domingos, no Alentejo.

Dados

Na área de S. Domingos foram obtidos dados digitais com instrumentos espectrais e outros dados laboratoriais de natureza físico-química (Quental *et al.*, 2002a), referindo-se aqui os mais significativos para o trabalho exposto.

Os dados espectrais foram adquiridos em 2000 com o sensor aerotransportado *HyMap*™ (450-2500nm e 126 bandas) operado pela *Hyvista Corporation* (HVC). Esta empresa forneceu as imagens com ficheiros de georeferenciação DGPS de voo, e também imagens já calibradas para reflectância (*software* Hycorr), além de imagens de radiância. Contemporaneamente, e posteriormente em 2001, foram feitas medições no terreno pelo BGR com espectro-radiómetros GER Mark V e ASD FieldSpec (350-2500nm) nos principais tipos de materiais

relacionados com a actividade mineira, assim como outras assinaturas em áreas geológicas (Silva *et al*. 1997) de referência (Quental *et al*., 2002a) não contaminadas.

Um total de 43 elementos foram analisados em amostras de solos, sedimentos e águas no laboratório *Actlabs*, Canadá. Fonte adicional de dados foi fornecida pela COBA (2002), com ênfase para as análises químicas obtidas no lixiviado de amostras de escórias e escombreiras (Batista *et al*., 2003).

Metodologia

Para o mapeamento da dispersão de materiais contaminados e poluentes resultantes da actividade mineira foi definida uma metodologia que pode ser sintetizada nas seguintes etapas:

1. *PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS HYMAP™*– Para minimizar as variações de iluminação em cada fiada de voo, devido às condições de aquisição, procedeu-se a uma correcção de iluminação nos dados de reflectância utilizando um algoritmo de interpolação polinomial (*software* ENVI 3.5, 1999). Cada uma das fiadas foi georeferenciada e o seu mosaico tem um pixel de 4,1m. O mosaico foi mascarado da vegetação fresca (NDVI), assim como dos corpos de água. As bandas com ruído foram eliminadas, ficando para análise 114 bandas.
2. *ESPECTROS DE CAMPO* – Dos cerca de 100 espectros medidos em diferentes materiais no terreno, foram feitos vários testes e seleccionados os mais significativos, tendo em conta os alvos, as características espectrais e dados complementares de geoquímica, quando presentes, com enfâse para os teores em elementos químicos mais elevados.
3. *MAPEAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS* – O Mapeamento de Ângulo Espectral (MAE) do ENVI 3.5 foi o algoritmo seleccionado, devido à sua relativa insensibilidade a variações de iluminação que ainda subsistiram na imagem. Este algoritmo compara espectros de cada pixel da imagem com espectros de referência que podem ter origem diversa (Kruse *et al*., 1993, Boardman, 1992). Os espectros são tratados como vectores no espaço com dimensão igual ao número de bandas, calculando a semelhança angular entre os espectros de acordo com um dado valor angular pré-definido (*threshold*).

Na imagem hiperespectral o MAE foi utilizado com um ângulo standard, usando como espectros de referência os seleccionados em 2. Os resultados obtidos foram analisados em função das características espectrais das classes definidas e informação adicional de campo. Procedeu-se a um refinamento com uma classificação supervisada em classes heterogéneas e a um agrupamento de classes, em função da semelhança de espectros da imagem e de campo, e renomeação destas de acordo com os teores em elementos químicos.

Aplicação: área mineira de São Domingos

A antiga Mina de São Domingos (MSD) localiza-se no Baixo Alentejo a 60 km a SE de Beja, e integra-se na Faixa Piritosa Ibérica. A exploração a longo termo de sulfuretos maciços polimetálicos com primórdios pré-romanos e romanos (no *gossan*) para Cu, Ag e Au e posteriormente em tempos recentes durante 109 anos para Cu, S e secundariamente Pb, Zn e Au, terminou em 1966 devido ao esgotamento das suas reservas.

A produção de minério foi estimada em mais de 25Mt (Carvalho, 1979, Barriga e Carvalho, 1997), enquanto que as escórias e escombreiras resultantes estão calculadas em alguns milhões de toneladas. A Drenagem Ácida Mineira (DAM) foi significativa, de acordo com o volume de minério explorado e processado, com efeitos que permanecem até hoje. Os efeitos da intervenção passada e a acção actual da DAM na ribeira de S. Domingos são problemáticos, sobretudo na zona onde se localizam vários açudes e na margem esquerda desta ribeira, onde foram construídos canais de distribuição das águas ácidas para evaporação durante a mineração. O desenvolvimento de várias estruturas mineiras para exploração, processamento e transporte do minério, facilitou a dispersão de materiais mineiros e poluentes associados, visíveis numa área aproximada de 50 km^2, abrangendo desde a área de exploração, S. Domingos, até ao Porto do Pomarão no Rio Guadiana. Alguns destes materiais, devido ao teor elevado em enxofre, quando lixiviados pelas águas de precipitação escoadas superficialmente de forma organizada ou desorganizada, possuem um potencial elevado para gerar águas ácidas, constituindo a origem actual da drenagem ácida, e consequentemente facilitando a dissolução e dispersão dos elementos poluentes que possam conter. As áreas de DAM efectiva foram estimadas (Batista *et al*., 2003) com base em dados de campo para um sector da área mineira de S. Domingos, abrangendo a área visível na Figura 1, desde a corta da mina até à zona do Telheiro.

A área total do estudo cobre cerca de 80km^2 e abrange várias estruturas associadas à actividade da mina, desde a zona da corta até ao Porto do Pomarão, onde o minério era escoado, incluindo-se os reservatórios de água, as Tapadas Grande e Pequena, a fábrica de enxofre (na Achada do Gamo) e a área do Telheiro.

Resultados

Os resultados parciais da classificação MAE estão expressos na Figura 1, da imagem hiperespectral, para uma área onde o impacto da actividade mineira é significativo.

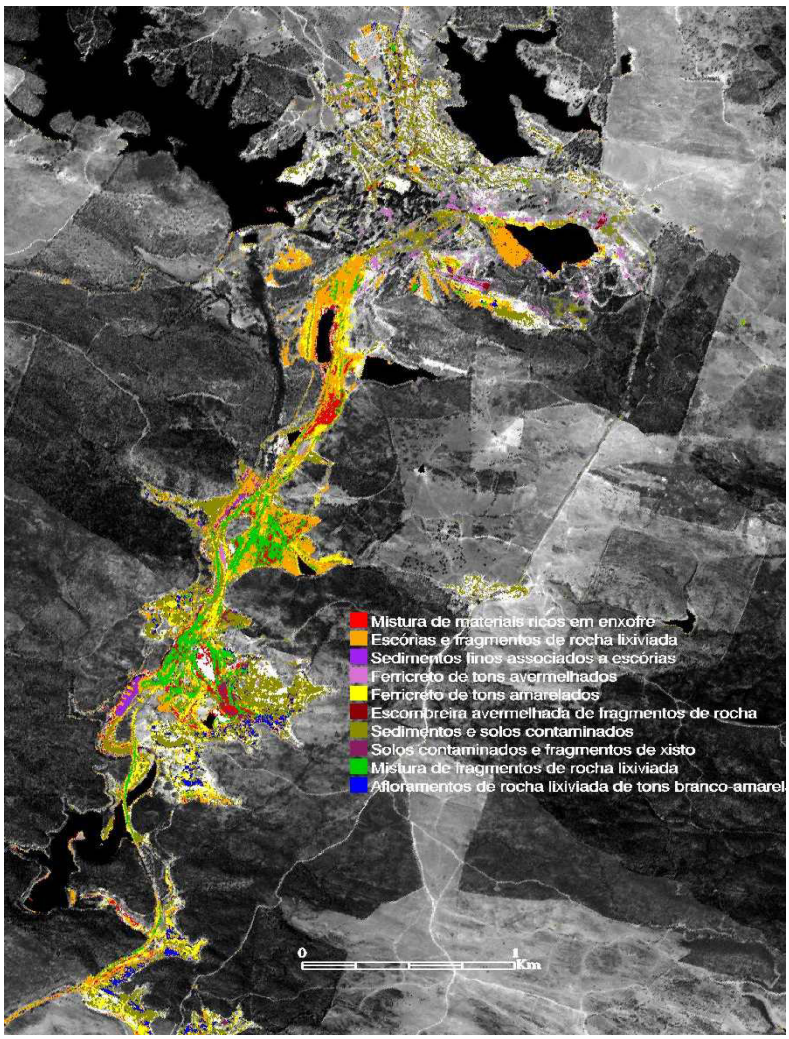

Figura 1. Mapeamento de materiais mineiros com o algoritmo MAE (adaptado de Quental *et al*. 2002b).

Da tipologia definida para materiais contaminados e poluentes, uma das classes mais importantes é a "*mistura de materiais ricos em enxofre"*, para identificar focos de DAM. Estes materiais assinalam sistematicamente a periferia de águas ácidas fluviais, em açudes e represas, e escombreiras e escórias (S. Domingos, Achada e Telheiro) assim como um foco importante em Moitinhos. A distribuição espacial do material "*escórias e fragmentos de rocha lixiviada*" é igualmente significativa e importante para a avaliação da DAM. A área de DAM efectiva foi estimada em Batista *et al*.(2003), tendo-se verificado também a sua dispersão na linha de caminho de ferro do transporte do minério. A classe "*sedimentos finos associados a escórias*", que está associada à anterior, tem características semelhantes, mas apresenta granulometria mais fina e maior teor em água. A classe definida como "*ferricreto de tons avermelhados*" está associada a corpos gossanizados que se encontram na área, possivelmente ricos em óxidos de ferro do tipo hematite e, a classe "*ferricreto de tons amarelados*" estará associada a oxihidróxidos de Fe mais ricos em goethite. Nas restantes classes a designação de "*contaminados*" reporta-se a parâmetros geoquímicos, correspondendo a valores elevados de alguns elementos (Pb, S, As, Sb, Hg, Cu e Zn) que aqueles materiais contêm.

Para a restante área estudada, evidencia-se a dispersão de alguns destes materiais em redor da linha de caminho de ferro e alguns focos mais localizados e que não tinham sido investigados anteriormente. O Porto do Pomarão mostra também uma distribuição de materiais compatível com teores elevados de alguns elementos químicos decorrentes de contaminação, função da descarga e embarque do minério.

Considerações finais

Baseado na resposta espectral e em medições de campo, dos materiais resultantes da actividade mineira foi possivel o mapeamento, utilizando o MAE, de materiais potenciais geradores de DAM e de outros com características de materiais contaminados, os quais foram suportados por dados geoquímicos.

Os resultados obtidos são coerentes com a cartografia de campo realizada pelo BRGM (Quental *et al.*, 2002b) com este objectivo específico, e parcialmente validados com observações de campo, evidenciando as potencialidades das imagens hiperespectrais para discriminar materiais resultantes da actividade mineira. O facto dessa discriminação ser bastante elevada, tendo em conta a resolução espectral e espacial das imagens hiperespectrais, implica, para uma hierarquização do mapeamento obtido, estudos laboratoriais, geoquímicos e espectrais, mais pormenorizados pois que, o sistema químico desta área é bastante complexo e está em constante evolução desde o abandono da actividade mineira.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. Hartmut Mollat a disponibilidade e sugestões na aquisição de dados espectro-radiométricos de campo realizada pelo BGR no âmbito do projecto Mineo.

Bibliografia

Boardman J. W. (1992) - SIPS User´s Guide Spectral Image Processing, Version 1.2., *Center for the Study of Earth from Space*, Boulder, CO, 88 p.

Barriga & Carvalho (1997) - Geology and VMS deposits of the Iberian Pyrite Belt. SEG, *Neves Corvo field conference*.

Batista, M. J.; Quental, L.; Sousa, A. J.; Abreu, M. M.; Brito, M. G. & Vairinho, M. (2003) - Avaliação da contaminação mineira por drenagem ácida por modelação em SIG: S. Domingos, Faixa Piritosa, Alentejo, *VI Congresso Geologia*, Lisboa.

Carvalho, D. (1979) - Geologia, metalogenia e metodologia da investigação de sulfuretos polimetálicos do sul de Portugal. *Comunicações Serviços Geológicos Portugal,* t. 65: 169-191.

COBA Consultores de Engenharia e Ambiente (2002) - Estudo de controlo ambiental na mina abandonada de S. Domingos. *Relatório final para Instituto Geológico Mineiro*.

ENVI (1999) - ENVI Users Guide, *Research Systems Inc*.

Kruse, F. A.; Lefkoff, A. B.; Boardman, J. B.; Heidebrecht, K. B.; Shapiro, A. T.; Barloon, P. J. & Goetz, A. F. H. (1993) - The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data: *Remote Sensing Environment*, v. 44: 145-163.

Quental, L.; Bourguignon, A.; Batista, M. J.; Brito, G.; Abreu, M. M.; Vairinho, M.; Sousa, A. J. & Cottard, F. (2002a) - MINEO Southern environment test site. Contamination/impact mapping and modelling, *Final report European Comission*, 71 p.

Quental, L.; Abreu M. M.; Oliveira, V.; Sousa, P.; Batista, M. J.; Brito, G.; Vairinho, M.; Sousa, J. & Martins, L. (2002b) - Imagens hiperespectrais para avaliação e monitorização ambiental em áreas mineiras: resultados preliminares do projecto MINEO na Mina de São Domingos, Alentejo, *In* J. Brandão (Ed.) *Actas Congresso Internacional sobre Património Geológico e Mineiro*, Museu Geológico e Mineiro de Lisboa, Beja: 583-595.

Silva, J. B; Oliveira, V.; Matos, J. & Leitão, J. C. (1997) - Field trip 2, Aljustrel and the Central Iberian Pyrite Belt.

Zhang, B.; Wang, X.; Liu, J.; Zheng, L. & Tong, Q. (2000) - Hyperspectral Image processing and analysis system (HIPAS) and its applications, *Photogrammetric Engineering Remote Sensing,* Vol. 66, No. 5, 2000: 605-609.