

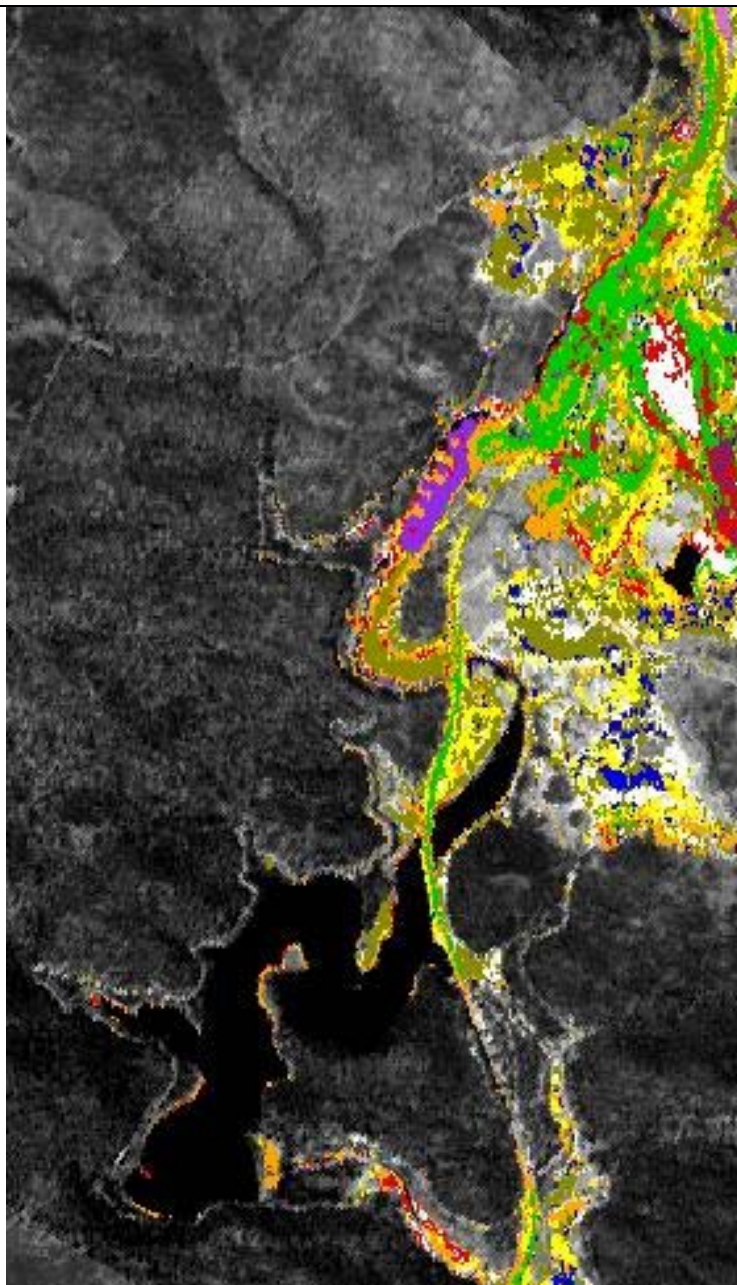
# MINEO

IST-1999-10337

*Assessing and monitoring the environmental impact of mining activities in Europe using advanced Earth Observation techniques*

Duração: 01/01/00 a 31/06/03

Coordenação: *Bureau de Reserche Geologiques et Minières*

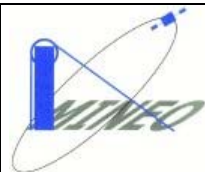
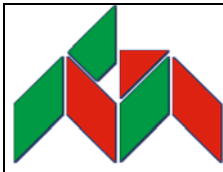


**Síntese de resultados e perspectivas do Projecto MINEO em Portugal (S.Domingos)**

**Lídia Quental  
18/12/03  
Relatório interno IGM**

**Projecto co-financiado pela Comunidade Europeia / Programa "Information Society Technology" (1998-2002)**





## Resumo Executivo

Este documento enquadra os objectivos e metodologias desenvolvidas no projecto MINEO e refere-se em particular aos principais resultados obtidos em Portugal, assim como algumas perspectivas pós-MINEO.

### PROJECTO MINEO

O projecto MINEO ([www.brgm.fr/mineo](http://www.brgm.fr/mineo)) teve por objectivo geral o desenvolvimento de ferramentas e metodologias utilizando técnicas avançadas de **Observação da Terra (OT)**, i.e. imagens hiperespectrais, de modo a avaliar e monitorizar diferentes tipos de contaminação em ambientes mineiros.

O MINEO desenvolveu-se na estrutura dos *EuroGeoSurveys*, coordenado pelo BRGM, englobando também instituições ambientais, mineiras e espacial. As metodologias propostas foram testadas em seis áreas que reflectem a diversidade climática, geográfica, mineira e sócio-económica da Europa.

Os objectivos estratégicos foram os de desenvolver os componentes de um instrumento de decisão futura possível, para uso no planeamento ambiental e para disseminação de conhecimento e tomada de consciência do papel que pode ser desempenhado pelos dados de OT neste processo.

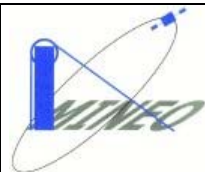
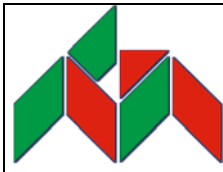
Nos objectivos científicos pretendeu-se:

- i) Desenvolver métodos avançados para extracção de informação e conhecimento dos dados de OT, que serão necessários no futuro de modo a fornecer à UE e utilizadores (industriais, gestores), *layers* temáticos e actualizados para uma base de dados ambiental relacionada com áreas mineiras, quer estejam inactivas, quer em exploração ou em planeamento, e incrementar instrumentos operacionais para preparar e actualizar estes *layers*;
- ii) Desenvolver componentes-chave de instrumentos de decisão necessários para explorar informação e conhecimento de OT na gestão de sistemas ambientais e facilitar o seu uso em sistemas de informação sustentáveis para localizar e monitorizar riscos ambientais relacionados com áreas mineiras europeias e auxiliar nos processos de decisão em gestão ambiental.

De modo a desenvolver as técnicas de OT e métodos para contribuir para a avaliação de impacto ambiental em áreas mineiras, o trabalho consistiu em desenvolvimentos metodológicos nos vários ambientes europeus que incluíram:

- i) Aquisição de dados hiperespectrais aerotransportados
- ii) Aquisição de dados de Detecção Remota convencionais
- iii) Medições espectro-radiométricas no terreno concomitantes com a aquisição de dados hiperespectrais aerotransportados, para calibração e interpretação, incluindo cartografia específica e colheita de águas, solos e materiais de áreas poluídas e contaminadas
- iv) Estudo do estado ambiental dos sítios teste usando técnicas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG)
- v) Desenvolvimento de técnicas de processamento de imagem específicas para detecção de poluentes e cartografia da contaminação
- vi) Integração em SIG, desenvolvimento de ferramentas SIG, métodos geoestatísticos e ferramentas analíticas para compreensão e modelação da dinâmica de processos poluentes

Esta sequência de passos permitiu o desenvolvimento de ferramentas genéricas entre as quais a geração de uma biblioteca espectral de áreas mineiras contaminadas, produtos e ferramentas em SIG e outros específicos para utilizadores da comunidade para fornecer ferramentas de suporte, assim como simulação de sensor hiperespectral de satélite para aquisição espacial futura global.



IST – 1999 – 10337

*Síntese de resultados e perspectivas do Projecto MINEO em Portugal (S.Domingos)*

## RESULTADOS EM PORTUGAL

### SÍTIO TESTE PORTUGUÊS: MINA DE S.DOMINGOS

A área seleccionada para estudo em Portugal, a Mina de S.Domingos, localiza-se no Baixo Alentejo a 60 km a SE de Beja. A exploração a longo termo de sulfuretos maciços polimetálicos, com primórdios pré-romanos e romanos, para Cu, Ag e Au e posteriormente em tempos recentes durante 109 anos para Cu e S, terminou em 1966 devido ao esgotamento das suas reservas.

A produção de minério foi estimada em mais de 25Mt, enquanto que as escórias e escombrelas 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, 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.

### DADOS DE TERRENO

Com o objectivo de avaliação ambiental, correlação e validação dos dados aéreos, colheram-se dados no terreno de origem diversa (rochas, solos, águas, vegetação, eflorescências salinas e medições espectrais) relevantes para avaliação e definição de poluentes em seis subáreas. Obtiveram-se dados laboratoriais (solos e sedimentos) de geoquímica multielementar, pH, carbono orgânico, Fe livre total e mineralogia, assim como medições nas águas de pH, Eh e hidrogeoquímica em outros locais de amostragem.

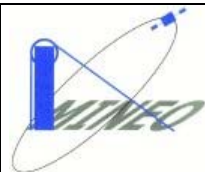
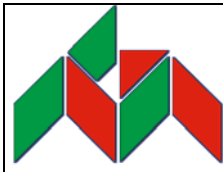
No tratamento dos dados de solos e sedimentos utilizou-se Análise em Componentes Principais (ACP) para redução do volume de dados e métodos de interpolação geoestatísticos para cartografia geoquímica, com o objectivo de melhorar a identificação e interpretação dos padrões geoquímicos e anomalias significativas relacionadas com problemas ambientais ou teor de fundo litológico. Este trabalho, além dos estudos realizados nas águas e outros dados suplementares, permitiu a concepção de um modelo ambiental para esta área mineira, o qual foi fundamental para a abordagem desenvolvida em Processamento de Imagem, quer na fase inicial utilizando dados de campo, i.e. medições espectro-radiométricas, quer na fase final para validação dos resultados obtidos (dados geoquímicos e mineralógicos, além da cartografia de campo de materiais mineiros) na classificação das imagens hiperespectrais.

### OBJECTIVOS ESPECÍFICOS

Considerando o historial da área mineira de S.Domingos, um dos objectivos fundamentais na utilização das imagens hiperespectrais, era o de detectar evidências superficiais de DAM e poluentes associados.

### BIBLIOTECA ESPECTRAL DO MINEO (MSL)

Concebida e desenvolvida pelo BGR constitui uma base de dados espectral à escala europeia para áreas mineiras contaminadas que foi preenchida com dados espectrais de cada um dos sítios teste. As assinaturas espectrais, reflectância e radiância, têm origem em dados aéreos, *Hymap<sup>TM</sup>*, de campo ou de laboratório ao quais se encontra associada outro tipo de informação. A MSL tem funcionalidades que facilitam a gestão, comparação, busca e re-estabelecimento de espectros, de acordo com as características espectrais, traços superficiais, localização e condições climáticas. No caso do S.Domingos, um total de 560 espectros obtidos com espectro-radiómetros GER MARK V e PIMA



IST – 1999 – 10337

Síntese de resultados e perspectivas do Projecto MINEO em Portugal (S.Domingos)

compreenderam as principais categorias de materiais (classificação da área de medição): depósitos aluviais, detritos mineiros, materiais mistos, afloramentos de rocha, vegetação e superfícies rochosas.

### PROCESSAMENTO DE IMAGEM

O processamento (utilizando *software* ENVI da *Research Systems*) das imagens hiperespectrais do sensor aerotransportado *HyMap*<sup>TM</sup> (450-2500nm, 126 bandas) obtidas em Agosto de 2000 permitiu identificar evidências superficiais químicas e mineralógicas de DAM associada à dispersão dos materiais mineiros, seguindo duas abordagens:

- i) uma relacionada com a DAM das assinaturas espectrais de campo dos materiais mineiros e
- ii) outra baseada em assinaturas de minerais geradores de DAM de bibliotecas espectrais estandardizadas (USGS).

Em i), a extensão dos materiais mineiros relacionados com a DAM foi obtida utilizando assinaturas espectrais locais como referência e comparando-as com as assinaturas equivalentes na imagem através de um algoritmo denominado *Spectral Angle Mapper* (SAM) inserido no *software* ENVI. A metodologia desenvolvida pode ser sintetizada como a combinação de dois algoritmos de classificação, após uma fase de processamento utilizando apenas informação da imagem. Na classificação, embora os materiais contenham em geral um teor significativo de poluentes como o S, Zn, Pb, Sb, Cu, As, Hg and Cd, as primeiras classes definem o potencial gerador de acidez destes materiais, os quais foram correlacionados com valores baixos de pH da água. Estes resultados permitem a delimitação de áreas mais problemáticas para medidas de segurança e/ou de remediação. Esta metodologia foi aplicada a imagens multiespectrais de satélite, Landsat ETM+. Estes testes, embora com carácter preliminar, evidenciam as limitações destas imagens para estudos de carácter mais localizado quando comparadas com as hiperespectrais *HyMap*<sup>TM</sup>.

Em ii), a extensão dos minerais geradores de DAM foi obtida utilizando medições espectrais estandardizadas de laboratório (Biblioteca espectral mineral do USGS). Baseado num algoritmo conjunto *Mixture Tuned Matched Filtering* e SAM foi possível delinear a localização de solos contaminados contendo copiapite, jarosite, goethite, hematite e alunite. Cartografar a jarosite e alunite permite reconhecer áreas que ainda são activas na produção de drenagem ácida.

### MODELAÇÃO EM SIG

A modelação em SIG pretendeu definir áreas de poluição pela integração de parâmetros ambientais relevantes, tais como teor geoquímico de solos, pH da água e informação hiperespectral, utilizando metodologias geoestatísticas.

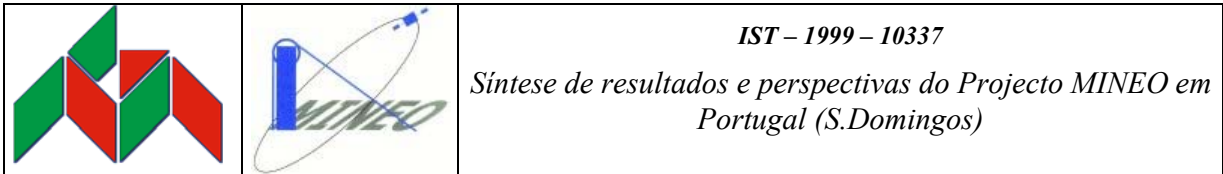
Na modelação utilizando dados geoquímicos de solos e dados hiperespectrais o objectivo fundamental foi definir mapas de poluentes geoquímicos utilizando dados de terreno e dados remotos hiperespectrais de registo contínuo. Este objectivo é alcançado pela estimação das concentrações de elementos químicos, usando factores de maior correlação entre as imagens e os dados geoquímicos de terreno (método de interpolação- cokrigagem).

A cartografia superficial das áreas de influência da drenagem ácida foi produzida pela estimação dos valores de pH de forma a integrar a influência da proximidade dos locais de acumulação de materiais mineiros na variação espacial dos valores de pH. O método geoestatístico utilizado foi a *cokrigagem co-localizada*. Esse algoritmo permite a predição de áreas de Drenagem Ácida Mineira.

### TRABALHOS FUTUROS

A utilização de imagens hiperespectrais para detecção de contaminação em ambientes mineiros constituiu uma linha de investigação inovadora e que abre potencialidades importantes de aplicação futura de técnicas avançadas de OT.





Os mapas de contaminação obtidos com o processamento de imagens hiperespectrais levam a considerar esta técnica como promissora e bastante positiva para a avaliação de poluentes em áreas mineiras. Para consolidar o trabalho executado, assim como para otimizar a utilização de dados de OT, várias questões que derivaram do projecto devem ser analisadas.

Uma questão fundamental está relacionada com dois aspectos que tornam dispendiosa e morosa a utilização de dados hiperespectrais para monitorização ambiental, nomeadamente a aquisição de dados multitemporais aerotransportados e correcções atmosféricas. Estes dois aspectos serão investigados no âmbito de uma tese de doutoramento tendo como linha de base os resultados obtidos no projecto MINEO e como objectivo principal a optimização da utilização de dados de OT na detecção de contaminação mineira, recorrendo a metodologias geoestatísticas e de processamento de imagem.

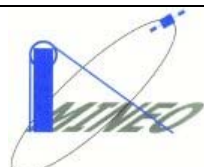
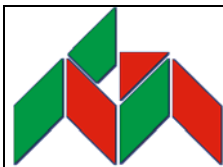
Outras potenciais áreas de investigação englobam:

- i) Correlação da informação contida na MSL com dados mineralógicos de campo e com bibliotecas espectrais estandardizadas para evidenciar as diferenças mineralógicas associadas a áreas afectadas pela DAM e posterior processamento de imagem.
- ii) Desenvolvimentos em ambiente SIG, modelando vários *layers* de informação de tratamento de dados ambientais, geoquímicos e hidrogeoquímicos com os resultados obtidos (e a obter) da classificação hiperespectral, na sequência dos que já foram realizados.
- iii) Utilização de dados de vegetação (informação espectral de terreno e aerotransportada, e de parâmetros ambientais de campo) para detecção do *stress* da vegetação na envolvente de áreas mineiras.

As técnicas de processamento de imagem desenvolvidas poderão ser investigadas para objectivos não directamente ambientais. Nomeadamente, os algoritmos desenvolvidos poderão ser testados em imagens de satélite e adaptados com o objectivo de inventariação, prospecção e revelação de recursos minerais conjuntamente com outros *layers* de informação. Outra possibilidade é o processamento de imagens hiperespectrais como contribuição para a cartografia geológica da área, pela introdução da componente mineralógica utilizando bibliotecas espectrais estandardizadas.

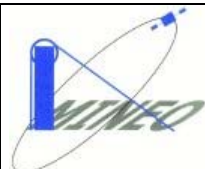
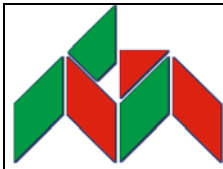
Algumas actividades de demonstração, uso e disseminação previstas incluem:

- i) Utilização de Biblioteca espectral do MINEO (MSL) em diferentes projectos
- ii) Propostas de remediação e medidas de segurança
- iii) Contributo para musealização de área mineira
- iv) Apresentação de resultados e ferramentas
- v) Propostas para aplicação da metodologia desenvolvida a vários sítios teste portugueses relacionadas com a missão do IGM e EXMIN



## Índice

<b>1. Introdução</b>	<b>8</b>
<b>2. Objectivos e metodologias gerais do Mineo</b>	<b>8</b>
2.1. Objectivos gerais	8
2.2. Objectivos estratégicos	8
2.3. Descrição do trabalho	9
2.4. Consórcio MINEO	10
2.5. Financiamento	11
<b>3. Resultados obtidos em Portugal</b>	<b>12</b>
3.1. Sítio Teste Português: Mina de S. Domingos, Alentejo	12
3.2. Avaliação ambiental global /Dados de terreno	14
3.3. Objectivos específicos em S.Domingos	14
3.4. Biblioteca espectral do MINEO	14
3.5. Processamento de imagens hiperespectrais	16
3.6. Metodologia comparativa de processamento hiperespectral/multiespectrais	17
3.7. Modelação em SIG	20
3.7.1. Modelação utilizando dados geoquímicos de solos e dados hiperespectrais	21
3.7.2. Modelação utilizando dados geoquímicos de águas e resultados de classificação hiperespectral	21
3.8. Trabalhos produzidos	23
3.8.1. Técnico-científicos	23
3.8.2. Gestão e financeiros	24
3.8.3. Actividades de divulgação	24
<b>4. Perspectivas e desenvolvimentos futuros</b>	<b>25</b>
4.1. Trabalhos a desenvolver- Investigação	25
4.1.1. Relações internacionais decorrentes do projecto	27
4.1.2. Outros trabalhos	27
4.2. Uso e disseminação de resultados do projecto MINEO	27
4.2.1. Interação com entidades locais	28



## Lista de Figuras

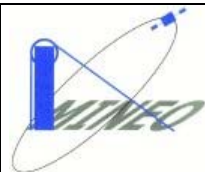
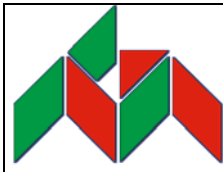
Figura 1. Metodologia geral do projecto Mineo ( <a href="http://www.brgm.fr/mineo/project1.htm">http://www.brgm.fr/mineo/project1.htm</a> ). .....	10
Figura 2. Entidades do Consórcio MINEO. ....	11
Figura 3. Financiamento do Projecto MINEO a)Valor total do projecto por participante b)Discriminação por itens do IGM. ....	11
Figura 4. Área de estudo seleccionada. ....	13
Figura 5. Menus do software MSL. ....	15
Figura 6. Reflectância (nm) de alguns materiais mineiros medidos com espectro-radiómetro .....	16
Figura 7. Cartografia (parcial) de contaminação mineira (esquerda) utilizando fundamentalmente o algoritmo SAM tendo como espectros de referência os de campo (direita). Os materiais mais importantes geradores de Drenagem Ácida Mineira, estão primeiramente correlacionados com “materiais mistos de enxofre”( a vermelho). ....	18
Figura 8. Detecção de minerais geradores de Drenagem Ácida Mineira. Resultados obtidos pela intersecção dos algoritmos SAM e MTFM utilizando bibliotecas standardizadas (USGS). Linhas correspondem a cartografia de campo (legenda inferior). ....	19
Figura 9. Resultados da classificação de contaminação mineira HyMap™ (esquerda) e Landsat ETM+(direita) utilizando a mesma metodologia. ....	20
Figura 10. Mapa de predição do Cu na subárea de S. Domingos por krigagem ordinária (esquerda) e por cokrigagem (direita). ....	21
Figura 11. Indicador “cokrigagem co-localizada” do pH da água com a distância mais próxima aos “materiais mistos de enxofre” da classificação hiperespectral de materiais mineiros (correlação mais alta) que permite a predição de áreas de Drenagem Ácida Mineira. ....	22

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Medições espectro-radiométricas. ....	16
Tabela 2: Actividades previstas pós-MINEO. ....	28

### Lista de apêndices

Apêndice. 1 – Participantes, respectivas instituições e tarefas nos trabalhos realizados em Portugal. ....	29
--	----



## 1. INTRODUÇÃO

O Projecto *Assessing and Monitoring the Environmental Impact of Mining in Europe using Advanced Earth Observation Techniques* (MINEO) teve por objectivo geral o desenvolvimento de ferramentas e metodologias utilizando técnicas avançadas de Observação da Terra (OT), i.e. imagens hiperespectrais, de modo a avaliar e monitorizar diferentes tipos de contaminação em ambientes mineiros. Este tipo de imagens caracteriza-se por uma resolução espectral elevada, permitindo distinguir características mineralógicas e/ou geoquímicas dos materiais, muito para além das potencialidades dos sensores multiespectrais convencionais.

Financiado parcialmente pelo V Programa Quadro de Investigação e coordenado pelo *Bureau de Reserche Geologique e Minière (BRGM)*, o projecto MINEO ([www.brgm.fr/mineo](http://www.brgm.fr/mineo)) desenvolveu-se na estrutura dos *EuroGeoSurveys*, uma associação de instituições geológicas e mineiras europeias. No total o projecto MINEO englobou 11 instituições, entre geológicas (*EuroGeoSurvey*), ambientais e espacial, assim como empresas mineiras. As metodologias propostas foram testadas em seis sítios teste reflectindo a diversidade climática, geográfica, mineira e sócio-económica da Europa.

Esta síntese enquadra os objectivos e metodologias desenvolvidas no projecto MINEO e refere-se em particular aos principais resultados obtidos em Portugal no sítio teste português a Mina de S.Domingos. São abordadas algumas perspectivas futuras decorrentes do referido projecto.

Este documento baseia-se quer na proposta original do projecto à Comissão Europeia (CE), quer em relatórios e artigos produzidos essencialmente no âmbito do projecto MINEO.

## 2. OBJECTIVOS E METODOLOGIAS GERAIS DO MINEO

### 2.1. Objectivos gerais

A gestão responsável do ambiente terrestre é hoje uma das preocupações mais prementes. Uma gestão ambiental completa das actividades mineiras evita custos elevados de remediação, que frequentemente escoam de fundos públicos. Compreender e monitorizar processos de poluição em áreas mineiras é pois do interesse de uma comunidade vasta, incluindo órgãos centrais de governo ou agências, autoridades locais, indústria, grupos ambientais ou indivíduos.

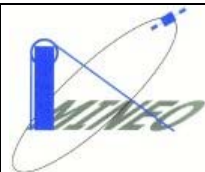
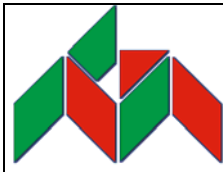
**O objectivo geral do projecto foi o desenvolvimento de métodos de Observação da Terra (OT) hiperespectrais, que possam ser usados para medir e monitorizar minas e poluição a um custo menos dispendioso do que os padrões que se verificam na União Europeia (UE).**

### 2.2. Objectivos estratégicos

A actividade mineira e a indústria extractiva contribuem com cerca de 7% do PIB da UE e fornecem materiais brutos para todas as outras indústrias da UE, quer a nível local, quer regional e à escala UE. No entanto, a indústria mineira europeia enfrenta uma crescente pressão ambiental e controlos legislativos. Industriais e gestores necessitam de instrumentos inovadores a custos eficazes, para aquisição de dados ambientais e processamento que forneçam uma base sólida para um diálogo que garanta o desenvolvimento económico sustentável da indústria mineira.

**Os objectivos estratégicos deste Projecto foram os de desenvolver os componentes de um instrumento de decisão futura possível, para uso no planeamento ambiental e para disseminação de conhecimento e tomada de consciência do papel que pode ser desempenhado pelos dados de OT neste processo.**





### **Objectivos científicos**

O projecto MINEO pretendeu:

- i) Desenvolver métodos avançados para extracção de informação e conhecimento dos dados de OT, que serão necessários no futuro de modo a fornecer à UE e utilizadores (industriais, gestores), *layers* temáticos e actualizados para uma base de dados ambiental relacionada com áreas mineiras, quer estejam inactivas, quer em exploração ou em planeamento, e incrementar instrumentos operacionais para preparar e actualizar estes *layers*;
- ii) Desenvolver componentes-chave de instrumentos de decisão necessários para explorar informação e conhecimento de OT na gestão de sistemas ambientais e facilitar o seu uso em sistemas de informação sustentáveis para localizar e monitorizar riscos ambientais relacionados com áreas mineiras europeias e auxiliar nos processos de decisão em gestão ambiental.

A Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) e a Gestão de Planos Ambientais (GPA) podem obter vantagens de *layers* de bases de dados ambientais regularmente actualizados, relacionados com ambientes mineiros. Dados de OT, quando integrados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e combinados com outros dados relevantes para interesses ambientais, mostraram-se valiosos na avaliação de impactos ambientais em minas, quer à escala local, quer à escala regional. Em particular, eles podem ser usados na produção de mapas de risco de poluição em redor de áreas mineiras. As vantagens principais de futuras imagens de satélite são a redução de métodos convencionais, como a amostragem de campo, morosos e dispendiosos, assim como a sua capacidade de adquirir dados sucessivos e conseqüentemente monitorizar a poluição mineira.

Por este motivo, foi proposto desenvolver a contribuição das várias OT mais longe. Os sensores hiperespectrais mais avançados aerotransportados foram usados para detectar poluição mineira e contaminação de solos e aquíferos. Em particular, as suas capacidades na detecção e discriminação dos poluentes maiores foi avaliada e validada durante as campanhas de campo.

A aquisição regular de tal informação geográfica baseada em detecção remota de alta resolução ajudará a UE a organizar a gestão ambiental de um modo sustentável, realista e coerente e desenvolver estratégias de monitorização à escala europeia

***Para empreender os desenvolvimentos propostos, seis áreas mineiras, cinco na Europa (Portugal, Reino Unido, Alemanha, Áustria e Finlândia) e uma na Gronelândia, foram seleccionadas para investigação de modo a reflectirem a diversidade ambiental, climática, geográfica e sócio-económica da Europa.***

### **2.3. Descrição do trabalho**

De modo a desenvolver as técnicas de OT e métodos para contribuir para a avaliação de impacto ambiental em áreas mineiras, o trabalho consistiu em desenvolvimentos metodológicos nos vários ambientes europeus que incluíram:

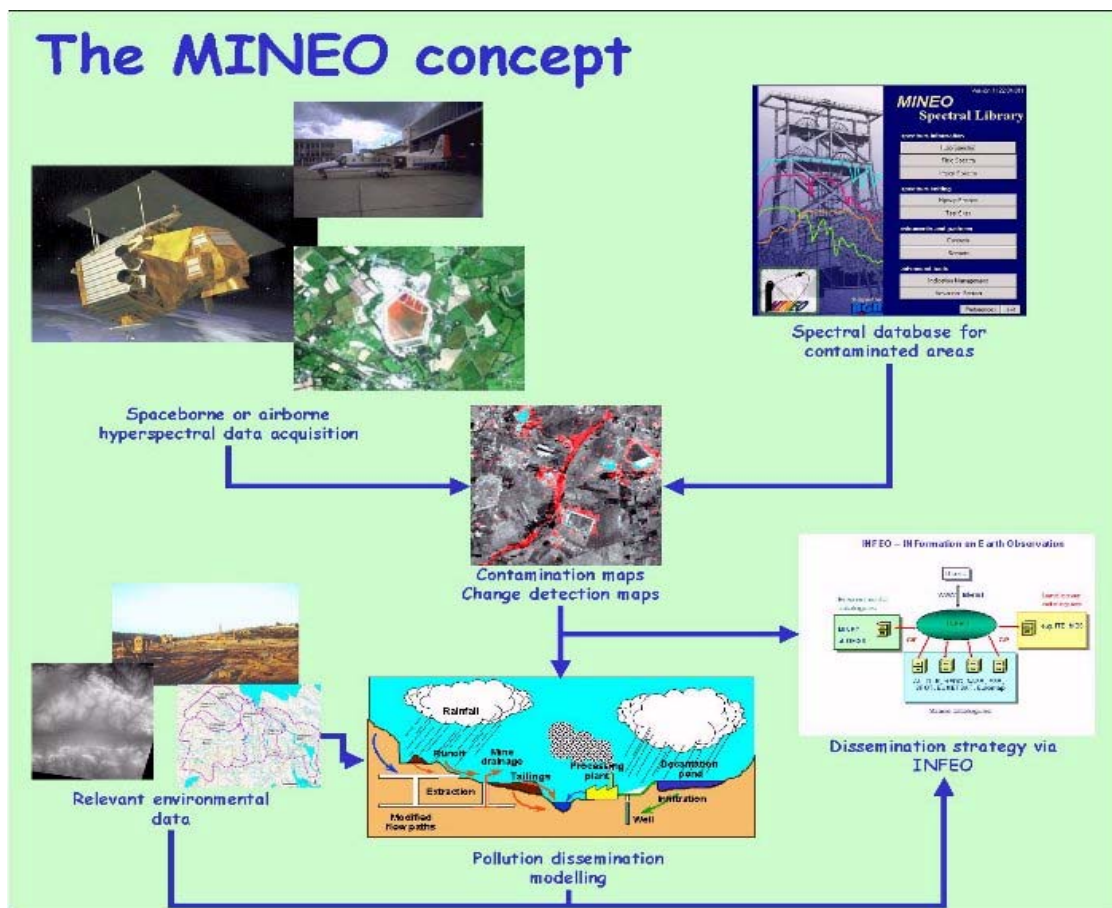
- i) aquisição de dados hiperespectrais aerotransportados
- ii) aquisição de dados de Detecção Remota convencionais
- iii) medições espectro-radiométricas no terreno concomitantes com a aquisição de dados hiperespectrais aerotransportados, para calibração e interpretação, incluindo cartografia específica e colheita de águas, solos e materiais de áreas poluídas e contaminadas
- iv) estudo do estado ambiental dos sítios teste usando técnicas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

- i) desenvolvimento de técnicas de processamento de imagem específicas para detecção de poluentes e cartografia da contaminação
- ii) integração em SIG, desenvolvimento de ferramentas SIG, métodos geoestatísticos e ferramentas analíticas para compreensão e modelação da dinâmica de processos poluentes

Esta sequência de passos permitiu o desenvolvimento de ferramentas genéricas:

- iii) geração de uma biblioteca espectral de áreas contaminadas mineiras (*Mineo Spectral Library*, MSL)
- iv) produtos e ferramentas em SIG e outros específicos para utilizadores da comunidade para fornecer ferramentas de suporte
- v) simulação de sensor hiperespectral de satélite para aquisição espacial futura global

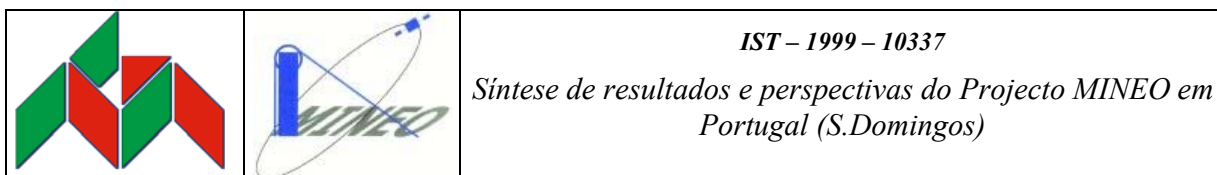
A sequência metodológica do Projecto MINEO está sintetizada na Figura 1.



**Figura 1. Metodologia geral do projecto Mineo (<http://www.brgm.fr/mineo/project1.htm>).**

## 2.4. Consórcio MINEO

Os participantes do projecto MINEO formaram legalmente um consórcio que engloba as instituições expressas na Figura 2. O IGM teve como subcontratados o Instituto Superior Técnico, centro de Valorização de Recursos Minerais (IST/CVRM), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Centro de Investigação em Geociências Aplicadas (FCTUNL/CIGA) e Instituto Superior de Agronomia, Departamento de Ciências do Ambiente (ISA/DCA) para apoio e execução de alguns trabalhos. Outras tarefas foram executadas em conjunto com alguns participantes do Consórcio.



IST – 1999 – 10337

Síntese de resultados e perspectivas do Projecto MINEO em Portugal (S.Domingos)

No Apêndice 1 discrimina-se a participação nacional e internacional em várias actividades que ocorreram em Portugal ou de dados relativos a S.Domingos.

PARTICIPANTES	ACRÓNIMO	PAÍS
<b>COORDENAÇÃO DO PROJECTO</b> Bureau de Recherches Géologiques et Minières	<b>BRGM</b>	<b>FRANÇA</b>
<b>Geologian Tutkimuskeskus</b>	<b>GTK</b>	<b>FINLÂNDIA</b>
<b>Geologische Bundesanstalt</b>	<b>GBA</b>	<b>ÁUSTRIA</b>
<b>Natural Environment Research Council</b>	<b>NERC (BGS)</b>	<b>REINO UNIDO</b>
<b>Danmarks og Groenlands Geologiske Undersoegelse</b>	<b>GEUS</b>	<b>DINAMARCA</b>
<b>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe</b>	<b>BGR</b>	<b>ALEMANHA</b>
<b>Instituto Geologico e Mineiro</b>	<b>IGM*</b>	<b>PORTUGAL</b>
<b>Deutsche Steinkohle AG</b>	<b>DSK</b>	<b>ALEMANHA</b>
<b>Joint Research Centre/Space Applications Institute</b>	<b>JRC/SAI/SSSA</b>	<b>ITÁLIA</b>
<b>Mondo Minerals Oy</b>	<b>MM</b>	<b>FINLÂNDIA</b>
<b>Danmarks Miljøundersoegeler</b>	<b>NERI</b>	<b>DINAMARCA</b>

*EuroGeoSurveys* *Empresas mineiras privadas* *Instituto de Investigação ambiental* *Instituto de Investigação espacial*

\*SUBCONTRATADOS: IST/CVRM, FCTUNL/CIGA, ISA/DCA

Figura 2. Entidades do Consórcio MINEO.

## 2.5. Financiamento

Os custos totais do projecto MINEO estão discriminados por participantes e respectiva contribuição da CE (de acordo com o penúltimo ajuste financeiro) inserida no V Programa Quadro de Investigação na Figura 3a) e nos vários itens relativos ao IGM na Figura 3b).

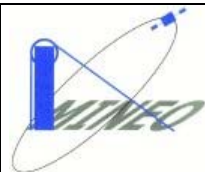
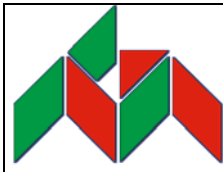
Participantes	Custos Totais (Euros)	Contribuição Comunidade (Euros)
BRGM	524,971	208,736
GTK	517,824	206,117
GBA	368,050	174,774
NERC (BGS)	231,471	103,686
GEUS	249,805	105,621
BGR	269,983	124,105
<b>IGM</b>	<b>392,758</b>	<b>186,560</b>
DSK	391,631	163,937
JRC/SAI/SSSA	77,674	36,524
MM	0	0
NERI	193,131	79,408
<b>TOTAL</b>	<b>3,217,298</b>	<b>1,389,468</b>

a)

Itens	IGM (Euros)
<b>Pessoal</b>	165,531
<b>Deslocações subsistência</b>	20,111
<b>Consumíveis</b>	19,200
<b>Subcontratos (incluindo voo aéreo e sensor)</b>	110,504
<b>Outros custos específicos</b>	38,131
<b>Overheads</b>	39,281
<b>Total</b>	<b>392,758</b>

b)

Figura 3. Financiamento do Projecto MINEO a) Valor total do projecto por participante b) Discriminação por itens do IGM.



IST – 1999 – 10337

*Síntese de resultados e perspectivas do Projecto MINEO em Portugal (S.Domingos)*

Uma fonte adicional de financiamento para a execução dos trabalhos foi obtida através do projecto *AVALIAÇÃO GEOESTATÍSTICA DO RISCO AMBIENTAL DE MINAS ABANDONADAS UTILIZANDO DETECÇÃO REMOTA E BIOMONITORES* (GEOMIN, Referência: POCTI /ECM/34784/1999). A coordenação é do IST/CVRM. Além do IGM participam igualmente a FCTUNL/CIGA e o Museu Laboratório e Jardim Botânico (MLJB). O GEOMIN iniciou-se em Janeiro de 2001 e está em curso até final de Dezembro de 2003, possivelmente com extensão. Este projecto, além do carácter mais local e objectivos mais restritos, distingue-se fundamentalmente dos objectivos nacionais do MINEO nos seguintes tópicos:

- i) as imagens utilizadas serem multiespectrais;
- ii) ser dado ênfase à metodologia geoestatística e
- iii) utilização de biomonitores

O financiamento é pela *Fundação para a Ciência e Tecnologia* e montante envolvido é de 12 000 euros, correspondendo o financiamento relativo ao IGM a 2 940 euros.

### **3. RESULTADOS OBTIDOS EM PORTUGAL**

Os resultados descritos nesta secção são extraídos e/ou adaptados dos vários trabalhos que resultaram no âmbito do projecto (Secção 3.8.) cujos participantes e respectivas actividades estão discriminados no Apêndice 1.

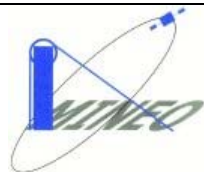
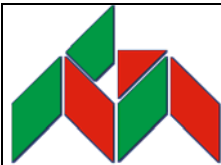
#### **3.1. Sítio Teste Português: Mina de S. Domingos, Alentejo**

A área seleccionada para o Projecto MINEO 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, enquanto que as escórias e escombrelas 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 (caminho de ferro), facilitou a dispersão de materiais mineiros e poluentes associados, visíveis numa área aproximada de 50 km<sup>2</sup>, 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.

A área total de estudo seleccionada para o Projecto MINEO abrange as estruturas significativas associadas à actividade da Mina de S.Domingos (MSD), que vão desde a própria mina incluindo os reservatórios de água a N, Tapadas Grande e Pequena, a fábrica de enxofre (Achada do Gamo), até ao Porto do Pomarão, onde o minério era transportado e posteriormente embarcado, cobrindo uma área com cerca de 80km<sup>2</sup> (Figura 4).





IST – 1999 – 10337

Síntese de resultados e perspectivas do Projecto MINEO em Portugal (S.Domingos)

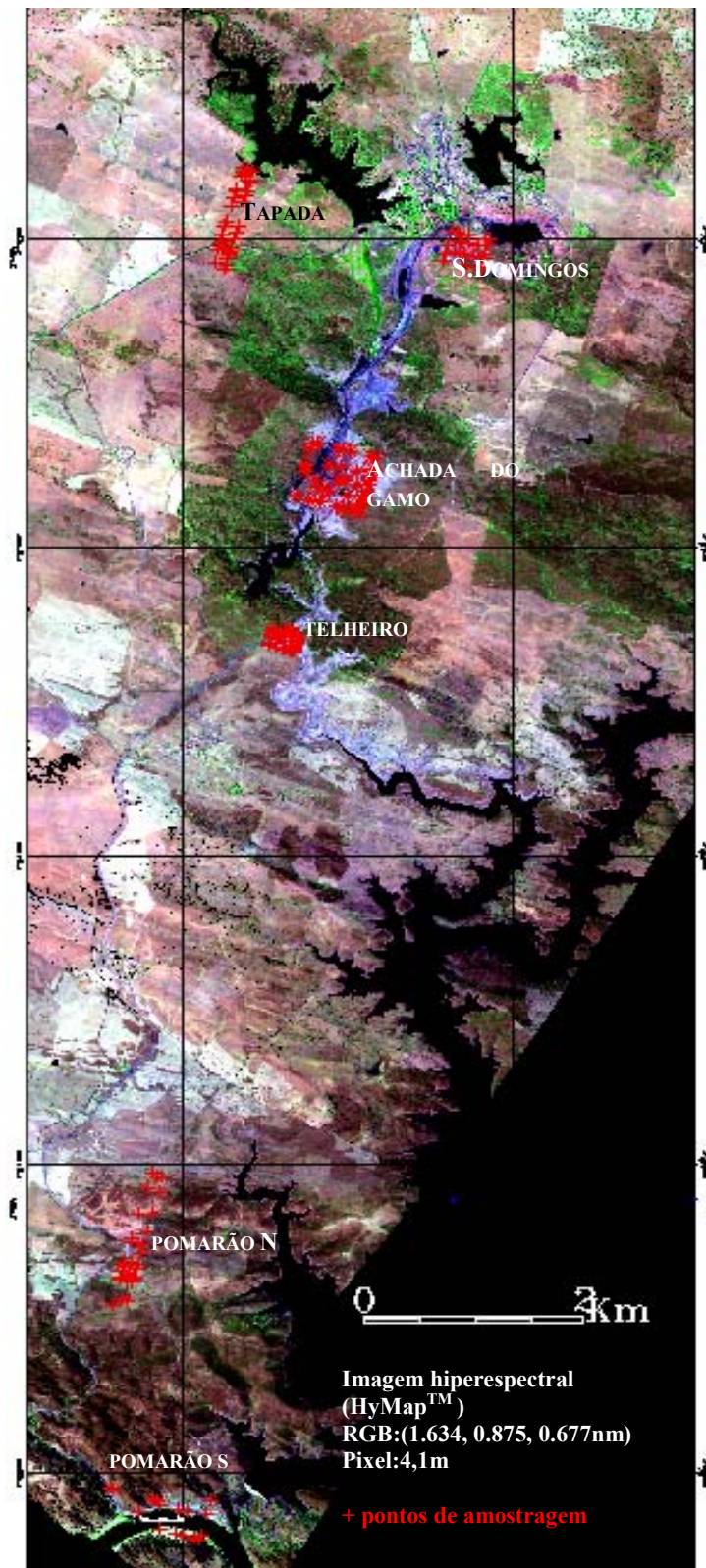
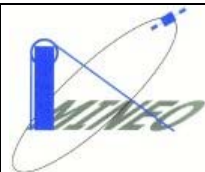
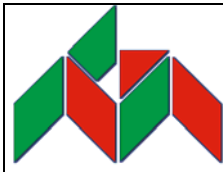


Figura 4. Área de estudo seleccionada.





IST – 1999 – 10337

*Síntese de resultados e perspectivas do Projecto MINEO em Portugal (S.Domingos)*

### 3.2. Avaliação ambiental global /Dados de terreno

Para cumprir os objectivos propostos, i.e., colher dados de origem diversa relevantes para avaliação e definição de poluentes, a área de estudo foi dividida em seis subáreas (Figura 4) para avaliação ambiental, correlação e validação dos dados aéreos. Pretendeu-se definir distintos padrões de contaminação e grau, tendo em conta aspectos inerentes à mineração, à variabilidade litológica e da vegetação. Os pontos de amostragem (Figura 4, total 179 pontos) foram definidos em malhas regulares em função da variabilidade expressa no terreno dos tipos a amostrar (rochas, solos, águas, vegetação, eflorescências salinas e medições espectrais), que se realizaram simultaneamente (Agosto 2000) e/ou posteriormente (Agosto 2001) com a aquisição dos dados aéreos do sensor HyMap<sup>TM</sup>. Obtiveram-se dados laboratoriais (em solos e sedimentos) de geoquímica multielementar, pH, carbono orgânico, Fe livre total e mineralogia da fracção argilosa, assim como medições nas águas de pH, Eh e hidrogeoquímica em outros locais de amostragem.

No tratamento dos dados de solos e sedimentos utilizou-se Análise em Componentes Principais (ACP) para redução do volume de dados e métodos de interpolação geoestatísticos para cartografia geoquímica, com o objectivo de melhorar a identificação e interpretação dos padrões geoquímicos e anomalias significativas relacionadas com problemas ambientais ou teor de fundo litológico. Assim, confirmaram-se as subáreas da corta, **S.Domingos**, e **Achada do Gamo** (fábrica de enxofre), como sendo os principais focos de poluentes onde os valores mais baixos de pH são atingidos, enquanto a subárea do **Telheiro** é contaminada pela acção da drenagem ácida proveniente das duas subáreas anteriores (Figura 4). O Porto do Pomarão, designado como **Pomarão S**, encontra-se localmente contaminado na área de embarque. O **Pomarão N** e **Tapada**, as duas outras subáreas de estudo, foram validadas como áreas de referência i.e. não contaminadas.

Este trabalho, além dos estudos realizados nas águas e outros dados suplementares, permitiu a concepção de um modelo ambiental para esta área mineira, o qual foi fundamental para a abordagem desenvolvida em Processamento de Imagem, quer na fase inicial utilizando dados de campo, i.e. medições espectro-radiométricas, quer na fase final para validação dos resultados obtidos (dados geoquímicos e mineralógicos, além da cartografia de campo de materiais mineiros) na classificação das imagens hiperespectrais.

### 3.3. Objectivos específicos em S.Domingos

Atendendo ao historial da área mineira de S.Domingos, com exploração a longo termo, produção de volumes significativos de escórias e escombrelas dispersos e/ou concentrados numa área vasta, assim como presença de águas ácidas, um dos objectivos fundamentais na utilização das imagens hiperespectrais era a **detecção de evidências superficiais de Drenagem Ácida Mineira (DAM) e poluentes associados. Atendendo às características das imagens hiperespectrais, i.e. alta resolução espectral que permitem a discriminação química e/ou mineralógica dos materiais esperava-se que se pudesse detectar características mais ou menos poluentes de alguns dos materiais.**

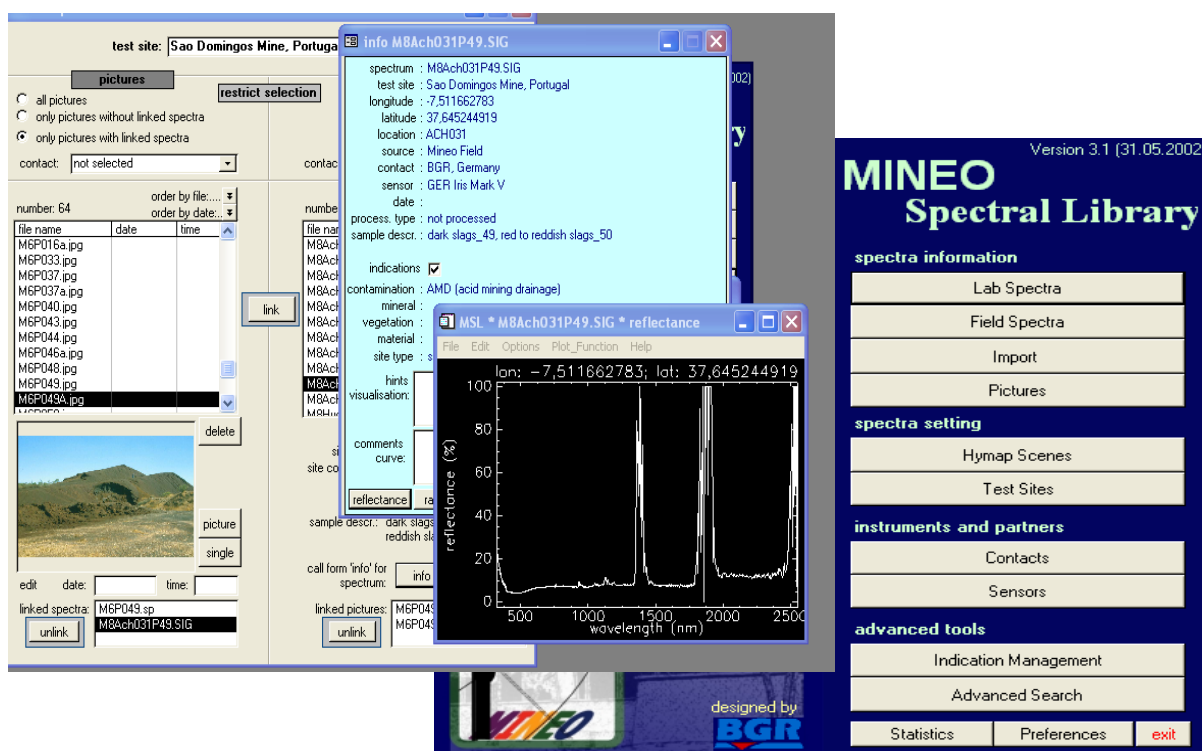
Para tal a metodologia desenvolvida para cartografia dos materiais mineiros seguiu duas perspectivas distintas, uma baseada na tipologia dos materiais mineiros em função do potencial para gerar acidez e outra baseada nos minerais que evidenciam a DAM.

### 3.4. Biblioteca espectral do MINEO

A Biblioteca Espectral do MINEO (*Mineo Spectral Library-MSL*) é um dos produtos resultantes deste projecto e que está classificado pela CE como tendo claramente interesse comercial. Concebida e desenvolvida pelo BGR **constitui uma base de dados espectral à escala europeia para áreas mineiras contaminadas** que foi preenchida com dados espectrais de cada um dos sítios teste. As assinaturas espectrais, curvas de reflectância ou radiância, têm origem em dados aéreos, *HyMap<sup>TM</sup>*, de

campo ou de laboratório ao quais se encontra associada outros tipos de dados como fotografias dos alvos ou a indicação da existência de dados de outra natureza nomeadamente geoquímicos (Figura 5). A MSL tem **funcionalidades que facilitam a gestão, comparação, busca e re-estabelecimento de espectros, de acordo com as características espectrais, traços superficiais, localização e condições climáticas.**

A MSL requer a utilização do *software* ENVI da *Research Systems*, através do qual se visualiza os espectros, **permitindo o seu uso imediato para processamento de imagem.** Em particular, permite visualizar um **espectro indicativo correspondente a um determinado problema ambiental, relacionado com um ambiente específico (Figura 5).**



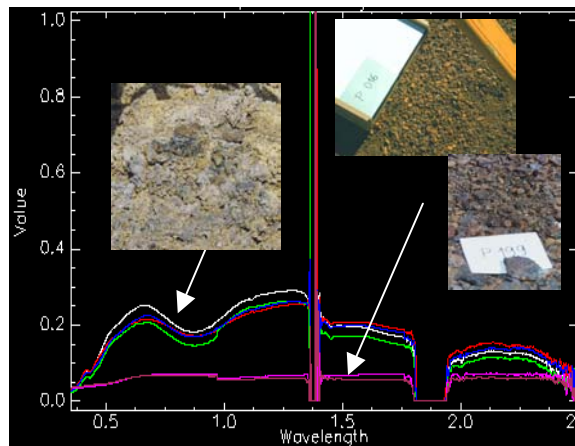
**Figura 5. Menus do software MSL.**

Os dados relativos a Portugal inseridos e classificados na MSL estão sintetizados na Tabela 1, tendo a colheita de espectros sido feita de modo a traduzir as variações inerentes à área mineira de S.Domingos. Atente-se que alguns destes espectros correspondem a áreas não contaminadas incluídas na área de estudo como termo comparativo. Preferencialmente os espectros foram medidos em pontos de amostragem das subáreas onde havia informação adicional, como dados geoquímicos, difracção de Raios X e outros parâmetros de carácter ambiental, de modo a auxiliar na avaliação da contaminação nas assinaturas espectrais. A classificação de espectros **contaminados** baseou-se fundamentalmente na **análise destes dados complementares.**

**Tabela 1. Medições espectro-radiométricas.**

Ano	Espectro-radiómetros Ra-radiância Re-reflectância	Nº de Espectros	Alvos S-solos, V-vegetação, R-rocha, M-materiais mineiros C-calibração	Areas (Figura 4): SD-S.Domingos, TA-Tapada, AG- Achada do Gamo, TE-Telheiro, PN- Pomarão N, PS-Pomarão S, O- outros
2000	GER MARK V (Ra, Re)	60	S, V, R, M, C	SD, TA, AG, O
2000	PIMA II (Re)	300	S, R	SD, TA, AG, TE, PN, PS
2001	ASD FieldSpec (Ra, Re)	200	S, V, R, M	SD, AG, TE, PN, PS, O

As principais categorias de materiais (classificação da área de medição) compreendem depósitos aluviais, detritos mineiros, materiais mistos, afloramentos de rocha, vegetação e superfícies rochosas. Os materiais mineiros têm assinaturas espectrais distintas, variando desde espectros homogêneos, que é o caso das escórias, até materiais com percentagens elevadas de enxofre com maior definição na região do visível (Figura 6).



**Figura 6. Reflectância (nm) de alguns materiais mineiros medidos com espectro-radiómetro GER Mark V.**

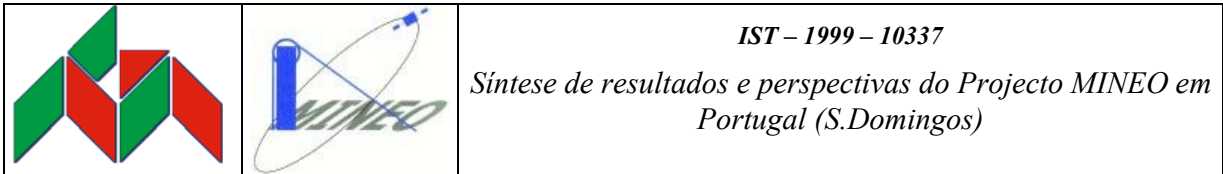
Alguns materiais mineiros mostram alguma dependência de outros parâmetros tais como o teor em água e granulometria, dificultando por vezes a interpretação destes materiais quando processados.

Os espectros que apresentam semelhança mais significativa com os dados hiperespectrais, para avaliação ambiental estão ilustrados na Figura 7.

### 3.5. Processamento de imagens hiperespectrais

O processamento (utilizando *software* ENVI da *Research Systems*) das imagens hiperespectrais do sensor aerotransportado *HyMap*<sup>TM</sup> da *HyVista Corporation* (450-2500nm, 126 bandas) obtidas em Agosto de 2000 permitiu identificar evidências superficiais químicas e mineralógicas da Drenagem Ácida Mineira (DAM) associada à dispersão dos materiais mineiros, seguindo duas abordagens:

- i) uma relacionada com a DAM das assinaturas espectrais de campo dos materiais mineiros e
- ii) outra baseada em assinaturas de minerais geradores de DAM de bibliotecas espectrais estandardizadas (USGS).



Na primeira, a extensão dos materiais mineiros relacionados com a DAM foi obtida utilizando assinaturas espectrais locais como referência e comparando-as com as assinaturas equivalentes na imagem através de um algoritmo denominado *Spectral Angle Mapper* (SAM) inserido no *software* ENVI. O SAM compara a semelhança de espectros, considerando-os como vectores no espaço, através de um ângulo mínimo. A metodologia desenvolvida pode ser sintetizada como a combinação de dois algoritmos de classificação, após uma fase de processamento utilizando apenas informação da imagem. Aos resultados da classificação SAM aplica-se uma classificação supervisionada de distância Mahalanobis para minimizar alguma confusão de classes onde os espectros dos materiais apresentam aglomerados que não são separados pelo algoritmo SAM. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 7 (parciais, uma vez que abrangem a área da Figura 4). Embora esses **materiais contenham em geral um teor significativo de poluentes como o S, Zn, Pb, Sb, Cu, As, Hg and Cd**, as primeiras classes **definem o potencial gerador de acidez destes materiais**, as **quais foram correlacionadas com valores baixos de pH da água** (Secção 3.7.2). Estes resultados permitem a **delineação de áreas mais problemáticas para medidas de segurança e/ou de remediação**.

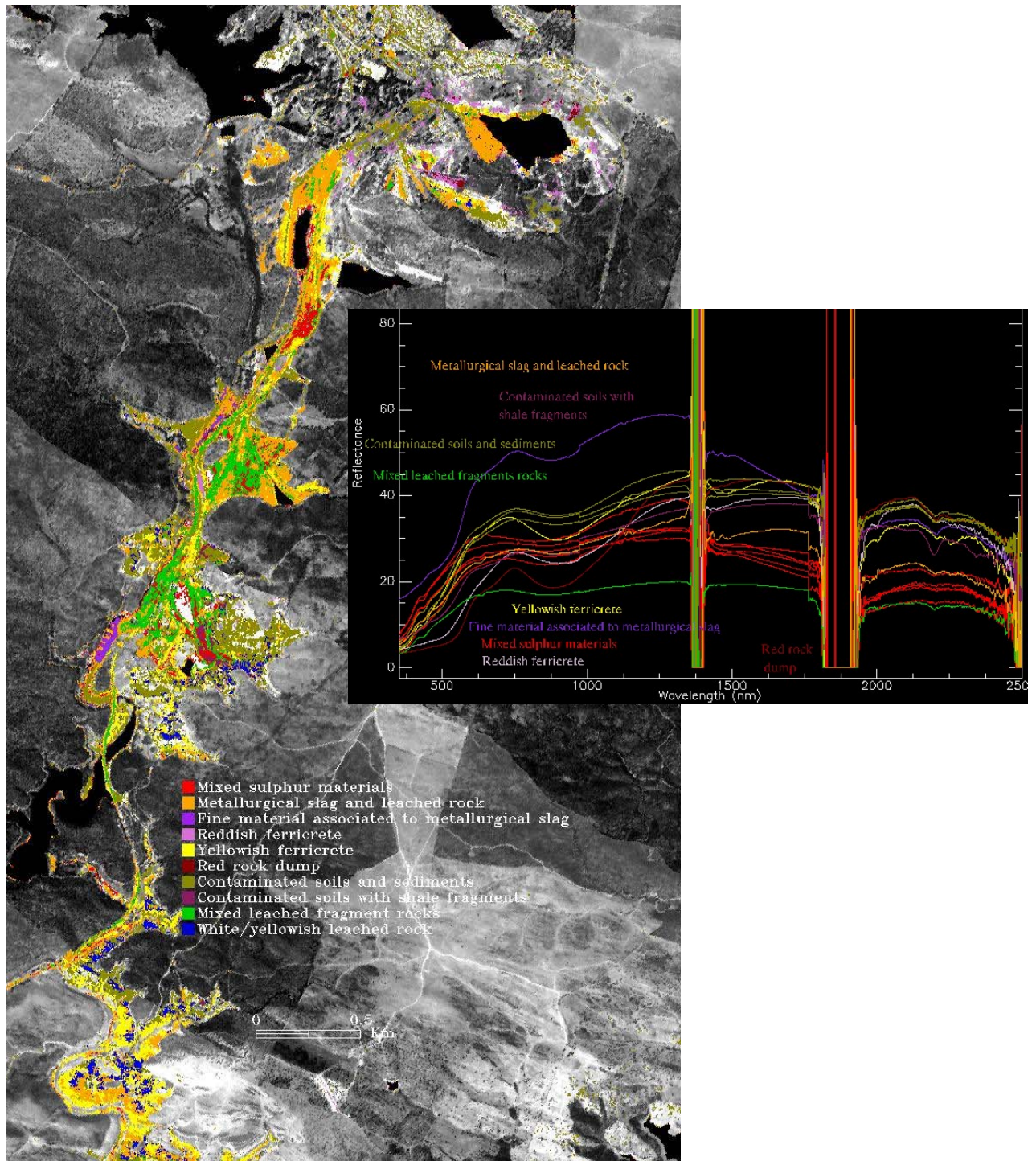
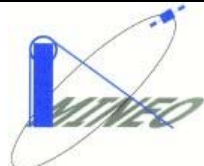
Na segunda abordagem a extensão dos minerais geradores de DAM foi realizada utilizando medições espectrais standardizadas de laboratório (Biblioteca espectral mineral do USGS). Baseado num algoritmo conjunto MTMF (*Mixture Tuned Matched Filtering*, incluído no *software* ENVI) e SAM foi possível delinear a localização de solos contaminados contendo copiapite, jarosite, goethite, hematite e alunite (Figura 8). **Cartografar a jarosite e alunite** permite reconhecer **áreas que ainda são activas na produção de drenagem ácida**.

### 3.6. Metodologia comparativa de processamento hiperespectral/multiespectrais

Os sensores hiperespectrais têm potencialidades muito superiores ao dos sensores convencionais (multiespectrais), em particular relacionadas com a discriminação espectral mas também quando se considera os métodos estatísticos/matemáticos que são utilizados. As imagens hiperespectrais podem identificar minerais baseados em princípios espectroscópicos utilizando bibliotecas espectrais, enquanto que os sensores multiespectrais são usualmente utilizados para discriminar e classificar alvos naturais.

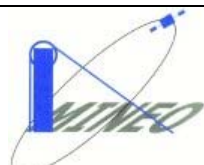
Para efeitos comparativos com a imagem hiperespectral HyMap™ efectuaram-se alguns estudos preliminares numa imagem *Landsat ETM+* contemporânea da anterior (Agosto 2000). Procedeu-se à mesma sequência metodológica que foi utilizada para a cartografia dos materiais mineiros com imagens hiperespectrais, i.e. após uma fase de processamento utilizando apenas informação da imagem, utilizou-se um algoritmo SAM, com os mesmos espectros de campo que foram transformados à mesma escala da imagem *Landsat ETM+* (nº de bandas para o mesmo comprimento de onda), não se chegando a utilizar o algoritmo Mahalanobis devido aos resultados obtidos ilustrados na Figura 9.





**Figura 7. Cartografia (parcial) de contaminação mineira (esquerda) utilizando fundamentalmente o algoritmo SAM tendo como espectros de referência os de campo (direita). Os materiais mais importantes geradores de Drenagem Ácida Mineira, estão primeiramente correlacionados com “materiais mistos de enxofre” (a vermelho).**





IST – 1999 – 10337

Síntese de resultados e perspectivas do Projecto MINEO em Portugal (S.Domingos)

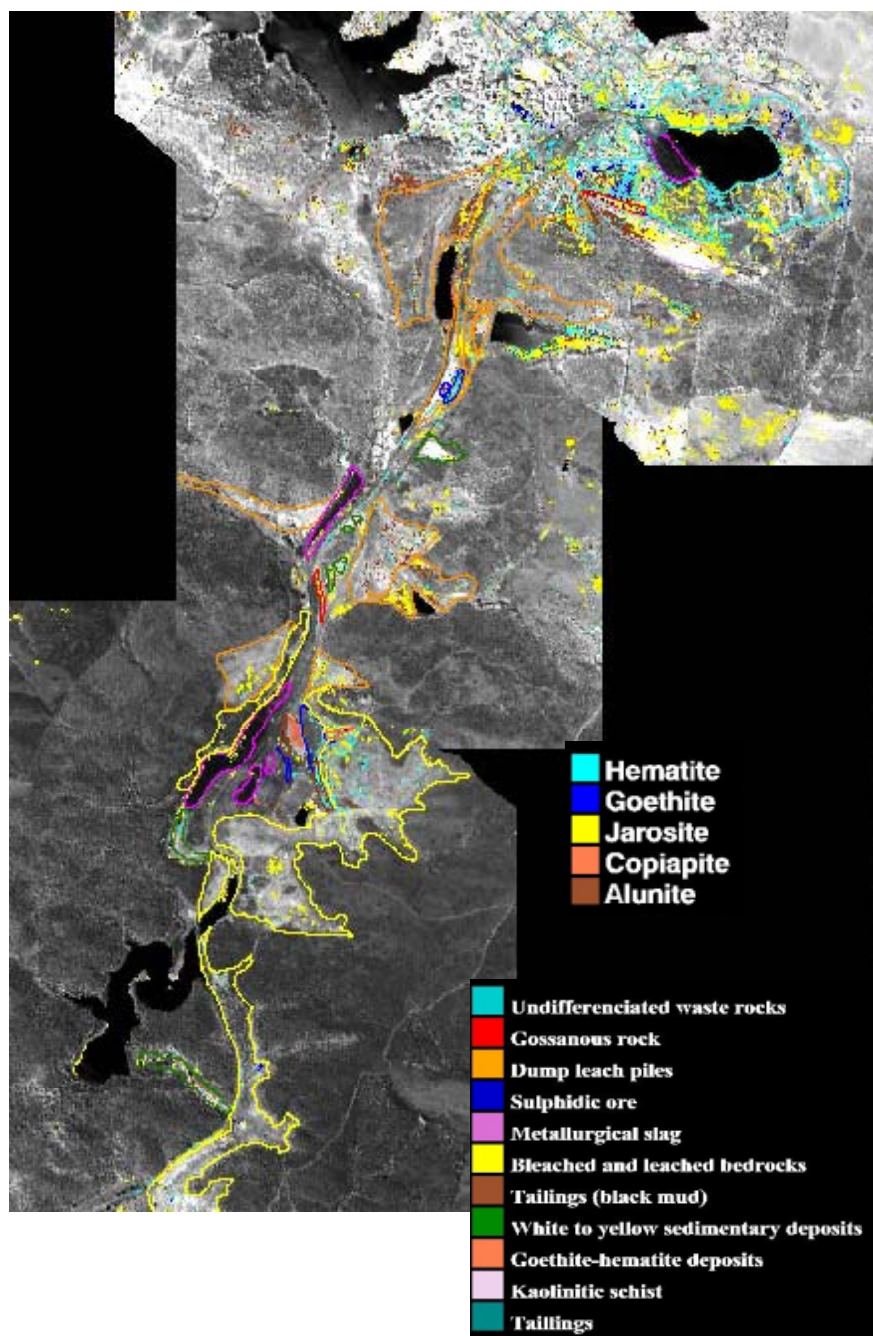


Figura 8. Detecção de minerais geradores de Drenagem Ácida Mineira. Resultados obtidos pela intersecção dos algoritmos SAM e MTMF utilizando bibliotecas standardizadas (USGS). Linhas correspondem a cartografia de campo (legenda inferior).

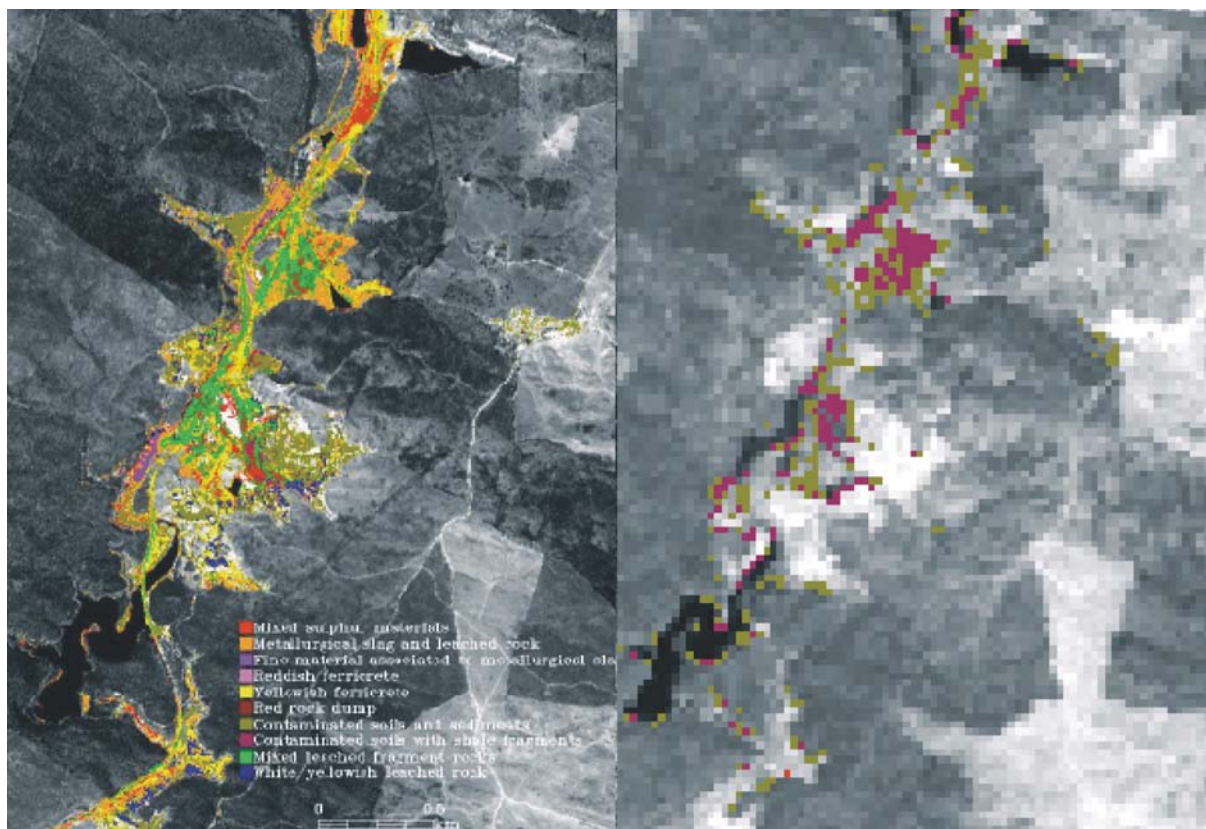
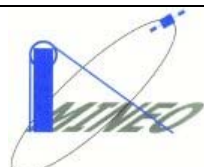
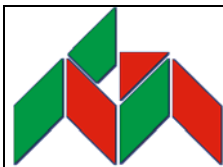
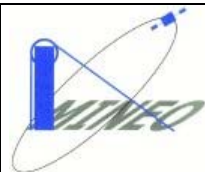
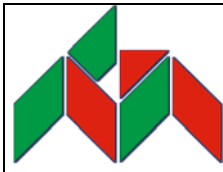


Figura 9. Resultados da classificação de contaminação mineira HyMap<sup>TM</sup> (esquerda) e Landsat ETM+(direita) utilizando a mesma metodologia.

Estes resultados, embora considerados **preliminares**, parecem bastante limitados na imagem *Landsat ETM+*, devido à **baixa resolução espectral e espacial** (não foi ainda separado o efeito específico de cada um destes factores). A variabilidade de materiais expressa na imagem HyMap<sup>TM</sup>, em particular a classe mais correlacionada com a Drenagem Ácida Mineira (DAM), não aparece nesta área. Nestas circunstâncias a imagem *Landsat ETM+* não parece adequada para tais estudos locais relacionados com a DAM, pese embora apenas ter sido testada a mesma metodologia que foi aplicada à imagem HyMap<sup>TM</sup>. Esta metodologia poderá eventualmente ser útil a uma escala regional, por exemplo a nível da Faixa Piritosa Ibérica para estudos ambientais sinópticos.

### 3.7. Modelação em SIG

A modelação em SIG pretendeu definir áreas de poluição pela integração de parâmetros ambientais relevantes, tais como teor geoquímico de solos, pH da água e informação hiperespectral, utilizando metodologias geoestatísticas. Na secção 3.2, a metodologia seguida no tratamento de solos e sedimentos para interpretação dos padrões geoquímicos e anomalias significativas relacionadas com problemas ambientais ou *background* litológico, foi igualmente desenvolvida em ambiente SIG.



### 3.7.1. Modelação utilizando dados geoquímicos de solos e dados hiperespectrais

O objectivo fundamental nesta tarefa (denominada geoestatística) foi definir mapas de poluentes geoquímicos utilizando dados de terreno e dados remotos hiperespectrais de registo contínuo. Este objectivo é alcançado pela estimação das concentrações de elementos químicos. De modo a melhorar a estimação das concentrações químicas de elementos seleccionados utilizando as assinaturas espectrais das imagens hiperespectrais, uma metodologia foi desenvolvida englobando os seguintes passos:

- Tratamento das imagens hiperespectrais com o objectivo de identificar os factores da imagem com alta correlação com a composição química dos solos (análise de dados multivariada – Análise em Componentes Principais (ACP); Fracção de Ruído Mínimo (FRM), Análise Factorial de Correspondências (AFC-que apresentam as mais altas) aplicadas às assinaturas espectrais dos pixels correspondentes à amostragem de solos);
- Estimação das concentrações químicas de elementos nos solos usando os factores de maior correlação entre as imagens e os dados geoquímicos de terreno (método de interpolação-cokrigagem).

Na maioria dos casos, **os mapas cokrigados comparam favoravelmente com os mapas krigados de concentrações químicas dos solos**, mostrando a melhoria introduzida pela **informação hiperespectral**. No entanto, essa melhoria **não foi tão significativa** como seria de esperar, provavelmente relacionadas com a baixa correlação entre a informação hiperespectral e as variáveis químicas. Um exemplo dos dois tipos de mapa está ilustrado na Figura 10 para o elemento cobre, identificando a área mais afectada pela actividade mineira e metalúrgica.

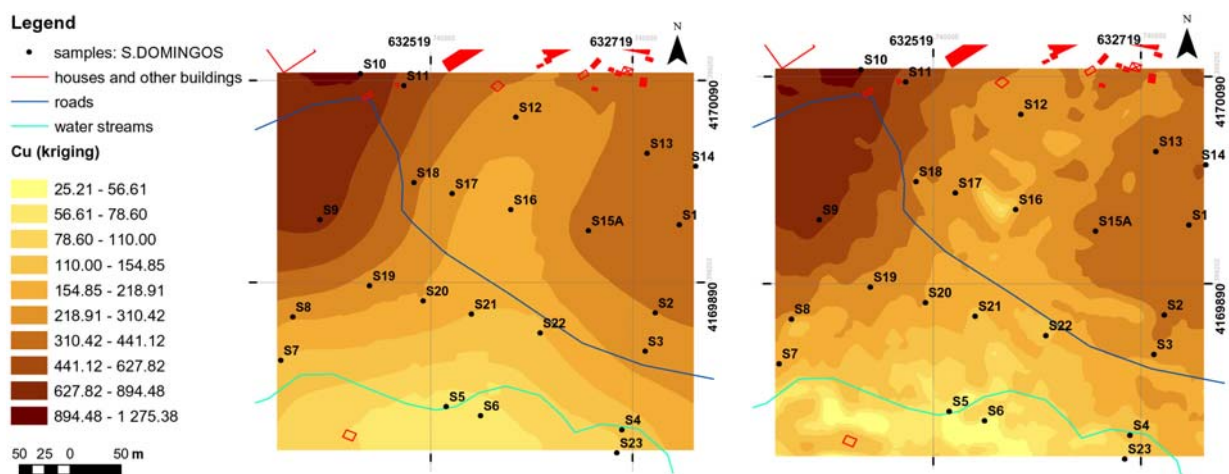
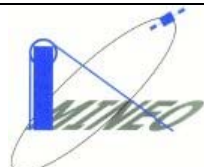
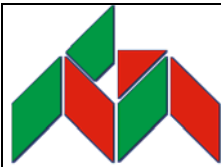


Figura 10. Mapa de predição do Cu na subárea de S. Domingos por krigagem ordinária (esquerda) e por cokrigagem (direita).

### 3.7.2. Modelação utilizando dados geoquímicos de águas e resultados de classificação hiperespectral

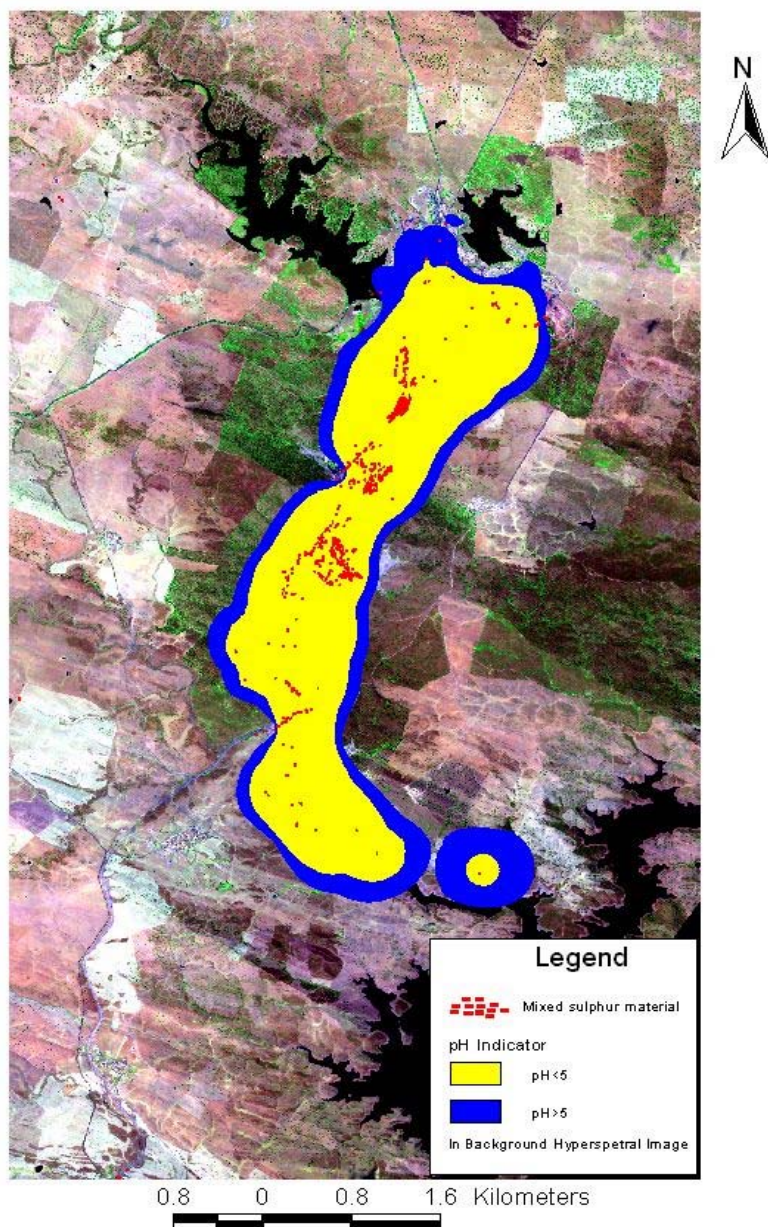
A cartografia superficial das áreas de influência da drenagem ácida foi produzida pela estimação dos valores de pH de forma a integrar a influência da proximidade dos locais de acumulação de materiais mineiros na variação espacial dos valores de pH. O método geoestatístico utilizado foi a *cokrigagem co-localizada* (Figura 11).



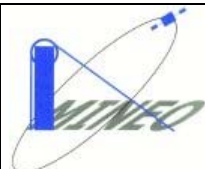
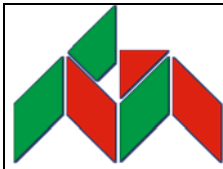


IST – 1999 – 10337

Síntese de resultados e perspectivas do Projecto MINEO em Portugal (S.Domingos)



**Figura 11.** Indicador “cokrigagem co-localizada” do pH da água com a distância mais próxima aos “materiais mistos de enxofre” da classificação hiperespectral de materiais mineiros (correlação mais alta) que permite a predição de áreas de Drenagem Ácida Mineira.



### 3.8. Trabalhos produzidos

#### 3.8.1. Técnico-científicos

##### Relatórios

L.Quental, A.Bourguignon, A.J. Sousa, M.J. Batista, M.G Brito, T.Tavares, M.M. Abreu, M.Vairinho & F. Cottard (2002). MINEO Southern environment test site. Contamination /impact mapping and modelling – Final report for European Commission. 131p.

([http://www.brgm.fr/mineo/SiteReport/IGM\\_FinalReport.pdf](http://www.brgm.fr/mineo/SiteReport/IGM_FinalReport.pdf),

[http://www.igm.pt/departam/metalicos/projectos/mineo\\_finalreport.pdf](http://www.igm.pt/departam/metalicos/projectos/mineo_finalreport.pdf))

L.Quental, G.Brito, A. Bourguignon, M.Vairinho & M.Abreu (2002). Preliminary apparent contamination mapping using hyperspectral remote sensing at Southern Environment European test site, São Domingos Mine 21p. Relatório enviado para a CE.

P.J. Oliveira e Sousa (2001). Relatório das Acções Desenvolvidas no âmbito do projecto MINEO. Relatório Interno IGM.

M. M. Abreu (2001). Resultados Laboratoriais e de Campo. Instituto Superior de Agronomia. Relatório para o IGM.

M.J.Batista (2000). Environmental state in the Portuguese test site:S.Domingos Mine:Past and Present. ([http://www.brgm.fr/mineo/SiteReport/IGM\\_test\\_site.pdf](http://www.brgm.fr/mineo/SiteReport/IGM_test_site.pdf))

##### Tese de mestrado

*Comportamento geoquímico de elementos maiores e elementos traço na área envolvente da Mina de S. Domingos (2003).Teresa Tavares, orientadores: Prof. António Jorge de Sousa (ISA) e Prof. Maria Manuela Abreu (ISA).*

##### Publicações

Chevrel S, Kuosmanen V, Groesel K, Marsh S, Tukiainen T, Schaeffer U, Quental L, Vosen P, Loudjani P, Kuronen E and Aastrup P. (2003). Remote-sensing monitoring of environmental impacts "Mining Environmental Management, Vol.11, Nb 6 November, pp 19-23.

L. Quental, M. G. Brito, A. J. Sousa, M. M. Abreu, M. J. Batista, V. Oliveira M. Vairinho & T. Tavares (2003). Utilização de imagens hiperespectrais na avaliação da contaminação mineira em S. Domingos, Faixa Piritosa, Alentejo. *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, Vol.Especial V, CD-ROM, pp. M33-M36

M. J. Batista, M. G. Brito, M. M. Abreu, A. J. Sousa, L. Quental & M. Vairinho (2003). Avaliação por modelação em SIG da contaminação mineira por drenagem ácida em S. Domingos (Faixa Piritosa, Alentejo). *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, Vol.Especial. V, CD-ROM, pp. M6-M10

Bourguignon, L. Quental, F. Cottard, S. Hosford, S. Chevrel (2003). Hyperspectral Investigations of Mining-Related Contaminated Areas: Acid Mine Drainage Mineral Identification Comparison Between Field and Airborne Data (Sao Domingos Mine, Southeast Portugal), 3rd EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy, DLR, Munich, Germany.

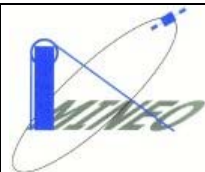
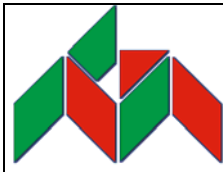
L. Quental, M.G. Brito, A.J. Sousa, M.M. Abreu, M. Vairinho (2003). Contamination Mapping Using Hyperspectral Data (HyMap) at S. Domingos Mine, Iberian Pyrite Belt, Southeast Portugal, 3rd EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy, DLR, Munich, Germany.

L.Quental, A.Bourguignon, F.Cottard, M.G.Brito, M.M.Abreu, A.J.Sousa, M.Vairinho (2003). USE OF AIRBORNE HYPERSPECTRAL IMAGERY FOR CONTAMINATION MAPPING AT SÃO DOMINGOS MINE, IBERIAN PYRITE BELT, SOUTHEAST PORTUGAL.

[http://www.regione.emilia-](http://www.regione.emilia-romagna.it/geologia/convegna/download/4th_congress/abs_poster/13_quental.pdf)

[romagna.it/geologia/convegna/download/4th\\_congress/abs\\_poster/13\\_quental.pdf](http://www.regione.emilia-romagna.it/geologia/convegna/download/4th_congress/abs_poster/13_quental.pdf)





Proceedings of 4<sup>th</sup> European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems, Vol. II pp.698-9

- M. Vairinho, L.Quental, G. Brito, T. Tavares, A. J. Sousa, V. Oliveira, M.M.Abreu (2003). Image characterisation and interpretation of remote sensing Landsat 7 etm data, in Aljustrel - S.Domingos area, Iberian Pyrite Belt, Portugal: classic classifications versus spectrometer image analysis tools. 4<sup>th</sup> European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems. Palazzo dei Congressi, Bolonha, Itália. [http://www.regione.emilia-romagna.it/geologia/convegni/download/4th\\_congress/oral/10A\\_Vairinho.pdf](http://www.regione.emilia-romagna.it/geologia/convegni/download/4th_congress/oral/10A_Vairinho.pdf)
- L. Quental, M.G. Brito, A.J. Sousa, M.M. Abreu, T.Tavares, M. Vairinho (2003). Hyperspectral data to assess mining-related contaminated areas (S.Domingos Mine, Iberian Pyrite Belt, Southeast Portugal).PROCEEDINGS OF THE 2<sup>ND</sup> MINE-WATER INTERDISCIPLINARY NETWORK EUROPE (M-WINE) WORKSHOP. Editors: LMP Martins & DPS de Oliveira. Instituto Geológico e Mineiro, Alfragide (Lisbon), Portugal. CD-Rom.
- Quental L., Abreu M.M., Oliveira V., Sousa P., Batista M.J., Brito G., Vairinho M., Sousa J. e Martins L.(2002). 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 do Congresso Internacional sobre Património Geológico e Mineiro. Museu Geológico e Mineiro de Lisboa, Beja, pp 583-595.
- Abreu, M. M.; Tavares, M.T.; Vairinho, M.; Joaquim, C.;Quental, L. "Geoquímica comparada dos solos da área mineira de São Domingos, Alentejo: fundo geoquímico versus zona de exploração". Congresso Nacional da Ciência do Solo, Portugal Setembro 5-7, 2002 (Aceite para publicação na Revista de Ciências Agrárias)
- Chevrel S., Kuosmannen V., Belocky R., Tapani T., Mollat H., Quental L., Vosen P., Schumacher V., Kuronen E., e Aastrup P. (2002). Hyperspectral Airborne Imagery For Mapping Mining-Related Contaminated Areas In Various European Environments – First Results Of The Mineo Project.Resumo e artigo enviados para publicar nos Proceedings da 5<sup>th</sup> Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition (IARSC).Miami, USA ([http://www.erim-int.com/CONF/5<sup>th</sup>\\_airborne](http://www.erim-int.com/CONF/5th_airborne))
- Bourguignon,A. Quental, Martins, L. Souza, P, Oliveira, V., Baghdadi, N., Abreu, M:M (2002). Hyperspectral investigations of mining-related contaminated areas: comparison between field and airborne data (São Domingos mine, Southeast Portugal). Resumo a publicar nos Proceedings da 5<sup>th</sup> Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition (IARSC).Miami, USA ([http://www.erim-int.com/CONF/5<sup>th</sup>\\_airborne](http://www.erim-int.com/CONF/5th_airborne))

### 3.8.2. *Gestão e financeiros*

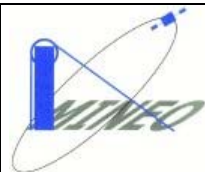
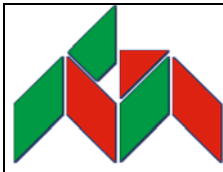
A contribuição relativa a Portugal foi inserida em diversos em relatórios para a CE:

- i) Relatórios trimestrais (13)
- ii) Relatórios periódicos anuais (3)
- iii) Relatórios financeiros (3)
- iv) Relatório final (Secção 6) <http://www.brgm.fr/mineo/RapportFinal/section6.pdf>

### 3.8.3. *Actividades de divulgação*

Além dos trabalhos referidos na Secção 3.8.1-(trabalhos com resumo, resumo alargado e/ou artigo que foram apresentados oralmente e/ou em poster, outras actividades pontuais serviram para disseminação e informação relativa ao projecto:

**Apresentação de resultados do Projecto MINEO aos participantes do 2<sup>ND</sup>MINE-WATER INTERDISCIPLINARY NETWORK EUROPE (M-WINE) WORKSHOP**, em visita de campo a S.Domingos.  
(2 de Julho 2003)



IST – 1999 – 10337

*Síntese de resultados e perspectivas do Projecto MINEO em Portugal (S.Domingos)*

**Divulgação do Projecto MINEO em programa televisivo ambiental “Planeta Azul” sobre a Mina de S.Domingos.** L.Quental  
(2 Março 2003)

**Geostatistical modelling using field data and hyperspectral images.** L.Quental  
2<sup>nd</sup> Mineo Workshop: Hyperspectral imaging and GIS in mining-related impact mapping and monitoring Orléans, France,  
<http://www.brgm.fr/mineo/workshop/2ndWorkshop/11th%20Dec/Session%204/geostatistics.pdf>  
(11 Dezembro 2002)

**Resultados do projecto MINEO no sítio teste de S.Domingos.** Quental, L.  
Apresentação na Mina de S.Domingos em associação com a Câmara de Mértola  
(4 de Maio 2002)

**Resultados preliminares do projecto MINEO.** Quental L.  
**Apresentações técnicas do DPMM no IGM. Auditório Carlos Ribeiro**  
(17 de Dezembro de 2001)

**Results from the Southern European test site São Domingos, Portugal.** L.Quental  
1<sup>o</sup> Workshop do Projecto MINEO: Hyperspectral imaging in mining-related impact mapping and monitoring. GBA, Viena [http://www.brgm.fr/mineo/workshop/DocPDF/IGM\\_Workshop.pdf](http://www.brgm.fr/mineo/workshop/DocPDF/IGM_Workshop.pdf)  
(25 de Outubro de 2001)

**Hyperspectral investigations of mining-related contaminated areas: comparison between field and airborne data (São Domingos Mine, Southeast Portugal).** Bourguignon A., Quental L., Martins L., Sousa P., Oliveira V., Baghdadi N., Abreu MM. Poster no 1<sup>o</sup> Workshop do projecto MINEO: Hyperspectral imaging in mining-related impact mapping and monitoring. GBA, Viena  
(25-26 de Outubro de 2001)

**Apresentação do Projecto MINEO na Mina de S.Domingos.** P.Sousa  
Integrado num programa desenvolvido pelo CYTED (Programa da Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento) e referente à problemática das Minas Abandonadas.  
(27 Setembro 2000)

**Contribuição para “newsletters”:**

<http://www.brgm.fr/mineo/NewsLetters/MINEO%20letter%20one.pdf>

<http://www.brgm.fr/mineo/NewsLetters/MINEO%20letter%20two.pdf>

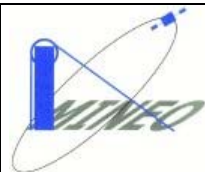
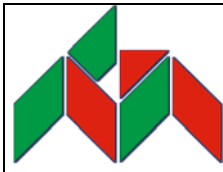
<http://www.brgm.fr/mineo/NewsLetters/MINEO%20letter%20three.pdf>

## **4. PERSPECTIVAS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

### **4.1. Trabalhos a desenvolver- Investigação**

A **utilização de imagens hiperespectrais para detecção de contaminação em ambientes mineiros** constituiu uma **linha de investigação inovadora** e que abre **potencialidades importantes de aplicação futura** de técnicas avançadas de Observação da Terra (OT).

Os **mapas de contaminação obtidos** com o processamento de imagens hiperespectrais levam a considerar esta técnica como **promissora e bastante positiva** para a **avaliação de poluentes** em áreas mineiras, atendendo à variabilidade que foi possível definir no terreno para a área de S.Domingos. Essa variabilidade confirma o **potencial discriminatório dos sensores hiperespectrais** permitindo



conhecer **características físico-químicas e mineralógicas** dos materiais superficiais, tendo sido possível delimitar **áreas de extensão** de materiais mineiros. Estes materiais foram classificados em **função do seu potencial para gerar águas ácidas**, quer em tipologia de materiais mineiros quer em minerais, validados por dados de campo, e permitindo **definir áreas prioritárias para medidas de segurança e/ou remediação que devem ser confirmadas por mais alguns dados de campo pontuais**.

- Várias questões de carácter técnico e científico derivaram do projecto em termos conceptuais e que são importantes para consolidar o trabalho executado, assim como para otimizar a utilização de dados de OT. Uma questão fundamental está relacionada com **dois aspectos** que tornam **dispendiosa e morosa a utilização de dados hiperespectrais para monitorização**:

- i) A aquisição de dados multitemporais aerotransportados em si
- ii) Calibração das imagens/ Correções atmosféricas

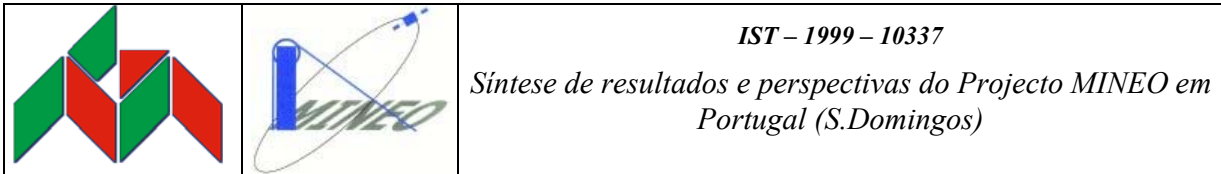
Em i) a aquisição de imagens só terá custos sustentáveis com o lançamento de satélites hiperespectrais (em gama espectral idêntica aos aerotransportados) ou se os satélites já existentes fornecerem informação significativa para avaliação ambiental relacionada com ambientes mineiros. Em ii) várias abordagens podem ser utilizadas baseadas em modelos estatísticos ou modelos físicos para conversão da radiância em reflectância real ou aparente, com base em dados da imagem e/ou dados de terreno ou utilizando dados atmosféricos)

Estes dois aspectos serão investigados no âmbito da proposta de tese de doutoramento da signatária (aceite formalmente em 15/07/03 pelo então Presidente do IGM, Eng<sup>o</sup> Luís Costa), tendo como ponto de partida os resultados obtidos no projecto MINEO e enquadrado nos seguintes pontos:

- A. Optimização da calibração de dados hiperespectrais aerotransportados, comparando diferentes abordagens para correcções.
- B. Optimização do pré-processamento e técnicas de classificação de imagem baseada em análise Geoestatística multivariada.
- C. Comparação entre os algoritmos de contaminação obtidos em imagens hiperespectrais (HyMap<sup>TM</sup>) com outras imagens existentes de satélite.

**Prevê-se** que os resultados a obter com este programa **permitam um contributo importante** para futuro **desenvolvimento de sistemas de monitorização com dados de OT relacionados com áreas mineiras**. Estima-se a conclusão deste projecto de doutoramento em 2005 (a realizar no Instituto Superior Técnico, sob a orientação do Prof. António Jorge de Sousa), se se concretizarem as condições previstas, nomeadamente disponibilidade para a sua execução e aquisição de alguns dados complementares.

- Outra potencial área de investigação das imagens hiperespectrais que não foi explorada no projecto MINEO na área de S.Domingos, por limitações temporais e algumas dificuldades técnicas associadas, está relacionada com a **informação espectral da vegetação**. Alguns algoritmos foram desenvolvidos no projecto MINEO em outros sítios teste e por outros participantes, para detectar o *stress* da vegetação na envolvimento de áreas mineiras. A **aplicação de alguns desses algoritmos** deveria ser **testada na área de S.Domingos**, possivelmente inserida no âmbito de uma tese de doutoramento prevista para a Mestra Teresa Tavares.
- As medições realizadas com espectro-radiómetro PIMA e inseridas na *Mineo Spectral Library* podem ser **correlacionadas** com os **dados mineralógicos de campo** e com **bibliotecas espectrais estandardizadas** para evidenciar as **diferenças mineralógicas** relacionadas com áreas afectadas



pela **Drenagem Ácida Mineira**. Subsequentemente, estes dados específicos de S.Domingos deverão ser utilizados no processamento de imagem.

- Outros **desenvolvimentos** em **ambiente SIG** devem ser realizados, modelando vários *layers* de informação de tratamento de **dados ambientais, geoquímicos e hidrogeoquímicos** (e outros em execução, item 4.2.1, ou a adquirir) com os resultados obtidos (e a obter, inseridos no programa de doutoramento mencionado no primeiro item desta secção) da **classificação hiperespectral**, na sequência dos que já foram realizados (Secção 3.7.1. e 3.7.2).

#### **4.1.1. Relações internacionais decorrentes do projecto**

- Através de contactos com os Doutores Trude King e Barnaby Rockwell do “*United States Geological Survey*” (USGS) foi discutida a possibilidade de o modelo de correcções atmosféricas englobando modelos físicos, utilizado pela referida instituição em imagens hiperespectrais do sensor aerotransportado AVIRIS, fossem aplicadas aos dados portugueses *HyMap*<sup>TM</sup>. A signatária obteve financiamento parcial através da *Fundação Calouste Gulbenkian* para a execução deste trabalho nos Estados Unidos, que englobará também técnicas de aprendizagem de processamento hiperespectral, uma vez que a metodologia desenvolvida pelo USGS compreende algoritmos bastante distintos dos aplicados no projecto MINEO. Actividades relacionadas com o encerramento do mesmo projecto, impediram a realização deste trabalho prevista para Julho de 2003, tendo sido agendado para 2004 devido também a outros compromissos dos elementos do USGS.
- Foi acordado entre o “*British Geological Survey*” e o IGM, em 13/02/03, através dos respectivos presidentes Doutor David Falvey e Eng<sup>o</sup> Luís Costa, a co-orientação na tese de doutoramento da signatária, do Doutor Stuart Marsh, Director da Detecção Remota no BGS e coordenador nacional inglês do projecto MINEO, devendo ser procurado financiamento no VI Programa Quadro de Investigação.


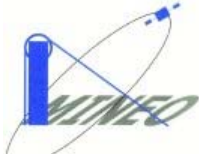
#### **4.1.2. Outros trabalhos**

Após optimização das calibrações/correcções atmosféricas previstas na Secção 4.1.1., e do método de classificação, o processamento de imagens (hiperespectrais e de satélite), poderá ser realizado com objectivos não directamente ambientais:

- i) As **técnicas de processamento de imagem desenvolvidas** poderão ser testadas em imagens de satélite e conseqüentemente adaptadas, conjuntamente com outros *layers* de informação, com o objectivo de **inventariação, prospecção e revelação de recursos minerais**.
- ii) As imagens hiperespectrais adquiridas pelo IGM no âmbito deste projecto (no qual cerca de 35% das imagens correspondeu à área de estudo seleccionada para S.Domingos), **poderão contribuir para a cartografia geológica** da área pela **introdução da componente mineralógica**. O processamento das imagens hiperespectrais **poderá ser realizado para cartografia mineralógica** utilizando **bibliotecas espectrais estandardizadas** (ex:USGS). Outra possibilidade está relacionada com a **utilização directa de bibliotecas de rochas**.

#### **4.2. Uso e disseminação de resultados do projecto MINEO**

Compromissos assumidos com a Comissão Europeia através do Plano Tecnológico de Implementação incluem os seguintes itens relativos a uso e actividades de disseminação nos três anos subsequentes ao término do projecto (Tabela 2), que incluem também actividades de investigação.

		<p style="text-align: right;"><i>IST – 1999 – 10337</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Síntese de resultados e perspectivas do Projecto MINEO em Portugal (S.Domingos)</i></p>
--	--	---

**Tabela 2: Actividades previstas pós-MINEO**

Actividade	Breve descrição da actividade, potenciais participantes e financiamento.	Calendarização
Uso	Uso da Biblioteca espectral MINEO para diferentes projectos envolvendo espectro-radiometria de campo e imagens de satélite Financiamento: IGM/VI Programa Quadro de Investigação /INTERREG III/Outros?	2004+
	Propostas de remediação e medidas de segurança Participantes: IGM, EXMIN? Financiamento: Ministério da Economia	2004+
Uso e disseminação	Musealização de uma área mineira, utilizando os resultados e disseminação através de uma comunidade mais vasta Participantes: DRAOTS/ IGM/ Municípios Financiamento: INTERREG III/IGM	2003-2004
Disseminação	Apresentação dos resultados e ferramentas do MINEO Autoridades locais, DRAOTS, Municípios, EXMIN	2004
Demonstração e Uso	Propostas para a aplicação da metodologia desenvolvida no MINEO a vários sítios teste Portugueses relacionadas com a missão do IGM e EXMIN para o estudo e reabilitação de minas antigas e/ou abandonadas na perspectiva de segurança e prevenção Financiamento: Ministério da Economia	2004 <sup>+</sup>
Investigação e desenvolvimento	Comparação de diferentes métodos para avaliação de contaminação mineira utilizando dados de Observação da Terra. Inclui: estudos espectroscópicos pormenorizados, técnicas de processamento de imagem em dados hiperespectrais e multiespectrais e validação de campo. Participantes: IGM, Technical University of Lisbon (IST/CVRM), British Geological Survey Financiamento: IGM, IST/CVRM, Fundação para a Ciência e Tecnologia	2003-2005
	Testar diferentes métodos de calibrações de dados hiperespectrais e algoritmos de contaminação Participantes: IGM, USGS, BRGM Financiamento: IGM/ USGS/ BRGM/INTERREG III	(2003-2004)

#### 4.2.1. *Interacção com entidades locais*

Contribuição para realização de cartografia de campo de detritos mineiros definindo critérios adicionais para a cartografia através dos resultados obtidos com a classificação das imagens hiperespectrais. **Trabalho a ser coordenado pelo Drº João Matos (IGM) para a Câmara Municipal de Mértola (em execução)**

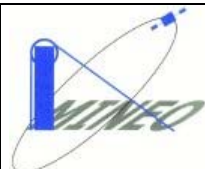
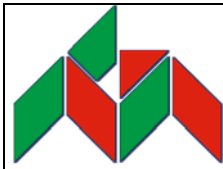
*Poster de alguns resultados do projecto MINEO para exposição a realizar em S.Domingos organizada pela Câmara Municipal de Mértola. Realização prevista: Janeiro 2004*

---

A Técnica Superior Principal  
(Coordenadora Técnico-científica para os trabalhos em Portugal do Projecto MINEO)

Lídia Quental  
Alfragide, 18/12/03





IST – 1999 – 10337

Síntese de resultados e perspectivas do Projecto MINEO em Portugal (S.Domingos)

APÊNDICE 1

Institutions and persons involved in the Southern Environment MINEO test site

**Scientific-technical coordination and management: L.Quental, assessorship by L.Martins**  
**Subcontractors for IGM - IST, FCTUNL and ISA for specific tasks and global consultant.**

Tasks	Institutions	Persons
<i>Compilation of existing data, acquisition of specific data</i>	IGM	V. Oliveira / M.J. Batista P. Sousa / M. Vairinho L.Quental / J.Fernandes J.Marquilhas/ J.Leal
	ISA	M.Abreu T.Tavares C.Joaquim
<i>Environmental hazard review and socio-economics impact</i>	IGM	M.J.Batista / V.Oliveira
	ISA	M.M..Abreu
<i>Hyperspectral airborne survey</i>	GEUS	T.Tukianen
<i>Spectroradiometric survey (and Mineo Spectral Library)</i>	BGR	H.Mollat / F.Boker K.Oppermann
	BRGM	A.Bourguignon
	IGM	L.Quental
<i>Hyperspectral (and multispectral) image processing, contamination mapping</i>	IGM	L.Quental / M.Vairinho
	BRGM	A.Bourguignon F.Cottard (validation field data)
	FCTUNL	G.Brito
<i>Generation of Digital Elevation Models</i>	BGS	P. Turner / S.Marsh
	IGM	P.Sousa / M.Silva
<i>GIS integration</i>	IGM	M.J. Batista / L.Quental
<i>Geostatistical analysis</i>	IGM	M.J. Batista / M.Vairinho
	IST	A.J.Sousa / T.Tavares
<i>GIS modelling</i>	IGM	M.J.Batista
	FCTUNL	G.Brito
	IST	A.J. Sousa
<i>Summarising report</i>	IGM	L.Quental / M.J.Batista / M.Vairinho
	FCTUNL	G.Brito
	ISA	M.Abreu
	IST	J.Sousa / T.Tavares
	BRGM	A.Bourguignon F.Cottard